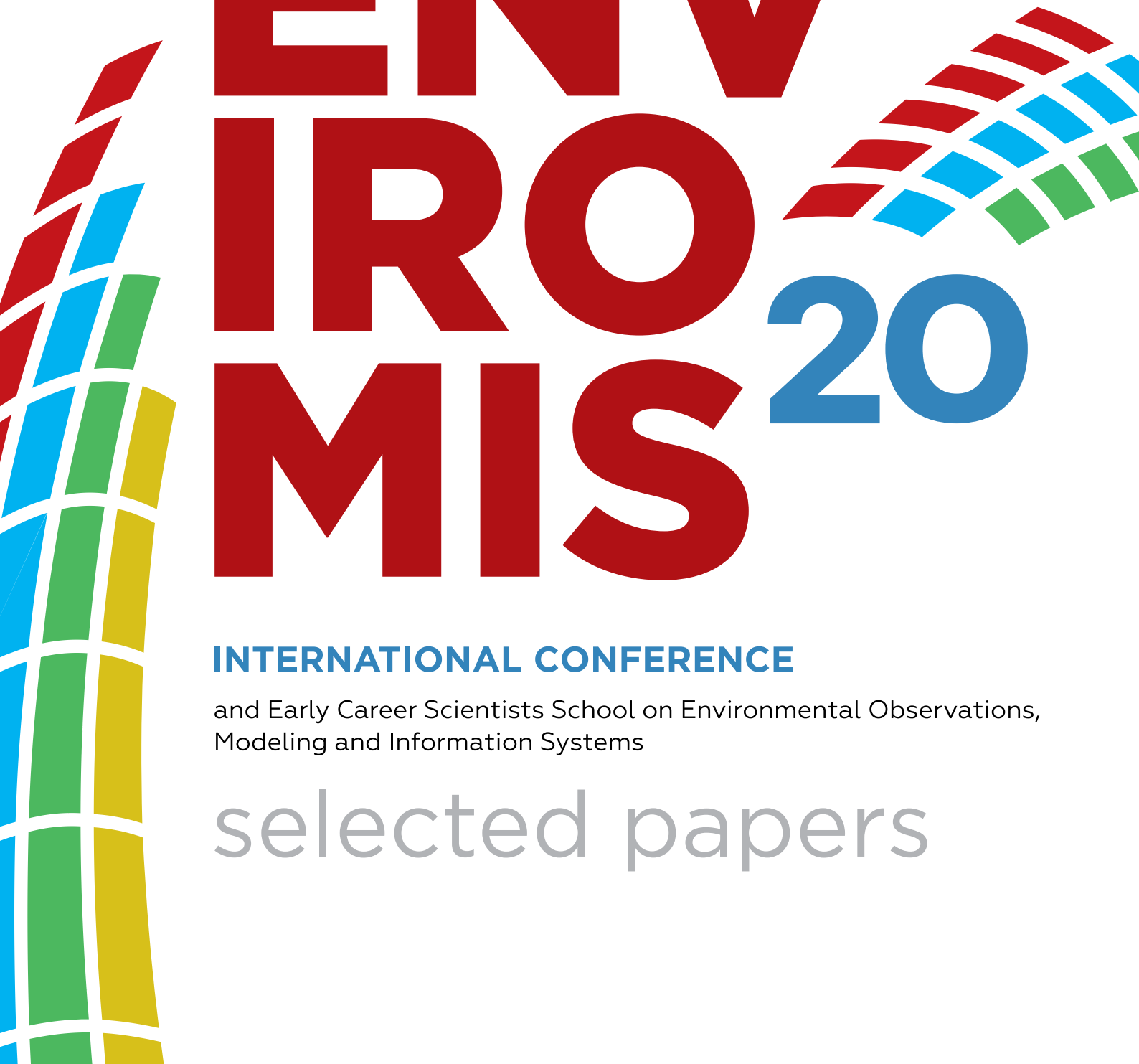


МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

и школа молодых ученых по измерениям, моделированию
и информационным системам для изучения окружающей среды

избранные труды

ENV IRO MIS 20



INTERNATIONAL CONFERENCE

and Early Career Scientists School on Environmental Observations,
Modeling and Information Systems

selected papers



Организаторы Enviromis 2020

Институт мониторинга климатических
и экологических систем СО РАН

Институт вычислительной математики
РАН

Enviromis 2020 organizers

Institute of Monitoring of Climatic
and Ecological Systems SB RAS,

Institute of Numerical Mathematics
RAS

Благодарности за поддержку

Мероприятие проведено
при финансовой поддержке РФФИ,
проект № 20-05-22040

Thanks

The conference
is supported by RFBR,
grant № 20-05-22040

СЕКЦИЯ 1

Мониторинг климатических изменений в Северной Евразии

SESSION 1

Monitoring of Climate Changes over Northern Eurasia

Convective potential of the atmosphere of Western Siberia in a changing climate

¹Gorbatenko V.P., ^{1,2}Pustovalov K.N.,

¹Konstantinova D.A.

¹National Research Tomsk State University, Tomsk,
Russia

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological
Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: vpgor@tpu.ru, const.pv@yandex.ru,

da_konstantinova@mail.ru

Against a background of the global warming hiatus observed in the recent decade, climate change in Russia is generally characterized with the ongoing warming. As for Western Siberia, a trend towards the warming slowdown is observed in winter only [1]. The atmosphere over Western Siberia during the warm season generally becomes warmer and also wetter, due to local sources of moisture. This is accompanied by the intensification of convective processes and by an increase in the frequency of occurrence of extreme weather events [2].

The objective of the present paper is to analyze trends in air temperature and the degree of atmospheric instability in summer in Western Siberia for the territory located within the coordinates of 50°–64° N and 60°–95° E. Air temperature and values of the K_{IND} of atmospheric instability for the summer months at the $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ grid points from 1990 to 2019 were determined from data of the ERA5 reanalysis, which represents the fifth generation of the reanalysis of global atmospheric observations developed by ECMWF [3].

The temperature zonality is broken by a hollow of the north-eastern direction, and heat spots have also appeared. The temperature of which is one or more degrees higher than the average background values for this territory, especially at night. This air temperature distribution over Western Siberia is probably due to the Great Vasyugan swamp. Note that the isotherm of 14 °C almost outlines the swamp from its southern and western sides.

The boundary of active convection estimated by the temperature and humidity characteristics in the layer up to 500 hPa (K_{IND}) is gradually moving northward and by 2019 reached a parallel of 62°N. Comparison of hail characteristics between modern climate change and previous period (1936–1965) showed a tendency to double the number of days with a long hail (30–60 min), as well as hail of large diameter (more than 10 mm). In addition, an increase in the average values of the upper boundary of cumulonimbus clouds and thunderstorm activity is confirmed by more powerful convective processes in general [4].

The greatest changes in the temperature regime of the atmosphere were observed in the Great Vasyugan swamp. The swamp boundaries are clearer distinguished on the maps of temperature isolines in the last decade, which indicates changes of the thermal radiation of the wetland surface. These changes of the heating heterogeneity and heat transfer are reflected in changes of atmospheric instability against the background of an increase in the moisture capacity of the atmosphere.

Acknowledgements: the research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 18-45-700010 r_a).

REFERENCES:

1. *The Second Roshydromet Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation (Roshydromet, Moscow, 2014) [in Russian].*
1. Chernokulsky A.V., Kurgansky M.V., Mokhov I.I. "Analysis of Changes in Tornadogenesis Conditions over Northern Eurasia Based on a Simple Index of Atmospheric Convective Instability". – *Dokl. Akad. Nauk.* – 2017. – №. 6. – P. 477
1. Copernicus Climate Change Service. ERA5 Hourly Data on Single Levels from 1979 to present, <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>.
1. Gorbatenko V.P., Kuzhevskaya I.V., Pustovalov K.N. and oth. Assessment of atmospheric convective potential variability in Western Siberia in changing climate. – *Meteorology and climatology.* – 2020. – №5. – P. 108–117.

Конвективный потенциал атмосферы Западной Сибири в условиях меняющегося климата

¹Горбатенко В.П., ^{1,2}Пустовалов К.Н., ¹Константинова Д.А.

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: vpgor@tpu.ru, const.pv@yandex.ru, da_konstantinova@mail.ru

На фоне наметившегося в последнее 10-летие замедления глобального потепления, изменение климата России в целом (в среднем за год и по территории) характеризуется как продолжающееся потепление. Что касается территории Западной Сибири, то здесь продолжается тенденция потепления атмосферы во все сезоны, кроме зимы [1].

Причинами такого потепления могут быть и макроциркуляционные процессы, и местные факторы. При наличии на подстилающей поверхности исследуемой территории обширных источников влаги в виде болот, закономерно увеличение неустойчивости атмосферы, и, как следствие, увеличение повторяемости опасных конвективных явлений в виде ливневых осадков, гроз, града и даже появления смерчей. В связи с этим актуально выявить наличие изменений в степени конвективной неустойчивости атмосферы Западной Сибири, особенно в последнее десятилетие.

Целью настоящих исследований является анализ тенденций в изменении температуры воздуха и степени неустойчивости атмосферы в летний период на территории расположенной в междуречье Обь-Иртыш, ограниченной 50–64 °с.ш., 60–95 °в.д.

Значения температуры воздуха и индекса конвективной неустойчивости (K_{IND}) за летние месяцы в узлах сетки 0,25°×0,25° с 1990 по 2019 гг. определялось по данным реанализа ERA5, который является пятым поколением реанализа глобальных атмосферных наблюдений, созданным Европейским центром среднесрочных прогнозов (ECMWF). Применение данных ERA5 обусловлена рядом достоинств: непрерывными рядами данных за период более 40 лет (с 1979 г. по настоящее время), высоким пространственным (0,25°×0,25°) и временным (1 час) разрешением [2], а также высокой точностью описания температурного режима. По оценке авторов [3], ERA5, как и предыдущая версия ERA-Interim, средняя ошибка значений температуры воздуха составляет 0,8 °C и СКО 2–2,5 °C. Авторы [4] показали, что временные ряды температуры воздуха в ERA5 однородны для территории Сибири, и, следовательно, могут быть использованы для выявления пространственной неоднородности, обусловленной местными факторами.

Для получения выводов анализировались: средние арифметические значения температуры воздуха на уровне 2 м над подстилающей поверхностью за летние месяцы в сроки 09 ч и 18 ч ВСВ и медианные значения для этих же сроков.

Географическое распределение средних значений температуры за период 1990–1999 гг., построенное по данным реанализа ERA5 можно назвать характерным для периода до 2000 г. Зональность темпе-

ратуры нарушена ложбиной северо-восточного направления, которая прослеживается на всех ранних картах и схемах, представляющих климатические особенности Западной Сибири. Такое распределение температуры воздуха над Западной Сибирью возможно обусловлено наличием Большого Васюганского болота (БВБ). На рисунке 1 приведено положение изотермы 14°C за летние месяцы в срок 18 ВСВ у поверхности земли (на высоте 2 м) за три периода: 1990–1999 гг., 2000–2009 и 2010–2019 гг. Заметим, что изотерма 14°C , практически окольцовывает болото с его южной и западной стороны.

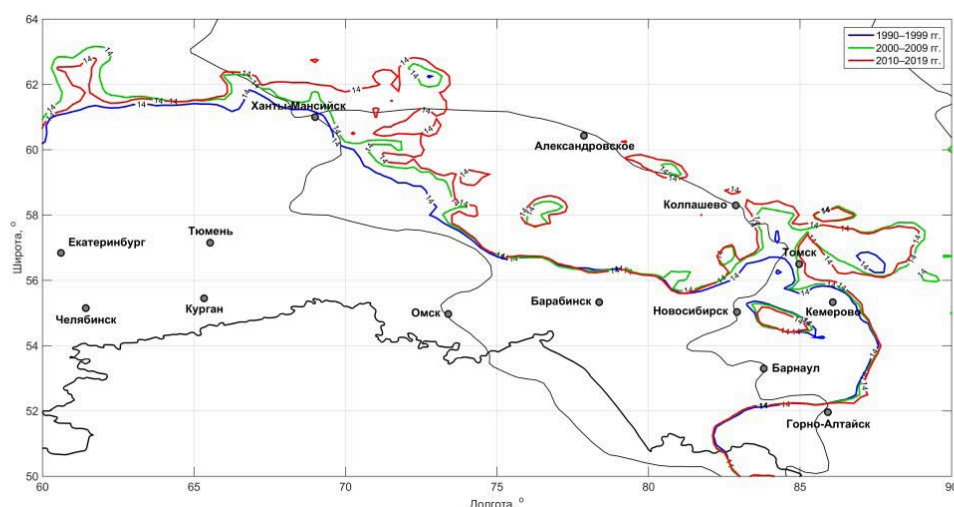


Рис. 1. Положение изотермы 14°C за летние месяцы в срок 18 ВСВ в разные десятилетия.

Однако, в последнее десятилетие пространственное положение изотермы существенно изменилось. В междуречье Обь-Иртыш и над болотным комплексом юго-западнее Ханты-Мансийска, появились очаги тепла, которые на градус и более превышают средние фоновые для этой территории значения температуры. Заметим, что в районе Ханты-Мансийска в 2012 г. был замечен смерч [5], причиной зарождения которого и может явиться наличие температурных неоднородностей подстилающей поверхности в условиях высокого влагосодержания атмосферы. Такие температурные неоднородности, расположенные как внутри территории БВБ, так и по контурам (рис. 1), появились в последнее десятилетие. Одним из объяснений этого процесса является увеличенное содержание метана.

Над болотными системами отмечается выраженный сезонный ход со значительными потоками метана в летний период, учитывая высокую теплоемкость которого, можно ожидать и увеличения значений температуры воздуха. Эти увеличения происходят не равномерно над всей территорией, а отдельными очагами, из-за разнообразия структур болотного комплекса. Этот процесс на региональном уровне вносит вклад в имеющиеся тенденции потепления климата Сибири. На фоне увеличения средних годовых значений температуры воздуха ожидаем рост содержания водяного пара в атмосфере и проявления ее неустойчивости в целом [6].

Карта распределения медианных значений дневных температур (09 ч ВСВ) воздуха над междуречьем Обь-Иртыш в последнее десятилетие также демонстрирует наличие температурных неоднородностей в виде островов с более теплой атмосферой вблизи подстилающей поверхности. Заметим, что географическое расположение таких островов тепла совпадает в исследованиях за разные периоды времени. Однако медианные значения средних летних температур демонстрируют более высокие значения практически по всей площади, охваченной болотными системами междуречья.

Различия в распределении дневных температур могут быть вызваны, в первую очередь, изменившимися условиями прогрева подстилающей поверхности. Различия в прогреве несомненно усилят конвекцию в исследуемом районе.

Столь значительное повышение значений ночных температур воздуха на уровне 2 м от подстилающей поверхности может объясняться несколькими причинами: увеличением конденсации водяного пара с выделением скрытого тепла и увеличением облачности ночью на фоне более сильного прогрева подстилающей поверхности днем.

При сохранении тенденции повышения температуры воздуха в летние месяцы и при наличии источников дополнительного увлажнения атмосферы, ее неустойчивость может существенно увеличиться, вместе с этим увеличится и повторяемость опасных конвективных явлений.

Для выявления зон наибольшей неустойчивости атмосферы был проведен анализ изменения пространственного положения значений индекса неустойчивости атмосферы K_{IND} [7] за летние месяцы периодов 1990–1999 гг., 2000–2009 и 2010–2019 гг. По значениям индекса определяют степень неустойчивости атмосферы и вероятность развития опасных конвективных явлений над территорией. Значения K_{IND} прямо пропорционально отражают степень неустойчивости атмосферы. Если атмосфера устойчи-

ва, то его значения близки к 0, чем более неустойчива, тем больше значение K_{IND} . Пороговыми значениями индекса в случае формирования грозы с вероятностью 70 % и 90 % для большинства аэрологических станций Западной Сибири являются значения $K_{IND} > 30^\circ\text{C}$ и $> 35^\circ\text{C}$ соответственно [8].

Получено, что в последнее десятилетие увеличивается конвективная неустойчивость атмосферы Западной Сибири, оцениваемая по температурно-влажностным характеристикам атмосферы в слое до 500 гПа. Граница активной конвекции постепенно отодвигается на север и к 2019 г. достигла параллели 62°с.ш. Особенно заметное увеличение неустойчивости атмосферы наблюдается в районе, ограниченном диапазоном $75\text{--}85^\circ\text{в.д.}$ и $60\text{--}62^\circ\text{с.ш.}$

Полученные выводы подтверждаются тем фактом, что над анализируемой территорией замечено увеличение грозовой активности. Кроме того, отмечается увеличение средних значений верхней границы кучево-дождевой облачности и, соответственно, конвективно-неустойчивого слоя, что говорит о более мощных конвективных процессах в целом [9]. Увеличивается продолжительность грозового сезона и число дней с грозой в году, представленное на примере метеорологической станции Александровское (рис. 2). Заметим, что до начала периода глобального потепления среднее многолетнее число дней с грозой на севере Томской области составляло 16-19 дней. В южной части, на зарегистрированных наблюдателями на метеорологических станциях достигало 25-28 дней [10]. Даже учитывая тот факт, что повторяемости грозовой активности свойственна квазицикличность разных временных масштабов, продолжительностью от 7 до 30 лет и, возможно, еще большей продолжительности, уровень грозовой активности, наблюдаемый в этих широтах в последние годы, высок. Аналогичные значения грозовой активности можно было наблюдать разве что над территорией Алтая.

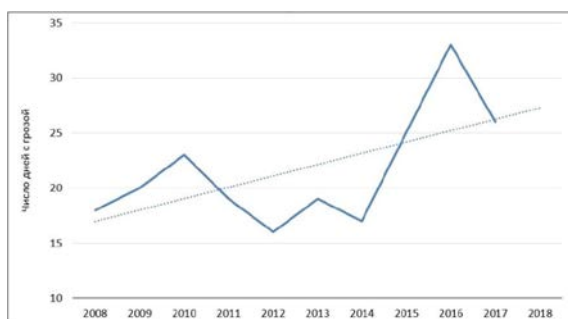


Рис. 2. Изменение числа дней с грозой.

Кроме того, сравнение характеристик града в условиях современного изменения климата (по сравнению с периодом 1936–1965 г.) показало тенденцию двукратного увеличения числа дней с продолжительным градом (30–60 минут), а также с градом большого диаметра (более 10 мм) [11].

Наибольшие изменения температурного режима атмосферы замечены в районах Большого Васюганского болота и болотных систем в районе слияния рек Обь и Иртыш. В последнее десятилетие границы БВБ наиболее отчетливо выделяются на картах изолиний ночных температур, что свидетельствует о наличии изменений в тепловом излучении поверхности, окружающей территорию БВБ. Эти изменения неоднородности прогрева и отдачи тепла нашли отражение в изменении степени неустойчивости атмосферы на фоне увеличения влагоемкости атмосферы.

Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований №18-45-700010 p_a.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет. – 2014 – 1008 с.
2. Copernicus Climate Change Service. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
3. Платонов В.С., Новикова Е.В. Оценка качества воспроизведения современными реанализами экстремальных метеорологических характеристик в регионе Карского моря. – Тезисы конференции к 100-летию со дня рождения М.А. Петросянца «М.А. Петросянец и отечественная метеорология». – М.: Изд-во Тирекс. – С. 48.
4. Гордов Е.П., Богомолов В.Ю., Генина Е.Ю., Шульгина Т.М. Анализ региональных климатических процессов Сибири: подход, данные и некоторые результаты. – Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2011. – т. 9, № 1. – С. 56–66.
5. Курганский М.В., Чернокульский А.В., Мохов И.И. Смерч под Ханты-Мансийском: пока исключение или уже симптом? – Метеорология и гидрология. – 2013. – № 8. – С. 40–50.
6. Веретенникова Е.Э., Дюкарев Е.А. 2019. Эмиссия метана с поверхности верховых болот Западной Сибири. – Тезисы докладов российской конференции «Тринадцатое Сибирское

совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу». – Томск. – Аграф-Пресс. – С.162-163.

7. Горбатенко В.П., Нечепуренко О.Е., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю. Верификация параметров неустойчивости атмосферы, восстановленных по данным спектро радиометра MODIS/terra данными аэрологического зондирования. – *Оптика атмосферы и океана*. – 2016. – т. 29. – № 7. – С. 603-607.
8. Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Севастьянов В.В. Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью. – *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. – 2018. – № 2 (368). – С. 44-59.
9. Нечепуренко О.Е., Константинова Д.А. Долговременная изменчивость числа дней с грозой над территорией Сибири // VIII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству: сборник трудов. г. Нальчик, 23–27 сентября 2019 г. – Санкт-Петербург. – 2019. – С. 98–100.
10. Горбатенко В.П., Ершова Т.В. Молния как звено глобальной электрической цепи. – Томск: издательство ТГПУ, 2011. – 204с.
11. Горбатенко В.П., Кузевская И.В., Пустовалов К.Н. и др. Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях меняющегося климата Западной Сибири – *Метеорология и климатология*. – 2020. – №5. – С. 108–117.

The influence of Arctic sea ice loss on winter cooling in Northern Eurasia

Zuev V.V., Savelieva E.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia
E-mail: vzuev@list.ru, p.vortices@gmail.com

A number of studies (Overland et al., 2011; Cohen et al., 2012; Inoue et al., 2012; Zhang et al., 2012; Tang et al., 2013; Mori et al., 2014; Overland et al., 2015; Koenigk et al., 2016; McCusker et al., 2016; Sun et al., 2016) showed a link between Arctic sea ice loss (or Arctic surface temperature increase) in autumn and surface cooling in the northern mid-latitudes in the subsequent winter. Some studies (Sun et al., 2015; Nakamura et al., 2016; Zhang et al., 2018) examined the role of the stratospheric circulation in the formation of this linkage. Studies (Jaiser et al., 2013; Kim et al., 2014; Screen, 2017) revealed that the increased activity of planetary waves and the subsequent weakening of the stratospheric polar vortex can occur as a result of the autumn retreat in Arctic sea ice. Jaiser et al. (2013) investigated the stratospheric response to Arctic sea ice loss in August–September based on the ERA-Interim reanalysis data from 1979 to 2012. It is shown that during low ice conditions the stratospheric polar vortex is weakened and stratospheric polar temperatures are higher. The link between tropospheric and stratospheric processes is manifested due to an increase in planetary wave activity under low ice conditions. The low ice period is characterized by enhanced upward planetary wave propagation especially between 70°–90° N. Kim et al. (2014) investigated the polar vortex weakening in mid-winter by Arctic sea ice loss in late autumn–early winter based on the calculated eddy heat flux for 45°–75° N at 100 hPa and the climate model experiments using the Community Atmospheric Model Version 5 (CAM5). It is shown that Arctic sea ice retreat in November–December, especially over the Barents–Kara Seas, enhances the upward propagation of planetary waves with wavenumbers of 1 and 2, subsequently weakening the stratospheric polar vortex in January–February. Therefore, planetary wave generation by sea-ice losses and its upward propagation during early winter underline the link between surface climate variability and polar stratospheric variability.

REFERENCES:

1. Cohen J.L. et al., 2012. Arctic warming, increasing snow cover and widespread boreal winter cooling. *Environ. Res. Lett.* 7, 014007.
2. Inoue J., Hori M.E., Takaya K., 2012. The role of Barents Sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a warm-Arctic cold-Siberian anomaly. *J. Climate*. 25, 2561–2568.
3. Jaiser R., Dethloff K., Handorf D., 2013. Stratospheric response to Arctic sea ice retreat and associated planetary wave propagation changes. *Tellus A*. 65, 19375.
4. Kim B.-M. et al., 2014. Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss. *Nat. Commun.* 5, 4646.
5. Koenigk T. et al., 2016. Regional Arctic sea ice variations as predictor for winter climate conditions. *Clim. Dynam.* 46, 317–337.

6. McCusker K.E., Fyfe J.C., Sigmond M., 2016. Twenty-five winters of unexpected Eurasian cooling unlikely due to Arctic sea-ice loss. *Nat. Geosci.* 9, 838–842.
7. Mori M. et al., 2014. Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nat. Geosci.* 7, 869–873.
8. Nakamura T. et al., 2016. The stratospheric pathway for Arctic impacts on midlatitude climate. *Geophys. Res. Lett.* 43, 3494–3501.
9. Overland J.E., Wood K.R., Wang M., 2011. Warm Arctic – cold continents: climate impacts of the newly open Arctic Sea. *Polar Res.* 30, 15787.
10. Overland J. et al., 2015. The melting Arctic and midlatitude weather patterns: are they connected? *J. Climate.* 28, 7917–7932.
11. Screen J.A., 2017. Simulated atmospheric response to regional and pan-Arctic sea ice loss. *J. Climate.* 30, 3945–3962.
12. Sun L., Deser C., Tomas R.A., 2015. Mechanisms of stratospheric and tropospheric circulation response to projected Arctic sea ice loss. *J. Climate.* 28, 7824–7845.
13. Sun L., Perlwitz J., Hoerling M., 2016. What caused the recent “Warm Arctic, Cold Continents” trend pattern in winter temperatures? *Geophys. Res. Lett.* 43, 5345–5352.
14. Tang Q. et al., 2013. Cold winter extremes in northern continents linked to Arctic sea ice loss. *Environ. Res. Lett.* 8, 014036.
15. Zhang X., Lu C., Guan Z., 2012. Weakened cyclones, intensified anticyclones and recent extreme cold winter weather events in Eurasia. *Environ. Res. Lett.* 7, 044044.
16. Zhang P. et al., 2018. A stratospheric pathway linking a colder Siberia to Barents-Kara Sea sea ice loss. *Sci. Adv.* 4, eaat6025.

Влияние уменьшения площади арктического морского льда на зимнее похолодание в Северной Евразии

Зуев В.В., Савельева Е.С.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
E-mail: vzuev@list.ru, p.vortices@gmail.com

В ряде работ была рассмотрена связь между уменьшением площади арктического морского льда осенью и похолоданием в средних широтах Северного полушария последующей зимой [1–10]. При этом в некоторых исследованиях рассматривалась роль стратосферной циркуляции в формировании этой связи [11–13]. В работах [14–16] показано, что при осеннем уменьшении площади арктического морского льда происходит усиление активности планетарных волн и последующее ослабление стратосферного полярного вихря.

Стратосферный полярный вихрь представляет собой масштабный циклон, формирующийся осенью и разрушающийся с конца зимы по весну [17]. Динамика полярного вихря играет важную роль в распределении стратосферного озона, движении воздушных масс у вихря и температурном режиме над полярной областью [18]. Особенностью арктического стратосферного полярного вихря является его значительная межгодовая изменчивость, связанная с высокой частотой появления внезапных стратосферных потеплений (ВСП) [19]. ВСП характеризуются увеличением среднеширотной температуры на высотах от 10 гПа (~30 км) и ниже по направлению от 60° широт к полюсу. При малых ВСП происходит сильное смещение полярного вихря, а при больших – его расщепление, эпизодически завершающееся разрушением вихря [20]. Как правило, большие ВСП, при которых расщепление полярного вихря распространяется в нижнюю стратосферу, происходят с конца января по март. Выявлено всего 3 случая (с 1979 по 2018 гг.), когда при расщеплении полярного вихря в середине зимы в нижней стратосфере не произошло его последующего восстановления как минимум в течение месяца или до конца весны: 1984/1985 гг., 1998/1999 гг. и 2012/2013 гг.

В зимне-весенний период 1984/1985 гг., 29 декабря наблюдалось расщепление полярного вихря, проявившееся на всех стратосферных высотах, после которого при очередной попытке восстановления полярного вихря 20 января произошло его повторное расщепление и последующее разрушение в результате повышенной активности планетарных волн. В зимне-весенний период 1998/1999 гг., в результате повышенной активности планетарных волн расщепление полярного вихря наблюдалось 20 декабря, после которого он восстановился только в конце января. В зимне-весенний период 2012/2013 гг., расщепление полярного вихря, проявившееся на всех стратосферных высотах, наблюдалось с 7 по 10 января, и затем повторное расщепление произошло 20 января, после которого полярный вихрь уже не

восстановился вплоть до конца весны. На рис. 1 приведены поля температуры над Арктикой на высоте 50 гПа в среднем за 10–15 января (т.е. в середине зимы) с 1979 по 2018 гг., полученные по данным реанализа ERA-Interim. Как видно из рис. 1, в период с 10 по 15 января в разные годы полярный вихрь мог быть вытянут, или смещен, или был слабее, чем в соседние годы. При этом выделяется необычное поведение полярного вихря в 1985, 1999 и 2013 гг., когда он либо находился в расщепленном состоянии, либо практически не прослеживался в середине зимы, с 10 по 15 января. Причиной аномально раннего разрушения арктического полярного вихря в исследуемые годы была повышенная активность планетарных волн. На рис. 2 приведены временные изменения потока турбулентного тепла в области 45–75° с.ш. на высотах 50 и 10 гПа (~ 20 и 30 км) с октября по март за 1984/1985, 1998/1999 и 2012/2013 гг. на фоне средних значений за 1979–2018 гг. с интервалами $\pm\sigma$, полученные по данным NASA GSFC. Как видно из рис. 2, аномальное увеличение потока турбулентного тепла в исследуемые годы наблюдалось главным образом в декабре и в первой половине января, а также в феврале 1999 г.

В работах [15, 16, 21] было показано, что уменьшение площади арктического морского льда, в частности в районе Баренцева и Карского моря, приводит к усилению активности планетарных волн и последующему ослаблению арктического стратосферного полярного вихря. Для исследования причин аномального усиления активности планетарных волн с декабря по январь, способствующего разрушению полярного вихря в середине зимы, были проанализированы межгодовые изменения площади морского льда в регионах морей Баренцева, Карского, Восточно-Сибирского, Чукотского, Бофорта, а также Канадского Арктического архипелага и Центрального арктического бассейна в осенне-зимний период.

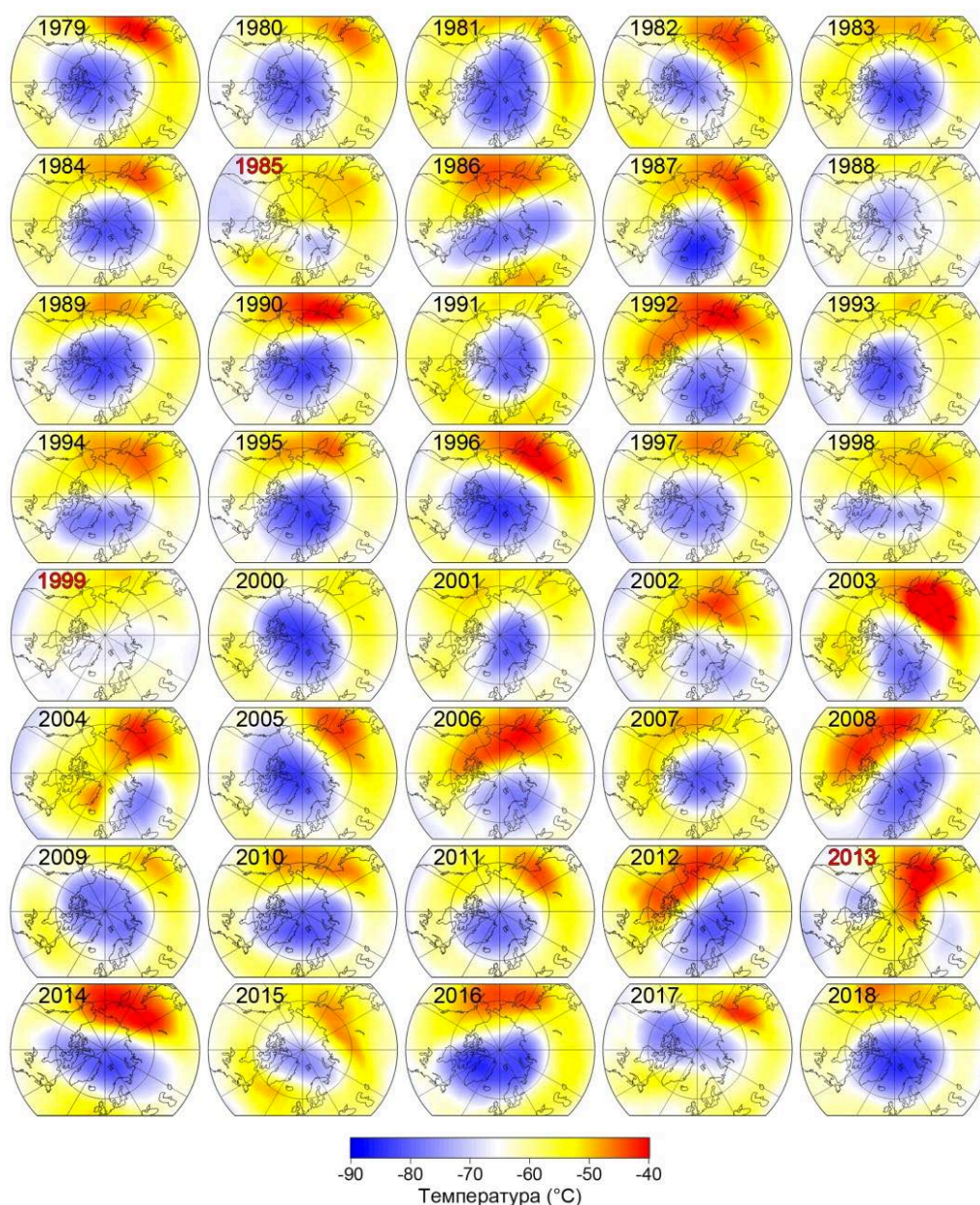


Рис. 1. Поля температуры над Арктикой на высоте 50 гПа в среднем за 10–15 января с 1979 по 2018 гг.

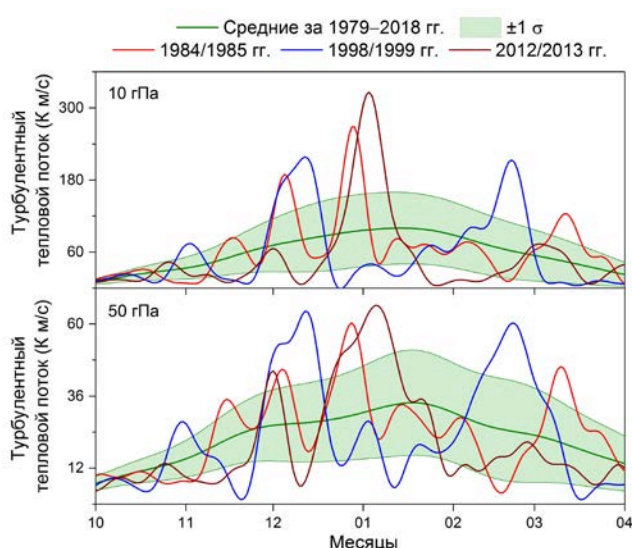


Рис. 2. Внутригодовой ход потока турбулентного тепла в области 45–75° с.ш. на высотах 50 и 10 гПа в период с октября по март за 1984/1985, 1998/1999 и 2012/2013 гг. на фоне средних значений за 1979–2018 гг. с интервалами среднеквадратичных отклонений ($\pm 1 \sigma$).

Существенное понижение площади морского льда в исследуемые годы наблюдалось в море Бофорта, Канадском Арктическом архипелаге и Центральном арктическом бассейне. На рис. 3 приведены межгодовые изменения среднемесячных значений площади морского льда просуммированных над регионами моря Бофорта, Канадского арктического архипелага и Центрального арктического бассейна за сентябрь, октябрь и ноябрь с 1979 по 2018 гг., полученные по данным NSIDC.

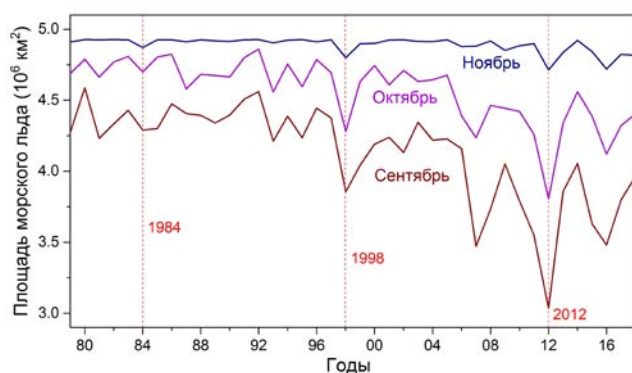


Рис. 3. Межгодовые изменения среднемесячных значений площади морского льда просуммированных над регионами моря Бофорта, Канадского арктического архипелага и Центрального арктического бассейна за сентябрь, октябрь и ноябрь с 1979 по 2018 гг.

Как видно из рис. 3, в 1984, 1998 и 2012 гг. в рассматриваемых регионах наблюдалось аномальное по сравнению с предыдущими годами уменьшение площади морского льда с сентября по ноябрь. Если в 1984 г. значение площади морского льда было рекордно низким только в ноябре (по сравнению с соответствующими величинами с 1979 по 1983 гг.), то в 1998 и 2012 гг. значения площади морского льда были рекордно низкими по сравнению с предшествующими годами в течение всех трех месяцев с сентября по ноябрь. Уменьшение площади морского льда в исследуемых регионах в процентах по отношению к площади морского льда в 1980 г. составило в сентябре 1984, 1998 и 2012 гг. соответственно 6.49, 15.98 и 33.85 % (по отношению к значению за сентябрь 1980 г.) в октябре 1984, 1998 и 2012 гг. соответственно 1.83, 10.64 и 20.53 % (по отношению к значению за октябрь 1980 г.) и в ноябре 1984, 1998 и 2012 гг. соответственно 1.13, 2.57 и 4.32 % (по отношению к значению за ноябрь 1980 г.). Таким образом, аномальное усиление активности планетарных волн, способствовавшее необычно раннему разрушению полярного вихря, происходило, когда уменьшение площади морского льда примерно в 2 раза превышало предшествующий рекорд, зарегистрированный в исследуемые годы. При этом периодичность протекания рассматриваемых явлений составила 14 лет.

Таким образом, в зимне-весенний период 1984/1985, 1998/1999 и 2012/2013 гг. наблюдалось аномально раннее (с конца декабря по начало января) расщепление полярного вихря, после которого он фактически отсутствовал в течение месяца или совсем не восстановился до конца весны. Аномально раннее расщепление арктического полярного вихря в исследуемые годы было вызвано повышенной активностью планетарных волн с декабря по первую половину января. Как было показано в работах [14, 15], уменьшение площади арктического морского льда приводит к повышению приземной температуры и последующему усилению активности планетарных волн Россби. В исследуемые годы наблюдалось рекордное по сравнению с предыдущими годами уменьшение площади морского льда в районе моря Бофорта, Канадского арктического архипелага и Центрального арктического бассейна с сентября по ноябрь [22]. Аномальное усиление активности планетарных волн, способствовавшее необычно раннему разрушению полярного вихря, происходило, когда уменьшение площади морского льда в исследуе-

мых регионах превышало предшествующий рекорд примерно в 2 раза, что наблюдалось с периодичностью в 14 лет. Таким образом, показано, что уменьшение площади арктического морского льда, может приводить не только к ослаблению стратосферного полярного вихря, но и к его аномально раннему разрушению, в частности, зарегистрированному в результате рекордного уменьшения площади арктического морского льда в районе моря Бофорта, Канадского арктического архипелага и Центрального арктического бассейна в осенний период.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Overland J.E., Wood K.R., Wang M. Warm Arctic – cold continents: climate impacts of the newly open Arctic Sea // *Polar Res.* 2011. V. 30. P. 15787.
2. Cohen J.L. et al. Arctic warming, increasing snow cover and widespread boreal winter cooling // *Environ. Res. Lett.* 2012. V. 7. P. 014007.
3. Inoue J., Hori M.E., Takaya K. The role of Barents Sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a warm-Arctic cold-Siberian anomaly // *J. Climate.* 2012. V. 25. P. 2561–2568.
4. Zhang X., Lu C., Guan Z. Weakened cyclones, intensified anticyclones and recent extreme cold winter weather events in Eurasia // *Environ. Res. Lett.* 2012. V. 7. P. 044044.
5. Tang Q. et al. Cold winter extremes in northern continents linked to Arctic sea ice loss // *Environ. Res. Lett.* 2013. V. 8. P. 014036.
6. Mori M. et al. Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades // *Nat. Geosci.* 2014. V. 7. P. 869–873.
7. Overland J. et al. The melting Arctic and midlatitude weather patterns: are they connected? // *J. Climate.* 2015. V. 28. P. 7917–7932.
8. Koenigk T. et al. Regional Arctic sea ice variations as predictor for winter climate conditions // *Clim. Dynam.* 2016. V. 46. P. 317–337.
9. McCusker K.E., Fyfe J.C., Sigmond M. Twenty-five winters of unexpected Eurasian cooling unlikely due to Arctic sea-ice loss // *Nat. Geosci.* 2016. V. 9. P. 838–842.
10. Sun L., Perlwitz J., Hoerling M. What caused the recent “Warm Arctic, Cold Continents” trend pattern in winter temperatures? // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 5345–5352.
11. Sun L., Deser C., Tomas R.A. Mechanisms of stratospheric and tropospheric circulation response to projected Arctic sea ice loss // *J. Climate.* 2015. V. 28. P. 7824–7845.
12. Nakamura T. et al. The stratospheric pathway for Arctic impacts on midlatitude climate // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 3494–3501.
13. Zhang P. et al. A stratospheric pathway linking a colder Siberia to Barents-Kara Sea sea ice loss // *Sci. Adv.* 2018. V. 4. P. eaat6025.
14. Jaiser R., Dethloff K., Handorf D. Stratospheric response to Arctic sea ice retreat and associated planetary wave propagation changes // *Tellus A.* 2013. V. 65. P. 19375.
15. Kim B.-M. et al. Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss // *Nat. Commun.* 2014. V. 5. P. 4646.
16. Screen J.A. Simulated atmospheric response to regional and pan-Arctic sea ice loss // *J. Climate.* 2017. V. 30. P. 3945–3962.
17. Waugh D.W., Randel W.J. Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56. P. 1594–1613.
18. Newman P.A. Chemistry and dynamics of the Antarctic ozone hole, in: Polvani L.M., Sobel A.H., Waugh D.W. *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry* // *Geophys. Monogr. Ser.* 2010. V. 190. P. 157–171.
19. Kuttippurath J., Nikulin G. A comparative study of the major sudden stratospheric warmings in the Arctic winters 2003/2004–2009/2010 // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 8115–8129.
20. Flury T., Hocke K., Haefele A., Kämpfer N., Lehmann R. Ozone depletion, water vapor increase, and PSC generation at midlatitudes by the 2008 major stratospheric warming // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. P. D18302.
21. Hoshi K., Ukita J., Honda M., Iwamoto K., Nakamura T., Yamazaki K., Dethloff K., Jaiser R., Handorf D. Poleward eddy heat flux anomalies associated with recent Arctic sea ice loss // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44. P. 446–454.
22. Zuev V.V., Savlieva E. Arctic polar vortex splitting in early January: The role of the Arctic sea ice loss // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. V. 195. P. 105137.

On climatology of storm cyclones entering European region of Russia

¹Viazilova N.A., ²Viazilov A.E.

¹RIHMI-WDC, Obninsk, Russia

²RPA "Typhoon", Obninsk, Russia

E-mail: nav@meteo.ru, vyazilov@typhoon.obninsk.ru

Knowledge of the geographical distribution of the trajectories of extratropical cyclones, the origin, growth, and finally decay of these systems is of central importance to characterize extratropical climate. Storms are cyclones that are accompanied by high wind speeds. To classify the strength of a storm by surface wind speed the Beaufort scale is often used, according to which the term "storm" refers to all cyclones with a storm wind speed from 17.2 m/s. Cyclones with storm wind speeds from 17.2 to 24.5 m/s correspond to the definition of "moderate storms", and cyclones with storm wind speed of more than 24.5 m/s are referred to as "severe storms".

The aim of this work is to compare the characteristics of storm cyclones entering European region of Russia (ETR) from various genesis regions during winter (October to March) and summer (April to September) for the study period from 1979 to 2018.

The storm tracks were calculated based on automated cyclone detection/tracking algorithm based on the 6-hourly sea-level atmospheric pressure (MSLP) data of reanalysis-2 NCAR/NCEP DOE [1] for the period from 1 January 1979 to 31 December 2018. The method for identifying cyclone centers and an algorithm for calculating cyclone displacement trajectories are presented in the author's paper [2].

The analyzed characteristics of storm cyclones are the number of cyclone tracks, cyclone density and storm wind density. Cyclone density and storm wind density were defined as cyclone center number and storm wind speed observations in region during season. The maximum wind speed was selected from an area close to the center of the cyclone with a radius of 5 degrees and was calculated based on 6-hour data on the components of the wind speed on the surface of 925 hPa. For analysis only cyclone trajectories entering European region of Russia (ETR) with life of 2 days or more were selected. All trajectories of cyclones entering European region of Russia (ETR) are divided into groups according to genesis regions (Fig. 1).

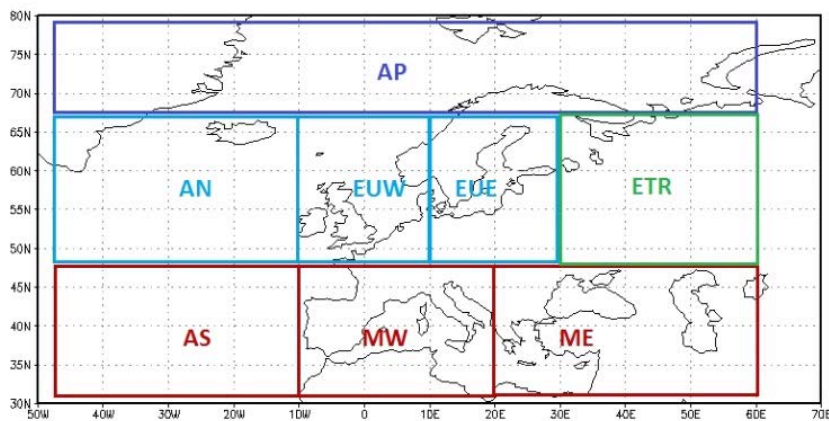


Fig. 1. Genesis regions of cyclones reaching the European territory of Russia.

For each genesis region for the winter half of each calendar year from October to March and the summer half from April to September the number of moderate and severe storms entering European region of Russia (ETR) was calculated, as well as the density of cyclones (the number of cyclone centers) and storm wind speed in each point of the region of study separately for moderate and severe storms, maps of their spatial distribution are built.

According to the results of the study about 65% of all moderate and more 55% of severe storms, that entering European region of Russia during all study period, as in winter (tabl.1), as in summer (tabl.2), started in the Baltic and North Sea regions (areas on the map EUW, EUE). Significant part of severe storms, entering European region of Russia from these genesis regions, is accompanied by extreme sea level pressure. Cyclones generated in the North Sea and Great Britain go out to northwestern regions of the European Russia. The maximum density of these cyclones is located over the Scandinavian Peninsula and the Baltic Sea (Fig.2.a). The region of the severe storm wind, associated with these cyclones, is in central Europe (Fig. 2b), while in some areas of western part of the ETR only 4-5 cases of severe storm wind were noted. Cyclones generated in the Baltic

region (Fig. 2c) provide a high density of observations of storm wind speeds in the central and western areas of the ETR, where the total number of observations of severe storm wind in individual points exceeded 17 cases for all period (Fig. 2d).

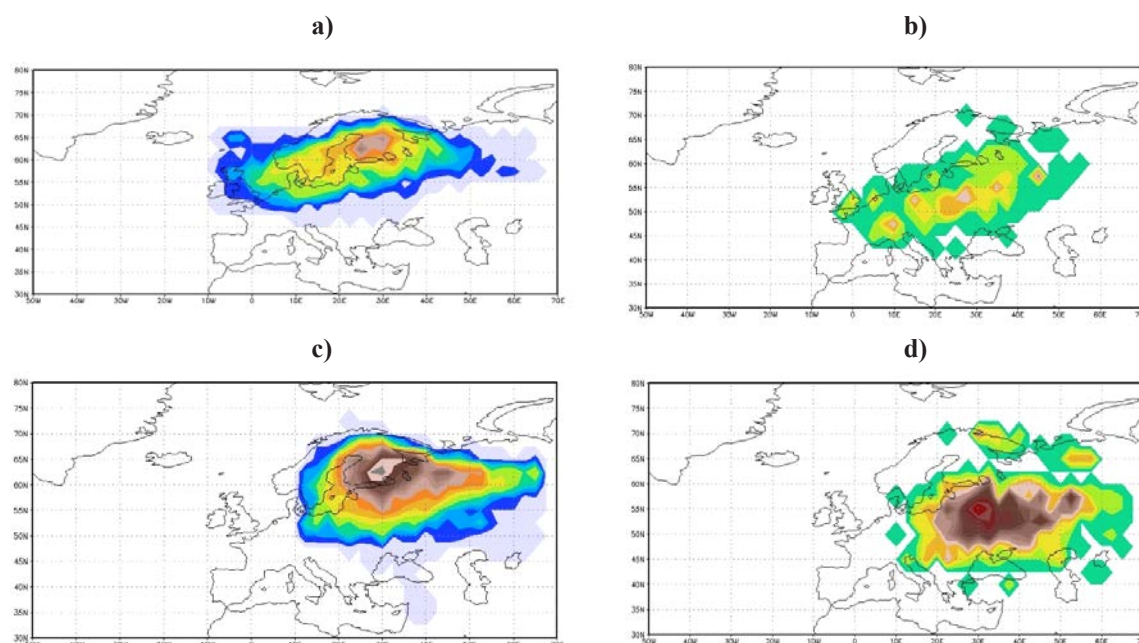


Fig. 2. The integral density of cyclones (a, c) and number observations of storm wind speed more than 24.5 m/s in cyclone areas (b, d) that entering ETR from the EUW genesis region (a, b) and the EUE genesis region (c, d). Winter half of the year. Study period from 1979 to 2018.

Mediterranean cyclones (genesis regions MW and ME) account for about 15% of moderate and about 37% of severe storms. The storm tracks from west Mediterranean enter the south-west region of ER and have strong influence to Black sea region (Fig.3a, 3b.). The storm tracks, were originated in eastern Mediterranean, affects the south-east region of ER, where is observed high density of storm wind, especially during winter seasons (Fig.3c,3d).

The integral number of storms over ER, that were originated in subpolar region of North Atlantic for severe storms is near 1% for season, for moderate storms is near 7% in winter and near 11% in summer season (tabl.1, tabl.2). These storms do not differ in the high cyclone density (Fig. 3e) and severe storm wind density in Russia (Fig.3f) due to the small number of such cyclones.

The number of Atlantic storms from other genesis regions is near 4% for severe storms and 8% for moderate storms. All cyclones, that entering ER from south and east part of North Atlantic, were outstanding by long life, extreme low sea level pressure and storm wind along track.

The comparison the patterns of integral storm wind density and patterns of integral cyclone density for severe storms, entering European region of Russia from selected genesis regions in winter season during all period of study, shows, that the position of storm wind shifted to south from cyclones centers regions. This feature is characteristic for all cyclone genesis groups, both in the winter and summer half of the year.

The number of severe storm tracks entering ER and number of storm wind events in these tracks in summer seasons is more in comparison during winter seasons. In the total number of storm cyclones in the summer months the proportion of storms with a severe wind speed, of more than 24.5 m/s, and extremely low atmospheric pressure increases.

Analysis of the interannual variability of the storm cyclones number shows that with an average number of about 16 trajectories in the summer and winter half of the year, the maximum number of storms entering the ETR was observed in the winter seasons 1982-1983, 1986-87, 1989-90, 1996-97, 2013-14 and 2015-16, and in the summer seasons of 1987, 1990, 1997, 2006 and 2008, during the years distinguished by active cyclogenesis in various regions of the northern and southern branches of the storm track. The minimum number of storm cyclones was noted in the winter seasons of 1983-84, 1993-94 and 2014-15, and the summer seasons of 1982, 1998, 2000, 2010. The minimum number of storm cyclones in the summer half of the year is primarily due to the absence of southern cyclones reaching the ETR.

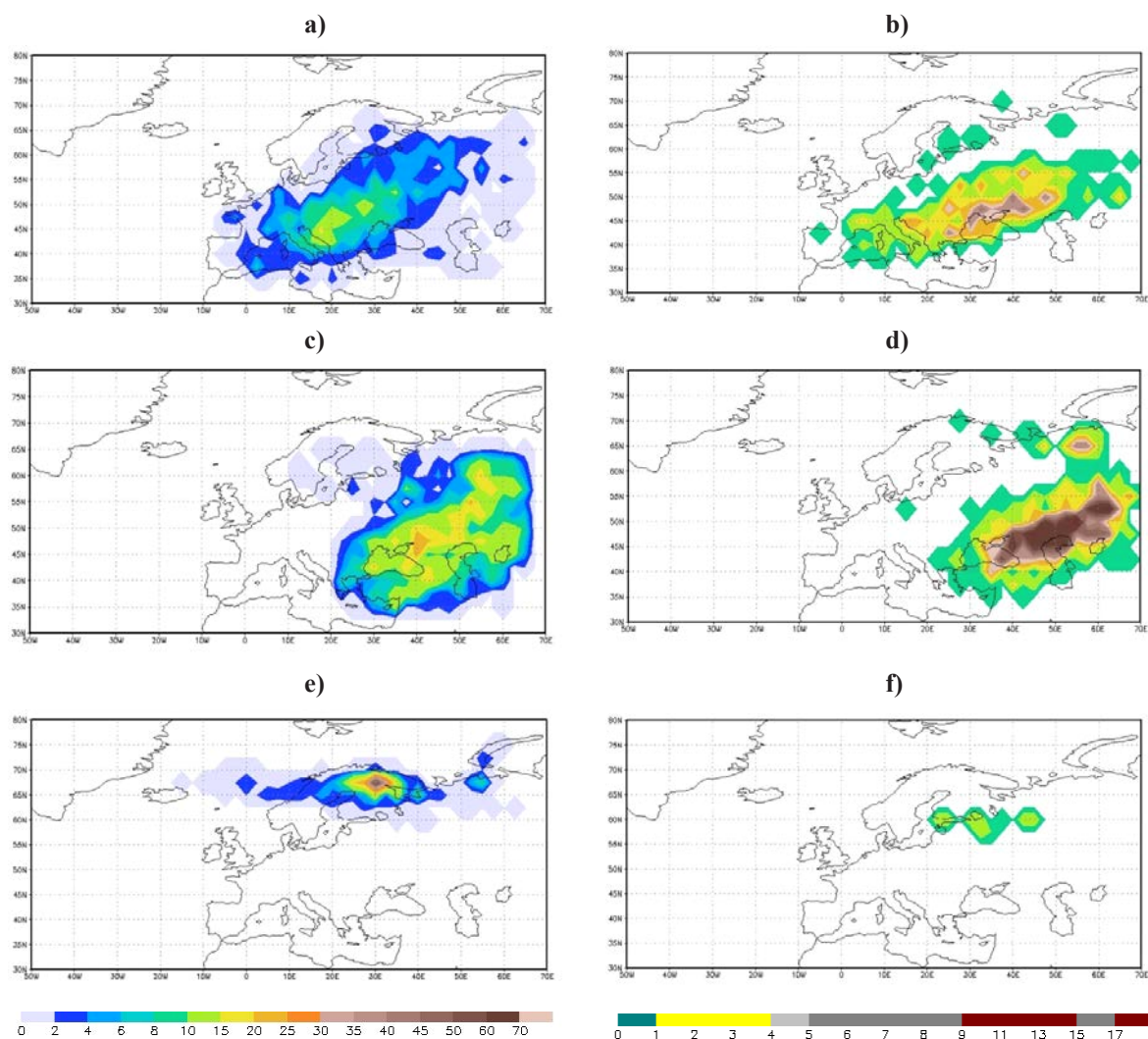


Fig. 3. The integral density of cyclones (a, c, e) and number observations of storm wind speed more than 24.5 m/s in cyclone areas (b, d, f) that entering ETR from the genesis regions: MW (a, b), ME (c, d) and AP (e, f). Winter half of the year. Study period from 1979 to 2018.

Table 1. The number of trajectories of cyclones, entering European region of Russia from genesis regions during the winter half of the year (October-March) for the study period from 1979 to 2018. Designations in the table: a) total number of cyclones; b) the number of cyclones with atmospheric pressure in the center from 970 hPa or less; c) the total number of storm cyclones with a wind speed of 17.2 m/s or more; d) the number of moderate storms with a wind speed of 17.2 to 24 m/s; e) the number of severe storms with a wind speed of 24 m/s or more.

Genesis regions	October-March				
	a	b	c	d	e
AP [65°с.ш.- 80°с.ш., 50°з.д.- 60°в.д.]	33	17	14	13 (5.8%)	1 (0.4%)
AN [50°с.ш.-65°с.ш., 50°з.д.-10°з.д.]	21	20	18	15 (6.7%)	3 (1.2%)
EUW [50°с.ш.-65°с.ш., 10°з.д.-10°в.д.]	99	85	75	52 (23.2%)	23 (9.4%)
EUE [50°с.ш.-65°с.ш., 10°в.д.- 30°в.д.]	260	198	220	108 (42.2%)	112 (45.7%)
AS [30°с.ш.-50°с.ш., 50°з.д.- 10°з.д.]	13	9	11	5 (2.2%)	6 (2.5%)
MW[30°с.ш.-50°с.ш., 10°з.д.- 20°в.д.]	62	27	47	13 (5.8%)	34 (13.9%)
ME [30°с.ш.-50°с.ш., 20°в.д.- 60°в.д.]	128	48	84	18 (8.0%)	66 (26.9%)
TOTAL:	616	404	469	224 (100%)	245 (100%)

Table 2. The number of trajectories of cyclones entering European region of Russia from genesis regions in the summer half of the year (April–September) for the study period from 1979 to 2018. Designations as in table 1.

Genesis regions	April–September				
	a	b	c	d	e
AP [65°с.ш.- 80°с.ш., 50°з.д.- 60°в.д.]	34	16	24	18 (10.7%)	6 (1.6%)
AN [50°с.ш.-65°с.ш., 50°з.д.-10°з.д.]	11	9	7	5 (3.0%)	2 (0.5%)
EUW [50°с.ш.-65°с.ш., 10°з.д.-10°в.д.]	94	85	78	38 (22.7%)	40 (11.0%)
EUE [50°с.ш.-65°с.ш., 10°в.д.- 30°в.д.]	273	230	252	73 (43.5%)	179 (49.2%)
AS [30°с.ш.-50°с.ш., 50°з.д.- 10°з.д.]	23	19	18	7 (4.2%)	11 (3.0%)
MW [30°с.ш.-50°с.ш., 10°з.д.- 20°в.д.]	104	60	87	18 (10.7%)	69 (19.0%)
ME [30°с.ш.-50°с.ш., 20°в.д.- 60°в.д.]	117	43	66	9 (5.4%)	57 (15.7%)
TOTAL:	656	462	532	168 (100%)	364 (100%)

REFERENCES:

1. Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). – *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2002, vol. 83, pp. 1631–1643.
2. Viazilova N.A. Cyclonic activity and fluctuations in circulation in the North Atlantic. – *Russian J. "Meteorology and Hydrology"*, 2012, N 7, pp. 5–14.

The structure of the climatic classes of Eurasia during periods of different thermal regimes in the North Atlantic

Volkov Yu.V., Cheredko N.N., Tartakovsky V.A.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: yvvolkov@mail.ru, atnik3@rambler.ru, trtk@list.ru

The identification of the universal complex properties of an evolving system contributes to the development of climate theory. The search for informative criteria and objective methods of spatio-temporal structuring of climate elements is important and relevant. In our works, we develop the idea of universality of the principle of coherence of climatic processes. We use the average temperature as an integral indicator of the influence of the whole complex of climate-regulating factors.

It is logical to assume that the observed changes in the global climate should contribute to the transformation of the spatial structure of the fields of climate parameters. Therefore, climate classifications need to be reviewed in a timely manner. At the same time, it is advisable to take into account large-scale trends in external climatic factors.

We proposed a method of objective climate classification. It is based on a phase grouping of temperature fluctuations [1]. In this paper, we implement this method for two periods. These periods correspond to two regimes of sustained anomalies of ocean surface temperature in the North Atlantic: the period 1962–1994 sustained negative anomalies, the period 1995–2016 – sustained positive anomalies. Inter-decadal changes in ocean surface temperature in the North Atlantic are described by the AMO index, the Atlantic multi-decadal oscillation [2–3].

In each period, groups of stations with similar patterns of phase change were distinguished. The level of tightness of communication was determined by the correlation coefficient. In different regimes of the North Atlantic, the structure of climatic clusters varies. The coherence of surface temperature fluctuations has increased, and the majority of the distinguished classes of stations have become larger. This happened due to the transition to the more southern classes of stations located to the north. This pattern is typical for the entire considered territory below 60°N. Including, more than half of the stations located in the mountains of medium heights have become more consistent in terms of interannual temperature fluctuations with stations of classes of more southern territories.

The Ural Mountains lost their role as a natural climatic border. In addition, most stations in Western Europe formed one large class. It is known that during the warmer Atlantic, western transport is intensifying. This

means that its influence extends to a large territory. In addition, the paths of cyclone movement are shifted to the north, the intensity of atmospheric vortices changes [3]. These processes manifested themselves in the structure of synchronization of temperature fluctuations. Also, in the transformation of the structure of classes, we can trace the well-known relationship between the Atlantic multi-decadal wobble, mid-latitude westerly winds and the Asian monsoon [4].

The work was carried out in the framework of the state budget theme № НИОКТР
AAAA-A17-117013050030-1.

REFERENCES:

1. Cheredko N.N., Tartakovsky V.A., Krutikov V.A., Volkov Y.V. *Climate classification in the northern hemisphere using phases of temperature signals // Atmospheric and Oceanic Optics. 2017. T. 30. № 1. C. 63-69.*
2. Schlesinger M.E., Ramankutty N. *An oscillation in the global climate system of period 65–70 years // Nature. 1994. V. 367. P. 723-726. 10.1038/367723a0.*
3. Polonskij A.B. *Atlanticheskaya mul'tidekadnaya oscillyaciya i ee proyavleniya v Atlantiko-Evropejskom regione // Marine Hydrophysical Journal. 2008. № 4. P. 69-79.*
4. Lu R., Dong B., Ding H. *Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the Asian summer monsoon // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. Iss. 24. Article L24701.*

Структура климатических классов Евразии в периоды разных термических режимов в Северной Атлантике

Волков Ю.В., Чередыко Н.Н., Тартаковский В.А.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
E-mail: yvvolkov@mail.ru, atnik3@rambler.ru, trtk@list.ru

Выявление универсальных комплексных свойств эволюционирующей системы, поиск информативных критериев и объективных методов пространственно-временной структуризации элементов климата способствуют развитию теории климата. Развиваемая нами идея об универсальности принципа согласованности природно-климатических процессов позволяет расширять возможности исследований изменения климата как реакцию на воздействия различных внешних факторов с учетом региональных особенностей. Значения средней температуры можно считать непрерывным интегральным индикатором влияния всего комплекса климаторегулирующих факторов. Следует ожидать, что в трансформации структуры поля температуры изменения климата отражаются наиболее информативно.

Обобщенно состояние климатической системы, ее структуру, представляют климатические классификации. Закономерно полагать, что наблюдаемые изменения глобального климата должны способствовать трансформации пространственной структуры полей параметров климата. Что влечет за собой целесообразность регулярного пересмотра классических климатических классификаций в тот или иной период времени. В ряде работ такие оценки уже проводились, главным образом, для классификации В.П. Кеппена, как наиболее используемой в мире [1-2]. Показано, что ее структура меняется в зависимости от периода. Нами, также, ранее показано в [3], что в период ускоренного роста глобальной температуры происходит перестройка структуры климатической системы, изменяются закономерности синхронизации температурных колебаний. На большей части территории Евразии было выявлено увеличение согласованности температурных колебаний. При этом эффект потепления выразился в том, например, что многие станции, расположенные в высоких широтах, влились в более южные классы. Также, была подтверждена более высокая чувствительность высокоширотных регионов к изменениям глобальной температуры, что известно в литературе как арктическое усиление потепления [4-5].

В наших предыдущих работах [3, 6] и в данном исследовании как фактор общей изменчивости температурных рядов используется фаза температурных колебаний, а алгоритм классификации построен на взаимном сравнении всех оценок фазы из общей выборки и выделении классов со сходными закономерностями поведения этих оценок. Действительно, природно-климатические процессы представляют собой колебания физических величин во времени, что может быть описано в терминах амплитуды и фазы. Как мера синхронности, сфазированности, используется коэффициент корреляции оценок фазы на разных станциях. Данный способ классификации соответствует принципам любого районирования:

различия внутри класса меньше, чем между классами и каждый класс географически четко локализован, причем пространственное расположение классов соответствует известным классическим представлениям о типах климата, что подтверждает физическую обоснованность метода.

Помимо антропогенного фактора, признанного широкой научной общественностью как основной в изменчивости современного климата, существенная климаторегулирующая роль принадлежит естественным факторам. В любом случае, основным механизмом изменения структуры климатической системы является трансформация преобладающих режимов общей циркуляции атмосферы.

Развиваемый нами метод объективной климатической классификации на основе фазовой группировки температурных колебаний [6] был реализован для территории Евразии по данным измерений 625 метеостанций [7] для двух периодов: устойчивых положительных (1995-2016 гг.) и устойчивых отрицательных (1962-1994 гг.) аномалий температуры поверхности океана в Северной Атлантике, климаторегулирующее влияние которой на глобальный, а также региональные климаты общепризнано. Согласно [8] порядка половины величины потепления климата с середины 1970-х гг. может быть объяснено долгопериодной изменчивостью процессов в Северной Атлантике, а процессы, происходящие над территориями Евразии, особенно над ее северной частью во многом определяют изменения климата всего Северного полушария [9]. Междекадные изменения температуры поверхности океана в Северной Атлантике описываются индексом АМО – Атлантическая мультideкадная осцилляция [10-13].

Для каждого из рассмотренных периодов путем взаимного сравнения всех оценок фаз температурных колебаний из общей выборки выделялись группы станций со сходными закономерностями изменения фазы в рассмотренный период. Уровень тесноты связи определялся коэффициентом корреляции.

Сравнительный анализ показал, что в период устойчивых положительных аномалий температуры поверхности океана Северной Атлантики произошла трансформация структуры климатических кластеров. Согласованность колебаний приземной температуры увеличилась, произошло укрупнение большинства выделенных классов станций. Это произошло за счет перехода в более южные классы станций, расположенных севернее. Такая закономерность характерна для всей рассмотренной территории ниже 60 °с.ш. В том числе, более половины станций, расположенных в среднегорье, стали более согласованы по режиму межгодовых температурных колебаний со станциями классов более южных территорий. Главным образом, эти станции расположены в горах Южной Сибири и Монголии. В высокогорье Евразии (высота расположения станций выше 2000 м) только две станции Монгольского Алтая отреагировали на смену знака преобладающих аномалий термического режима в Северной Атлантике. Горы Южной Сибири, в частности, Алтай, расположены на стыке преобладающих влияний основных крупномасштабных потоков циркуляции атмосферы. Поэтому эти территории более чувствительны к перестройке в структуре циркуляции.

Известно, что когда Атлантика теплеет, усиливается западный перенос, его влияние распространяется на большую территорию. Кроме того, пути перемещения циклонов смещаются к северу, меняется интенсивность атмосферных вихрей [12]. Эти процессы проявились в структуре синхронизации температурных колебаний. Помимо приведенных выше эффектов устойчивого режима положительных аномалий Северной Атлантики, станции Восточной Европы и обширной территории Сибири объединились в один класс, в который вошли и станции, расположенные на левобережной низменной заболоченной равнинной части Нижнего Приобья, не входившие в период относительно холодной Атлантики ни в один из классов. При усилении западного переноса Уральские горы утратили свою роль естественной климатической границы. Также, большинство станций Западной Европы образовали один обширный класс.

Формирование структур в регионах, где в период выраженной отрицательной аномалии температуры поверхности океана Северной Атлантике температурные колебания были не согласованы, станции не входили ни в один из классов, наблюдается и в Северо-Восточной Сибири, и в тропических широтах Внутренней и Восточной Азии. Станции островов Сахалин и Японских, ранее распределенные по двум классам, в период 1995-2016 гг. образовали один класс. Взаимосвязь между Атлантическим мультideкадным колебанием, среднеширотными западными ветрами и азиатским муссоном известна [14], хотя механизмы этой связи остаются предметом дискуссий. По данным [15, 16] холодный режим Северной Атлантики ослабляет Индийскую и Восточно-Азиатскую летние муссонные подсистемы. В период теплой Северной Атлантики они усиливаются. Расширение зоны синхронизации материковой и островной Восточной Азии, вероятно, является следствием усиления Восточно-Азиатского муссона, мощного регионального влияющего фактора на колебания температуры в этом регионе.

Реакция температурного поля Евразии на особенности теплового режима Северной Атлантики отслеживается в особенностях трансформации структуры климатических классов. Закономерности таких перестроек необходимо исследовать глубже. Возможно, это расширит наше понимание механизмов влияния и реагирования в климатической системе.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № НИОКТР АААА-А17-117013050030-1.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated // *Meteorologische Zeitschrift*. 2006. V. 15. P. 259–263.
2. Rohli R.V., Joyner T.A., Reynolds St. J., Shaw C., Vazquez J.R. Globally Extended Köppen-Geiger climate classification and temporal shifts in terrestrial climatic types // *Physical Geographi*. 2015. V. 36. Is. 2. P. 142–157.
3. Чередыко Н.Н., Тартаковский В.А., Волков Ю.В., Крутиков В.А. Трансформация пространственной структуры поля приземной температуры Северного полушария // *Известия РАН. Сер. Географич.* 2020. № 1. С. 1-9. DOI: 10.31857/S2587556620010057.
4. Walsh J.E. Intensified warming of the Arctic: Causes and impacts on middle latitudes // *Glob. and Planetary Change*. 2014. V. 117. P. 52–63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.03.003>.
5. Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фунд. и прикл. климатология*. 2015. Т. 1. С. 11–26.
6. Cheredko N.N., Tartakovsky V.A., Krutikov V.A., Volkov Y.V. Climate classification in the northern hemisphere using phases of temperature signals // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2017. Т. 30. № 1. С. 63–69.
7. Архив Университета Восточной Англии [Электронный ресурс]. URL: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/crutem4/data/download.html> (дата обращения 21.05.19).
8. Семенов В.А., Мохов А.Б., Полонский А.Б. Моделирование влияния естественной долгопериодной изменчивости в Северной Атлантике на формирование аномалий климата // *Морс. гидрофиз. журн.* 2014. № 4. С. 14–26.
9. Попова В.В. Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции // *Фунд. и прикл. климатология*. 2018. № 1. С. 84–111.
10. Schlesinger M.E., Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years // *Nature*. 1994. V. 367. P. 723–726. 10.1038/367723a0.
11. Knight J., Folland C., Scaife A. Climate impacts of the Atlantic multidecadal oscillation // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L17706. doi:10.1029/2006GL026242.
12. Полонский А.Б. Атлантическая мультидекадная осцилляция и ее проявления в Атлантико-Европейском регионе // *Морс. гидрофиз. журн.* 2008. № 4. С. 69–79.
13. Lin P., Yu Z., Lu J., Ding M., Hu A., Liu H. Two regimes of Atlantic Multidecadal Oscillation: cross-basin dependent or Atlantic-intrinsic // *Science Bulletin*. 2019. V. 64. Iss. 3. DOI: 10.1016/j.scib.2018.12.027.
14. Lu R., Dong B., Ding H. Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the Asian summer monsoon // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. Iss. 24. Article L24701.
15. Zhang R., Delworth T.L. Simulated tropical response to a substantial weakening of the Atlantic thermohaline circulation // *J. Clim.* 2005. V. 18. P. 1853–1860.
16. Lewis S.C., LeGrande A.N., Kelley M., Schmidt G.A. Water vapour source impacts on oxygen isotope variability in tropical precipitation during Heinrich events // *Clim. Past*. 2010. V. 6. P. 325–343.

Comparison of the anticyclone characteristics in the Black Sea region using to the NCEP / NCAR reanalysis and surface synoptic maps

Zhuravsky V.Yu., Sukhonos O.Yu., Voskresenskaya E.N.

Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia
E-mail: ipts-sevastopol@mail.ru

Anticyclones are accompanied by comfortable weather conditions, such as a decrease in precipitation over the region and an increase in air temperature. However, the long-lived high pressure system over a certain region significantly increases the risk of developing natural hazards. Therefore, the identification of evolution patterns of anticyclonic activity on a regional scale is actually issues. To detect high pressure system, methods developed to detect low pressure systems (cyclones) are used [see, for example, 1]. However, not all such techniques are applicable for determining anticyclones. It is a reason to the development of such techniques for identifying high pressure areas.

The aim of this paper is to develop a technique of anticyclone detecting and comparing their characteristics in the Black Sea region according to the NCEP / NCAR reanalysis and surface synoptic maps.

The used data sets are 1000 and 500 hPa geopotential height from the NCEP / NCAR reanalysis (spatial resolution - 2.5 ° latitude x 2.5 ° longitude; temporal resolution – 00, 06, 12 and 18 UTC) for the 1948 – 2019 period, surface synoptic maps for the 1954 – 2009 period. Anticyclone is detected for the entire Northern Hemisphere; comparison of the anticyclone characteristics for the Black Sea region (40 - 50° N, 27.5 - 45°E).

The technique of anticyclone detecting according to reanalysis is as follows. To determine the centers of the high pressure systems, the initial data is recalculated into surface pressure using the formula given in [2]. The anticyclone center is found in the surface pressure field at five points. If the pressure value at the central point is greater than the four surrounding ones, then its coordinates is taken as the anticyclone center. The spatial location of the anticyclone center is refined by transferring the pole of the spherical coordinate system into the high pressure center and spherical spline interpolation in order to obtain geometry characteristics of anticyclone splines. The position of the last closed isobar is calculated in 360 directions from the anticyclone center. The anticyclone trajectory is determined as follows. If the coordinates of the center are detected within a radius of 600 km from the anticyclone coordinates in the previous synoptic hour, then these coordinates are fixed as the new position of the anticyclone center. The anticyclone lifetime should be at least 6 synoptic hours.

Validation of the anticyclone identification technique is carried out by comparing coordinates of the anticyclone centers and pressure, determined according to the NCEP / NCAR reanalysis, with the results of surface synoptic maps. The most intense anticyclones with a pressure in the center at the maximum of their development of at least 1040 mbar are selected for analysis. As a result, 193 anticyclone cases in the Black Sea region for the 1954 - 2009 period are found. It is received that more than half of the cases are characterized by a deviation of less than 378 km in absolute values of the coordinates of the anticyclone center. At the same time the pressure deviation in 74% of cases, does not exceed 5 mbar. For the total analyzed period, the maximum number of anticyclones in the analyzed region is noted in November (42 cases). The long-term average pressure in the anticyclone center according to the NCEP / NCAR is 1035.5 mbar (maximum pressure - 1065 mbar), according to the surface synoptic maps - 1038.1 mbar (maximum pressure - 1067 mbar). Thus, the technique for detecting anticyclones used in the work qualitatively determines the anticyclone centers and the pressure in them.

The reported study was partially funded by RFBR and government of Sevastopol, project number 20-45-920015.

REFERENCES:

1. Murray R.J., Simmonds I. A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data. Part I: Development and operation of the scheme // *Aust. Meteor. Mag.* – 1991. – Vol. 39, № 3. – P. 155–166.
2. Maslova V.N. et al. Intense Cyclones in the Black Sea Region: Change, Variability, Predictability and Manifestations in the Storm Activity // *Sustainability*. 2020. Vol. 12(11). P. 4468; <https://doi.org/10.3390/su12114468>

Сравнение характеристик антициклонов в Черноморском регионе по данным реанализа NCEP/NCAR и сборно-кинематическим картам

Журавский В.Ю., Сухонос О.Ю., Воскресенская Е.Н.

Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия

E-mail: ipts-sevastopol@mail.ru

Антициклоны сопровождаются благоприятными погодными условиями, такими как сокращение выпадения атмосферных осадков над регионом и повышение температуры воздуха. Однако стационарирование областей высокого давления над некоторым регионом существенно повышает риск развития опасных природных явлений. Поэтому выявление закономерностей эволюции антициклонической активности на региональном масштабе является актуальной проблемой. Для обнаружения областей высокого давления используются методики, разработанные для выделения областей низкого давления (циклонов) [см., например, 1–3]. Наиболее полный перечень методик идентификации циклонов и их сопоставление между собой приведено в [4]. Однако не все такие методики применимы для определения антициклонов, что и обуславливает необходимость развития методик идентификации областей высокого давления.

Целью настоящей работы является разработка методики выделения антициклонов и сравнение их характеристик для Черноморского региона по данным реанализа NCEP/NCAR и сборно-кинематическим картам.

Для достижения поставленной цели привлекались 4-х срочные (00, 06, 12 и 18 часов) данные о геопотенциальной высоте на поверхностях 1000 и 500 гПа из реанализа NCEP/NCAR (пространственное разрешение – 2.5° широты $\times$ 2.5° долготы) за период 1948–2019 гг. и сборно-кинематические карты за период 1954–2009 гг. Обнаружение областей высокого давления по этим данным выполнялось для всего Северного полушария. Сравнение характеристик антициклонов – для Черноморского региона ($40 - 50^\circ$ с. ш. $27,5 - 45^\circ$ в. д.).

Идентификация антициклонов по данным реанализа выполнена следующим образом. Для определения центров областей высокого давления исходные данные пересчитывались в приземное давление по формуле, приведенной в [5]. Нахождение центра антициклона в поле приземного давления проводилось по пяти точкам. Если значение давления в центральной точке больше, чем в четырех окружающих, то ее координаты принимались за центр антициклона. Пространственное расположение центра антициклона уточнялось путем переноса полюса сферической системы координат в центр области высокого давления и последующей интерполяции приземного давления с помощью сферических сплайнов. Положение последней замкнутой изобары рассчитывалось в 360 направлениях от центра антициклона. Траектория антициклона определялась следующим образом. Если координаты центра антициклона обнаруживаются в радиусе 600 км от координат антициклона в предыдущий срок, то эти координаты фиксировались как новое положение центра антициклона. Время жизни области высокого давления должно составлять не менее 6 последовательных сроков. В качестве примера на рис. 1 приведены два интенсивных антициклона в Европейском регионе, затрагивающих Черноморский регион. Также на рис. 1 отображены центры вихрей, рассчитанные по вышеописанной методике.

Валидация методики идентификации антициклонов проводилась путем сравнения координат центров вихрей и давления в них, определенных по данным реанализа NCEP/NCAR, с результатами сборно-кинематических карт. Для анализа отбирались наиболее интенсивные антициклоны с давлением в центре в максимум своего развития не менее 1040 мбар. В результате было отобрано 193 случая антициклонов в Черноморском регионе за период 1954–2009 гг. Более половины случаев характеризуется отклонением в абсолютных величинах координат центра антициклонов менее 378 км. В то же время в 74% случаев отклонение в абсолютных величинах величин давления в центре вихрей не превышает 5 мбар. За исследуемый период максимальное количество антициклонов в анализируемом регионе отмечалось в ноябре (42 случая).

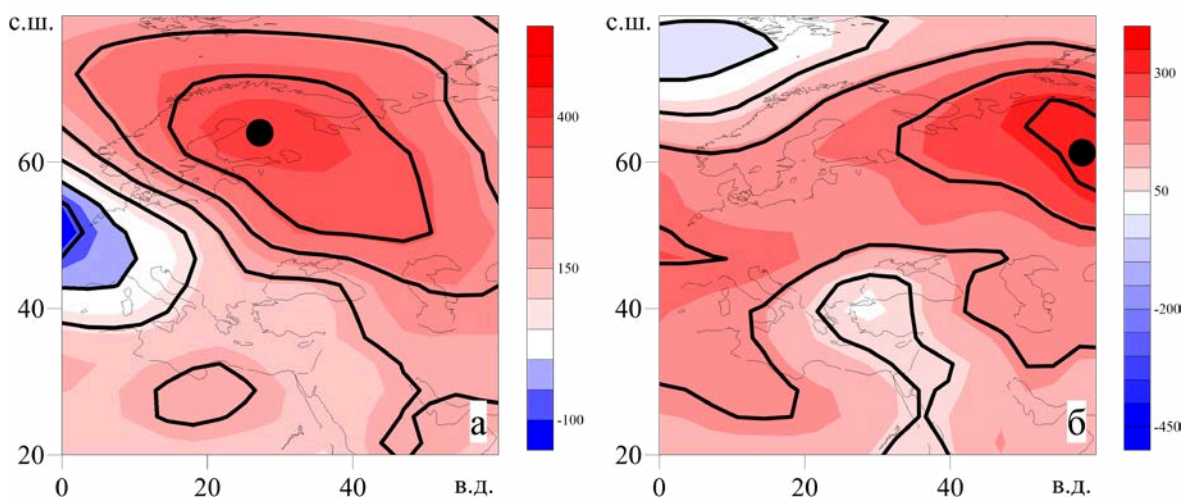


Рис. 1. Поле геопотенциальной высоты на поверхности 1000 гПа (цветная заливка), рассчитанное поле приземного давления (изолинии) и центры антициклонов (точка) на 08.12.1959 (а) и 20.02.2009 (б).

Среднегодовые значения давления в центре вихря по данным реанализа NCEP/NCAR составляют 1035,5 мбар (максимальное давление – 1065 мбар), по данным сборно-кинематических карт – 1038,1 мбар (максимальное давление – 1067 мбар). Таким образом, разработанная методика обнаружения антициклонов качественно определяет центры антициклонов и давление в них.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и г. Севастополь в рамках научного проекта № 20-45-920015.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бардин М.Ю. Изменчивость характеристик циклоничности в средней тропосфере умеренных широт Северного полушария // Метеорология и гидрология. – 1995. – № 11. – С. 24–37.
2. Murray R.J., Simmonds I. A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data. Part I: Development and operation of the scheme // Aust. Meteor. Mag. – 1991. – Vol. 39, № 3. – P. 155–166.
3. Serreze M.C. Climatological aspects of cyclone development and decay in the Arctic // Atmos.–Ocean. – 1995. – Vol. 33. – P. 1–23.
4. Neu U., Akperov M.G., Bellenbaum N. [et al.] IMILAST: A community effort to intercompare extratropical cyclone detection and tracking algorithms // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 2013. – Vol. 94. – P. 529–547. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00154.1>.
5. Maslova V.N., Voskresenskaya E.N., Lubkov A.S., Yurovsky A.V., Zhuravskiy V.Y., Evstigneev V.P. Intense Cyclones in the Black Sea Region: Change, Variability, Predictability and Manifestations in the Storm Activity // Sustainability. 2020. Vol. 12(11). P. 4468; <https://doi.org/10.3390/su12114468>

Assessment of the influence of the steering current velocity on anomalous weather phenomena in the troposphere of the northern hemisphere in modern climate conditions

Loginov S.V., Kharyutkina E.V., Moraru E.I., Zolotov S.Yu., Podnebesnykh N.V., Smirnov S.V.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: LogSV13@imces.ru

The aim of the study was to assess the role of the steering current (western transport) in the variability of meteorological anomalies at the end of the 20th – beginning of the 21st centuries over the Asian territory of Russia (ATR). Anomalies were understood as a perturbation of atmospheric values exceeding the 3σ level (σ is the standard deviation), i. e., perturbations corresponding to extreme values.

The study was conducted on a 6-h ERA-Interim reanalysis data for the 1979–2017 interval with a spatial resolution of $1.125 \times 1.125^\circ$.

Thus a study of the number of anomalies in the main meteorological variables corresponding to extreme values revealed an increasing of negative anomalies in winter for the entire ATR. A magnitude increasing of the positive anomalies of the meridional wind speed is observed only in the Far East. It is shown that the largest number of significant values of the correlation coefficients characterizing the seasonal relationship of processes in the lower troposphere is characteristic of the relationship between the steering current velocity and the number of positive anomalies of the meridional wind speed. The use of EOF analysis made it possible to identify the wave structure of the steering current, while the regions of significant anomalies are located both in the zone of the current and in areas of a sharp change in its direction. It was also established that at the beginning of the XXI century significant changes in the trends in the intensity of the action centers took place: in the winter at the Siberian maximum and the Icelandic minimum, in the summer at the Azores maximum and the Icelandic minimum. In addition, it was shown that in winter in Western and Eastern Siberia, significant changes in the trends of the steering current velocity are observed, while in spring in Eastern Siberia and the Far East, and in autumn in Western Siberia. Correlation analysis showed that significant decreasing of the intensity of the Siberian maximum in the winter season affected on decreasing of the steering current velocity in Western Siberia at the beginning of the 21st century, while the effect of the Icelandic minimum intensity on the current velocity, on the contrary, intensifies.

The study was supported by the state budget theme No. AAAA-A17-117013050031-8.

Влияние ведущего потока на аномальные явления погоды в тропосфере северного полушария в условиях современного климата

Логинов С.В., Харюткина Е.В., Морару Е.И., Золотов С.Ю., Поднебесных Н.В., Смирнов С.В.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: LogSV13@imces.ru

На образование аномальных явлений погоды (АЯП), в том числе на территории России, значительное влияние оказывают внетропические циклоны, которые перемещаясь преимущественно внутри области шторм-треков, приносят экстремальные осадки, температуру и ветер в средних широтах. Их интенсивность и расположение меняется в зависимости от сезона и реагирует на внешние и внутренние воздействия. В [1] указывали на роль адвекции в развитии аномалий $>3\sigma$, при этом, для территории Северной Америки отклонения от нормального распределения происходили более чем в 40 % случаев [2]. Для выявленных регионов наблюдалось увеличение количества экстремальных «теплых» температур. Результаты исследования по данным реанализа MERRA-2 и климатическим проекциям CMIP5 [3] выявили существование подобных зон на всем земном шаре, а численные эксперименты [4] подтвердили роль адвекции, а также областей генерации шторм-треков и районов струйных течений в образовании аномалий синоптического масштаба. При этом интенсивность и направление траекторий движения циклонов и ведущего потока над восточной частью северного полушария будет зависеть от месторасположения и интенсивности таких центров действия атмосферы, как азорский максимум, исландский минимум и сибирский антициклон.

Целью исследования являлась оценка роли ведущего потока (западного переноса) в изменчивости аномалий метеовеличин в конце XX – начале XXI вв. над азиатской территорией России (АТР). Под аномалией понималось возмущение атмосферной величины, превышающее уровень 3σ (σ – величина среднеквадратического отклонения), то есть возмущение, соответствующее экстремальным значениям. Аномалии, связанные с вихревой циркуляцией атмосферы выделялись из исходных временных рядов как составляющие сигнала, соответствующие временному масштабу циклонов/антициклонов (2–7 дней) [5, 6]. Сезонные величины аномалий (A^s): температуры (t) и влажности (q) воздуха, u , v , w – компоненты скорости ветра и геопотенциала (z) рассчитывались для АТР в диапазоне 1000–500 гПа. Исследование проводилось по 6-ч данные реанализа ERA-Interim за интервал 1979–2017 гг. с пространственным разрешением $1,125 \times 1,125^\circ$ по широте и долготе.

Под ведущим потоком понимался западный перенос воздушных масс в средних широтах (40 – 60° ш.) в диапазоне высот 700–500 гПа. Для каждого уровня высоты выделялись области, в которых скорость ветра, превышает средние значения в регионе. Величина, полученная после усреднения выявленных значений, принималась за региональную скорость ведущего потока (V_{lead}).

Проведенные ранее исследования [6] выявили закономерности и особенности пространственного распределения аномалий. Было показано, что в начале XXI в. число аномалий меридиональной скорости увеличивается в средних широтах Сибири в 2 раза. Было показано, существование связи между изменчивостью аномалий и характеристиками циклонической активности.

Для анализа пространственно-временной изменчивости аномалий климатических величин по ковариационной матрице аномалий были рассчитаны главные компоненты и собственные вектора (EOF), позволившие в зоне западного переноса выделить определенные атмосферные процессы. Согласно расчётам, EOF1-6 описывают ~ 70 % изменчивости, при этом EOF3 (~ 12 %), и остальные старшие вектора (>3) позволяют выявить сложный (волновой) характер ведущего потока. Совмещение пространственного распределения EOF3 аномалий (A_v^s) и распределения V_{lead} (рис. 1) показало, что области значимых аномалий ($|EOF3| > 0,05$) повторяют волновую структуру ведущего потока и расположены как в зоне потока, так и в областях резкой смены его направления, например, в Сибири и на Дальнем Востоке на высоте 1000 гПа. Подобная ситуация наблюдается и на высоте 500 гПа.

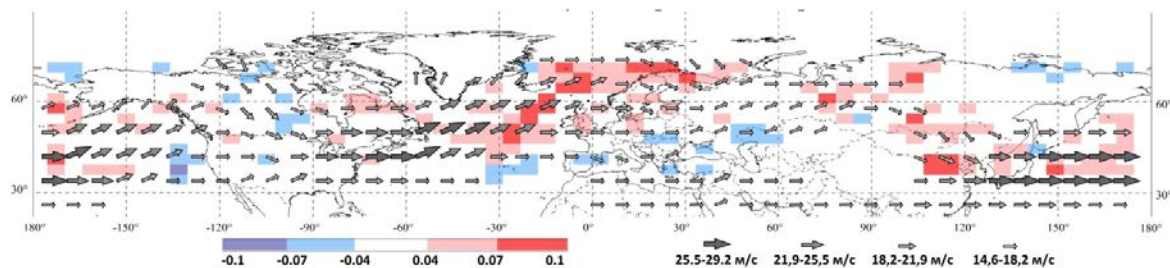


Рис. 1. Пространственное распределение собственных векторов EOF3 A^s и V_{lead} зимой для 1000 гПа.

Межгодовая изменчивость средних за зимний сезон аномалий величин A_v^s приведена на рис. 2 – как положительных (красный), так и отрицательных (чёрный). Временные ряды приведены для Западной Сибири (ЗС), Восточной Сибири (ВС), Дальнего Востока (ДВ). Значения, сглаженные фильтром низких частот с шириной окна 10 лет, показаны пунктиром.

Величины отрицательных аномалий увеличиваются зимой на всей АТР после 2000 г. Увеличение значений положительных аномалий меридиональной скорости ветра также наблюдается после 2000 г. на Дальнем Востоке (рис. 2). В остальных районах уменьшается.

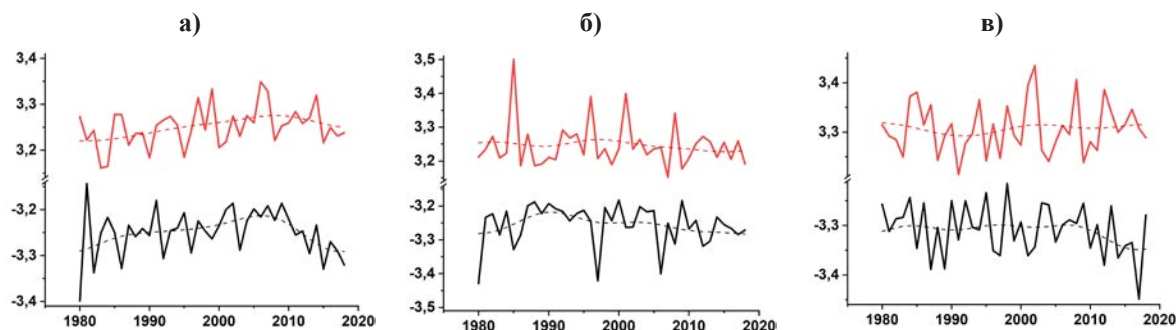


Рис. 2. Межгодовая изменчивость величины аномалий меридиональной скорости ветра зимой: а) Западная Сибирь, б) Восточная Сибирь, в) Дальний Восток.

Изменение числа аномалий основных метеовеличин в Сибири, в частности, связано с изменением типа атмосферной циркуляции, что связано с уменьшением морского льда на поверхности Северного Ледовитого океана.

Наибольшие значения скорости ведущего потока наблюдаются зимой, а наименьшие – летом. Весной и осенью V_{lead} близка к зимним значениям, как по величине, так и по временному ходу. Тенденции временной изменчивости V_{lead} оценивались по величине линейных трендов (рис. 3), из которых следует, что значимые изменения тенденций V_{lead} наблюдаются зимой в Западной Сибири (0,6 м/с/10 лет) и Восточной Сибири (0,3 м/с/10 лет), весной в ВС (0,2 м/с/10 лет) и на ДВ (0,5 м/с/10 лет) и осенью в ЗС (0,4 м/с/10 лет).

Для получения оценки связи процессов в регионе ($r(V_{lead}^s, A_v^s)$), применялись первый и третий квартили функции распределения коэффициентов корреляций по территории. Наибольшее количество значимых значений коэффициентов корреляций, характеризующих сезонную взаимосвязь процессов в нижней тропосфере, было установлено для связи скорости ведущего потока и величины положительных аномалий меридиональной скорости ветра. Изменчивость ведущего потока и вихревых процессов в нижней тропосфере чаще всего значимо проявляется в ВС.

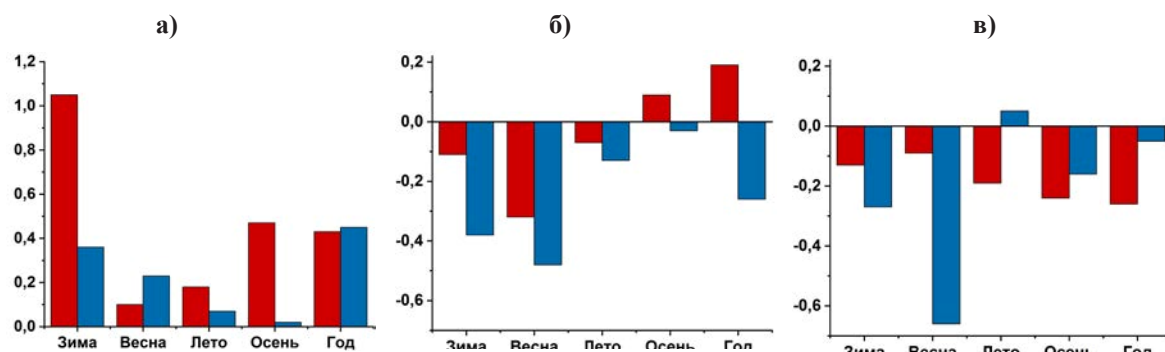


Рис. 3. Тренды скорости ведущего потока (за 10 лет) в слое 700–500 гПа в районах Евразии: а) Западная Сибирь; б) Восточная Сибирь; в) Дальний Восток; красный – 1979–1998 гг., синий – 1999–2018 гг.

Другим параметром, влияющим на аномалии климатических величин, а также на скорость и направление ведущего потока, являются характеристики центров действия атмосферы (ЦДА), интенсивность (I) которых определялась как модуль разности значений геопотенциала между центром и периферией (гп дам).

Анализ трендов I выбранных ЦДА (рис. 4) показывает, что значимые изменения в XXI в. произошли зимой в сибирском максимуме и исландском минимуму и летом в азорском максимуме и исландском минимуме, при этом наибольший значимый положительный тренд I был в сибирском антициклоне зимой в конце XX в. (10,8 гп дам/10 лет). Значимые изменения I в азорском антициклоне составили ~4,02

гп дам/10 лет. В районе исландского минимума зимой и летом наблюдается значимый рост I (5,17 и 4,7 гп дам/10 лет, соответственно). Стоит отметить, что происходит также ослабление североатлантического шторм-трека [7].

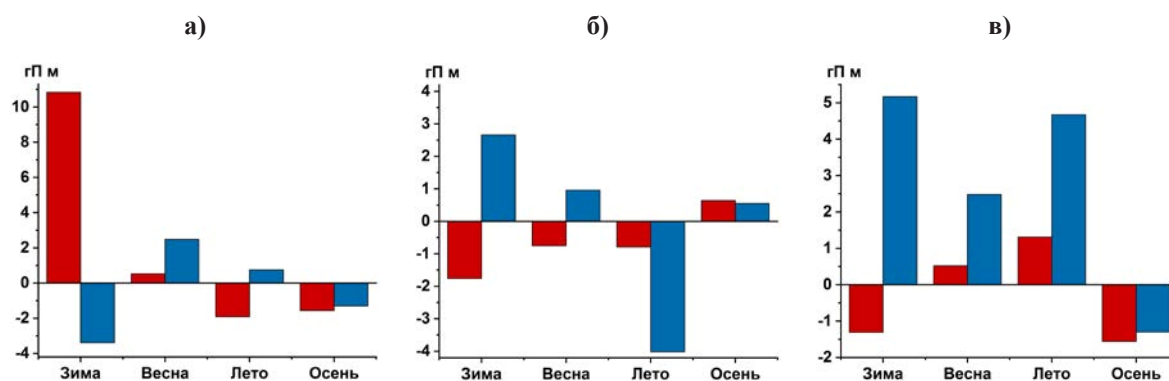


Рис. 4. Тренды интенсивности ЦДА (за 10 лет): а) сибирский максимум; б) азорский максимум; в) исландский минимум; красный – 1979–1998 гг., синий – 1999–2018 гг.

Значимые изменения отмечены в местоположении исландского минимума и сибирского максимума. Первый перемещается преимущественно на юг (1°с. ш. за 10 лет), а второй – в северо-восточном направлении примерно с такой же скоростью. Смещению сибирского антициклона соответствует увеличение меридиональной компоненты скорости ветра.

Влияние ЦДА на прохождение ведущего потока проявляется в том, что помимо радиационных эффектов (влияния на радиационный баланс атмосферы) при определенном расположении интенсивного ЦДА может возникнуть блокирование ведущего потока и его расщепление на две ветви, огибающие ЦДА с северной и южной стороны с последующим обратным их слиянием. Корреляционный анализ связи скорости ведущего потока с интенсивностью центров действия атмосферы показал, что резкое уменьшение интенсивности Сибирского максимума в зимний сезон (рис. 4а) повлияло на уменьшение V_{lead} в Западной Сибири (0,72 в конце XX века и 0,32 в начале XXI века). Ослабевают и вклад азорского максимума в изменение скорости ведущего потока в этом регионе. Влияние I исландского минимума на V_{lead} в Западной Сибири, наоборот, усиливается в начале XXI в. (возрастает до 0,50). Также проводилась оценка связи V_{lead} со смещением местоположения ЦДА по долготе и широте. За весь период исследования обнаружены статистически значимые корреляционные связи между смещением центра исландского минимума на юг и ведущим потоком в Восточной Сибири (-0,63) и на Дальнем Востоке (-0,68).

Таким образом, исследование числа аномалий основных метеовеличин, соответствующих экстремальным значениям выявило увеличение отрицательных аномалий зимой для всей АТР. Рост величины положительных аномалий меридиональной скорости ветра наблюдается только на Дальнем Востоке. Показано, что наибольшее количество значимых значений коэффициентов корреляций, характеризующих сезонную взаимосвязь процессов в нижней тропосфере, характерно для связи скорости ведущего потока и количества положительных аномалий меридиональной скорости ветра. Применение EOF-анализа позволило выявить волновую структуру ведущего потока, при этом области значимых аномалий расположены как в зоне потока, так и в областях резкой смены его направления. Также установлено, что в начале XXI в. произошли значимые изменения тенденций интенсивности ЦДА: зимой в сибирском максимуме и исландском минимуме, летом в азорском максимуме и исландском минимуме. Кроме того, показано, что зимой в Западной и Восточной Сибири наблюдаются значимые изменения тенденций скорости ведущего потока, при этом весной – в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, осенью – в Западной Сибири. Корреляционный анализ показал, что резкое уменьшение интенсивности сибирского максимума в зимний сезон повлияло на уменьшение скорости ведущего потока в Западной Сибири в начале XXI в., при этом влияние интенсивности исландского минимума на скорость потока, наоборот, усиливается.

Исследование было выполнено в рамках госбюджетной темы № АААА-А17-117013050031-8.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ruff T.W., Neelin J.D. Long tails in regional surface temperature probability distributions with implications for extremes under global warming// *Geophys. Res. Lett.* 2012. 39. L04704, doi:10.1029/2011GL050610.

- Loikith, P.C., Neelin J.D. Short-tailed temperature distributions over North America and implications for future changes in extremes // *Geophys. Res. Lett.* 2015. 42. 8577–8585, doi:10.1002/2015GL065602.
- Loikith, P.C., Neelin J.D., Meyerson, J., Hunter, J.S. Short Warm-Side Temperature Distribution Tails Drive Hot Spots of Warm Temperature Extreme Increases under Near-Future Warming // *Journal of Climate*. 2018. 31(23), 9469–9487.
- Garfinkel, C.I., Harnik N. The Non-Gaussianity and Spatial Asymmetry of Temperature Extremes Relative to the Storm Track: The Role of Horizontal Advection // *Journal of Climate*. 2017. 30. 445–464.
- Логинов С.В., Елисеев А.В., Мохов И.И. Влияние негауссовой статистики атмосферных переменных на экстремальные внутримесячные аномалии // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т.53. №3. С. 307–317.
- Podnebesnykh N.V., Loginov S.V., Kharyutkina E.V., Usova E.I. Vortex circulation and anomalous meteorological phenomena over the Asian territory of Russia in the context of climate change // *Proceedings Volume 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*; 1120883 (2019) DOI: 10.1117/12.2540911.
- Vargin, Pavel, Martynova, Yuliya, Volodin, Evgeny, Kostykin, Sergey. (2019). Investigation of storm tracks in Northern Hemisphere. *Ecology. Economy. Informatics. System analysis and mathematical modeling of ecological and economic systems*. 1. 145–152. 10.23885/2500-395X-2019-1-4-145-152.

Climate and weather extremes in the Volga Federal District

¹Perevedentsev Yu.P., ²Sherstukov B.G., ¹Guryanov V.V., ¹Shantalinskii K.M., ¹Auhadeev T.R.

¹Kazan Federal University, Russia

²Russian Research Hydrometeorological Institute-World data center, Obninsk, Russia

E-mail: Ypereved@kpfu.ru, boris@meteo.ru, vv@kpfu.ru

Modern climate change, accompanied by increasingly frequent and intense natural disasters, is most sensitive to nature, economy and population of specific regions. The tasks of assessing the role of natural (thermal state of the ocean surface, atmospheric circulation, solar and geomagnetic activity) and man-made factors in the formation of weather and climatic anomalies, including extreme ones, are becoming relevant.

The report examines the spatial-temporal variability of air temperature, precipitation, as well as extreme hydrometeorological events in the Volga Federal District (VFD) against the background of climatic events taking place in Russia, during the period 1955–2018. according to the weather network and ERA5 reanalysis.

At the beginning of the 21st century, the region experienced a significant jump in average annual air temperature of 1.2°C, at the same time, the amount of inter-annual variability in temperature has been halved, and the minimum value rose sharply from 0.55°C to 3.58°C. All this indicates a significant change in the thermal regime in the region at the junction of the two centuries.

When considering the distribution of air temperature anomalies by subperiods (1955–1999 and 2000–2018), it is noteworthy that in the later of them the number of cases with a negative temperature anomaly has drastically decreased. Thus, in the 21st century, their number varies from 0 (April, September) to 4 in May. Positive anomalies became noticeably more. At the same time, in the earlier periods (1955–1999) in most months there were more major negative anomalies than positive ones.

The trend of decreasing the number of frosty days per year ($T_{\min} < -20^{\circ}\text{C}$) and the growth of hot ($T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$) was revealed, and there was a slight increase in the number of days with heavy precipitation (more than 20 mm/day). The initial information on hazardous hydrometeorological phenomena (HP) used the database of information prepared in VNIIGMI-WDC for the period 1991–2018. At the same time, during the reviewed period (1991–2018), the average number of HP per year oscillates across the territory of the VFD from 4 (Udmurt Republic) to 11 (Samara region). The linear trend tilt ratio reaches 28 units/10 years. Assessment of the importance of linear trends and contribution to the variance of low-frequency components (LFCs) with a period of more than 10 years has been made.

The work was carried out with the support of RFBR grants (Project 18-05-00721, 18-45-160006, 20-55-00014).

Климатические и погодные экстремальные явления в Приволжском федеральном округе

¹Переведенцев Ю.П., ²Шерстюков Б.Г., ¹Гурьянов В.В., ¹Шанталинский К.М., ¹Аухадеев Т.Р.

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия

²Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации - Мировой центр данных, Обнинск, Россия

E-mail: Ypereved@kpfu.ru, boris@meteo.ru, vv@kpfu.ru

Современные изменения климата, сопровождающиеся все более частыми и интенсивными природными катаклизмами, оказываются наиболее чувствительными для природы, экономики и населения конкретных регионов. Становятся актуальными задачи по оценке роли естественных (тепловое состояние поверхности океана, циркуляция атмосферы, солнечная и геомагнитная активность) и антропогенных факторов на формирование погодных и климатических аномалий, включая экстремальные.

В последние годы опубликован ряд работ по этой тематике. Так в [1] рассматриваются изменения приземной температуры над сушей Земного шара, а также изменения режима осадков на территории России в период современного потепления. В работах [2,3] представлены результаты статистического анализа повторяемости опасных гидрометеорологических явлений на территории России, нанесших социально-экономический ущерб в период 1998-2017 гг. показано влияние изменений климата на частоту экстремальных гидрометеорологических явлений. В региональном плане эти вопросы рассматривались также в авторских статьях [6,7]. Важное внимание уделяется проблеме разработки стратегий адаптации к изменениям климата, созданию информационной основы адаптационных программ в экономике России. С этой целью ведется разработка технологии вероятностного климатического прогнозирования на основе массовых ансамблевых расчетов с высокоразрешающей системой моделей [3,4].

В докладе рассматривается пространственно-временная изменчивость температуры воздуха, атмосферных осадков, а также экстремальных гидрометеорологических явлений на территории Приволжского федерального округа (ПФО) на фоне климатических событий, происходящих на территории России, в период 1955-2018 гг. по данным метеосети и реанализа ERA5.

В начале XXI века в регионе произошел значительный скачок средней годовой температуры воздуха (СГТВ) на 1,2°C, при этом вдвое уменьшилась величина межгодовой изменчивости температуры, а минимальное значение резко повысилось с 0,55°C до 3,58°C. Все это свидетельствует о существенном изменении термического режима в регионе на стыке 2-х веков.

С целью оценки роли атмосферной циркуляции в формировании термического режима региона рассчитывались коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями температуры как осредненной по региону, так и по отдельным станциям и индексами циркуляции NAO, AO, SCAND в период 1954-2018 гг. (65 лет) по месяцам (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициент корреляции между осредненной по ПФО температурой воздуха и индексами циркуляции атмосферы.

Индекс	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
NAO	0,34	0,38	0,44	-0,10	-0,29	-0,32	-0,08	-0,15	0,11	-0,07	-0,12	0,47
AO	0,43	0,33	0,39	0,06	-0,06	-0,13	0,25	0,01	0,15	0,11	0,28	0,41
SCAND	-0,62	-0,63	-0,35	-0,31	-0,28	-0,03	0,09	-0,14	-0,17	-0,48	-0,22	-0,29

Как видно из табл. 1 годовой ход коэффициентов корреляции средней температуры ПФО с индексами AO и NAO обладает сходством, что вызвано достаточной тесной связью этих индексов особенно в холодный период года (коэффициент корреляции между этими индексами в период декабрь – март составляет 0,71-0,80). Наиболее тесная положительная связь температуры наблюдается в декабре-марте как с индексом NAO (r достигает в декабре значения 0,47), так и с индексом AO ($r = 0,43$ в январе).

Значимая отрицательная корреляция отмечается между осредненной по округу температурой и индексом SCAND в период декабрь-май, а также в октябре (коэффициент корреляции значим при 0,27 и выше на уровне достоверности 0,95). Наиболее тесная связь обнаруживается в январе и феврале ($r = -0,60$), в летний период она незначима.

Линейная регрессия осредненной по округу температуры, как результативного признака, и совместно индексов NAO и SCAND, как факториальных, показывает, что в период декабрь-март от 27 до 47% дисперсии температуры, а в октябре около 21% описывается изменениями циркуляции. При этом в январе и феврале более чем в два раза сильнее влияние индекса SCAND, в октябре влияние этого индекса является преобладающим, в марте влияние обоих индексов примерно одинаково, а в декабре преобла-

дает влияние индекса NAO. Добавление в модель регрессии в качестве факториального признака индекса АО не оказывает существенного влияния на характеристики модели по причине достаточно тесной связи индексов АО и NAO.

Таким образом, в холодный период года индексы циркуляции атмосферы достаточно тесно коррелируют с изменениями среднемесячной температуры и циркуляционный фактор в отличие от летнего времени года играет заметную роль в колебаниях температуры.

С использованием данных реанализа ERA5 за 1980–2018 гг. для Приволжского федерального округа рассчитывалось распределение экстремальных показателей температурно-влажностного режима (количество дней с высокими и низкими температурами, интенсивными осадками).

Количество морозных дней в году, когда минимальная суточная температура $t_{\min}$ ниже -20°C распределяется по территории ПФО неравномерно: на крайнем северо-востоке (Пермский край) их число достигает 50 дней, а на юго-западе в Саратовской области их всего лишь 15. Число морозных дней возрастает до 25–35 дней в году на юго-востоке округа (Оренбургская область) и на востоке Башкортостана в районе Уральских гор. Количество морозных дней, характеризующих холодный период года, когда $t_{\min} < 0$ возрастает по территории ПФО с юго-запада на северо-восток от 135 до 225 дней в году.

Коэффициент наклона линейного тренда (КНЛТ) этой характеристики повсеместно имеет отрицательное значение ($-0,3$ – $-0,4$ дня/год), т.е. за десятилетие число дней с минимальными температурами $< -20^{\circ}\text{C}$ уменьшается на 3 – 4 дня.

Количество летних дней, когда максимальная суточная температура ($t_{\max}$) $> 25^{\circ}\text{C}$, отличается зональным распределением за исключением горной части на востоке Башкортостана. Если на юге округа число жарких дней достигает 110, то на крайнем северо-востоке их всего лишь 10. Так же мало жарких дней (10–20) и на востоке Башкортостана (сказывается влияние Уральских гор). Тропические ночи, когда $t_{\min} > 20^{\circ}\text{C}$, отмечаются в основном в южной части округа (35), на крайнем северо-востоке ПФО они отсутствуют.

Тренд количества дней с $t_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$ повсеместно положителен. Число дней с максимальной температурой со скоростью 1–2 дня/10 лет растет в направлении с северо-востока на юго-запад до 6 – 7 дней/10 лет.

В северо-восточных районах ПФО и в Предуралье увеличивается количество дней с интенсивными осадками более 20 мм/сутки. Здесь ярко проявляется роль орографического фактора, поскольку влажные воздушные массы поступают с запада (на юге ПФО фиксируется один день с крупными осадками, а в восточном Башкортостане их три). КНЛТ положителен, но величина его незначительна.

В последние годы важное внимание уделяется проблеме влияния опасных гидрометеорологических явлений на экономику и жизнедеятельность населения России, на территории которой в 2010г. зафиксировано 510 опасных явлений (ОЯ) и неблагоприятных условий погоды [5]. Во ВНИИГМИ-МЦД, начиная с 1997 г., собирается и накапливается информация об опасных явлениях, фиксируемых гидрометеорологическими станциями. По экспертной оценке, ежегодный ущерб от чрезвычайных ситуаций в России составляет от 1,5 до 2% годового валового внутреннего продукта. В 2010 г. ущерб составил от 675 до 900 млрд. руб. В работе [8] приводятся сведения об ОЯ в субъектах РФ в период 1991–2018 гг.

Рассмотрим динамику опасных явлений на территории ПФО в период с 1991 по 2018 гг., используя данные о распределении ОЯ в субъектах Российской Федерации, располагающихся на территории ПФО [8]. Как видно из рис. 1, в целом наблюдается положительный тренд роста числа случаев с ОЯ на территории округа (28ед./10лет). Коэффициент детерминации R^2 линейного тренда достигает 27%, что свидетельствует о достоверности выявленной закономерности. Наибольшее количество ОЯ возникает в период 2007–2015 гг., что связано с повышением температуры воздуха в XXI веке. В 2010 г. их количество в регионе достигло 170. В табл. 2 представлены характеристики ОЯ в субъектах ПФО.

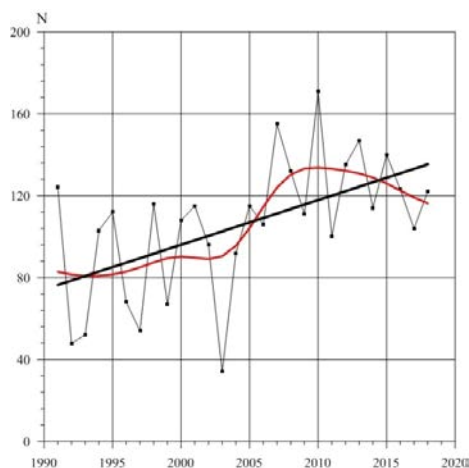


Рис. 1. Многолетний ход числа всех опасных явлений на территории ПФО.

Таблица 2. Характеристики изменения общего числа опасных явлений на территории ПФО (1991-2018 гг.).

Субъект	Av	Sd	S	Av/S	A	R ²	α
Кировская область	9,29	3,68	120,8	0,08	0,27	0,34	0,00
Пермский край	5,68	3,06	193,5	0,03	-0,07	0,00	0,33
Удмуртская Республика	3,82	2,51	42,1	0,09	0,08	0,04	0,17
Нижегородская область	8,61	4,15	74,8	0,12	0,21	0,14	0,03
Республика Марий Эл	4,36	2,33	23,2	0,19	-0,03	-0,03	0,64
Чувашская Республика	4,46	2,95	18,3	0,24	0,01	-0,04	0,86
Республика Татарстан	10,61	5,51	68,0	0,16	0,31	0,18	0,01
Республика Мордовия	6,29	2,99	26,2	0,24	0,01	-0,04	0,89
Ульяновская область	8,64	5,17	37,3	0,23	0,31	0,21	0,01
Самарская область	11,39	6,12	53,6	0,21	0,36	0,21	0,01
Республика Башкортостан	7,75	4,18	143,6	0,05	-0,01	-0,04	0,93
Пензенская область	6,11	3,72	43,2	0,14	0,13	0,04	0,15
Саратовская область	10,43	5,29	100,2	0,10	0,27	0,15	0,02
Оренбургская область	8,43	4,16	124,0	0,07	0,33	0,39	0,00
ПФО	105,86	33,18	1068,8	0,10	2,18	0,27	0,00

Av – среднее значение, Rms – СКО, S – площадь (тыс. км²), A – КНЛТ (число случаев в год), R² – скорректированный коэффициент детерминации, (доли единицы), α – значимость, (доли единицы).

Территориальное распределение случаев с ОЯ имеет большое разнообразие, Наиболее часто они отмечаются в центральных и южных районах, где более сложная физико-географическая обстановка. Наиболее часто на территории ПФО возникают следующие ОЯ: сильный ветер, шквал, смерч, сильный дождь, град и др.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (Проект 18-05-00721, 18-45-160006, 20-55-00014).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бардин М.Ю., Ранькова Э.Л., Платова Т.В., Самохина О.Ф., Корнева И.А. Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга.- Метеорология и гидрология, 2020, №5, С.29-45.
2. Голицын Г.С., Васильев А.А. Изменение климата и его влияние на частоту экстремальных гидрометеорологических явлений.- Метеорология и гидрология, 2019, №11, С.9-12.
3. Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Адаптация России к изменению климата: концепция национального плана.- Труды ГГО. 2017. Вып.586, С.7-20.
4. Катцов В.М., Школьник И.М., Ефимов С.В. Перспективные оценки изменений климата в российских регионах: детализация в физическом и вероятностном пространствах.- Метеорология и гидрология, 2017, №76 С.68-80.
5. Кориунов А.А., Шаймарданов В.М., Шаймарданов М.З., Шамин С.И. Повторяемость опасных гидрометеорологических явлений, нанесивших социально-экономический ущерб в 1998-2017гг.- Метеорология и гидрология, 2019, №11, С.13-19.
6. Переведенцев Ю.П., Шумихина А.В., Шанталинский К.М., Гурьянов В.В. Опасные гидрометеорологические явления на территории Приволжского федерального округа.- Метеорология и гидрология, 2019, №12, С.20-30.
7. Переведенцев Ю.П., Шерстюков Б.Г., Шанталинский К.М., Гурьянов В.В., Аухадеев Т.Р. Климатические изменения в Приволжском федеральном округе в XIX-XXI веках.- Метеорология и гидрология, 2020, №6, С.36-46.
8. Шамин С. И., Санина А. Т. Оценка частоты появления опасных гидрометеорологических явлений, нанесивших ущерб субъектам Российской Федерации. – Труды ВНИИГМИ-МЦД, вып. 184, с. 54-66.

Climatic conditions of the arctic tundra in the estuary zone of the Yenisei river: measurements at the atmospheric carbon observation station Dikson

Sidenko N.V., Panov A.V.

V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

E-mail: nikita.v.sidenko@gmail.com

Meteorological conditions are presumed to be the crucial drivers that may have feedback on many environmental components. Meteorological variables recorded at the measurement station Dikson along with the GHG observations should help to characterize the climate variability of the local environment and are expected to be of great importance as a background for further studies, screening, and interpreting the GHG data series.

The variability of air temperature is seasonally dependent, with stronger amplitudes recorded during colder months (November – April), while summer rates are rather constant (fig. 1a). The annual average air temperature on the measurement site achieves -8.03°C . Throughout the year, summer monthly means are reaching slightly above 5.0°C with the highest value of 9.15°C recorded during late summer in August. Within spring and fall, average monthly air temperature achieves -4.4°C , while winter means drop up to -17.9°C , with the coldest value as low as -22.8°C observed in February.

Климатические условия арктической тундры в эстуарной зоне р. Енисей: результаты мониторинга на станции «Диксон»

Сиденко Н.В., Панов А.В.

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

E-mail: nikita.v.sidenko@gmail.com

В современных научных исследованиях, связанных с изменениями глобального климата, особое внимание уделяется климату Арктических территорий. В приземной атмосфере северных полярных областей наиболее выражены климатические эффекты, связанные с глобальными изменениями атмосферной циркуляции, такие как: повышение среднегодовой температуры, усиление скорости таяния льдов, деградация вечной мерзлоты и др. Однако, климатическая система Земли, под которой обычно понимают пять взаимодействующих друг с другом компонентов — атмосферу, гидросферу, криосферу, деятельный слой суши и биосферу, — никогда не находится в состоянии равновесия. Она непрерывно меняется, даже в отсутствие изменений естественных и антропогенных факторов, влияющих на климатическую систему извне [1]. Таким образом становится очевидным, что разнородность компонентов климатической системы Арктики, в глобальном смысле, является более мозаичной, (по сравнению с другими климатическими широтами). Так проявляется особая необходимость в точечных исследованиях климатических условий для отдельных частей арктического региона, а метеорологические данные, полученные в ходе климатического мониторинга для отдельных арктических областей, в мезоклиматическом отношении, должны помочь охарактеризовать изменчивость климата местной окружающей среды. В данном исследовании проанализирован ряд основных метеорологических параметров, зарегистрированных, посредством атмосферного мониторинга, сопряженного с плановыми измерениями концентраций парниковых газов ($\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}$) в атмосфере береговой зоны Енисейского залива.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Мониторинг ключевых метеорологических величин производился на побережье эстуарной зоны р. Енисей в районе г.п. Диксон (73.33° с.ш.; 80.34° в.д.), с отбором воздуха с микрометеорологической мачты на высоте 30 м над уровнем моря. Спектр измерений включает характеристики направления и скорости ветра (Gill R3-50, Gill Instruments Ltd., Великобритания), температуру и влажность воздуха (Vaisala HMP155, Vaisala Corp., Финляндия), количество атмосферных осадков (TRM-525M, Texas

Electronics Inc., США). Данные измерений сохраняются на регистраторе данных Sutron 9210 X Lite (Sutron Corp., США). Метеорологические исследования реализуются в качестве вспомогательных в рамках круглогодичного мониторинга концентраций диоксида углерода, метана и водяного пара в приземной атмосфере. Для обобщения данных был использован метод метеорологических наблюдений. Для расчетов использован стандартный анализ статистических данных, а полученные значения выражены в разрешении срочных, средних месячных и средних годовых интервалов для всего периода наблюдений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 1 приведена сводная диаграмма средних месячных значений температуры воздуха (а), относительной влажности воздуха (б), скорости ветра (в) и атмосферных осадков (г), зарегистрированных в период наблюдений на измерительной станции (с 09.2018 по 02.2020 год).

Изменчивость температуры имеет характерные зависимости, связанные с сезонными процессами атмосферной циркуляции в арктической зоне северного полушария, и районе исследования, в частности. Так наибольшая амплитуда температуры воздуха регистрируется в холодные месяцы (ноябрь - апрель), тогда как в летние месяцы эта величина более постоянна (рис. 1а). Среднегодовая температура воздуха достигает $-8,03^{\circ}\text{C}$. В летние месяцы средняя температура не превышает $5,0^{\circ}\text{C}$. Максимум наблюдается в августе, средняя температура которого составляет $9,15^{\circ}\text{C}$. Средняя температура в весенние и осенние месяцы колеблется около $-4,4^{\circ}\text{C}$. Максимальное отрицательное значение температуры воздуха в зимний период, как и летом, сдвинуто от центральных месяцев, так самым холодным зимним месяцем является февраль $-22,8^{\circ}\text{C}$. Средняя температура в зимний период составила $-17,9^{\circ}\text{C}$. Средний годовой показатель относительной влажности воздуха достигает 86,8%, что является довольно высоким значением, которое напрямую связано с полярным морским типом климата. Годовая изменчивость относительной влажности варьирует от 78,62% в феврале (рис. 1б) до 93,65% в июне. Наибольшее летнее значение относительной влажности наблюдается в июне, тогда как годовые пики осадков приходятся на август (43,6 мм) и сентябрь (42,9 мм) (рис. 1в). Этот сдвиг можно объяснить сильным влиянием таяния снега в начале лета, что, несомненно, приводит к увлажнению воздуха. Абсолютный минимум отмечен в июле, когда на фоне высоких значений температуры воздуха (рис. 1а), показатели относительной влажности воздуха снижались до 35,8% (рис. 1б). Среднегодовая величина атмосферных осадков составила 143,4 мм (рис. 1в), с минимумом, отмеченным в зимний период - 8 мм. Максимум

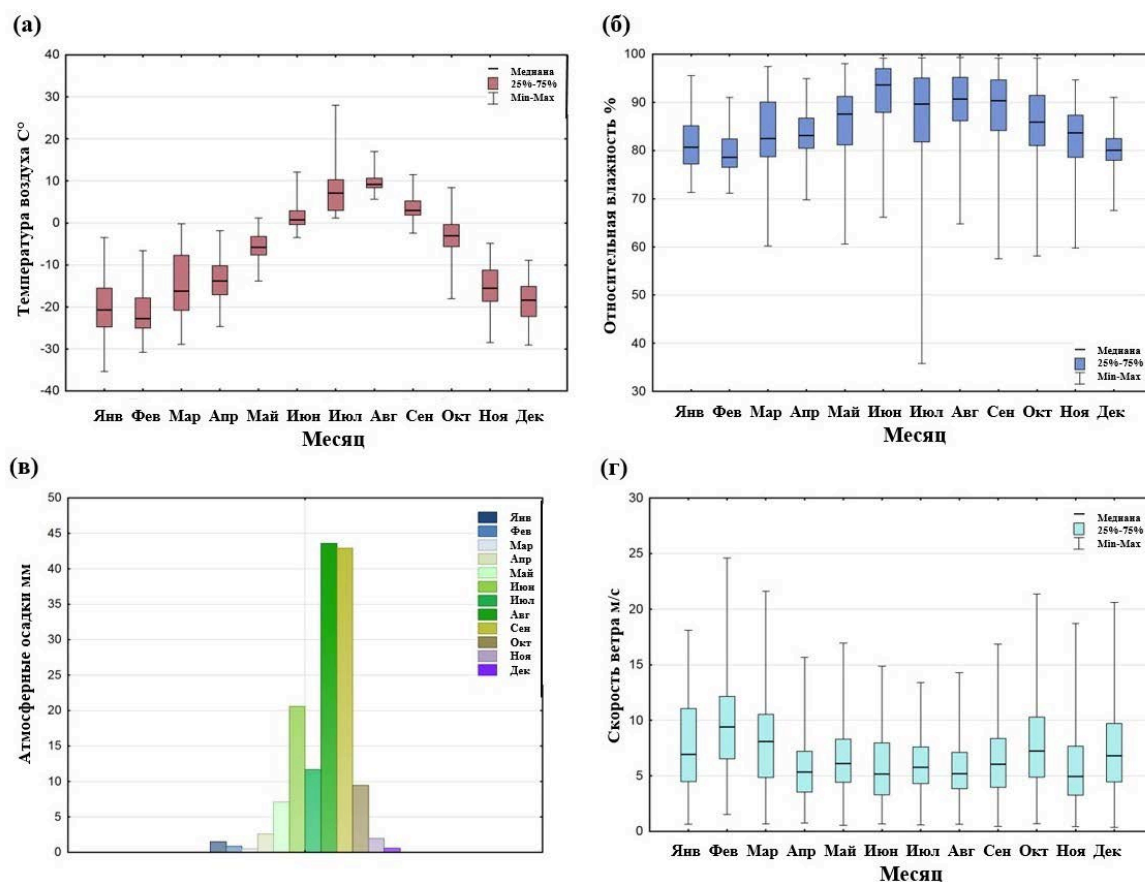


Рис. 1. Температура воздуха (а), относительная влажность (б), скорость ветра (в) и количество осадков (г) за период измерений.

осадков наблюдается летом - 118,8 мм. В весенние и осенние месяцы среднее количество осадков не превышает 16,5 мм (рис. 1в). Средние показатели скорости ветра, на исследуемой территории за весь период наблюдений, имеют довольно значительную величину 6,4 м/с (рис. 1г). Более высокие средние значения, зарегистрированы в зимние месяцы (7,2 м/с), а более низкие летом (5,5 м/с). Максимальные показатели наблюдаются в феврале 9,4 м/с. В течение сезонов амплитуда средних месячных показателей скорости ветра довольно постоянна.

На рисунке 2 представлен линейный регрессионный анализ данных измерений и рядов метеоданных со станции «Остров Диксон» (ВМО ID: 20647), расположенной на расстоянии ~ 3,5 км. к северо-западу от места наших наблюдений. Результаты показывают высокую корреляцию сравниваемых значений. Так значения температуры воздуха ($r = 0,98$) (рис. 2а) имеют весьма высокую связь по шкале Чеддока. Скорость ветра ($r = 0,83$) (рис. 2в) и относительная влажность воздуха ($r = 0,72$) (рис. 8б) относятся к показателям с высокой связью. Вместе с тем, для направления ветра ($r = 0,59$) (рис. 8г) отмечена лишь заметная связь.

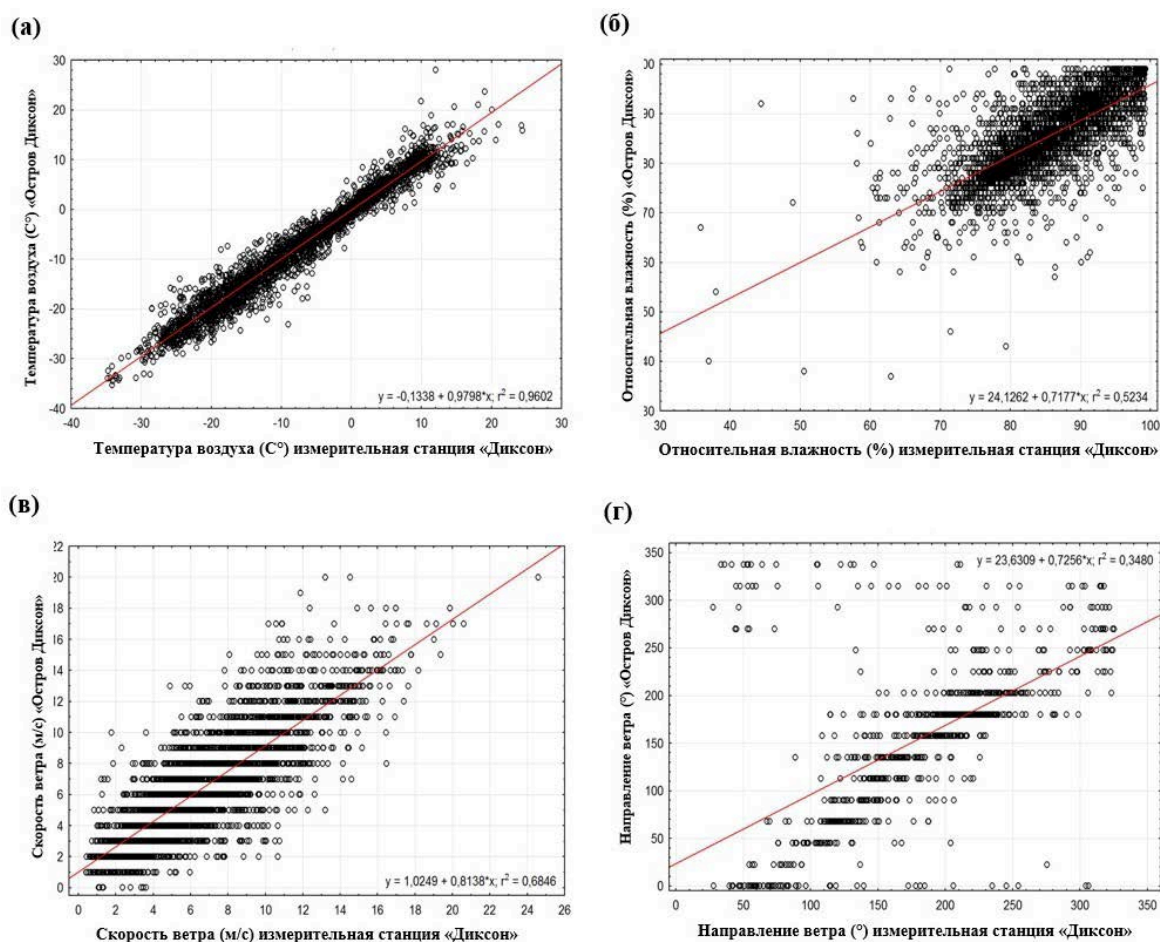


Рис. 2. Линейный регрессионный анализ данных измерений и рядов метеоданных со станции «Остров Диксон» (ВМО ID: 20647), где (а) температура воздуха, (б) относительная влажность воздуха, (в) скорость ветра и (г) направление ветра.

Таким образом, результаты, полученные в ходе инструментального мониторинга климатических условий в районе исследований, характеризуют состояние приземной атмосферы и происходящих в ней процессов и позволяют оценить структурные закономерности метеорологических условий в арктической полярной области.

Данная работа была выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований, гранты № 18-05-00235

ЛИТЕРАТУРА:

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В. В. Ясюкевич, В. А. Говоркова, И. А. Корнева, Т. В. Павлова, Е. Н. Попова — г. Москва: Росгидромет, 2014. — 58 с

Emergent properties of climatic system according to weather stations' data in the Northern Hemisphere

Tartakovsky V.A., Cheredko N.N., Maximov V.G.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, TomskRussia
E-mail: trtk@list.ru, atnik3@rambler.ru

It is common knowledge that the global climate system has its development trajectory, which is not formed only by changes in regional climates and weather elements. The variability of the latter is not always correctly evaluated individually since they are under the influence of the holistic system. This is supported by the low efficiency of existing climate forecasts.

The study of a climate system and the subsequent conceptual foresight are possible only by the identification of the emergent properties. They are associated with the presence of the system itself; they cannot be reduced to the properties of its subsystems or the superposition of the properties of individual elements. The definition of emergent properties is not obvious, but, apparently, the equilibrium state of the overall climate system is just that. However, the equilibrium of the climate system cannot be measured directly. It is necessary to introduce a measure of emergent properties, by calculating which it will be possible to quantify the equilibrium state of a holistic climate system in its development according to the results of observations.

The required measure of emergent properties is introduced as a correlation coefficient of extreme rates of temperature change. By construction, such a measure implicitly contains information on the assimilation of energy in the atmosphere, in the active soil layer, as well as on the transfer of air masses and on the boundaries of temperature fields in space and time.

These extreme rates were studied from 1956 to 2016 at 927 weather stations in the Northern Hemisphere of the Earth. The geographic localization of the rates corresponds to known ideas about the features of temperature variability.

For the first time, some relations inherent in the climate system were established. The measure of emergent properties is equal to 0.84 for the sample under study. This value conforms to the nonequilibrium state of high degree on Chaddock's scale for the holistic climate system. There are the more consistent subsystems with the measure equal up to 0.98. These groups of stations can potentially be the place, where processes stimulating the transition of the climate system to a new metastable state take their origin.

The long-term memory at the climate system was revealed that manifests in the coincidence of some of the time intervals between the opposite extrema with the duration of the known astronomical cycles. Cyclical movements are an immanent property of external forcing. Therefore, the established unique properties are general, and the values of the measure will be repeated in the future in a part that does not depend on the internal factors of the climate system. In such a context, the values of the correlative measure of emergent properties can be used as a test of climate models and serve the purpose of adjusting them.

It is clear that the sensitivity of the measure to changes in the state of the climate system is yet unknown; the ways of applying it require further study. However, the physical conditionality, the possibility of comparing the theoretical and observed values deserve attention. In any case, the introduction of the correlative measure of emergent properties appeared to be justified. The unique properties of the climate system were established; and a new tool for studying its development was proposed.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Эмерджентные свойства климатической системы по данным метеостанций Северного полушария

Тартаковский В.А., Чередыко Н.Н., Максимов В.Г.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
E-mail: trtk@list.ru, atnik3@rambler.ru

Климатическая система Земли рассматривается как композиция большого числа физических величин, элементов системы, которые взаимодействуют между собой и с окружающей средой. При этом в ней поддерживается равновесное состояние, при котором термодинамические харак-

теристики меняются достаточно медленно. Такая система характеризуется как открытая система, находящаяся в так называемом проточном равновесии [1].

Понятие системы неотделимо от ее эмерджентных свойств [2], которые нельзя свести к свойствам подсистем или суперпозиции свойств отдельных элементов системы. Определение эмерджентных свойств не очевидно, но, по всей видимости, характеристики равновесного состояния целостной климатической системы именно таковыми и являются. Тем более, что текущий климат испытывает значительные трансформации.

Однако равновесность климатической системы не может быть измерена непосредственно. Необходимо ввести меру эмерджентных свойств, путем расчета которой можно будет количественно оценить равновесность состояния целостной климатической системы в ее развитии по результатам наблюдений. Конструкция меры должна определяться функционалом, который зависит от всех процессов в климатической системе, насколько они могут быть выбраны на основе эмпирических идей. В любом случае критерием эффективности выбранной меры являются новые знания о системе.

Ранее мы определили климатические классы, используя синхронизм температурных колебаний [3]. Количество и локализацию классов можно использовать в качестве меры, но требуется разработка этой идеи. В данном случае требуемая мера эмерджентных свойств вводится иным путем: как коэффициент корреляции экстремальных скоростей изменения температуры. Такая мера неявно содержит информацию об ассимиляции энергии в атмосфере, в активном слое почвы, а также о переносе воздушных масс и границах температурных полей в пространстве и времени. Применение скоростей изменения температуры позволяет подавить региональные различия и повысить чувствительность введенной меры к общим закономерностям целостной системы.

Для расчетов использовались ряды среднемесячных температур в приземном слое атмосферы, измеренные с 1955 по 2016 год на 927 метеостанциях в Северном полушарии, и предоставленных Университетом Восточной Англии [4]. Станции были выбраны при условии, что общий период, характеризующий отсутствием данных, не превысил 3% от числа рассмотренных среднемесячных значений. Среднегодовые температуры на каждой метеостанции были получены путем усреднения среднемесячных значений в течение календарного года. Затем были рассчитаны ряды нисходящих разностей среднегодовых температур с использованием приращения в один год. Эти разности как скорости изменения температуры использовались для расчета экстремальных скоростей в интервале наблюдений и на каждой метеостанции.

Рассчитанное распределение экстремумов скоростей по континентам, соответствует географии климата. Изменчивость температурного режима увеличивается в условиях высоких широт и растущей континентальности, в местах, подверженных влиянию теплого течения Аляски и Гольфстрима изменчивость уменьшается. Максимальная изменчивость $0,12^{\circ}\text{C}/\text{год}$ выявлена на станциях Барроу в США, ГМО им. Кренкеля и о. Визе в России, они расположены выше 70°с.ш.

Также были рассчитаны на каждой метеостанции суммы противоположных экстремумов, максимумов и минимумов. По определению максимум скорости изменения температуры всегда положительный, а минимум отрицательный. На большинстве метеостанций эти суммы находятся в диапазоне $\pm 0,5^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Наибольшими различиями максимумов и минимумов характеризуются северные части Средней и Восточной Сибири, территории Приамурско-Охотской области, Южной Аляски. Среднее значение сумм экстремумов для всех 927 метеостанций составляет $0,03^{\circ}\text{C}/\text{год}$, среднеквадратичное значение сумм равно $0,56^{\circ}\text{C}/\text{год}$, 95% доверительный интервал равен $0,04^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Гистограмма распределения сумм экстремумов была достаточно симметрична с коэффициентом асимметрии равным 0,014. Явных особенностей географической локализации этих сумм выявлено не было.

Момент времени появления максимумов или минимумов для каждой метеостанции свой. Но временная дистанция между этими экстремумами имеет особенности. Некоторые дистанции совпадают с длительностью известных астрономических циклов. Наиболее вероятная дистанция наблюдается у 19,6% метеостанций, она равна одному годичному орбитальному циклу. Дистанция в 19 лет наблюдается на 6,9% метеостанций, что совпадает с продолжительностью известного лунно-солнечного цикла [5-7]. На 5% метеостанций наблюдается 15-летняя дистанция между противоположными экстремумами, она сопоставима с длительностью цикла обратной связи между ледяным покровом арктических морей и Арктическим колебанием [8] и циклом интенсивности тропической тихоокеанской изменчивости [9]. Имеется некоторая региональная обусловленность обсуждаемых совпадений.

Мера эмерджентных свойств климатической системы, т.е. коэффициент корреляции противоположных экстремумов скоростей изменения температуры, была рассчитана для всей системы 927 метеостанций и для подсистемы, в которой суммы противоположных экстремумов находятся в диапазоне $\pm 0,5^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Таких сумм было 623, т.е. 67% от общего числа метеостанций. Экстремумы определялись на интервалах наблюдения от 20 до 60 лет. На характерном интервале в 30 лет мера для 927 метеостанций достигала значения 0,81. После 55 лет наблюдалось асимптотическое насыщение, и мера достигала значения 0,84 для 60 летнего интервала. На тех же самых интервалах, мера для подсистемы 623 станций монотонно возрастала без признаков насыщения и достигала значения 0,98. Для ранжирования значе-

ний меры удобна шкала Чеддока, в рассматриваемом случае вся система будет характеризоваться сильной согласованностью элементов, а ее подсистема очень сильной [10].

Из того факта, что корреляционная мера эмерджентных свойств для всей системы метеостанций имеет во времени асимптоту следует, что в реальной климатической системе существует естественный сильный уровень согласованности элементов, характеризуемый величиной 0,84. Этот уровень в настоящее время стабилен, и для его оценки достаточно 60-летнего периода наблюдения.

Проведем интерпретацию известных концепций теории систем, например, [11], для рассматриваемого случая. Как известно, в состоянии полной равновесности элементы системы, в данном случае экстремумы, должны вести себя независимо друг от друга, и корреляционная связь у них будет отсутствовать, т.е. существует обратная зависимость между согласованностью поведения элементов системы и равновесностью состояния системы. Усиление воздействия на систему вызывает более согласованное поведение ее элементов. Коэффициент корреляции экстремумов при этом будет увеличиваться, а равновесность состояния уменьшаться. Таким образом, введенная мера адекватна комплексу процессов в системе и характеризует предлагаемое эмерджентное свойство, а именно равновесность состояния климатической системы.

Часть климатической системы, характеризуемая 623 метеостанциями, имеет очень сильный потенциал неравновесности, так как между элементами этой подсистемы существует очень сильная согласованность по шкале Чеддока. Этот факт может быть причиной того, что небольшое внешнее воздействие нарушит существующее метастабильное состояние. Однако, также возможно, что климатическая система, будет стабилизирована оставшимися $972-623=349$ элементами, которые из-за процессов в геосфере потеряли значительное количество внешней энергии и характеризуются умеренной согласованностью, мера равна 0,587. С другой стороны, климатическая система по определению не сводится к указанным подсистемам, свойства которых могут проявляться только в рамках целостной системы. Таким образом, существуют проблемы, решение которых требует дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гленсдроф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / под ред. Ю.А. Чизмаджеева – М.: Мир, 1973. 280с.
2. Mill J.S. *A system of logic: ratiocinative and inductive.* – Honolulu: University Press of the Pacific, 2002. 622 p.
3. Cheredko N.N., Tartakovsky V.A., Krutikov V.A., Volkov Y.V. *Climate classification in the Northern Hemisphere using phases of temperature signals // Atmospheric and Oceanic Optics.* 2017. V. 30. N 1. P. 63-69. DOI:10.1134/S1024856017010043.
4. Архив Университета Восточной Англии [Электронный ресурс]. URL: <http://www.metoffice.gov.uk>, <http://www.cru.uea.ac.uk> (дата обращения 01.12.18).
5. Максимов И.В. Геофизические силы и воды океана : моногр. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 447 с.
6. O'Brien D.P., Currie R.G. *Observations of the 18.6-year cycle of air pressure and a theoretical model to explain certain aspects of this signal // Clim. Dyn.* 1993. V. 8. P. 287-298. <https://doi.org/10.1007/BF00209668>.
7. Wilson I.R.G., Sidorenkov N.S. *A Luni-Solar Connection to Weather and Climate I: Centennial Times Scales // J. Earth Sci. Clim. Change.* 2018. V. 9. Iss. 1. 1000446. doi: 10.4172/2157-7617.1000446.
8. Mysak L. and Venegas S. *Decadal climate oscillations in the Arctic: A new feedback loop for atmosphere-ice-ocean interaction // Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. Iss. 19. P. 3607-3610. doi: 10.1029/98GL02782.
9. F., Yu J-Y. *A 10-15-year modulation of cycle of ENSO intensity // J Clim.* 2009. V. 22. P. 1718-1735. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2285.1>.
10. Chaddock R.E. *Principles and Methods of Statistics (1st Edition).* – Boston: Houghton Mifflin Co., 1925. 471 p.
11. Пригожин И., Стенгерс И. *Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой.* – М., 1986.

Monitoring cumulus clouds using global horizontal irradiance data

¹Zuev S.V., ^{1,2}Krasnenko N.P.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

E-mail: zuev@imces.ru, krasnenko@imces.ru

Continuous monitoring of cumulus clouds (*Cu*) is necessary because they are the basis for the formation of cumulonimbus (*Cb*), sources of dangerous meteorological phenomena (showers, thunderstorms, squalls, tornadoes, hail). In addition or replacing human observations of the sky condition, an amplitude and variational analysis of current actinometric data can be used. In the simplest case this can be global horizontal irradiance (GHI) Q , the sum of direct S' and diffuse horizontal D irradiance, measured by an unshaded pyranometer. Typically, before amplitude analysis, the non-stationary time series of the GHI is converted to a stationary time series using any clear-sky model. But the development of such model is a not easy task and requires some directly measured and reference data [1-3]. The authors previously proposed a method for detecting *Cu* without using a clear sky model [4]. This is possible when short 21-minute samples of the GHI time series (± 10 minutes near the analysis point) are considered as stationary and only variational analysis is applied to them.

Specific features of cumulus clouds are high optical density, distinct contours and clear sky between individual clouds. Therefore, the solar disk almost all the time is either fully open and $S' = S'_{max}$ or it is fully closed and $S' = 0$. As a result, a very heterogeneous time series of the global horizontal irradiance is formed. It was found the variation coefficient for the 21-minute moving window is $V_{21} \geq 0.33$, cumuliiform clouds *Cu hum.*, *med.*, *Ac cuf.* or *Sc cuf.* are present in the sky with a 70-80% probability. Later it turned out that stratus *St* and nimbostratus *Ns* clouds can also have similar variational characteristics. To reduce such detector errors, an additional analysis of the variation coefficient of the 3-minute window (± 1 minute near the analysis point) moving inside the analyzed 21-minute sample was added. If this coefficient $V_3 \geq 0.33$ for at least one point, this indicates the presence of sharp changes in GHI, typical for cumulus.

Comparison two detector versions with using All-sky images and a binary classifier showed an additional analysis of coefficient V_3 led to an increase in the accuracy of cumulus detection by an average of 7% with a decrease in the completeness of sampling by 6%. Errors of detecting *Ac cuf.* and *Sc cuf.* as cumulus decreased on average by more than 50%. Errors with *St* and *Ns* completely disappeared, and errors with *Ci* decreased by more than 6 times.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education (Project IX.138.2.5 "Scientific and methodological foundations for develop and use of technologies and information-measuring systems for remote monitoring of the lower atmosphere").

REFERENCES:

1. C.E. Duchon, M.S. O'Malley. *Estimating cloud type from pyranometer observations*. 1999. *J. Appl. Meteorol.* 38, pp. 132–141; doi:10.1175/1520-0450(1999)038<0132:ECTFPO>2.0.CO;2.
2. V. Badescu, C.F. Gueymard, S. Cheval, C. Oprea, M. Baciuc, A. Dumitrescu, F. Iacobescu, I. Milos, C. Rada. *Computing global and diffuse solar hourly irradiation on clear sky. Review and testing of 54 models*. 2012. *Renew Sustain Energy Rev.* 16, pp. 1636–1656; doi:10.1016/j.rser.2011.12.010.
3. M.J. Reno, C.W. Hansen, J.S. Stein. *Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis*. 2012. SANDIA report SAND2012-2389, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico; <https://doi.org/10.2172/1039404>.
4. S.V. Zuev, N.P. Krasnenko. *Simplified method for monitoring of Cumulus clouds using global horizontal irradiance*. 2019. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 386, p. 012044; doi:10.1088/1755-1315/386/1/012044.

Мониторинг кучевой облачности по данным суммарной радиации

¹Зуев С.В., ^{1,2}Красненко Н.П.

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск Россия

E-mail: zuev@imces.ru, krasnenko@imces.ru

Кучевые облака - это основа для формирования кучево-дождевых облаков, являющихся источниками различных опасных метеорологических явлений, таких как ливни, грозы, шквалы, смерчи и град. Непрерывный мониторинг облачности позволяет своевременно обнаруживать кучевые облака и заблаговременно, в режиме наукастинга, получать информацию о возможности формирования кучево-дождевых облаков. Определение форм облачности при наблюдении с земной поверхности является сложной для автоматизации задачей. Вариантом для дополнения или полной замены визуальных наблюдений за состоянием небосвода может стать амплитудный и вариационный анализ текущей актинометрической информации.

В качестве анализируемой информации может использоваться измеренная с помощью незатененного пиранометра суммарная радиация Q , определяемая как сумма прямой S' и рассеянной D радиации. Предварительно, для проведения амплитудного анализа, временной ряд суммарной радиации приводят к стационарному виду с помощью какой-либо модели ясного неба. Известно много различных способов построения таких моделей [1-3]. Как правило, для этого требуются непосредственно измеряемые на земной поверхности параметры атмосферы – влажность, температура, давление и др., и некоторые справочные данные (коэффициенты рассеяния газов и аэрозолей, местные средние климатические характеристики и др.). Получение и обработка такой информации обычно связана с определенными трудностями. Предложенный ранее авторами в [4] метод детектирования кучевой облачности позволяет отказаться от использования модели ясного неба. Это возможно, если небольшие 21-мин. выборки временного ряда суммарной радиации (± 10 мин. от точки анализа) принять за стационарные и анализировать их только на вариативность.

Применительно к суммарной радиации вариационный анализ дает оценку частоты смены степени покрытия солнечного диска облаками различной плотности и скорости их перемещения в зенитной и околозенитной области над точкой наблюдения. Слоистообразные облака (Cs , As , Ns) и безоблачное небо имеют коэффициенты вариации близкие к нулю. Более динамичная волнистообразная облачность (Cc , Ac , Sc , St) формирует средние значения коэффициентов вариации. Отличительной особенностью кучевообразной облачности ($Ac\ cuf.$, $Sc\ cuf.$, Cu) является их высокая оптическая плотность и наличие участков ясного неба в просветах между отдельными облаками или грядами. Это приводит к тому, что такие облака при своем движении с некоторой частотой, зависящей от их количества, горизонтальных размеров, размеров просветов между ними и от скорости движения, или полностью отрывают, или полностью покрывают диск Солнца. Если на небосводе присутствуют плотные кучевые облака, то солнечный диск практически все время находится в одном из двух устойчивых состояний – он или полностью открыт и прямая радиация $S' = S'_{max}$, или полностью закрыт и $S' = 0$. Соответственно, суммарная радиация при этом принимает следующие значения

$$\begin{cases} Q_{max} = S'_{max} + D, \\ Q_{min} = D, \end{cases}$$

что приводит к формированию очень неоднородного временного ряда суммарной радиации (Рис.1). Таким образом, задача обнаружения кучевой облачности может сводиться только к поиску неоднородных интервалов на временном ряде суммарной радиации с использованием 21-мин. скользящего окна. Предварительные исследования показали, что если для такой выборки коэффициент вариации $V_{21} \geq 0,33$, то с вероятностью 70-80% на небе присутствуют кучевообразные облака $Cu\ hum.$, $med.$, $Ac\ cuf.$ или $Sc\ cuf.$ Значение коэффициента вариации $V = 0,33$ в статистическом анализе считается порогом между однородными и неоднородными выборками. Также было обнаружено, что схожие вариационные характеристики могут иметь слоистые St и слоисто-дождевые Ns облака, что обусловлено большой чувствительностью коэффициента вариации к небольшим изменениям низких средних значений суммарной радиации. Для уменьшения или полного исключения таких ошибок при анализе необходимо использовать какой-либо дополнительный более жесткий критерий. Характерными особенностями $Cu\ hum.$ и $med.$ является наличие у них устойчивых четких краев и горизонтальных оснований. Это приводит к тому, что переход между значениями суммарной радиации Q_{max} и Q_{min} , как правило, занимает небольшое время. Следовательно, если внутри анализируемой 21-мин. выборки имеются резкие перепады между значениями Q_{max} и Q_{min} , то это является признаком присутствия искомых $Cu\ hum.$ и/или $med.$

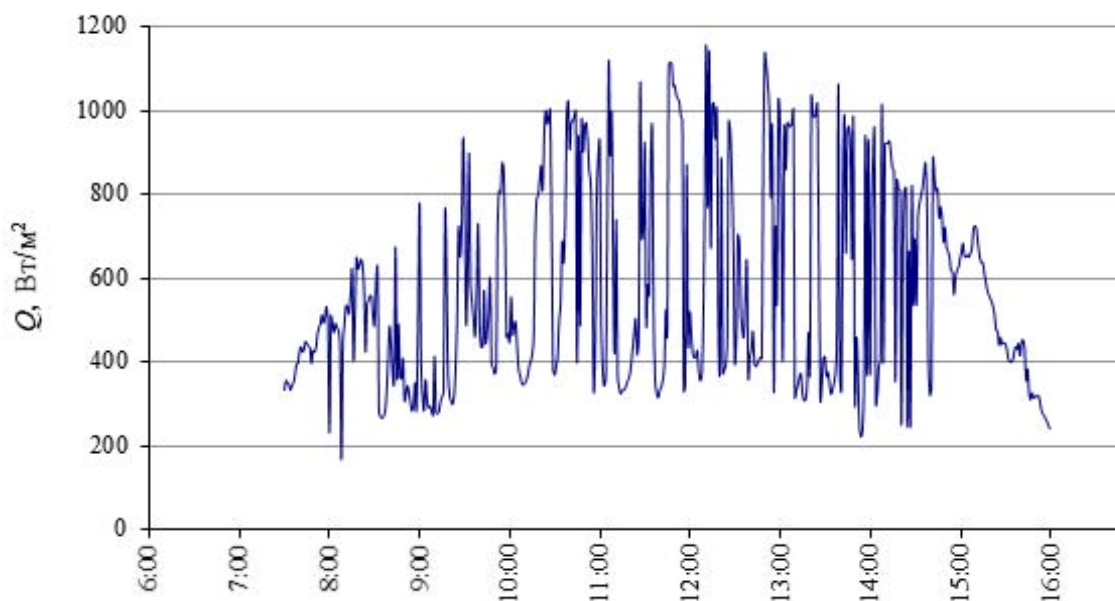


Рис.1. Пример суточного хода суммарной радиации при кучевой облачности 18 мая 2018 г. Геофизическая обсерватория ИМКЭС СО РАН (Томск).

Такие перепады можно обнаружить, например, анализируя коэффициент вариации 3-мин. скользящего окна (± 1 мин. от точки анализа) внутри выборки по условию $V_3 \geq 0,33$.

Для сравнения работы детектора кучевой облачности с анализом только V_{21} и $V_{21} + V_3$ использовались данные геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (Томск) по суммарной радиации за теплый период (май – август) 2018 г. пиранометра CM-11 (Kipp & Zonen, Нидерланды) при высоте Солнца $h > 30^\circ$. Проверка результатов детектирования проводилась с помощью бинарного классификатора путем визуального контроля по цветным панорамным изображениям All sky камеры MBK-1653ц (БайтЭрг, Россия), установленной в непосредственной близости от пиранометра, а также по данным одночасовых визуальных наблюдений.

Бинарный классификатор представляет собой решение задачи о принадлежности анализируемого состояния объекта к одному из двух классов по правилу “верно” или “неверно” [5]. Для случая мониторинга кучевой облачности есть четыре базовых комбинации для полученного результата (Рис. 2):

1. *True Positive (TP)* – детектор обнаружил Cu , на небосводе есть Cu ;
2. *True Negative (TN)* – детектор не обнаружил Cu , на небосводе нет Cu ;
3. *False Positive (FP)* – детектор обнаружил Cu , на небосводе нет Cu ;
4. *False Negative (FN)* – детектор не обнаружил Cu , на небосводе есть Cu .

		Предсказанное состояние	
		Cu есть	Cu нет
Реальное состояние	Cu есть	True Positive	False Negative
	Cu нет	False Positive	True Negative

Рис.2. Матрица сопряженности бинарного классификатора.

Качество работы обоих детекторов оценивалось по трем параметрам – точность выборки (Positive Predictive Value) $PPV = TP/(TP+FP)$, полнота выборки (True Positive Rate) $TPR = TP/(TP+FN)$ и гармоническое среднее точности и полноты выборки (F -мера) $F_1 = 2 \cdot PPV \cdot TPR / (PPV + TPR)$. Результаты приводятся в Таблице. Учитывая сложность разделения кучевой и кучево-дождевой облачности, находящейся над точкой наблюдения, определение состояния небосвода как Cu при реальном состоянии Cb

(по панорамным изображениям) принималось за положительный результат работы методики TP . Также не считалось ошибкой классификация низкого балла (1-3) кучевой облачности как ее отсутствие TN .

Таблица. Результаты работы детекторов кучевой облачности.

Месяц	Критерий	Кол-во точек анализа	TP	FP	FN	PPV	TPR	F_1	Количество точек FP				
									Ci fib.	Ac cuf.	Sc cuf.	St	Ns
Май	V_{2l}	14806	2821	440	316	0,86	0,90	0,88	0	191	244	0	5
	$V_{2l} + V_3$	14745	2051	191	390	0,91	0,84	0,88	0	79	112	0	0
Июнь	V_{2l}	13255	1885	723	677	0,72	0,74	0,73	125	365	223	0	18
	$V_{2l} + V_3$	13201	1556	344	722	0,82	0,68	0,74	17	233	94	0	0
Июль	V_{2l}	16913	2628	448	588	0,85	0,82	0,84	0	145	147	52	104
	$V_{2l} + V_3$	16853	2621	230	668	0,92	0,80	0,86	0	128	178	0	0
Август	V_{2l}	14784	2562	592	913	0,81	0,74	0,77	24	206	455	0	73
	$V_{2l} + V_3$	14732	1933	306	1037	0,86	0,65	0,74	5	167	139	0	0
Всего (сред.)	V_{2l}	59758	9907	2203	2494	(0,81)	(0,80)	(0,81)	149	907	895	52	200
	$V_{2l} + V_3$	59531	8188	1071	2817	(0,88)	(0,74)	(0,81)	22	607	442	0	0

Как видно из таблицы, применение дополнительного критерия в детекторе привело к увеличению точности определения кучевой облачности PPV в среднем на 7% при уменьшении полноты выборки TPR на 6%. Количество случаев ошибочно определенной кучевой облачности FP уменьшилось в среднем более чем на 50%. Полностью исчезли ошибки, связанные со слоистой St и слоисто-дождевой Ns облачностью. Значительно уменьшилось количество ошибок при перистой Ci облачности. Большинство случаев ложного детектирования Ci связано с присутствием высококучевой кучевообразной Ac cuf. и слоисто-кучевой кучевообразной Sc cuf. облачности, что обусловлено как их морфологической, так и генетической схожестью. Кроме того, облака таких форм визуально сложно разделять по панорамным изображениям, что приводит к неизбежным субъективным ошибкам. К другим недостаткам детектора можно отнести неполную фильтрацию состояний $Ci + Cu(Cb)$, что требует дополнительных исследований в этом направлении.

Предлагаемая методика позволяет практически в реальном времени, с задержкой в 10 мин., осуществлять мониторинг кучевой облачности со средним и высоким баллом. Ее реализация не требует значительных вычислительных мощностей, что особенно важно при создании сети мониторинга на базе автономных измерителей интегральной и ФАР суммарной радиации. Кроме того, возможно использование существующей сети актинометрических наблюдений Росгидромета, на точках которой проводятся непрерывные измерения суммарной радиации с помощью незатененного пиранометра.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН (Проект фундаментальных исследований СО РАН IX.138.2.5 "Научно-методические основы создания и использования технологий и информационно-измерительных комплексов для дистанционного мониторинга нижнего слоя атмосферы").

ЛИТЕРАТУРА:

1. C.E. Duchon, M.S. O'Malley. Estimating cloud type from pyranometer observations. 1999. *J. Appl. Meteorol.* 38, pp. 132–141; doi:10.1175/1520-0450(1999)038<0132:ECTFPO>2.0.CO;2.
2. V. Badescu, C.F. Gueymard, S. Cheval, C. Oprea, M. Baciu, A. Dumitrescu, F. Iacobescu, I. Milos, C. Rada. Computing global and diffuse solar hourly irradiation on clear sky. Review and testing of 54 models. 2012. *Renew Sustain Energy Rev.* 16, pp. 1636–1656; doi:10.1016/j.rser.2011.12.010.
3. M.J. Reno, C.W. Hansen, J.S. Stein. Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis. 2012. SANDIA report SAND2012-2389, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico; doi.org/10.2172/1039404.
4. S.V. Zuev, N.P. Krasnenko. Simplified method for monitoring of Cumulus clouds using global horizontal irradiance. 2019. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 386, p. 012044; doi:10.1088/1755-1315/386/1/012044.
5. T. Fawcett. An introduction to ROC analysis. 2006. *Pattern Recognition Letters.* 27(8), pp. 861–874; doi:10.1016/j.patrec.2005.10.010.

Long-term variations of total cloud cover in the south of Eastern Siberia

Devyatova E.V.

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk State University, Russia
E-mail: elenadevyatova4@gmail.com

Three optical observatories of the Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS in the south of Eastern Siberia are located. The observatories are equipped with instruments for observing the Sun, the near and far Space. The Baikal Astrophysical Observatory (BAO) is located in the outskirts of the settlement of Listvyanka on the south shore of Lake Baikal (51.86 N, 104.86 E). The Sayan Solar Observatory is located in the mountains at 2000m altitude (51.67 N, 100.99 E). These two observatories were built in the 60s – 70s of the last century. The third observatory is being built now in the settlement of Tory, Buryatia (51.78 N, 103.00 E).

The state of the atmosphere, through which the light passes, is of great importance for optical observations. The south of Eastern Siberia was once chosen for the construction of telescopes as a region with favorable astroclimatic conditions [1]. Meteorological characteristics that determine the astroclimatic conditions of the area are frequency of clear sky, transmissivity of the atmosphere and turbulence.

Our goal is to study the long-term dynamics of astroclimatically significant characteristics over the area observatories' location in order to find out how these characteristics have changed over the several decades that have passed since the first instruments were installed. In this paper, we study the long-term dynamics of total cloud cover (TCC), general characteristic related to the notion of clear sky frequency.

We used monthly mean TCC values (in %) derived from ERA-Interim 1979–2018 [2] with spatial resolution $1^\circ \times 1^\circ$ and from NCEP Reanalysis Gaussian Grid 1948–2019 [3]. We calculated TCC values averaged along $50,475^\circ$ N (NCEP) and along 51° N (ERA) over 101° – 105° E (5 grid points for ERA and 3 grid points for NCEP). Next, we calculated the annual mean values of TCC and anomalies of the annual mean TCC.

The ERA-Interim showed higher TCC values than the NCEP/NCAR. There are indirect evidences that the ERA-Interim data have incorrect values for a number of meteorological characteristics over the south of Eastern Siberia and Mongolia, approximately from 1979 to 1989. In particular, the comparison of TCC derived from the ERA-Interim with GPCC precipitation data showed the overestimated TCC values over the Selenga basin in summertime [4]. We also found that during the construction of the observatories and the first observations, there were only positive mean annual TCC anomalies. Since 2005 there were only negative TCC anomalies.

We assume that the long-term TCC dynamics may be due to the reasons that responsible for the precipitation decrease observed over the past two decades over the Selenga River basin (Mongolia, south part of Eastern Siberia west of Lake Baikal) in midsummer [5, 6]. One of such reasons may be changes in blocking activity both in Eastern Siberia and in the Eastern Hemisphere as a whole.

Долговременная изменчивость облачности на юге Восточной Сибири

Девяткова Е.В.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия
E-mail: elenadevyatova4@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

В середине 60-х годов 20 века СибИЗМИР (в настоящее время ИСЗФ СО РАН) начал строительство солнечных оптических обсерваторий на юге Восточной Сибири. Были основаны две оснащенные различными инструментами обсерватории: Байкальская астрофизическая на юго-западном берегу Байкала (п. Листвянка, Иркутская область) и Саянская солнечная в Восточных Саянах недалеко от п. Монды (р. Бурятия) на высоте 2000 м над уровнем моря. В настоящее время ИСЗФ СО РАН ведет строительство оптической обсерватории в п. Торы, р. Бурятия. Карта с расположением обсерваторий показана на рисунке 1.

При наблюдениях в оптическом диапазоне большое значение имеет состояние атмосферы, сквозь толщу которой проходит солнечный свет. Выбор мест для двух первых обсерваторий был обоснован

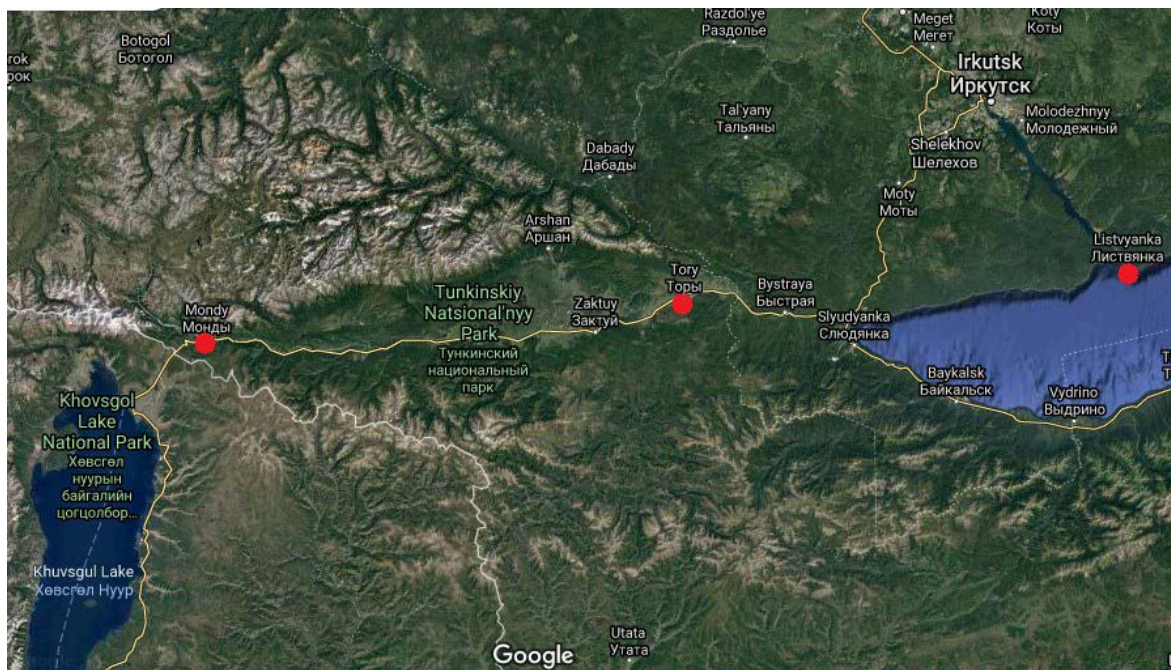


Рис. 1. Карта оптических обсерваторий ИСЗФ СО РАН. Географические координаты объектов:
п. Монды 51.67 град. с.ш., 100.99 град. в.д.; Торы 51.78 град. с.ш., 103.00 град. в.д.;
Листвянка 51.86 град. с.ш., 104.86 град. в.д.

особыми местными условиями: стабилизирующим влиянием на атмосферу холодной поверхности озера Байкал и высотой базирования инструментов в горах, позволяющей избежать искажения данных турбулентными движениями в самых плотных нижних слоях атмосферы. В целом юг Восточной Сибири был в свое время выбран для установки инструментов как регион с благоприятными астроклиматическими условиями [1]. Выводы в работе [1] основаны на данных справочников Гидрометеоцентра СССР, по которым для территории СССР были рассчитаны таблицы повторяемости ясного неба, одного из основных метеорологических факторов, влияющих на эффективность работы телескопов. Помимо повторяемости ясного неба важными астроклиматическими характеристиками, влияющими на эффективность работы оптических инструментов, являются прозрачность атмосферы и турбулентность.

Для нас представляет интерес изучить долговременную динамику астроклиматически значимых характеристик в регионе базирования обсерваторий ИСЗФ СО РАН и узнать, как изменились эти характеристики за несколько десятилетий, прошедших с момента установки инструментов. К решению этой задачи мы планируем привлечь данные реанализов и данные метеорологических наблюдений, находящиеся в свободном доступе.

В данной работе на основе данных реанализов мы изучаем динамику одной из самых общих характеристик, имеющих отношение к понятию повторяемости ясного неба – общую облачность (Total Cloud Cover – TCC).

ДАННЫЕ И МЕТОД

Среднемесячные данные ERA-Interim 1979–2018 [2], разрешение по пространству $1^\circ \times 1^\circ$. На широте 51° с.ш. в интересующий нас диапазон долгот (101° – 105° в.д.) попадает пять узлов сетки. За каждый месяц было произведено осреднение значений TCC в этих узлах.

Среднемесячные данные NCEP Reanalysis Gaussian Grid 1948–2019 [3]. На широте $50,475^\circ$ с.ш. в диапазон долгот 101° – 105° в.д. попадает три узла сетки, по которым производилось осреднение.

Далее были рассчитаны среднегодовые значения TCC и отклонения среднегодовых TCC от среднеголетнего значения (1981–2010).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рисунок 2 показывает графики среднемесячных значений TCC в регионе базирования обсерваторий. На рисунке, прежде всего, обращает на себя внимание то, что архив ERA-Interim демонстрирует более высокие значения TCC, чем архив NCEP/NCAR. Если по данным NCEP/NCAR самые высокие значения TCC за весь период 1948–2019 не превышают 75%, то по данным ERA-Interim с 1979 по 1989 показано, что значения TCC могли достигать от 75 до 85 %. Однако, имеются косвенные свидетельства того, что в этот период данные ERA-Interim показывают некорректные значения ряда метеохарактери-

стик над югом Восточной Сибири и Монголией. В частности, в работе [2] показано сравнение ТСС из архива ERA-Interim с данными об осадках GPCC над бассейном Селенги, свидетельствующее о завышенных значениях ТСС на этой территории в летний период.

На рисунке 3 показаны межгодовые вариации осредненных за год значений ТСС. В течение 50-х – 60-х годов 20-го века межгодовые колебания среднегодовых значений ТСС в основном происходили в интервале 45 – 50%. Начиная с 2005 года, они происходят в интервале 35 – 45%.

Рисунок 4 показывает межгодовую динамику аномалий ТСС относительно среднеемноголетнего значения. Согласно этим графикам, для периода строительства обсерваторий и первых наблюдений характерны исключительно положительные среднегодовые аномалии ТСС. Начиная с 2005 года, по данным обоих архивов отмечаются только отрицательные аномалии ТСС.

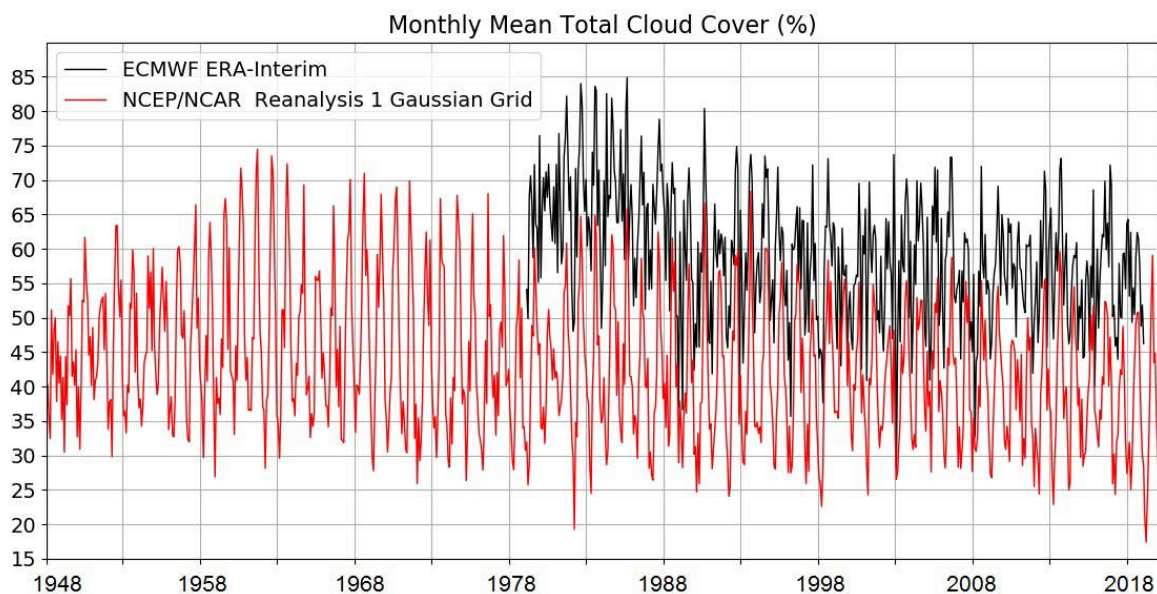


Рис. 2. Графики среднемесячных значений ТСС в регионе базирования оптических обсерваторий ИСЗФ СО РАН.

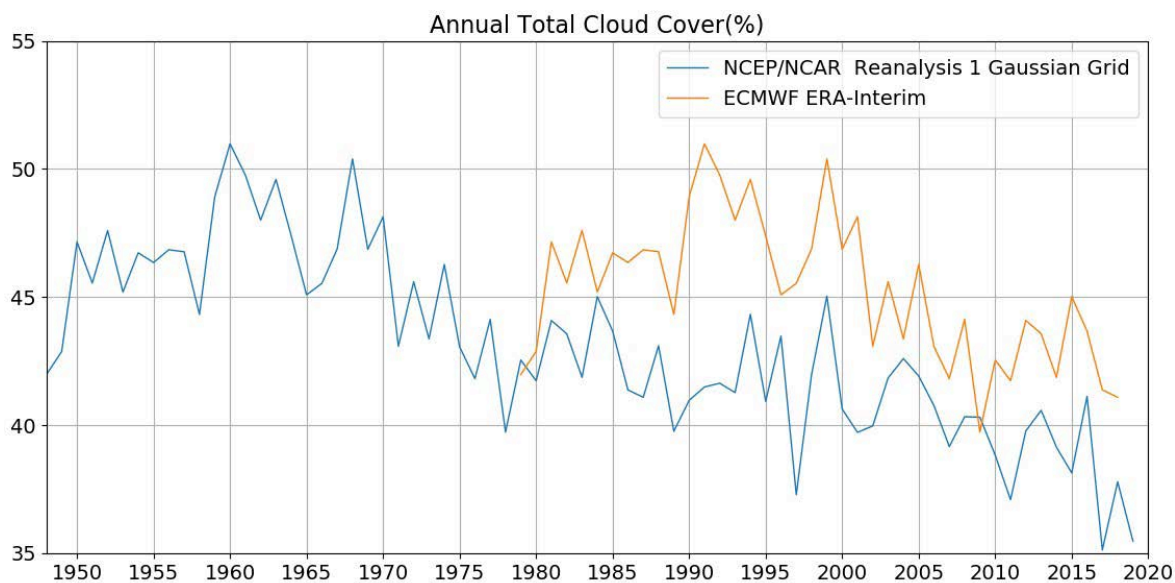


Рис. 3. Графики среднегодовых значений ТСС в регионе базирования оптических обсерваторий ИСЗФ СО РАН.

ОБСУЖДЕНИЕ

Имеется ряд работ по исследованию засушливого периода в бассейнах Байкала и его основного притока реки Селенги [3, 4, 5]. Оптические обсерватории находятся вне бассейнов этих водных объектов и расположены севернее и западнее бассейна Селенги. Но происходящие в бассейне Селенги и Байкала изменения могут быть частью крупномасштабных изменений, происходящих на большей площади

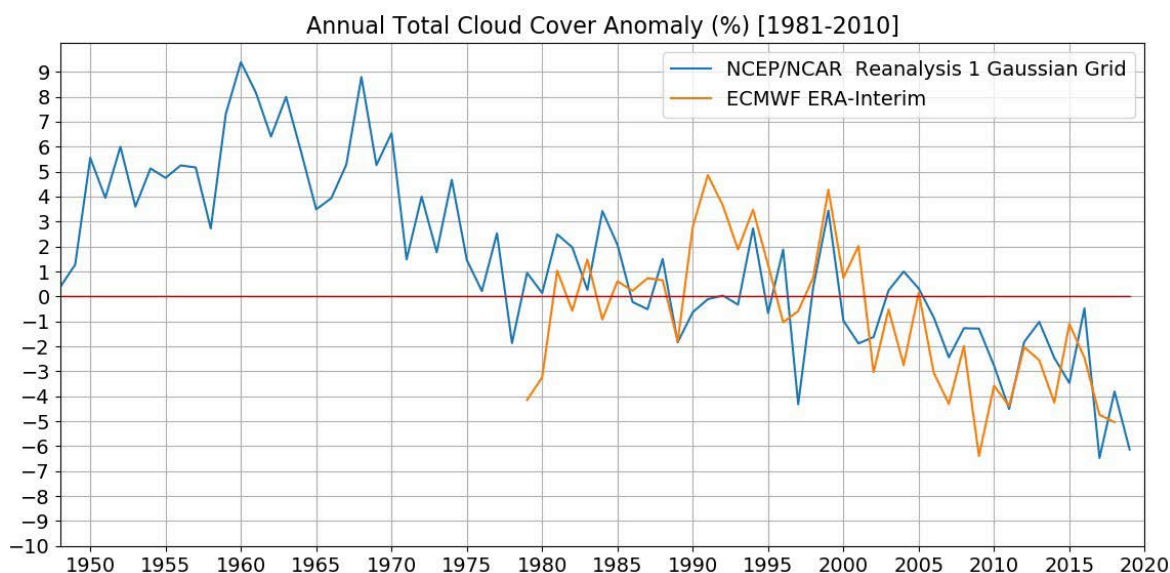


Рис. 4. Графики среднегодовых аномалий ТСС относительно среднемноголетнего (1981–2010) значения ТСС в регионе базирования оптических обсерваторий ИСЗФ СО РАН.

и обладающих широким спектром проявлений и влияний на природу и хозяйственную деятельность человека. Исследованное в перечисленных выше работах маловодье обусловлено долговременным снижением количества осадков, выпадающих в летний период в бассейне Селенги. Изменения в количестве осадков должны быть связаны с изменениями в облачности. На рисунке 5 мы приводим графики долговременного поведения ТСС в регионе базирования обсерваторий в летние месяцы. Графики показывают, что действительно, происходит длительное снижение ТСС здесь. Начиная с 1990 года, среднемесячные значения ТСС здесь не превышают 60%, а с 2008 года – 55% (за исключением июля 2012 и 2013 гг.). Таким образом, мы, скорее всего, имеем дело с одними и теми же тенденциями в интенсивности крупномасштабных процессов, охватывающими большую площадь, в том числе бассейн Селенги и область базирования обсерваторий ИСЗФ СО РАН. В работах [3, 4, 5] в качестве таких процессов рассматривается активность блокингов в Восточной Сибири и в целом в Восточном полушарии, что требует дальнейших исследований в этом направлении.

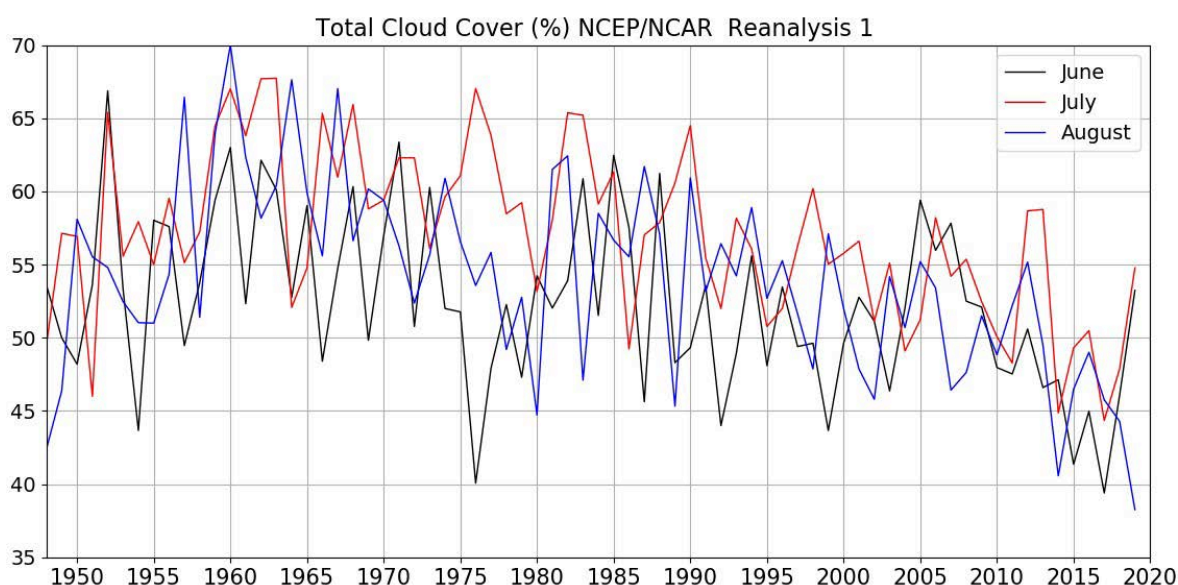


Рис. 5. Графики среднемесячных значений ТСС в регионе базирования оптических обсерваторий ИСЗФ СО РАН в летний период.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Дарчия Ш.П. Об астрономическом климате СССР. М: Наука, 1985.
2. Dee D.P. et. al. 2011 The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system *Q. J. R. Met. Soc.* 137 pp 553–597
3. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. – *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, vol. 77, No 3, pp. 437–471.
4. Devyatova Elena V., Olga Yu. Antokhina, Pavel N. Antokhin, Vladimir I. Mordvinov, Inna V. Latysheva, "Comparison of total cloud cover (ERA-Interim) and precipitation (GPCC) over Mongolia and southern part of Eastern Siberia in July," *Proc. SPIE* 11208, 2019, doi:10.1117/12.2538640
5. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Девятова Е.В., Мордвинов В.И. Динамические процессы в атмосфере, обуславливающие аномалии осадков в Восточной Сибири и Монголии в летний период // *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2018, № 1, С. 10–27
6. Антохина О.Ю. Атмосферные осадки в бассейне р. Селенги в июле и особенности крупномасштабной циркуляции атмосферы над Евразией // *География и природные ресурсы*, 2019, №4 С. 104–115 (Antokhina O.Yu. Atmospheric Precipitation Within the Selenga River Basin and Large-Scale Atmospheric Circulation Over Eurasia in July // *Geography and Natural Resources*, 2019, Vol. 40, No. 4, pp. 373–383.)
7. Antokhina O.Y., Latysheva I.V., Mordvinov V.I. A Cases Study of Mongolian Cyclogenesis During The July 2018 Blocking Events. *Geography, Environment, Sustainability*. 2019; 12(3):66–78.

Variations of meteorological and atmospheric electric quantities under the influence of mesoscale convective systems using the example of the city of Tomsk

²Zhukov D.F., ^{1,2}Pustovalov K.N., ¹Koshikova T.S., ^{1,2}Oglezneva M.V., ^{1,2}Nagorskiy P.M.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

²Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: den1szhukov@yandex.ru, const.pv@yandex.ru, tkoshikova@gmail.com, oglezneva.m@yandex.ru, npm_sta@mail.ru

In the second half of the XX – beginning of the XXI centuries in the regions of Northern Eurasia, an increase in the proportion of convective clouds was noted [1]. The most dangerous manifestations of convective cloudiness are mesoscale convective systems (MCSs), in particular, mesoscale convective complexes (MCC) and squall lines (SL) [2]. The aim of the work was to analyze variations in atmospheric electric and meteorological quantities during the passage of the MCSs near the city of Tomsk for the period 2017–2019.

The following data were used for the research: satellite images according to the MODIS and VIIRS spectroradiometers [3]; measurement data of the electric field potential gradient ($\nabla\varphi$) and meteorological quantities at the geophysical observatory of IMCES SB RAS; coordinates of lightning discharges according to WWLLN (World Wide Lightning Location Network) [4].

Based on the research, the following characteristics of variations in electrical and meteorological values during the passage of the MCSs are noted:

- the duration of the "slow variations" $\nabla\varphi$ – from 2 h 10 min to 4 h 15 min;
- extreme average minute values $\nabla\varphi$ – $5 \div 19$ kV/m;
- the number of Cloud-to-ground lightnings – $1 \div 57$;
- maximum speed of the horizontal component of the wind – $4 \div 16$ m/s;
- maximum speed of the vertical component of the wind – $0,9 \div 3,3$ m/s;
- the duration of rainfall – from 25 min to 1 h 20 min;
- total amount of precipitation – $0,5 \div 8,8$ mm;
- maximum intensity of precipitation – $0,09 \div 0,65$ mm/min

Acknowledgements: This work was supported by the grant of the President of the Russian Federation (MK-489.2020.5).

REFERENCES:

1. Chernokulsky A.V., Bulygina O.N., Mokhov I.I. Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations // *Environ. Research Letters*. – 2011. – V. 6, № 3. – P. 035202.
2. Vel'tishchev N.F., Stepanenko V.M. *Mezometeorologicheskiye protsessy*. – M.: MSU, 2006. – 101 p.

3. EOSDIS Worldview [Электронный ресурс]. – URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (дата обращения: 15.04.2020).
4. World Wide Lightning Location Network: [Электронный ресурс]. URL: <https://wwlln.net/> (дата обращения: 20.04.2020).
5. Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M. The main types of electric field variations during the passage of cumulonimbus clouds of different genesis // *Optika Atmosfery i Okeana*, 2016. – V. 29, № 8. – P. 647–653.
6. Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M. Response in the surface atmospheric electric field to the passage of isolated air mass cumulonimbus clouds // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018. – V. 172. – P. 33–39.

Вариации метеорологических и атмосферно-электрических величин под воздействием мезомасштабных конвективных систем на примере г. Томска

²Жуков Д.Ф., ^{1,2}Пустовалов К.Н., ¹Кошикова Т.С., ^{1,2}Оглезнева М.В., ^{1,2}Нагорский П.М.

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: den1szhuk0v@yandex.ru, const.pv@yandex.ru, tkoshikova@gmail.com, oglezneva.m@yandex.ru, npm_sta@mail.ru

Во второй половине XX – начале XXI вв. в регионах Северной Евразии, отмечалось увеличение доли конвективных облаков [1]. Сохранение данной тенденции приведёт к дальнейшему увеличению повторяемости конвективных облаков и связанных с ними неблагоприятных и опасных явлений: грозы, града, интенсивных ливневых осадков, шквалов и др. Наиболее опасными проявлениями конвективной облачности являются мезомасштабные конвективные системы (МКС), в частности мезомасштабные конвективные комплексы (МКК) и линии шквалов (ЛШ) [2]. При этом на юге Западной Сибири отмечается один из очагов высотной повторяемости мезомасштабных конвективных систем [3]. Таким образом, исследование МКС и связанных с ними явлений на данной территории видится весьма актуальным.

Целью данной работы является анализ вариаций метеорологических и атмосферно-электрических величин в г. Томске при прохождении мезомасштабных конвективных систем за период 2017–2019 гг.

Для исследования были использованы следующие данные:

- 1) спутниковые изображения в видимой части спектра (RGB-композиции), полученные по данным спектрорадиометров MODIS (спутники Terra и Aqua) и VIIRS (спутник Suomi NPP), на портале EOSDIS Worldview [4];
- 2) данные измерений градиента потенциала электрического поля, скорости (горизонтальной и вертикальной составляющих) и направления ветра, атмосферного давления, плотности воздуха, абсолютной и относительной влажности воздуха, интенсивности осадков, полученные на геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (ГО ИМКЭС);
- 3) координаты разрядов молний, зарегистрированных Всемирной грозопеленгационной сетью WWLLN (World Wide Lightning Location Network) [5].

На первом этапе на основе спутниковых изображения в видимой части спектра, полученных по данным дневных пролётов спутников Terra, Aqua и Suomi NPP производилось дешифрирование случаев прохождения МКК и ЛШ через г. Томск. Всего за период 2017–2019 гг. было отобрано 12 случаев прохождения мезомасштабных конвективных систем.

Затем для отобранных случаев прохождения мезомасштабных конвективных системы выделялись интервалы с данными измерений градиента потенциала электрического поля и различных метеорологических величин на ГО ИМКЭС, а также выполнялся расчёт интенсивности грозы (количества разрядов молний за период 10 мин) в ближней зоне пункта мониторинга (радиус 20 км). На основе подготовленных данных строились тематические рисунки, представляющие собой комплексы синхронизированных по времени графиков вариаций анализируемых величин.

Рассмотрим детально типичные примеры вариаций атмосферно-электрических и метеорологических величин при прохождении МКК (рис. 1) и ЛШ (рис. 2).

Согласно рисунку 1, при прохождении МКК 25.06.2017 г. длительность «медленных вариаций» $\nabla\varphi$ (интервала времени между первым и последним выходом за границы невозмущённого электрического поля – 0–500 В/м), обусловленных влиянием на приземное электрическое поле объёмных электриче-

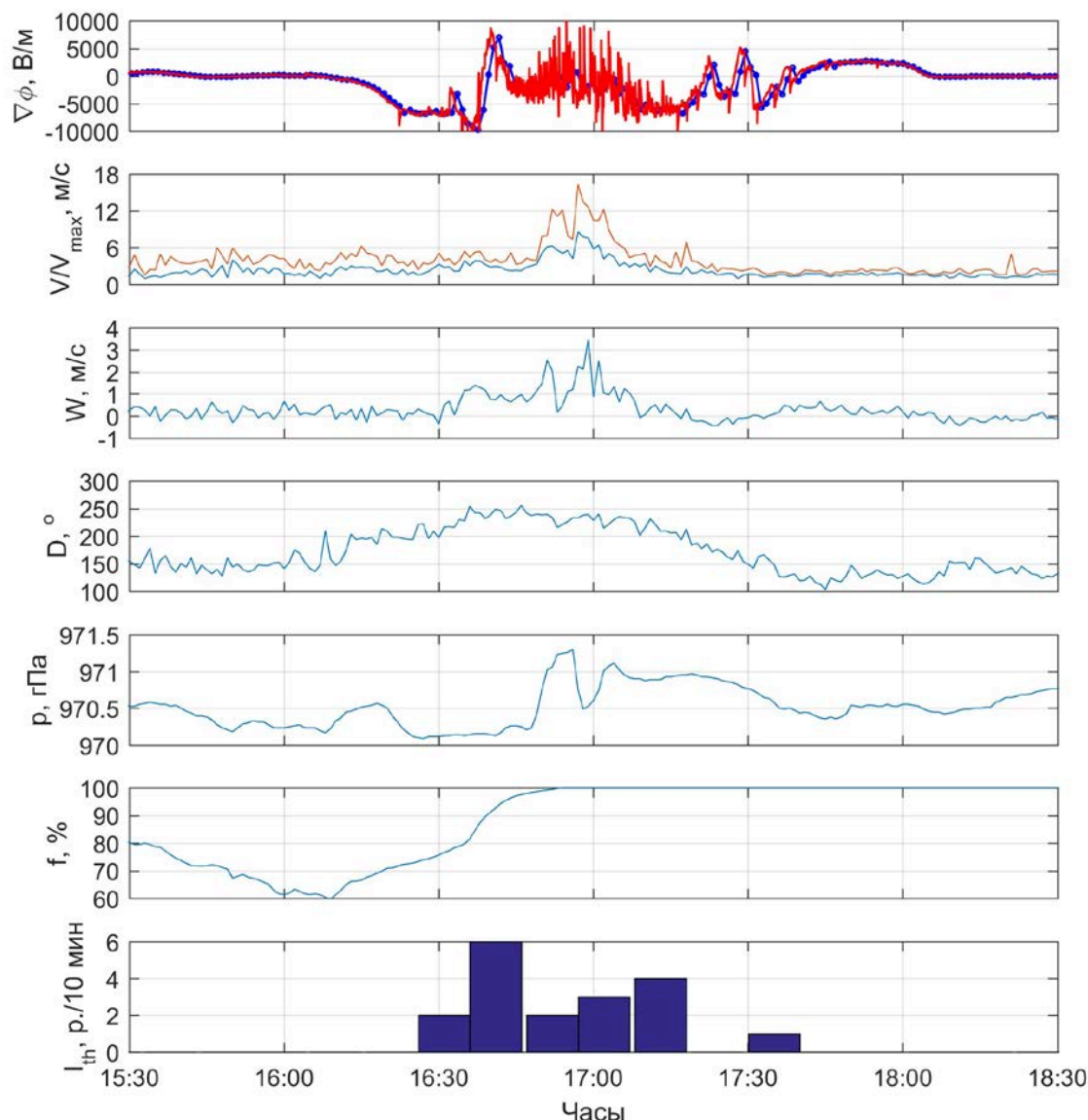


Рис. 1. Вариации градиента потенциала электрического поля ($\nabla\phi$; красная линия – мгновенные значения, синяя – среднeminутные), средних (V) и максимальных ($V_{\max}$) значений скорости горизонтальной составляющей ветра, средних значений скорости вертикальной составляющей ветра (W), направлений ветра (D), атмосферного давления (p), относительной влажности воздуха (f) и интенсивности грозы (I_{th}) при прохождении МКК 25.06.2017.

ских зарядов в облачной системе, составляла около 3 ч. При этом среднeminутные значения $\nabla\phi$ изменялись в диапазоне ± 10 кВ/м. На медленные вариации $\nabla\phi$ накладывались «быстрые вариации» $\nabla\phi$, обусловленные близкими молниевыми разрядами, при которых мгновенные значения $\nabla\phi$ достигали 20 кВ/м и более. Всего в ближней зоне пункта наблюдения сетью WWLLN было зарегистрировано 18 молний Облако-Земля, однако, отмечалось также большое число внутриоблачных разрядов. В середине рассматриваемого события отмечалось усиление значений горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра до 16 и 3 м/с соответственно, а в ходе атмосферного давления отмечался «Грозового нос», характеризующийся резким скачком атмосферного давления более чем на 1 гПа. Относительная влажность в свою очередь менее чем за час поднялась с 60 до 100 %.

На рисунке 2 представлены вариации атмосферно-электрических и метеорологических величин при прохождении ЛШ. Согласно этому рисунку, «медленные вариации» $\nabla\phi$ имеют сопоставимую с МКК длительность, однако среднeminутные значения $\nabla\phi$ являются более низкими и изменяются преимущественно в диапазоне ± 5 кВ/м. В течении рассматриваемого события было зарегистрировано 5 молниевых разрядов Облако-Земля, которым соответствовали быстрые скачки мгновенных значений $\nabla\phi$. В начале события отмечается шквалистые усиления ветра, во время которых значения скорости горизонтальной и вертикальной составляющей ветра достигают 10 и 2 м/с соответственно. В динамике атмосферного давления отмечался минимум в начале события и постепенный рост в дальнейшем, которому сопутствовал рост относительной влажности вплоть до 100 %.

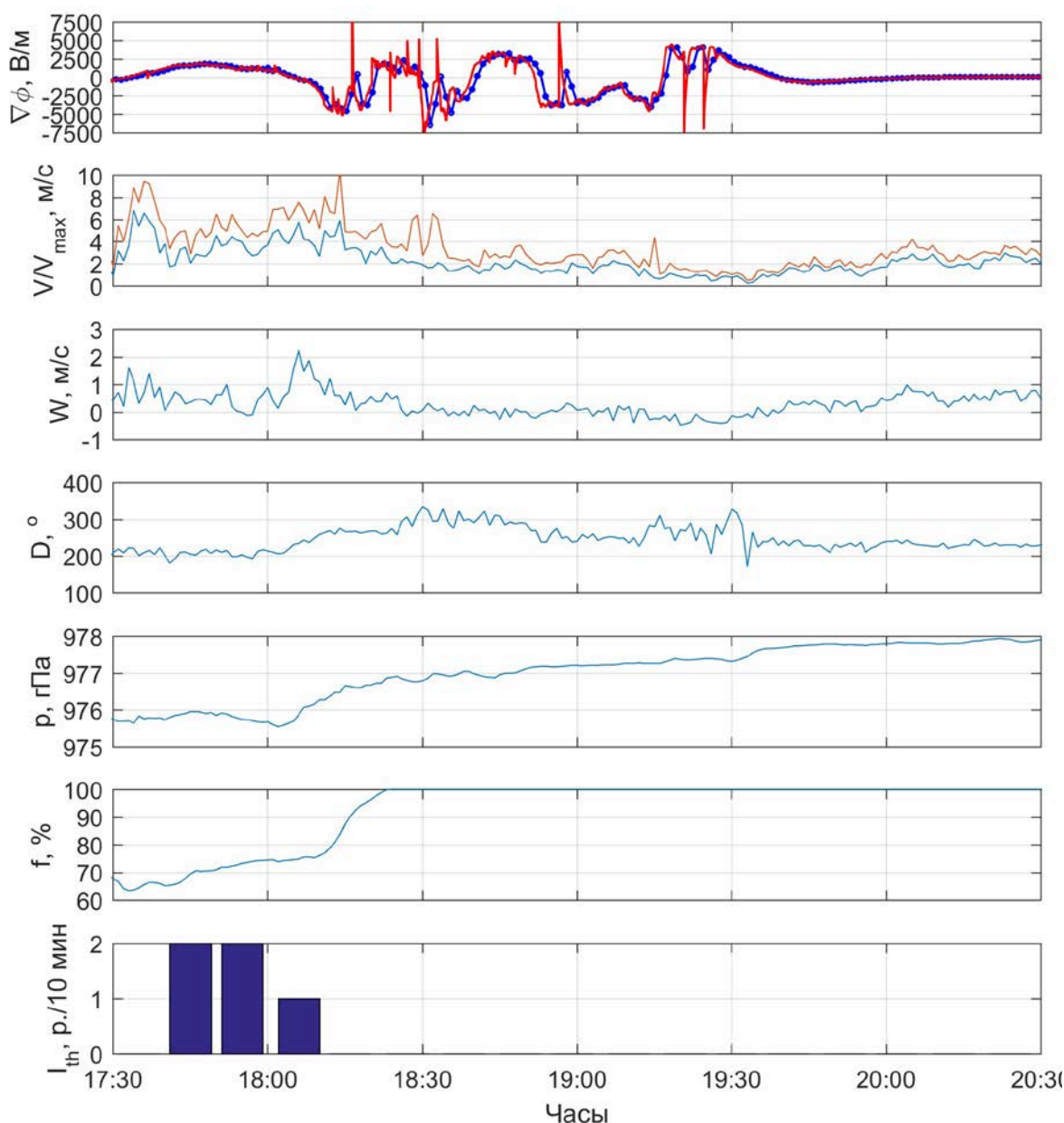


Рис. 2. Вариации градиента потенциала электрического поля ($\nabla\phi$; красная линия – мгновенные значения, синяя – среднееминутные), средних (V) и максимальных ($V_{\max}$) значений скорости горизонтальной составляющей ветра, средних значений скорости вертикальной составляющей ветра (W), направления ветра (D), атмосферного давления воздуха (p), относительной влажности воздуха (f) и интенсивности грозы (I_{th}) при прохождении ЛШ 11.06.2017 г.

В целом, вариации атмосферно-электрических и метеорологических величин во время рассмотренных случаев прохождения мезомасштабных конвективных систем характеризуются следующими характеристиками:

- длительность «медленных вариаций» $\nabla\phi$ – от 2 ч 10 мин до 4 ч 15 мин;
- экстремальные среднееминутные значения $\nabla\phi$ – $5 \div 19$ кВ/м;
- количество зарегистрированных молний Облако-Земля – $1 \div 57$;
- максимальная скорость горизонтальной составляющей ветра – $4 \div 16$ м/с;
- максимальная скорость вертикальной составляющей ветра – $0,9 \div 3,3$ м/с;
- длительность выпадения осадков – от 25 мин до 1 ч 20 мин;
- суммарное количество выпавших осадков – $0,5 \div 8,8$ мм;
- максимальная интенсивность выпадения осадков – $0,09 \div 0,65$ мм/мин.

Сравнение длительности «медленных вариаций» электрического поля и экстремумов среднени-
нутных значений $\nabla\varphi$, зарегистрированных при прохождении мезомасштабных конвективных систем, с
аналогичными характеристиками для одиночных кучево-дождевых облаков, описанными в [6, 7], пока-
зало, что они превосходят характеристики последних в 6 и 4 раза соответственно.

Работа поддержана грантом Президента РФ (МК-489.2020.5).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Chernokulsky A.V., Bulygina O.N., Mokhov I.I. Recent variations of cloudiness over Russia from sur-
face daytime observations // *Environ. Research Letters*. – 2011. – V. 6, № 3. – P. 035202.
2. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы. – М.: МГУ, 2006. – 101 с.
3. Кошикова Т.С., Жукова В.А., Кужевская И.В. Оценка параметров мезомасштабных
конвективных комплексов на основе спутниковых и аэрологических данных // *Геосферные
исследования*. – 2019. – № 2. – С. 86–97.
4. EOSDIS Worldview [Электронный ресурс]. – URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (дата
обращения: 15.04.2020).
5. World Wide Lightning Location Network: [Электронный ресурс]. URL: <https://wwlln.net/> (дата
обращения: 20.04.2020).
6. Пустовалов К.Н., Нагорский П.М. Основные типы вариаций электрического поля при
прохождении кучево-дождевых облаков различного генезиса // *Оптика атмосферы и океана*.
– 2016. – Т. 29, № 8. – С. 647–653.
7. Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M. Response in the surface atmospheric electric field to the passage of
isolated air mass cumulonimbus clouds // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*,
2018. – V. 172. – P. 33–39.

Relief influence on the distribution of the precipitation at the Tunkinskie Goltsy mountain range

¹Korotchenko M.M., ^{2,3}Voropay N.N.

¹Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

³V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

E-mail: korotchenko.maria@yandex.ru, voropay_nn@mail.ru

The relief makes significant changes to the precipitation field. The distribution of precipitations in the
mountain areas depends on the openness of the study area, the orientation of the slopes against the
moisture-bearing wind flow, the height of the slope, the horizontal scale of the hill, the general condi-
tions of the humidification regime area, and the features of atmospheric circulation.

In the article we analyzed data on precipitation received from tree autonomous rain gauge stations in-
stalled in Tunka depression. Gauge stations were located in the center of the depression (Tunka station, 720 m
a.s.l.), at the foothill of the Tunkinskie Goltsy range (Arshan station, 870 m a.s.l.) and at the vicinity of the
range top (Peak of Love station, 1892 m a.s.l.). Baric topography maps were used (synoptic surface maps, AT-
850, AT-700, and AT-500) for analysis of the regional circulation conditions.

Differences and gradients of liquid precipitation amount were calculated from observation data from May
to September 2019. Based on the result analysis, two periods with continuous most abundant precipitation were
selected. The first period is from June 21 to June 30, and the second period is from July 18 to July 30. The pre-
cipitation amount in the mountain area (Peak of Love) was higher than in the foothill area (Arshan). Tunka
station (at the center of the depression) receives about the same of precipitation as Arshan station. The average
deviation of the difference was 1.69 mm. From June 25 to June 27 torrential rains were observed, which was
accompanied by thunderstorms. The study area was at the center of the cyclone, which was at its maximal de-
velopment stage. During these days, Tunka station received 30.5 mm of precipitation, Arshan station - 34 mm
of precipitation, and the Peak of Love - 58.2 mm of precipitation. On July 28 - 29, pouring rains were observed
during the passage of atmospheric fronts. The cyclone, which caused the weather in the study area, also was at
the stage of maximum development. During these days, Tunka station received 14 mm of precipitation, Arshan
station - 51.8 mm of precipitation, and Peak of Love - 130.4 mm of precipitation.

Влияние рельефа на распределение сумм атмосферных осадков на примере Тункинских Гольцов

¹Коротченко М.М., ^{2,3}Воропай Н.Н.

¹Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

³Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

E-mail: corotchenko.maria@yandex.ru, voropay_nn@mail.ru

Атмосферные осадки постоянно воздействуют на все компоненты окружающей среды, представляя собой неустраняемый фактор и поэтому в теории риска относятся к самой высокой категории. Рельеф вносит значительные изменения в поле осадков. Влияние рельефа учитывается в зависимости от открытости рассматриваемого участка, ориентации склонов по отношению к влагонесущему потоку, также от высоты по склону, горизонтальных масштабов возвышенности, общих условий увлажнения района, особенностей атмосферной циркуляции [Научно-практический..., 2019]. Методика оценок сводится к определению плювиометрических градиентов. Обычно исследователь имеет дело с суммарным эффектом увеличения осадков с высотой и уменьшением точности их измерения за счет увеличения скорости ветра [Швер, 1976].

Исследования проводились на базе Тункинского котловинного стационара Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН на территории Тункинской котловины. Для работы использованы данные об атмосферных осадках за период 01.05.2019-30.09.2019 гг., полученные с метеостанций, установленных в п. Тунка (центр котловины, h=720 м над ур.м.), п. Аршан (предгорье, h=870 м над ур.м.) и на Пике Любви (h=1892 м над ур.м.) (табл. 1). Для анализа синоптической ситуации за период исследования использовались карты барической топографии – приземные карты, АТ-850, АТ-700, АТ-500. [Погода и подробный прогноз...].

Таблица 1. Характеристика пунктов наблюдения.

Пункт наблюдения	Высота над ур.м., м	Приборная база	Периодичность измерений
п.Тунка (центр котловины, метеостанция Росгидромета, www.rp5.ru)	720	Осадкомер Третьякова, Davis 7852М (АПИК)	12 ч 1 ч
п.Аршан (предгорье, стационар ИГ СО РАН)	870	Davis 7852М (АПИК)	15 мин.
Пик Любви (Тункинские Гольцы)	1892	Davis 7852М (АПИК)	1 час

Было проведено сравнение сумм атмосферных осадков, полученных по данным измерения двух осадкомеров – Третьякова и Davis 7852М, установленных на территории метеостанции Тунка (табл. 2). Существенных различий между показаниями осадкомеров нет, следовательно, мы считаем корректным проводить сравнение результатов наблюдения в разных ландшафтных условиях при использовании этих двух приборов.

Предварительный анализ сумм атмосферных осадков показал, что за рассматриваемый период на станции Тунка (центр котловины) выпало примерно то же количество осадков, что и в п. Аршан (предгорье Тункинских Гольцов), среднее отклонение разности составило 1,69 мм. Максимальное превышение осадков, выпавших в поселке Аршан зафиксировано 28 июля и составило 32,8 мм. Максимальное превышение осадков, выпавших в селе Тунка зафиксировано 7 июля и составило 17,8 мм.

Таблица 2. Количественная оценка отклонений суточных сумм осадков, измеренных при использовании осадкомеров Davis 7852М и Третьякова.

Среднее отклонение, мм	0,00343
Максимальное отклонение, мм	4,9
Кол-во отклонений ($\pm 0,2$ мм), %	83,7
Кол-во отклонений ($\pm 0,5$ мм), %	93,1
Кол-во отклонений ($\pm 1,0$ мм), %	97,4

В течение лета 2019 г. были выделены периоды с непрерывными продолжительными осадками. Рассчитаны значения разности 12-часовых и суточных сумм атмосферных осадков между пунктами наблюдения Тунка – Аршан и Аршан – Пик Любви. Рассчитан вертикальный градиент часовых, 12-часовых и суточных сумм атмосферных осадков Аршан - Пик Любви.

Для дальнейшего анализа было выбрано два периода с непрерывными наиболее обильными осадками. Первый период – с 21.06 по 30.06, второй период – с 18.07 по 30.07. Количество выпавших осадков в горном районе (станция Пик Любви) больше, чем в предгорном (станция Аршан). Самое большое различие наблюдается с 18.07 по 30.07: за этот период на Пике Любви осадков зафиксировано 175,4 мм, а в п. Аршан 79 мм.

Наиболее обильные осадки выпали 25, 27 июня и 28, 29 июля. За эти сутки были рассмотрены значения вертикального градиента часовых сумм атмосферных осадков.

С 25 по 27 июня наблюдались осадки ливневого характера, которые сопровождались грозой. Осадки обусловлены прохождением фронтов. Район исследования был расположен в центре циклона, который находился в стадии максимального развития. За эти дни на станции Тунка выпало 30,5 мм осадков, в п. Аршан – 34 мм осадков, на Пике Любви – 58,2 мм осадков. Основное количество осадков 25 июня (рис.1) выпало с 21:00 до 6:00 ч, в этот период хорошо наблюдается увеличение суммы осадков, а затем уменьшение. Максимальная сумма осадков в обоих пунктах наблюдения зафиксирована в 22:00 – за час в п. Аршан выпало 3,8 мм осадков, на Пике Любви – 10,6 мм осадков, в это же время зафиксирован максимальный вертикальный градиент и его значение составило 0,67 мм/ 100 м. После 6:00 следует еще одна волна осадков, которая продолжается до 16:00. С 6:00 до 8:00 наблюдается отрицательный вертикальный градиент, во все эти 3 срока он составил -0,02 мм/ 100 м. Пик второй волны осадков наблюдался в 9:00, когда сумма в п. Аршан составила 1,2 мм, а на Пике Любви – 2,4 мм, значение градиента – 0,12 мм/ 100 м. После 16:00 ч осадки не наблюдаются 2 часа. В 18:00 зафиксирован отрицательный градиент и его значение составило -0,10 мм/ 100 м, осадки продолжаются до 20:00. В 20:00 также отмечен отрицательный градиент, значение которого составило -0,02 мм/ 100 м. Общая сумма осадков за 25 июня на станции Аршан составила 20,2 мм, на Пике Любви 37 мм.

Анализ часовых значений вертикального градиента 27 июня (рис.2) показал, что в п. Аршан и на Пике Любви в этот день выпало значительно меньшее количество осадков, чем 25 июня. Всего в этот день в п. Аршан выпало 5,2 мм осадков, а на Пике Любви – 18,8 мм. На рисунке видно, что сумма осадков на Пике Любви всегда больше, чем в предгорье, поэтому отрицательных градиентов в этот день не зафиксировано. На графике видно 4 волны осадков. Первая наблюдается с 21:00 до 1:00, где максимальный градиент составил 0,04 мм/ 100 м. Вторая волна с 2:00 до 8:00, максимальный вертикальный градиент наблюдается в 4:00 и составил 0,10 мм/ 100 м. В 8:00 осадки на станции Аршан не зафиксированы, на Пике Любви сумма осадков составила 0,8 мм. С 8:00 до 13:00 наблюдается третья волна осадков. Максимальное значение вертикального градиента составило 0,14 мм/ 100 м. В 13:00, 14:00 осадки не зафиксированы. С 14:00 до 20:00 наблюдается четвертая волна самых обильных осадков. В 16:00 максимальное значение вертикального градиента составило 0,14 мм/ 100 м. В 20:00 выпадение осадков прекратилось.

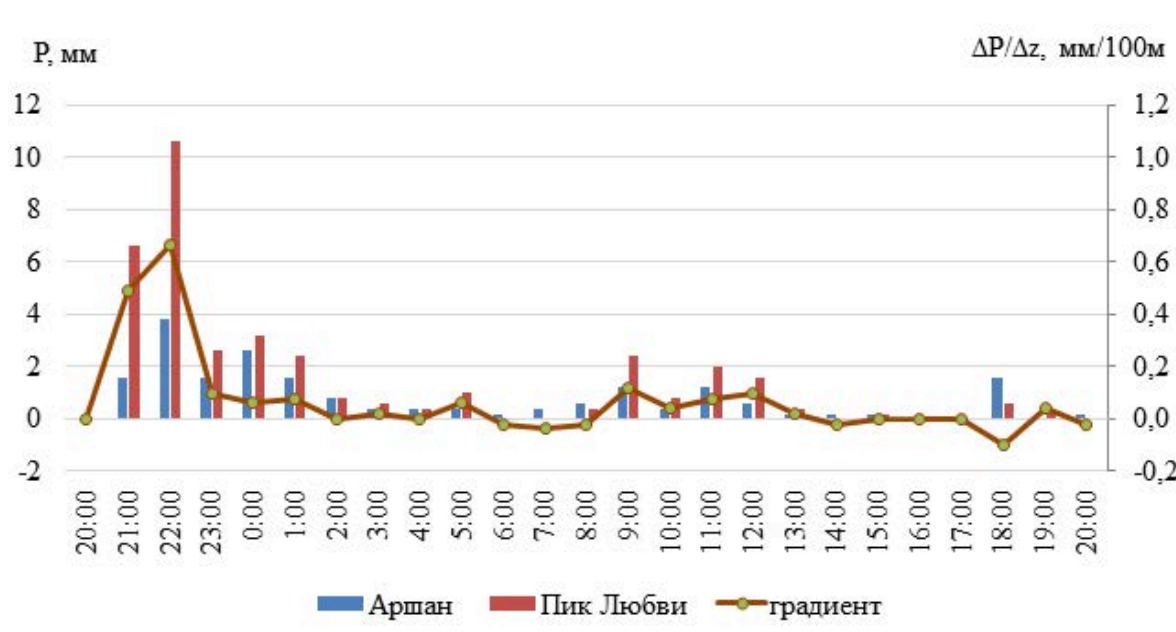


Рис. 1. Вертикальный градиент атмосферных осадков Аршан-Пик Любви 25 июня 2019 г.

С 28 по 29 июля на наблюдались осадки ливневого характера, связанные с прохождением фронтов. Циклон, который обуславливал погоду в районе исследования, находился в стадии максимального развития. За эти дни на станции Тунка выпало 14 мм осадков, в п. Аршан – 51,8 мм осадков, на Пике Любви – 130,4 мм осадков. 28 июля в п. Аршан и на Пике Любви наблюдались сильные осадки, сумма

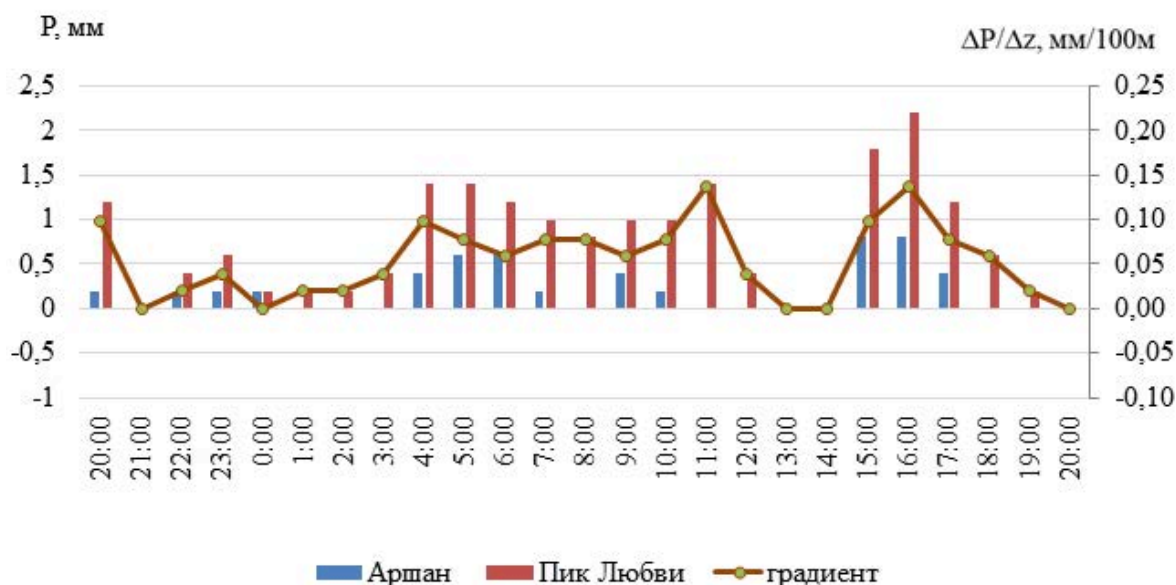


Рис. 2. Вертикальный градиент атмосферных осадков Аршан – Пик Любви 27 июня 2019 г.

осадков достигала 43,2 и 88,2 мм за сутки соответственно. 29 июля в поселке Аршан наблюдались умеренные осадки, количество осадков достигало 10,6 мм за сутки, а на Пике Любви наблюдались сильные осадки, сумма составила 48,8 мм за сутки.

Первая волна осадков наблюдается с 20:00 27 июля до 1:00 28 июля, максимальный вертикальный градиент составил 0,20 мм/ 100 м. В 1:00 28 июля наблюдается отрицательный вертикальный градиент и его значение составило -0,02 мм/ 100 м. С 2:00 до 10:00 28 июля наблюдается вторая волна осадков, с 3:00 начинается интенсивный рост суммы осадков, максимальный градиент зафиксирован в 6:00 и составил 0,31 мм/ 100 м. Третья волна наблюдается с 10:00 28 июля, которая заканчивается в 20:00 29 июля. С 10:00 28 июля до 10:00 29 июля на Пике Любви выпало 85,8 мм. Максимальное значение градиента было зафиксировано 28 июля в 16:00., оно составило 0,37 мм/ 100 м.

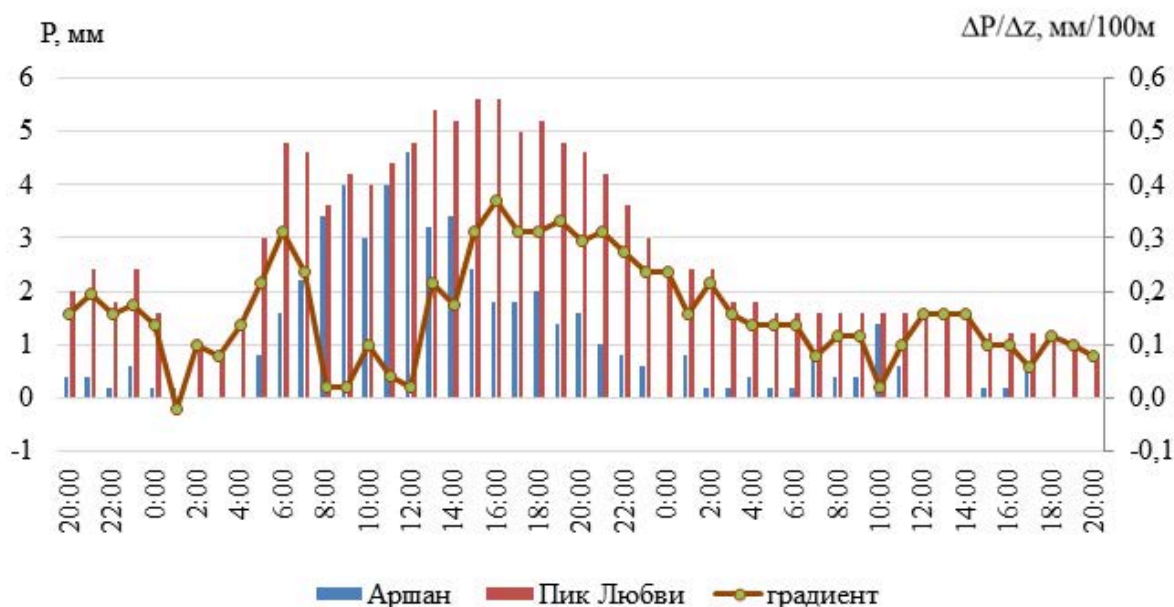


Рис. 3. Вертикальный градиент атмосферных осадков Аршан-Пик Любви 28,29 июля 2019 г.

Всего за исследуемый период, а именно с мая по сентябрь в поселке Тунка выпало 336,6 мм осадков, в поселке Аршан выпало 303,4 мм осадков, на Пике Любви, где период начинается с 18 июня, выпало 490,6 мм осадков. Таким образом, за исследуемый период в центральной части Тункинской котловины и на предгорной территории наблюдаются небольшие различия суммы осадков, а на предгорной территории и в горах эти различия существенны.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Научно-практический журнал Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление № 6, 2019 г.
2. Погода и подробный прогноз погоды от Гидрометцентра России. – URL: <https://meteoinfo.ru/> (дата обращения 10.04.2020)
3. Швер Ц.А. Атмосферные осадки на территории СССР / Ц.А. Швер – Л: Гидрометеиздат, 1976, с. 300.

Spatial distribution and features of genesis of mesoscale convective complexes over the south-east of Western Siberia

¹Koshikova T.S., ^{1,2}Zhukova V.A., ^{1,2}Pustovalov K.N., ²Kuzhevskaya I.V., ^{1,2}Nagorskiy P.M.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB, Tomsk, Russia

²Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: tkoshikova@gmail.com, jukowa.vera2017@yandex.ru, const.pv@yandex.ru, ivk@ggf.tsu.ru, npm_sta@mail.ru

The spatial distribution of the MCC and the heterogeneity of their characteristics are estimated using data from artificial Earth satellites. As a result of the analysis, two foci with the highest repeatability of MCC were identified. The first repeatability maximum is observed over the northwestern slopes of the Altai Mountains, the Salair Range and the Baraba Lowland, and the second is observed over the south of the Omsk Region. It was found that the hearth of repeatability of the MCC over the north-west of the Altai Mountains is represented by intra-mass cases, and the hearth above the Salair ridge and the Baraba lowland are frontal. The characteristics of the MCC were calculated and clustered. As a result of clustering over the south of Western Siberia, 4 classes of MCC were distinguished.

Acknowledgements: This work was supported by the grant of the President of the Russian Federation (МК-489.2020.5).

REFERENCES:

1. Chernokulsky A.V., Bulygina O.N., Mokhov I.I. Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations // *Environ. Research Letters*. – 2011. – V. 6, № 3. – P. 035202.
2. Vel'tishchev N.F., Stepanenko V.M. *Mezometeorologicheskie processy*. – M.: MGU, 2006. – 101 s.
3. Asmus V.V., Krovotynceva V.A., Milekhin O.E., Solov'ev V.I., Uspenskiy A.B. *Ispol'zovanie sputnikovyykh dannykh DZZ dlya resheniya zadach gidrometeorologii i monitoringa okruzhayushchej sredy // Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM*. – 2008. – T. 105. – S. 6–16.
4. Maddox R.A. Mesoscale convective complexes // *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1980. – V. 61. – P. 1374–1387.
5. Velasco, I. and J. M. Fritch: Mesoscale convective complexes in the Americas // *J. Geoph. Res.* – 1987. – V. 93, No. D8, – P. 9561–9613.
6. Koshikova T.S., Zhukova V.A., Kuzhevskaya I.V. Ocenka parametrov mezomasshtabnykh konvektivnykh kompleksov na osnove sputnikovyykh i aerologicheskikh dannykh // *Geosfernye issledovaniya*. – 2019. – №2. – S.86–97.7. LAADS Web [Электронный ресурс]. – URL: <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/> (дата обращения: 20.04.2020).
7. Qu J.J. *Earth Science Satellite Remote Sensing. V. 1: Science and Instruments* / J.J. Qu, W. Gao, M. Kafatos, R.E. Murphy, V.V. Salomonson. – Beijing: Tsinghua University Press and Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2006. – 418 p.
8. EOSDIS Worldview [Электронный ресурс]. – URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> (дата обращения: 25.04.2020).
9. Gidrometcentr Rossii. *Sinopticheskie karty* [Электронный ресурс]. – URL: <https://meteoinfo.ru/mapsynop> (дата обращения: 20.05.2020).

Пространственное распределение и особенности генезиса мезомасштабных конвективных комплексов над юго-востоком Западной Сибири

¹Кошикова Т.С., ^{1,2}Жукова В.А., ^{1,2}Пустовалов К.Н., ²Кужевская И.В., ^{1,2}Нагорский П.М.

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: tkoshikova@gmail.com, jukowa.vera2017@yandex.ru, const.pv@yandex.ru, ivk@ggf.tsu.ru, npm_sta@mail.ru

Во второй половине XX – начале XXI вв. в регионах Северной Евразии, отмечалось увеличение доли конвективных облаков [1]. Сохранение данной тенденции приведёт к дальнейшему увеличению повторяемости таких опасных явлений, как град, интенсивные ливни, шквалы и др. Наиболее опасными проявлениями конвективной облачности являются мезомасштабные конвективные системы, в частности мезомасштабные конвективные комплексы (МКК) [2]. Обнаруживаются МКК с помощью радиолокационных наблюдений и изображений, получаемых с искусственных спутников земли (ИСЗ). На территории юга Западной Сибири практически отсутствует радиолокационная сеть (МРЛ, ДМРЛ), что не позволяет использовать их в данном исследовании. На основе применения систем космического мониторинга обнаруживаются признаки возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС), ведётся мониторинг ЧС, оценивается ущерб [3].

Согласно [4], МКК – это комплекс кучево-дождевых облаков, объединённых общей наковальной квазиовальной формы, инфракрасные изображения которой имеют следующие характеристики. Площадь более или менее непрерывного облачного покрова с температурой верхней границы ниже -32°C составляет не менее 105 км^2 , а площадь внутреннего района с температурой верхней границы ниже -52°C не менее $5 \times 104\text{ км}^2$. Указанные размеры сохраняются в течение 6 ч и более. МКК можно встретить в разных географических регионах [2-5], в том числе и в Западной Сибири [6]. Однако в умеренных широтах их размеры могут существенно уступать описанным в [4], определённым для тропических регионов.

Целью данной работы является оценка пространственного распределения МКК и неоднородности их характеристик с помощью данных ИСЗ.

Исходными данными для исследования послужили RGB-изображения облачности [7] и продукты второго уровня обработки MODATML2 и MYDATML2 (разрешение $5 \times 5\text{ км}$) [8], полученные по данным спектрорадиометра MODIS. Спектрорадиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) один из ключевых приборов на КА «Тerra» и «Aqua» [9]. Дополнительно привлекались синоптические карты с фронтальным анализом [10].

Исследование проводилось для территории юга Западной Сибири (Омская, Томская, Новосибирская и Кемеровская области, Алтайский край, республика Алтай), за апрель-сентябрь 2010–2019 гг.

На первом этапе на основе спутниковых изображений осуществлялось визуальное дешифрирование конвективных комплексов (в том числе МКК), поперечное сечение которых превышает 50 км. Всего за период 2010–2019 гг. было дешифрировано более 460 таких случаев. Были выделены временные интервалы прохождения отобранных конвективных комплексов над территорией исследования и определены координаты их центров. На основе синоптических карт [10] дешифрированные случаи конвективных комплексов были разделены на две группы: фронтальные и внутримассовые.

На основе информации прохождения и координатах конвективных комплексов были отобраны файлы MODATML2/MYDATML2 [7], содержащие двумерные массивы данных (ячейки которых имеют размеры $5 \times 5\text{ км}$) с облачными продуктами, следующие из которых были использованы в данной работе: оптическая толщина облачности – Cloud Optical Thickness (*COT*); эффективный радиус облачных частиц – Cloud Effective Radius (*CER*); высота верхней границы облачности – Cloud Top Height (*CTH*); интегральное влагосодержание – Cloud Water Path (*CWP*); давление на верхней границе облака – Cloud Top Pressure (*CTP*); температура на верхней границе облака – Cloud Top Temperature (*CTT*).

На втором этапе исследования осуществлялась автоматизированная формализация дешифрированных случаев конвективных комплексов по следующей разработанной авторами методике. На основе данных облачных продуктов MODIS строилась маска, состоящая из пикселей $5 \times 5\text{ км}$, для каждого из которых выполнялись условия: $CTT \leq 200\text{ К}$ (-32°C) [3], $COT \leq 30$. Для каждого случая рассчитывалась площадь маски посредством вычисления суммы всех пикселей в пределах маски и умножения её на площадь одного пикселя (25 км^2). Также вычислялись длины хорд маски вдоль широты ($l_{\text{lat}(i)}$) и долготы ($l_{\text{lon}(i)}$) как произведения суммы пикселей вдоль меридиана и параллели соответственно и размера пикселя (5 км). Значения l_{lat} и l_{lon} , соответствующие 95-перцентиллю, принимались в качестве протяжённостей всего конвективного комплекса вдоль широты и долготы – L_{lat} и L_{lon} . Кроме того, на основе значений продуктов *CTH*, *CWP*, *CER*, *CTT*, *CTP* в пикселях, попадающих внутрь маски, рассчитывались средние

значения высоты верхней границы, интегрального влагосодержания, эффективного радиуса частиц, температуры и давления на верхней границе МКК.

Для исключения из дальнейшего рассмотрения небольших конвективных комплексов, размеры которых не позволяют считать их МКК, проводилась дополнительная фильтрация случаев, в ходе которой исключались конвективные комплексы, площадь маски которых меньше пороговой площади (S_n). Применялись два варианта S_n :

- 1) 5000 км² (1/20 от пороговой площади определённой для тропических регионов [4]);
- 2) 10000 км² (1/10 от пороговой площади определённой для тропических регионов [4]).

На основе описанной выше методики за десятилетний период отобрано 279 случаев при $S_n = 5000$ км² и 91 случай при $S_n = 10000$ км². Каждая из категорий отобранных случаев МКК подразделялась на фронтальные и внутримассовые. В дальнейшем описании рассматривались только случаи МКК, отобранные при $S_n = 5000$ км².

Произведён расчёт количества МКК, приходящегося на ячейки 2°×2° по широте и долготе, как в целом по всем случаям, так и отдельно по фронтальным и внутримассовым. На основе произведённых расчётов были построены сглаженные распределения повторяемости (в % от общего количества) по территории исследования МКК различного генезиса (рис. 1), а также отдельно фронтального и внутримассового происхождения (рис. 2).

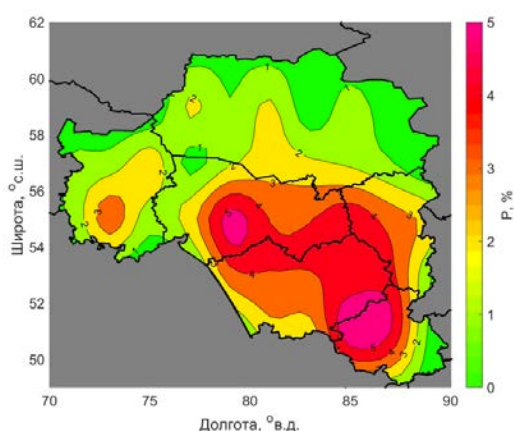


Рис. 1. Сглаженное распределение повторяемости всех отобранных случаев МКК на юго-востоке Западной Сибири.

Согласно рис. 1, наибольшая повторяемость МКК наблюдается на юго-востоке Западной Сибири, в частности, над северо-западными склонами Алтайских гор, Салаирским кряжем и Барабинской низменностью. Второй более слабый максимум отмечается над югом Омской области. Кроме того, можно отметить, что над поймой р. Обь и Обским водохранилищем отмечается некоторое снижение повторяемости МКК, а над юго-западом Томской области (восточной частью Васюганского болота) – увеличение. Анализ повторяемости мезомасштабных конвективных комплексов фронтального и внутримассового происхождения по отдельности (рис. 2) показал, что очаг повторяемости МКК над северо-западом Алтайских гор представлен, главным образом, внутримассовыми случаями, а очаги над Салаирским кряжем и Барабинской низменностью – фронтальными.

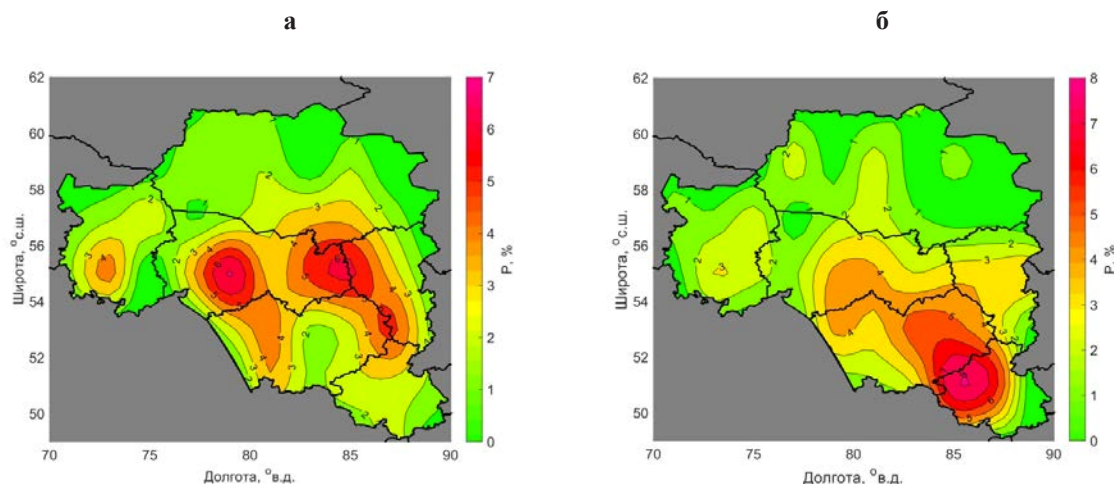


Рис. 2. Сглаженное распределение повторяемости МКК фронтального (а) и внутримассового (б) происхождения на юго-востоке Западной Сибири.

Перейдём к рассмотрению характеристик МКК. В таблице 1 представлены значения, соответствующие 5-, 50- и 95-перцентилям, некоторых параметров МКК, как в целом по всем случаям, так и отдельно фронтального и внутримассового происхождения.

Таблица 1. Значения, соответствующие 5-, 50- и 95-перцентилям, некоторых параметров МКК различного генезиса.

	Площадь, $\times 10^3 \text{ км}^2$	Высота верхней границы, км	Интегральное влажностное содержание, кг/м^2	Эффективный радиус облачных частиц, мкм
Все случаи МКК	5,2/8,3/17,1	9,2/10,6/12,1	1,0/1,3/1,5	23/26/29
Фронтальные МКК	5,3/9,2/18,4	9,3/10,6/12,0	1,0/1,3/1,5	22/26/29
Внутримассовые МКК	5,2/7,9/15,9	9,0/10,7/12,1	1,0/1,3/1,5	23/27/29

В целом для всех исследуемых случаев МКК площадь в среднем (медиана) составляет $8,3 \cdot 10^3 \text{ км}^2$, а её минимальное и максимальное значения (при доверительной вероятности 95 %) составляют $5,2 \cdot 10^3$ и $17,1 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ соответственно. Высота МКК, как правило, изменяется от 9,2 до 12,1 км, а её медианное значение равно 10,6 км. Интегральное влагосодержание для МКК на юге Западной Сибири составляет в среднем $1,3 \text{ кг/м}^2$ и изменяется от 1 до $1,5 \text{ кг/м}^2$. Медианные, минимальные и максимальные (при доверительной вероятности 95 %) эффективного радиуса облачных частиц в МКК составляют 23, 26 и 29 мкм соответственно. Сравнение характеристик МКК фронтального и внутримассового происхождения показывает, что внутримассовые МКК по площади значительно меньше фронтальных, однако их высота верхней границы и размеры облачных частиц, в целом, больше чем у фронтальных.

Далее рассчитанные значения параметров МКК (L_{lon} , L_{lat} , S , CTH и CWP , CER) были определены как признаковое пространство для кластеризации по методике итерационных алгоритмов k -mean. В основе алгоритма лежит принцип разбиения множества элементов векторного пространства на заранее известное число кластеров k . Действие алгоритма таково, что он стремится минимизировать среднеквадратичное отклонение внутри каждого кластера. На каждой итерации заново вычисляется математический центр масс для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге, затем векторы разбиваются на кластеры вновь в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе по выбранной метрике. Алгоритм завершается, в случае если на очередной итерации не происходит изменения в составе кластеров. На начальном этапе принимали в качестве центров самые отдаленные друг от друга объекты.

В результате кластеризации были выделены 4 класса МКК над югом Западной Сибири:

- Класс 1: небольшие невысокие маловодные (фронтальных/внутримассовых: 27/30 %);
- Класс 2: крупные невысокие маловодные (фронтальных/внутримассовых: 23/11 %);
- Класс 3: небольшие высокие водные (фронтальных/внутримассовых: 36/49 %);
- Класс 4: крупные высокие водные (фронтальных/внутримассовых: 13/10 %).

Второй класс представлен преимущественно фронтальными МКК, а третий класс – внутримассовыми. Для первого и четвёртого классов соотношение МКК различного генезиса сопоставимое. Рассчитаны статистические характеристики некоторых параметров МКК, относящихся к различным классам (табл. 2).

Таблица 2. Значения, соответствующие 5-, 50- и 95-перцентилям, некоторых параметров МКК различных классов.

Классы МКК	Площадь, $\times 10^3 \text{ км}^2$	Высота верхней границы, км	Интегральное влажностное содержание, кг/м^2	Эффективный радиус облачных частиц, мкм
Класс 1	5,1/6,8/9,5	9,0/10,1/11,0	1,0/1,1/1,3	23/25/27
Класс 2	9,2/13,1/18,2	8,5/10,4/11,8	1,0/1,2/1,4	22/25/27
Класс 3	5,3/7,6/11,8	9,4/10,8/12,0	1,2/1,3/1,5	25/27/30
Класс 4	9,6/14,9/22,4	10,9/11,7/12,2	1,3/1,4/1,6	24/27/30

Работа поддержана грантом Президента РФ (МК-489.2020.5).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Chernokulsky A.V., Bulygina O.N., Mokhov I.I. Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations // *Environ. Research Letters* – 2011 – V. 6, № 3. – P. 035202.
2. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы. – М.: МГУ, 2006. – 101 с.

3. Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Милехин О.Е., Соловьев В.И., Успенский А.Б. Использование спутниковых данных ДЗЗ для решения задач гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды // Вопросы электромеханики. Труды ВНИЭМ. – 2008. – Т. 105. – С. 6–16.
4. Maddox R.A. Mesoscale convective complexes // Bull. Am. Meteorol. Soc., 1980. – V. 61. – P. 1374–1387.
5. Velasco, I. and J. M. Fritch: Mesoscale convective complexes in the Americas // J. Geoph. Res. – 1987. – V. 93, No. D8, – P. 9561–9613.
6. Кошикова Т.С., Жукова В.А., Кужевская И.В. Оценка параметров мезомасштабных конвективных комплексов на основе спутниковых и аэрологических данных // Геосферные исследования. – 2019. – №2. – С.86–97.
7. EOSDIS Worldview [Электронный ресурс]. – URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> (дата обращения: 25.04.2020).
8. LAADS Web [Электронный ресурс]. – URL: <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/> (дата обращения: 20.04.2020).
9. Qu J.J. Earth Science Satellite Remote Sensing. V. 1: Science and Instruments / J.J. Qu, et al. – Beijing: Tsinghua University Press and Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2006. – 418 p.
10. Гидрометцентр России. Синоптические карты [Электронный ресурс]. – URL: <https://meteo-info.ru/mapsynop> (дата обращения: 20.05.2020).

Special aspects of snow cover formation in Siberia

Martynova Yu.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia
E-mail: FoxyJ13@gmail.com

Recently, there are a number of studies on the behavior of snow cover (SC). In some, the attention of researchers is concentrated on the territory of Eurasia as a whole. For example, it has been shown that in general for Eurasia, the duration of the cold season and duration of the period with a stable SC decrease [1, 2]. Other studies, considering individual regions, rely on datasets previously selected as the best, but for a large territory [3–5]. There are also works devoted to the comparison of various datasets of SC [6, 7]. However, such comparisons were carried out for rather large territories.

In this study, the attention is focused on the period of SC formation in Western and Eastern Siberia. The interannual variation of the SC formation characteristics was estimated for these regions.

The SC data was taken from the NOAA satellite data archive on the snow cover of the globe for the period 1979–2019 (Rutgers University, Global Snow Lab, <https://climate.rutgers.edu/snowcover/>) with a weekly time resolution. The analysis of the behavior of the SC area was carried out for part of the territory of Western Siberia (WS), namely 70E–90E 50N–70N, as well as for the entire WS territory, 60E–90E 50N–70N, and for Western and Eastern Siberia (WES) together, 60E–120E 50N–70N.

The territory of Siberia (WS, ES, WES), by the definition of many scientists, is a “hot spot”, that is, this territory is very responsive to ongoing climate changes and vice versa, small changes (disturbances) in this territory can cause relatively large climatic changes here and in the surrounding areas. The geographic location of the WS (and WES) determines its sharply continental climate. A significant distance from the oceans with pronounced temperature currents determines the stability of seasonal climatic conditions with minimal variability (in comparison with land areas bordering on different ocean currents). Thus, in studies of climate and its changes, the territory of the WS (WES) can be considered as a kind of indicator of the state and climate change.

The interannual variation of the duration of the SC formation period, start and end dates were considered. Also, weeks with the most intensive growth of the SC area were identified. Comparison of three Siberian regions showed both similarities and significant differences in interannual behavior of the considered parameters.

Особенности формирования снежного покрова в Сибири

Мартынова Ю.В.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
E-mail: FoxyJ13@gmail.com

На сегодняшний день существует ряд исследований, посвященных поведению снежного покрова (СП). В одних внимание исследователей сосредоточено на территории Евразии в целом. Например, показано, что в целом для Евразии, происходит сокращение длительности холодного сезона и продолжительности периода с устойчивым СП [1, 2]. Другие исследования, рассматривая отдельные регионы, опираются на наборы данных, предварительно выбранные как лучшие, но для большой территории [3-5]. Есть также работы, посвященные сравнению различных наборов данных о СП [6, 7]. Однако, такие сравнения проводились для довольно обширных территорий в целом.

В данной работе внимание сосредоточено на периоде формирования СП в Западной и Восточной Сибири. Была оценена межгодовая вариация характеристик формирования СП в этих регионах.

Данные о площади СП были взяты из архива спутниковых данных NOAA о площади снежного покрова Земного шара для периода 1979-2019 гг. (GSL, Лаборатория по изучению снежного покрова Ратгерского университета, <https://climate.rutgers.edu/snowcover/>), имеющих недельное разрешение по времени. Расчеты и анализ поведения величины площади СП проводились для части территории Западной Сибири (ЗС), а именно 70E-90E 50N-70N, а также для всей территории ЗС, 60E-90E 50N-70N, и для Западной и Восточной Сибири (ЗВС) совместно, 60E-120E 50N-70N.

Территория Сибири (ЗС, ВС, ЗВС) по определению многих ученых являет собой «hot spot», т. е. эта территория сильно реагирует на происходящие климатические изменения и наоборот, малые изменения (возмущения) на этой территории могут вызвать сравнительно большие климатические изменения на ней и на прилегающих территориях. Географическое положение территории ЗС (и ЗВС) определяет ее резко-континентальный климат, существенная удаленность от океанов с ярко выраженными по температуре течениями определяет устойчивость сезонных климатических условий с минимальной вариативностью (в сравнении с граничащими с разными океаническими течениями областями суши). Таким образом, при исследованиях климата и его изменений территорию ЗС (ЗВС) можно рассматривать, в качестве своего рода индикатора состояния и изменения климата.

Были рассмотрены межгодовая вариация длительности периода формирования СП, дат начала и окончания его формирования, выделены недели с наиболее интенсивным нарастанием СП.

Даты начала формирования СП для уменьшенной (70E-90E) и полной (60E-90E) территории ЗС совпадают на протяжении всего рассмотренного периода, за исключением 5 отдельных лет, и приходятся на сентябрь, чаще на вторую и третью его декаду (Рисунок 1 а). Совпадение дат начала формирования СП указывает на то, что на территории ЗС оно начинается одновременно по всем долготам рассматриваемой территории. На территории ЗВС формирование СП начинается раньше, чем для ЗС, в среднем на 10 дней, и приходится на первую-вторую декады сентября, а иногда и на последние числа августа. Различия в датах начала формирования СП, полученные для ЗС и ЗВС, явно свидетельствуют о том, что осеннее формирование СП сначала начинается на территории Восточной Сибири (ВС), а затем уже на ЗС.

Даты окончания формирования СП (даты, когда нарастание СП прекращается) тоже варьируются для рассматриваемых территорий. Раньше всего СП устанавливается для уменьшенной территории ЗС, затем для полной ЗС и после для ЗВС. Для уменьшенной ЗС формирование СП завершается во второй половине ноября – первой половине декабря. Для полной ЗС завершение формирования приходится в среднем на январь, и в отдельные годы – на декабрь и февраль. Межгодовой ход дат окончания формирования СП на территории ЗВС подобен полной ЗС, однако имеет меньшую межгодовую вариацию. Окончание формирования СП приходится в большей степени на первые дни февраля и в отдельные годы на январь и декабрь (Рисунок 1 а).

Как следствие вариации дат начала и окончания периода формирования СП для разных территорий, варьируются продолжительности периода формирования СП (Рисунок 1 б). Для уменьшенной территории ЗС она составляет 11 недель, для полной ЗС – 17 недель, а для ЗВС – 22 недели. Чем больше площадь территории, тем большее разнообразие ландшафтных особенностей и метеорологических процессов для нее характерных, тем дольше может длиться период формирования СП.

Необходимо отметить, что характер межгодового хода длительности формирования СП для полной территории ЗС и для ЗВС в целом сходен, а для уменьшенной территории ЗС – заметно отличается от остальных двух. Кроме того, при заметной вариации дат начала и окончания формирования СП при переходе от меньшей территории к большей неделя, в течение которой происходит наиболее интенсивное за весь осенне-зимний сезон формирование СП, приходится в основном на октябрь, и только в отдельные годы – на последние числа сентября или первые числа ноября. Эти недели, как правило, совпадают по датам для всех рассмотренных территорий почти для всех лет временного интервала (Рисунок 2 а).

Данный факт указывает на территориальную обширность процессов, способствующих формированию СП на территориях Сибири.

Важно отметить небольшую тенденцию к более раннему проявлению недели с интенсивным относительно других недель осенне-зимнего периода увеличением СП. Абсолютный (в млн км²) и относительный (в процентах от общей площади территории) прирост СП за эту неделю существенно варьируется от года к году, однако, характер межгодового хода этой величины схож для всех трех рассмотренных территорий и соразмерен их общей площади. Для уменьшенной и полной территории ЗС графики межгодового хода относительного в процентах от общей площади территории прироста СП очень близки друг к другу, в целом, совпадают также во времени и по величинам их пики максимальных и минимальных значений.

В работе было показано, что при сравнении трех территорий рассмотренные параметры демонстрируют как сходство, так и существенные различия в межгодовом поведении.

Исследование было выполнено в рамках госбюджетной темы № АААА-А17-117013050037-0.

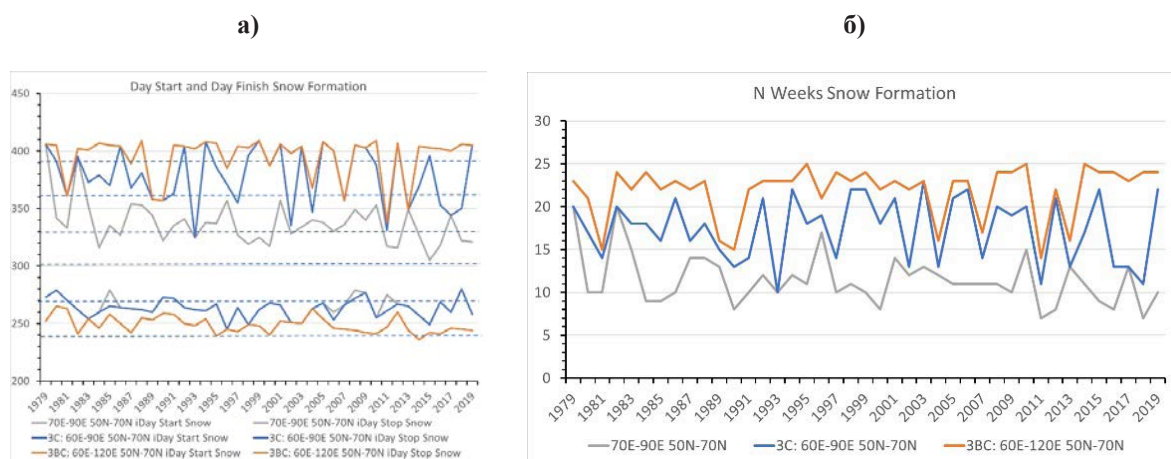


Рис. 1. Межгодовая вариация дат начала и окончания (а) и длительности в неделях (б) формирования СП. Пунктирные линии обозначают первое число каждого месяца с сентября по февраль.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Попова В. В., Полякова И. А. изменение сроков разрушения устойчивого снежного покрова на севере Евразии в 1936–2008 гг.: влияние глобального потепления и роль крупномасштабной атмосферной циркуляции // Лёд и снег. 2013. № 2 (122). С. 29–39.
2. Попова В. В., Морозова П. А., Ширяева А. В. Сроки установления снежного покрова на севере Евразии: прямые и обратные связи с крупномасштабной атмосферной циркуляцией // Лёд и снег. 2014. № 3. С. 39–49.
3. Титкова Т.Б., Китаев Л.М., Виноградова В.В. Короткопериодная изменчивость сроков залегания снежного покрова по данным MODIS на севере Евразии в условиях современного климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 223–238.
4. Титкова Т.Б., Виноградова В.В. Сроки залегания снежного покрова на территории России в начале XXI в. по спутниковым данным // Лёд и Снег. 2017. Т. 57, № 1, С. 25–33.
5. Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А. Изменения характеристик снежного покрова на территории России в 1950–2013 годах: региональные особенности и связь с глобальным потеплением // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII, № 4. С. 65–75.
6. Brown R.D., Derksen C. Is Eurasian October snow cover extent increasing? // Environment Research Letters. 2013. V. 8, № 2. 024006. doi: 10.1088/1748-9326/8/2/024006.
7. Mudryk L.R., Derksen C., Kushner P.J., Brown R. Characterization of Northern Hemisphere snow water equivalent datasets, 1981–2010 // Journal of Climate. 2015. V.28, No. 20, P.8037–8051.

Long-term dynamics of snow cover in the Baikal region

¹Matyukhina A.A., ^{2,3}Voropay N.N.

¹Tomsk State University, Tomsk, Russia

²V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

³Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: matyukhina_nastya08@mail.ru, voropay_nn@mail.ru

Snow cover contributes to changes in the radiation and heat balance of the land surface. Dates of onset and melt of the stable snow cover as well as the snow cover duration show its seasonal dynamic. They are important characteristics of the state of the environment under modern climate changes. The aim of this work was to analyze long-term changes in the maximum and average snow depth, dates of snow onset and melt, the snow cover duration over a 61-year period in the territory of the Baikal region.

A statistical analysis of the snow cover characteristics on the eastern and western shores of Lake Baikal was carried out. Observation data of 13 weather stations of the Baikal region for the period from 1959 to 2019 were used. The average date of snow cover onset in the eastern Baikal region is October 21, and the average date of snow cover melt is April 30. The average date of snow cover onset in the western Baikal region is October 25, and the average date of snow cover melt is April 14. The long-term average snow depth at weather stations of the eastern Baikal region is higher than at ones at the western coast.

The correlation coefficients (K) between the data series were calculated. The greatest linear relationship was found between the maximum snow depth at weather stations in the eastern Baikal region (Babushkin and Ulan-Ude, $K = 0.68$). The trends in snow depth and snow cover duration for the study period were calculated, and plots of long-term changes were constructed. In most cases, trends of snow cover characteristics are not statistically significant.

Многолетняя динамика снежного покрова на территории Прибайкалья

¹Матюхина А.А., ^{2,3}Воропай Н.Н.

¹Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

³Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

E-mail: matyukhina_nastya08@mail.ru, voropay_nn@mail.ru

Снежный покров способствует существенным изменениям радиационного и теплового баланса подстилающей поверхности по сравнению с открытой почвой, поэтому даты образования и схода устойчивого снежного покрова, которые показывают сезонную динамику, а также продолжительность залегания снежного покрова – важные характеристики состояния окружающей среды при современных изменениях климата.

Территория исследования – Прибайкалье – горная область на юге Восточной Сибири, прилегающая с запада и востока к озеру Байкал в Иркутской области и Республике Бурятия. Прибайкалье расположено в умеренных широтах, где изменчивость атмосферно-циркуляционных условий, а, следовательно, и метеорологического режима – одна из основных особенностей климатического режима. В этих широтах существует не только временная, но и пространственная изменчивость многих метеорологических элементов и явлений. На территории Прибайкалья есть горные хребты, окаймляющие озеро Байкал, и соседние с озером межгорные котловины. Большинство хребтов Прибайкалья имеют сравнительно мягкие очертания и плоские вершины, выровненные процессами длительной денудации. Лишь на наиболее высоких участках на севере Байкальского хребта, в Хамар-Дабане, а также на Баргузинском хребте встречаются массивы с альпийскими формами рельефа (максимальная отметка – 2840 м, Баргузинский хребет). Над Прибайкальем в течение всего года господствует местный континентальный воздух, поэтому для данной территории характерны сравнительно холодная зима (средняя температура января $-22 \div -26$ °C) и умеренно тёплое лето (средняя температура июля $15-18$ °C), в конце января-начале февраля бывают оттепели, а к марту повсеместно происходит бурное таяние снегов; осень зачастую бывает, как бы продолжением лета – дни стоят по-летнему теплые и до ноября снега почти не бывает. Накопленного в Байкале за лето тепла хватает на обогрев прибрежной территории на многие недели [1].

В работе на основе 61-летних стационарных наблюдений 13 метеорологических станциях Прибайкалья за период с 1959 по 2019 г. проведен статистический анализ характеристик снежного покрова на

Восточном и Западном побережьях озера Байкал. Исследована динамика основных характеристик снежного покрова – максимальная, средняя высота, продолжительность залегания, определены даты образования и схода, коэффициенты корреляции между рядами данных, посчитаны тренды высоты и продолжительности за исследуемый период, построены графики многолетнего хода.

При анализе пространственно-временной изменчивости характеристик снежного покрова за 1959-2019 гг. учитывались измерения [2] на станциях Прибайкалья, находящихся на восточном и западном побережьях озера Байкал, а также на некотором удалении от побережья (не более 100 км) в диапазоне высот 445-1443 м над уровнем моря: ГМС Нижнеангарск, Баргузинский заповедник, Большое Голоустное, Хомутово, Баргузин, Усть-Баргузин, Иркутск обсерватория, Улан-Уде, Хамар-Дабан, Баяндай, Бабушкин, Карам, Большой Ушканий остров. Использовалась информация о средней декадной высоте снежного покрова по постоянной рейке и продолжительности залегания устойчивого снежного покрова, датах его образования и разрушения. Высота над уровнем моря, географические координаты, расстояние от побережья озера Байкал указанных метеорологических станций представлены в таблице 1. Расположение метеорологических станций показано на рисунке 1.

Таблица 1. Географические данные метеостанций.

Станция	Высота над уровнем моря	Географические координаты	Расстояние от берега
Нижнеангарск	487 м	55° 47' с.ш., 109° 35' в.д.	1,8 км
Баргузинский заповедник	468 м	54° 20' с.ш., 109° 32' в.д.	150 м
Большой Ушканий о-в	460 м	53° 51' с.ш., 108° 36' в.д.	0 км
Усть-Баргузин	459 м	53° 25' с.ш., 109° 01' в.д.	2,9 км
Иркутск, обсерв.	469 м	52° 16' с.ш., 104° 19' в.д.	54,9 км
Хомутово	453 м	52° 28.5' с.ш., 104° 24.9' в.д.	83 км
Хамар-Дабан	1442 м	51° 32' с.ш., 103° 36' в.д.	17,9 км
Бабушкин	469 м	51° 43' с.ш., 105° 51' в.д.	0,8 км
Карам	497 м	55° 09' с.ш., 107° 37' в.д.	97,1 км
Баяндай	757 м	53° 06' с.ш., 105° 32' в.д.	78,4 км
Баргузин	489 м	53° 37' с.ш., 109° 38' в.д.	30,6 км
Большое Голоустное	461 м	52° 02' с.ш., 105° 25' в.д.	1,4 км
Улан-Уде	514 м	51° 50' с.ш., 107° 36' в.д.	100 км

Максимальная многолетняя высота снежного покрова 39 – 175 см зафиксирована на метеорологических станциях восточного Прибайкалья при средней многолетней высоте 9,1 – 80,8 см (табл. 2). Наибольшая линейная связь максимальных высот между парой станций восточного Прибайкалья Бабушкин и Улан-Уде ($K=0,68$). На метеорологических станциях западного Прибайкалья максимальная многолетняя высота снежного покрова 21-67 см при средней многолетней высоте 4,5-30,3 см. Наибольшая линейная связь максимальных высот между парой станций западного Прибайкалья Баяндай и Карам ($K=0,51$). Тренды и значимость трендов средних и максимальных за зиму высот снежного покрова представлены в таблице 3.



Рис. 1. Схема расположения метеорологических станций.

Таблица 2. Максимальная и средняя многолетняя высота снежного покрова за 61-летний период на метеорологических станциях Прибайкалья.

Метеостанция	$H_{\max}$, ГОД	$H_{\text{сред.}}$ см
Бабушкин	39 см в 2015/16 г	9,1
Баргузин	84 см в 2008/09 г	31,5
Баргузинский з-к	87 см в 1961/62 г	42,1
Баяндай	40 см в 1996/97 г	15,1
Большое Голоустное	21 см в 2001/02 г	4,5
Большой Ушканий о-в	86 см в 1993/94 г	18,9
Иркутск, обсерв.	55 см в 2017/18 г	20,3
Карам	64 см в 2017/18 г	30,3
Нижнеангарск	67 см в 1970/71 и 2012/13 г	22,9
Улан-Уде	69 см в 1959/60 г	8,3
Усть-Баргузин	87 см в 2012/13 г	21,5
Хамар-Дабан	175 см в 2003/04 г	80,8
Хомутово	38 см в 1997/98 г	11,6

Средняя дата образования снежного покрова в восточном Прибайкалье – 21 октября, средняя дата схода – 30 апреля. Средняя дата образования снежного покрова в западном Прибайкалье – 25 октября, средняя дата схода – 14 апреля. То есть образование снежного покрова происходит почти одновременно на обоих побережьях, а сход с разницей в 14 дней. В большинстве случаев, тенденции изменения характеристик снежного покрова статистически не значимы. По рассчитанным статистически значимым трендам дат схода снежного покрова, можно сделать вывод, что на большинстве станций (Бабушкин, Баргузинский заповедник, Усть-Баргузин, Улан-Уде) восточного Прибайкалья сход снежного покрова сместился на более ранние сроки. Средняя многолетняя продолжительность залегания устойчивого снежного покрова на территории Прибайкалья равна 182 дням: на восточном – 186 дней, на западном – 173 дня. На станциях, расположенных на севере (Нижнеангарск – 188 дней, Усть-Баргузин – 185 дней) Восточного и Западного побережья, продолжительность залегания снежного покрова дольше, чем на станциях, расположенных на юге (Большое Голоустное – 159 дней, Бабушкин – 179 дней) побережья (рис. 2).

Таблица 3. Изменение высоты снежного покрова в Прибайкалье.

Метеостанция	Максимальная за зиму высота снега		Средняя высота снега	
	Тренд, см/10лет	Значимость	Тренд, см/10лет	Значимость
Бабушкин*	2,20	0,07	1,7	0,02
Баргузин	2,60	0,00	1,8	0,00
Баргузинский з-к	1,20	0,14	0,3	0,61
Баяндай	1,70	0,00	1,2	0,00
Большое Голоустное	0,80	0,02	0,6	0,00
Большой Ушканий о-в	-0,30	0,66	1,2	0,09
Иркутск, обсерв.	0,02	0,98	-0,1	0,91
Карам	0,90	0,14	0,2	0,50
Нижнеангарск	-0,30	0,66	-0,1	0,78
Улан-Уде	-0,50	0,38	0,1	0,61
Усть-Баргузин	0,50	0,59	0,5	0,53
Хамар-Дабан	2,70	0,06	1,4	0,19
Хомутово	1,30	0,01	1,1	0,00

* Примечание – из-за отсутствия данных тренды по станции Бабушкин рассчитаны за более короткий период, с зимы 1986/87 гг. Выделены статистически значимые тренды.

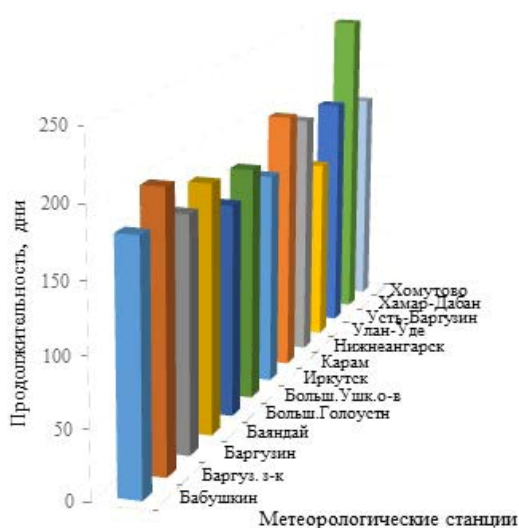


Рис. 2. Средняя многолетняя продолжительность залегания снежного покрова Прибайкалья.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Истомина Е. А. Использование дистанционных данных для мониторинга режима залегания снежного покрова Прибайкалья / Е. А. Истомина, Е. В. Максюткова // *Лёд и Снег*. – 2014. – № 1. – С. 66-77.
2. Булыгина О.Н. описание массива данных характеристики снежного покрова на метеорологических станциях России и бывшего СССР. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621201. <http://meteo.ru/data/165-snow-cover#описание-массива-данных> / В. Н. Разуваев, Т. М. Александрова. – 2014

Development Perspectives of the Channel Processes in the Sylva River Basin in the 21st Century (Kama basin)

Nazarov N.N., Frolova I.V.

Perm State University, Perm, Russia

E-mail: nikolainazarovpsu@gmail.com; irvik13@gmail.com

The study of the nature and direction of development of fluvial processes in riverbeds is an important part of research in the design of dredging and straightening works on navigable sections of rivers, in the construction of bridge crossings, water intakes and other engineering structures in the coastal zone.

The solution to the question of the variable activity of erosive-accumulative processes in the region requires a significant expansion of the geography of research and the involvement of various cartographic sources, which identify the morphological features of riverbeds with acceptable reliability. This approach allows us to look into the past of river valleys for centuries and, taking into account the current situation, predict the direction of formation of floodplain-riverbed complexes in the future.

The object of research is the lower course of Babka river, which is a tributary of Sylva river. The source of information about the morphological structure of the riverbed and its channel pattern changes over time includes cartographic materials of the XVIII-XX centuries: the map of the General survey of the Kungursky uyezd of Perm province, modern topographic maps of different scales and satellite images.

Based on the established relationships between the fluctuations of air temperatures and the amount of precipitation over the entire period of instrumental observations, we conclude that at least the current values of humidity will remain (a small increase is predicted) in the near future. This can be confirmed and illustrated by the results of observations of the dynamics of heavy rain in the Ural Kama region in 1979-2015. The intensity of such rains (≥ 50 mm/12 h) during this period increased from 1.6 to 3.5 cases per year. At the same time, the intensity of heavy showers (≥ 30 mm/1 h) throughout this time does not change and amounts to 2-3 cases per year. Another characteristic example of an increase in the amount of precipitation with increasing temperatures is the positive trend over 40 years (1962-2002), recorded in the dynamics of water equivalent of snow accumulating over the winter.

The greatest interest in maintaining the current activity of riverbed processes in the future (with a tendency even to some activation) is the data on the increase in the spring runoff in the Sylva basin. Its growth in the

range of Podkamennoe village (Sylva river) from 1430 m³/s (before 1978) increased to 1580 m³/s (1978-2009), which is 10%. In General, the increase in annual runoff in the basin in 1981-2004 compared to the period 1930-1980 was 25%, with the largest increase in runoff values occurring in the most recent years.

To determine the trend of development of riverbed processes in the Babka river valley, we can use the results of the forecast of relative changes in annual runoff calculated for the East European plain using an ensemble of 7 CMIP3 models (the dependence of daily precipitation amounts on average daily air temperatures). As a result, significant changes in runoff both in the middle and at the end of the XXI century are not expected for the entire Sylva basin. The range of fluctuations from modern values can be 0.9–1.1.

Based on the trends of climate change in the XXI century, the development of riverbed processes in the lower reaches of the Babka river and in the Silva basin will not undergo significant changes in its direction and activity relative to the current situation. In the concavities of large embedded bends, the erosion of the ledges of the above-floodplain terraces will continue. The main trend of planform changes within the borders of the young floodplain will be its longitudinal displacement with the formation of gentle confined bends within relatively straight inserts (mainly former straightening of the riverbed) between embedded bends.

Перспективы развития русловых процессов в бассейне р. Сылва в XXI веке (бассейн Камы)

Назаров Н.Н., Фролова И.В.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия
E-mail: nikolainazarovpsu@gmail.com; irvik13@gmail.com

Изучение характера и направленности развития эрозионно-аккумулятивных процессов в речных руслах является необходимой и важной частью исследований при проектировании дноуглубительных и выправительных работ на судоходных участках рек, при строительстве мостовых переходов, водозаборов и других инженерных сооружений в береговой зоне [1, 6]. Результаты таких изысканий играют весомую роль и в выявлении пространственно-временной устойчивости пойменно-русловых и террасовых комплексов речных долин. Стабильное положение этих геосистем определяет безопасность и комфортность проживания людей на берегах рек и является лимитирующим условием для существования прибрежных поселений во многих регионах мира в условиях глобальных изменений климата [3]. Как показывает анализ публикаций, посвященных результатам специальных изысканий в речных долинах, уже существует практика использования морфодинамического анализа современной русловой обстановки при разработке прогноза активности русловых процессов [2, 9].

Имеющиеся сегодня немногочисленные примеры изучения морфодинамики речных русел рек Пермского Прикамья не могут пока удовлетворить возросший научный и практический интерес к проблеме изменчивости развития русловых процессов во времени. Решение вопроса о сменяемости их активности в регионе требует значительного расширения географии исследований и привлечения для этого старых карт и любых других картографических источников, на которых с приемлемой достоверностью опознаются морфологические особенности речных русел. Такой подход может позволить на примере даже небольшого количества рек на целые столетия заглянуть в прошлое речных долин бассейна Средней Камы и с учетом современной ситуации, используя морфодинамический анализ, спрогнозировать направленность формирования пойменно-русловых комплексов в будущем.

Объектом исследований (опорным участком) стало нижнее течение р. Бабка, являющейся притоком р. Сылва – одной из крупнейших рек Предуралья. Источником информации о морфологическом строении русла р. Бабка и его морфодинамических изменениях во времени стали картографические материалы XVIII–XX вв.: карта Генерального межевания Кунгурского уезда Пермской губернии, современные топографические карты разных масштабов и космические снимки. Сравнение планового положения русла реки в разные периоды своего развития (использовался метод взаимоналожения плановых очертаний русла с приведением к одному масштабу) позволило сделать выводы о характере направленности руслового процесса во времени. Для периода, ограничивающегося последними десятилетиями, изучение направленности развития русла проводилось в основном с использованием дистанционных методов исследований. Как правило, они включали в себя вычисление морфолого-морфометрических характеристик русла для каждого из периодов.

Изучение смены характера развития русловых процессов р. Бабка с использованием картографических источников (конец XVIII в. – настоящее время) проводилось путем анализа изменения плановых очертаний русла. Совмещение (наложение) планов русел разного времени развития показало, что прирост значений извилистости на некоторых участках связан в основном с образованием свободных излу-

Период, предшествующий малому ледниковому периоду (МЛП) (примерно до XIV в.), относится ко времени развития широкопойменного извилистого русла, сформировавшего вторую надпойменную террасу. Следы русла петлеобразной формы (размеры превышают размеры староречий следующего этапа) просматриваются крайне редко и нечетко вследствие перекрытия поверхности продуктами почвенной эрозии. Этап, относящийся к МЛП (XIV–XVII вв.), представлен широкопойменным извилистым руслом с продольным и продольно-поперечным перемещениями в пределах современной первой надпойменной террасы (на тот момент поймы). Смена климатических условий окончания в конце МЛП спровоцировала увеличение стока и как следствие наступление периода резкого увеличения активности эрозионных процессов. В результате в течение короткого времени произошло образование извилистого русла с излучинами большего размера. На последних стадиях своего развития русло характеризовалось уже продольно-поперечным перемещением и прорывом шпор. Начало последнего периода можно отнести ко второй половине XIX в., когда по мере «накопления условий» для следующего более высокого уровня активности русловых процессов, сформировался плановый «рисунок» современного русла р. Бабка. Его морфодинамический вариант, фиксируемый на космических снимках, можно определить как чередование врезанных макроизлучин с участками извилистого адаптированного русла и относительно прямолинейных вставок.

Переходя к перспективам развития русловых процессов в ближайшем будущем, необходимо отметить, что само обсуждение этого вопроса возможно лишь при условии четкого понимания направленности климатических изменений, которые являясь ведущим фактором-регулятором активности эрозии, в значительной степени контролируют и активность карстово-суффозионных и антропогенных процессов, ранее уже сыгравших определенную роль в формировании рельефа долины реки. Для бассейна Сылвы, в состав которого входит и бассейн Бабки, по наличию установленных связей между ходом температур воздуха и количеством атмосферных осадков за весь период наблюдений, сделано заключение о сохранении здесь как минимум современных значений увлажненности (с перспективой даже небольшого увеличения) и в ближайшем будущем [8]. Подтверждением и иллюстрацией этого могут послужить результаты наблюдений за динамикой случаев очень сильных дождей в Уральском Прикамье за 1979–2015 гг. Число таких дождей (≥ 50 мм/12 ч) в этот период увеличилось с 1,6 до 3,5 случаев в год. При этом количество сильных ливней (≥ 30 мм/1 ч) на всем протяжении этого времени не меняется и составляет 2–3 случая в год [5]. Другим характерным примером увеличения количества атмосферных осадков с ростом температур является положительный тренд за 40 лет (1962–2002 г.), зафиксированный в динамике водного эквивалента снега, скапливающегося за зиму [4].

В качестве основной особенности современных климатообусловленных изменений стока рек с естественным режимом можно отметить изменения во внутригодовом распределении стока – увеличение водности в меженные периоды [8]. Однако наибольший интерес в отношении перспектив сохранения текущей активности русловых процессов в будущем (с тенденцией даже их некоторой активизации) представляют данные об увеличении весеннего стока в бассейне Сылвы. Его прирост в створе с. Подкаменное (р. Сылва) с $1430 \text{ м}^3/\text{с}$ (до 1978 г.) увеличился до $1580 \text{ м}^3/\text{с}$ (1978–2009 гг.), что составляет 10% [7]. В целом же прибавка годового стока по бассейну в 1981–2004 гг. по сравнению с периодом 1930–1980 гг. составила 25%, при этом наибольший прирост величин стока приходился на самые последние годы [8].

Определяя временной лаг (срочность) прогноза развития русловых процессов в долине Бабки можно опереться на результаты прогноза относительных изменений годового стока, рассчитанных для Восточно-Европейской равнины по ансамблю из 7 моделей СМIP3 (зависимости суточных сумм осадков от среднесуточных температур воздуха). Основным вывод по результатам расчетов – значимых изменений стока как в середине, так и в конце XXI в. для всего бассейна Сылвы не ожидается. Диапазон колебаний от современных величин может составить 0,9–1,1 [8].

Основным выводом, вытекающим из особенностей и характера климатических условий, прогнозируемых на текущее столетие, является то, что развитие русловых процессов в нижнем течении р. Бабка на ближайшую перспективу не претерпит значимых изменений в своей направленности и активности относительно современной ситуации. Косвенно на это указывает и примерная продолжительность трех последних этапов развития морфодинамических вариантов разновидностей ее русла в XIV–XXI вв. (рисунок). Локально в вогнутостях крупных врезанных излучин будет продолжаться размыв уступов надпойменных террас. Главной тенденцией смещения русла в границах молодой поймы будет его продольное смещение с образованием пологих адаптированных излучин в пределах относительно прямолинейных вставок (в основном бывших спрямлений русла) между врезанными излучинами.

Используя прогноз развития русловых процессов в долине нижнего течения р. Бабка, которая играет роль опорного участка (реки с типичной направленностью развития русловых процессов в регионе), можно сделать вывод, что морфодинамика речных русел и пойменно-русловых комплексов в речных долинах бассейна Сылвы до конца XXI в. останется на современном уровне и ждать кардинальных изменений в активности эрозионно-аккумулятивных процессов здесь нет оснований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00276.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Белый Б.В., Беркович К.М., Борсук О.К., Зайцев А.А., Лодина Р.В., Чалов Р.С., Чернов А.В. Морфология, динамика и регулирование русла р. Киренги в связи с транспортным освоением зоны БАМ // *Эрозия почв и русловые процессы*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. Вып. 7. С. 119–135.
2. Беркович К.М., Лодина Р.В., Сидорчук А.Ю. Русловой режим р. Нигер в районе сооружения металлургического завода у г. Аджаокута // *Эрозия почв и русловые процессы*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. Вып. 9. С. 127–145.
3. Беркович К.М., Р.С., Чалов Р.С., Чернов А.В. *Экологическое русловедение*. М.: ГЕОС, 2000. 332 с.
4. Булыгина О.Н., Коришунова Н.Н., Кузнецова В.Н. и др. Анализ изменчивости климата на территории России в последние десятилетия // *Труды ВНИИГМИ МЦД*. 2000. Вып. 167. С. 3–15.
5. Калинин Н.А. Условия формирования и прогноз сильных осадков с помощью индексов неустойчивости атмосферы на территории Уральского Прикамья // *Географический вестник*. 2019. №4(51). С. 96–112. Doi 10.17072/2079-7877-2019-4-96-112.
6. Маккавеев Н.И. *Русловой режим рек и трассирование прорезей*. М.: Речиздат, 1949. 202 с.
7. *Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы / под ред. В.Ю.Георгиевского. [Электронный ресурс]*. Ливны: Издатель Мухаметов Г.В., 2015.
8. *Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века*. М.: МАКС Пресс, 2008. 292 с.
9. Чалов Р.С. Историческое палеорусловедение: предмет, методы исследований и роль в изучении рельефа // *Геоморфология*. 1996. №4. С. 13–18.

The dynamics of the polar electrical conductivity of air in the surface layer of the atmosphere during the shower rain of various genesis (on the example of Tomsk)

^{1,2}Oglezneva M.V., ¹Kalchikhin V.V., ¹Kobzev A.A., ^{1,2}Nagorskiy P.M., ^{1,2}Pustovalov K.N.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: oglezneva.m@yandex.ru, vvk@imces.ru, alexey-kobzev@mail.ru, npm_sta@mail.ru, const.pv@yandex.ru

The electricity of the surface layer of atmosphere is related with optical phenomena and atmospheric aerosol. Thunderstorms and shower clouds generate complex perturbations in most atmospheric electrical parameters [1,2]. According to [3], the air conductivity is very high when detecting active cold fronts and shower rain. However, these data were obtained in the second half of the last century; they require refinement and a more detailed analysis, which determines the aim of this work.

For research, we used in-situ data in the summer period of 2018–2019, according to the Geophysical Observatory of IMCES SB RAS. To clarify the synoptic conditions, we used synoptic maps with frontal analysis [4] and satellite images from the spectroradiometers MODIS (Terra and Aqua satellites) and VIIRS (Suomi NPP satellite) [5].

During the analyzed period, 45 cases of rainfall were selected. At the same time, cases of rainfall were divided according to the type of atmospheric fronts and air masses that caused them.

As a result of studies, it was found that frontal showers in the vast majority of cases lead to an increase in the polar conductivity of air. Thus, we can conclude that heavy rain is associated with the passage of atmospheric fronts. Establishing a physical mechanism for the influence of the frontal surface and associated precipitation on $\lambda \pm$ requires additional studies.

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of Ministry of Science and Higher Education of Russia within federal targeted program for research (agreement N 14.607.21.0205, of 15.05.2018 unique identifier RFMEFI60718X0205).

REFERENCES:

1. Bennett A.J., Harrison R.G. *Atmospheric Electricity in Different Weather conditions // Weather*. – 2007. – V. 62. – P. 277–283.
2. Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M. *Response in the surface atmospheric electric field to the passage of isolated air mass cumulonimbus clouds // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018. – V. 172. – P. 33–39.
3. Gunn R. *The electrofication of precipitation and thunderstorms. // Proceedings of the IRE*. 1957. V.45. N. 10., p.1331-1358.
4. <https://meteoinfo.ru/mapsynop>.
5. <https://worldview.earthdata.nasa.gov>.

Динамика полярных электропроводностей воздуха в приземном слое атмосферы при выпадении ливневых осадков различного генезиса (на примере г. Томска)

^{1,2}Оглезнева М.В., ¹Кальчихин В.В., ¹Кобзев А.А., ^{1,2}Нагорский П.М., ^{1,2}Пустовалов К.Н.

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: oglezneva.m@yandex.ru, vvk@imces.ru, alexey-kobzev@mail.ru, npm_sta@mail.ru, const.pv@yandex.ru

Электрическое состояние приземного слоя атмосферы тесно связано с оптическими явлениями и атмосферным аэрозолем и существенно изменяется под влиянием облачности, особенно конвективных форм (Cb), и сопровождающих их атмосферных явлений [1–5]. Согласно [6], проводимость воздуха значительно изменяется при прохождении активных холодных фронтов (ХФ) и связанных с ними ливневых осадков. Однако эти данные были получены в середине прошлого века, требуют уточнения и более детального анализа, что определяет цель данной работы.

Для исследования были использованы данные измерений метеорологических и атмосферно-электрических величин в летний период 2018–2019 гг., полученные на геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (ГО ИМКЭС, г. Томск). Полярные электропроводности воздуха ($\lambda_{\pm}$) измерялись прибором «Электропроводность-2» (ГГО им. А.И. Воейкова), градиент потенциала электрического поля ($\nabla\varphi$) «CS110» (Campbell Scientific, Inc), характеристики осадков – чашечным осадкомером «Rain Collector П» (Davis Instruments), оптическим осадкомером «ОПТИОС» (ИМКЭС СО РАН) и акустическим датчиком метеостанции WXT520 (Vaisala). Для анализа метеорологических условий, сопутствующих вариациям электропроводности воздуха и градиента потенциала электрического поля, привлекались данные измерений метеорологических величин (температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, направления и скорости ветра и др.), производимых с помощью автоматических метеостанций «АМК-03» (ИМКЭС СО РАН) и «WXT520» (Vaisala), и визуальных наблюдений за облачностью и атмосферными явлениями, проводимых в ГО ИМКЭС и на ГМС «Томск» (расположена в ~ 6 км от ГО ИМКЭС). Для уточнения синоптических условий использовались синоптические карты с фронтальным анализом [7] и спутниковые изображения в видимой части спектра (RGB-композиции), полученные по данным спектрорадиометров MODIS (спутники Terra и Aqua) и VIIRS (спутник Suomi NPP) [8].

За анализируемый период было отобрано 45 случаев выпадения ливневых осадков фронтального и внутримассового происхождения. При этом случаи выпадения ливневых осадков подразделялись по типу обусловивших их атмосферных фронтов и воздушных масс на: тёплый фронт (ТФ), холодный фронт (ХФ), фронт окклюзии (ФО), арктическая (АВ), умеренная (УВ) и тропическая (ТВ) воздушная масса.

Далее строились синхронизированные по времени графики вариаций атмосферно-электрических и метеорологических величин. Рассмотрим типичные примеры динамики атмосферно-электрических и метеорологических величин при прохождении кучево-дождевых облаков и выпадении ливневых осадков фронтального (рис. 1) и внутримассового (рис. 2) происхождения.

Согласно рисунку 1, при прохождении холодного атмосферного фронта над г. Томском 20 июля 2018 г. отмечалось прохождение фронтальной облачной системы, с которой были связаны «медленные вариации» $\nabla\varphi$ [5], представленные одним отрицательным возмущением, и интенсивные ливневые осадки. Во время выпадения ливневого дождя наблюдался рост λ_{-} , который нельзя объяснить электродным эффектом и который коррелировал с изменением интенсивности осадков.

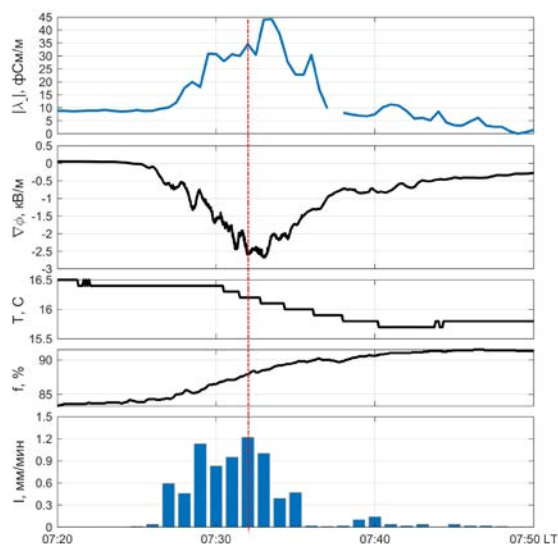


Рис. 1. Динамика отрицательной электропроводности воздуха (λ_-), градиента потенциала электрического поля ($\nabla\phi$), температуры (T) и относительной влажности воздуха (f), а также интенсивности осадков (I) при прохождении ХФ 20 июля 2018 г. Красная линия соответствует максимуму интенсивности осадков.

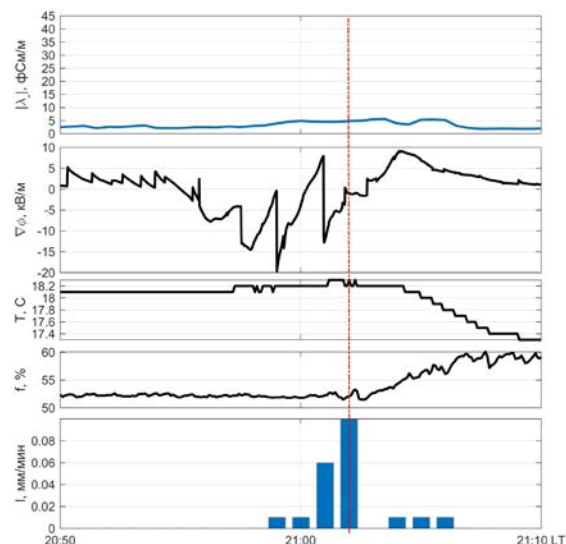


Рис. 2. Динамика отрицательной электропроводности воздуха (λ_-), градиента потенциала электрического поля ($\nabla\phi$), температуры (T) и относительной влажности воздуха (f), а также интенсивности осадков (I) при прохождении внутримассового кучево-дождевого (грозового) облака 17 августа 2019 г. Красная линия соответствует максимуму интенсивности осадков.

При прохождении внутримассового кучево-дождевого (грозового) облака, развивающегося в УВ, 17 августа 2019 г. (рис. 2) фиксировались «медленные вариации» $\nabla\phi$, представленные как отрицательным так и положительным возмущением, на которые накладывались «быстрые вариации» $\nabla\phi$, связанные с интенсивной грозой в окрестностях пункта наблюдения, а также отмечалось выпадение ливневого дождя. При этом λ_- не испытывала сильных изменений, подобных отмеченным в предыдущем примере, а её изменчивость, в целом, описывалась электродным эффектом.

На основе анализа вариаций полярных электропроводностей во время отобранных случаев выпадения ливневых осадков были выделены 3 типа изменения полярных электропроводностей воздуха при выпадении ливневых осадков: рост, отсутствие изменений и неопределённая ситуация.

Соотношение повторяемостей этих типов изменения $\lambda_{\pm}$ представлено на рисунке 3а. Согласно этому рисунку значимый рост электропроводностей отмечался примерно в половине всех рассмотренных случаев, а его отсутствие – в $\frac{1}{3}$ случаев. Соотношение синоптических условий, с которыми были связаны случаи с наличием и отсутствием роста $\lambda_{\pm}$ представлены на рисунках 3б и 3в соответственно. Рост $\lambda_{\pm}$ в подавляющем большинстве случаев отмечался при выпадении ливневых осадков фронтального происхождения. При этом в 45 % осадки были связаны с холодным фронтом, а 36 % с фронтом окклюзии. Случаи с отсутствием изменений $\lambda_{\pm}$, наоборот, были связаны, главным образом, с внутримассовыми ливнями, из которых $\frac{2}{3}$ отмечались в умеренной воздушной массе, а примерно $\frac{1}{4}$ – в арктической.

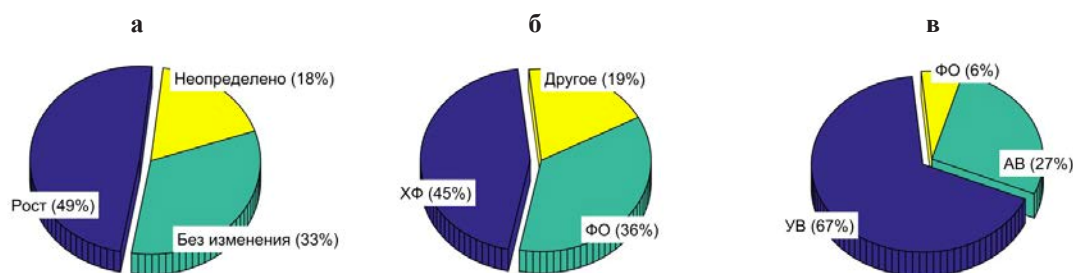


Рис. 3. Соотношение повторяемостей различных типов изменения $\lambda_{\pm}$ при выпадении ливневого дождя (а), а также синоптических условий, при которых отмечался (б) и отсутствовал (в) значимый рост $\lambda_{\pm}$.

В результате проведённого исследования было отмечено, что выпадение фронтальных ливневых осадков в подавляющем большинстве случаев приводит к росту полярных электропроводностей воздуха, в то время как внутримассовые ливни, как правило, не оказывают значимого влияния на $\lambda_{\pm}$. Таким образом, можно сделать вывод о том, что эффект роста $\lambda_{\pm}$ при выпадении ливневого дождя связан с наличием атмосферного фронта. Установление физического механизма влияния фронтальной поверхности и связанных с ней осадков на $\lambda_{\pm}$ требует проведения дополнительных исследований.

Благодарности. Работа финансово поддержана Минобрнауки России (Соглашение № 14.607.21.0205, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60718X0205).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тверской Н.П. Атмосферное электричество. – Л.: Гидрометеиздат, 1949. 252с.
2. Чалмерс Дж.А. Атмосферное электричество. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 420 с.
3. Красногорская Н.В. Электричество нижних слоёв атмосферы и методы его измерения. – Л.: Гидрометиздат, 1972. – 323 с.
4. Bennett A.J., Harrison R.G. Atmospheric Electricity in Different Weather conditions // *Weather*. – 2007. – V. 62. – P. 277–283.
5. Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M. Response in the surface atmospheric electric field to the passage of isolated air mass cumulonimbus clouds // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018. – V. 172. – P. 33–39.
6. Gunn R. The electrofication of precipitation and thunderstorms. // *Proceedings of the IRE*. 1957. V.45. N. 10., p.1331-1358.
7. Гидрометцентр России. Синоптические карты [Электронный ресурс]. – URL: <https://meteo-info.ru/mapsynop> (дата обращения: 10.05.2020).
8. EOSDIS Worldview [Электронный ресурс]. – URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (дата обращения: 15.05.2020).

The electric field of the undisturbed atmosphere, its diurnal and seasonal variations in the southeast of Western Siberia: a case study on Tomsk city

^{1,2}Pustovalov K.N., ^{1,2}Nagorskiy P.M., ^{1,2}Oglesneva M.V., ¹Sazonov Ya.S.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: const.pv@yandex.ru, npm_sta@mail.ru, oglezneva.m@yandex.ru, sazonov_yaroslav@inbox.ru

Currently, many researchers have an interest to the investigation of the electric field in the fair-weather conditions along with its diurnal and seasonal variations across all regions of the world [1-3]. However, a similar study in the southeastern part of Western Siberia has not yet been carried out. In this regard, the paper aims to estimate the mean values of a potential gradient of the electric field and its variations using the example of Tomsk.

The data set of electric field potential gradient ($\nabla\varphi$) measurements was registered at the Geophysical Observatory of the IMCES SB RAS (Tomsk) using Pole-2 electric field mill produced by Voeikov MGO and CS110 electric field meter sensor of Campbell Scientific, Inc. The time series of one-minute average $\nabla\varphi$ values from 2006 to 2019 have been used in this study.

The mean value of $\nabla\varphi$ is 275 V m^{-1} , and its typical changes are in the range $155\text{--}372 \text{ V m}^{-1}$. The diurnal variation per year on average are characterized by a simple wave with a minimum at 7 hours and a maximum at 22 hours of local time (00 and 15 UTC, respectively). The changes over the course of a day normalized by the average $\nabla\varphi$ values, in general, are consistent with daily pattern called the Carnegie curve [4]; however, their maximum and minimum are shifted relative to the curve by an earlier time (~ 3 hours). In the annual mode, the maximum $\nabla\varphi$ in Tomsk is observed in February, and the minimum in June–July. Additionally, the variance of $\nabla\varphi$ values also has been increasing from summer to winter.

Acknowledgements: This work was supported by PFSR SB RAS (№ AAAA-A17-117013050031-8)

REFERENCES:

1. Bennett A.J., Harrison R.G. *Atmospheric Electricity in Different Weather conditions* // *Weather*. – 2007. – V. 62. – P. 277–283.
2. Anisimov S.V., Afinogenov K.V., Shikhova N.M. *Dynamics of undisturbed midlatitude atmospheric electricity: from observations to scaling* // *Radiophys. Quantum Electron.* – 2014. – V. 56, № 11. – P. 709–722.
3. Adzhiev A.K., Kupovykh G.V. *Measurements of the Atmospheric Electric Field under High-Mountain Conditions in the Vicinity of Mt. Elbrus* // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* – 2015. – V. 51, № 6. – P. 633–638.
4. Yaniv R., Yair Y., Price C., Katz Sh. *Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel* // *Atmospheric Research.* – 2016. – V. 172–173. – P. 119–125.
5. Harrison R.G. *The Carnegie Curve* // *Surv Geophys.* – 2013. – V. 34. – P. 209–232.

Электрическое поле невозмущённой атмосферы, а также его суточные и сезонные изменения на юго-востоке Западной Сибири на примере г. Томска

^{1,2}Пустовалов К.Н., ^{1,2}Нагорский П.М., ^{1,2}Оглезнева М.В., ¹Сазонов Я.С.

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: const.pv@yandex.ru, npm_sta@mail.ru, oglezneva.m@yandex.ru, sazonov_yaroslav@inbox.ru

Состояние атмосферы в условиях «хорошей погоды» в настоящее время достаточно хорошо изучено [1-6]. Известно, что суточные вариации электрического поля обусловлены влиянием как глобальных (унитарная вариация – кривая Карнеги [3]), так региональных и локальных факторов [4]. Вклад последних может существенно отличаться в различных регионах земного шара. Для континентальных районов минимум и максимум около 4 и 19 UT соответственно, обусловленные унитарной вариацией электрического поля, проявляются значительно слабее чем в близости моря, и при этом часто отмечается дополнительный дневной максимум, обусловленный конвективным генератором, особенно активным в локальный полдень [5, 6]. Согласно [6], суточные вариации градиента потенциала электрического поля в приземном слое можно разделить на три группы, характеризующиеся различной формой вариаций. Годовой ход электрического поля хорошей погоды, в целом, описывается зимним максимумом и летним минимумом [1,2]. В настоящее время исследование суточных и сезонных вариаций электрического поля в условиях «хорошей погоды» были выполнены в различных регионах земного шара [7-11]. При этом подобного исследования на территории юго-востока Западной Сибири до сих пор не проводилось. В связи с этим, целью данного исследования является оценка средних значений градиента потенциала электрического поля, а также его суточных и сезонных вариаций на юге Западной Сибири на примере г. Томска.

Для исследования были использованы данные измерений градиента потенциала электрического поля ($\nabla\phi$), выполняемых в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (ГО ИМКЭС, г. Томск) с помощью флюксометров «Поле-2» (ГГО им. А. И. Воейкова) и «CS110» (Campbell Scientific, Inc). Использовался временной ряд средниминутных значений $\nabla\phi$ за период наблюдений с 2006 по 2019 г. Для анализа метеорологических условий, сопутствующих измеряемым вариациям градиента потенциала электрического поля привлекались данные измерений метеорологических величин (температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, направления и скорости ветра и др.) и визуальных наблюдений за облачностью и атмосферными явлениями, проводимых в ГО ИМКЭС и на ГМС «Томск» [7], расположенной примерно в 6 км от обсерватории.

На основе метеорологических данных отбирались стандартные сроки, для которых выполнялись условия «хорошей погоды» согласно методическим указаниям [12]. Далее выделялись вариации $\nabla\phi$, соответствующие интервалам времени ± 30 мин относительно отобранных сроков. Данный шаг по времени подобран исходя из допущения, что условия «хорошей погоды», зарегистрированные в метеорологический срок, будут сохраняться в этом интервале времени.

Затем выделенные значения $\nabla\phi$ проходили статистический анализ как за весь период исследования в целом, так и отдельно для каждого месяца и времени суток (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 и 21 UT). Средние значения рассчитывались как средние арифметические без учёта 5% максимальных и минимальных значений. Данный подход позволяет избежать влияния экстремально высоких и низких значений, обусловленных непредвиденным нарушением условий «хорошей погоды».

Проведён статистический анализ изменчивости значений $\nabla\phi$ в условиях «хорошей погоды» на юго-востоке Западной Сибири на примере г. Томска, а также были построены графики суточных и сезонных изменений средних значений. Для удобства сравнения с унитарной вариацией (кривой Карнеги) [3] и результатами других авторов ось времени на графиках откладывалась в UTC.

Согласно рис. 1, изменчивость значений градиента потенциала электрического поля в условиях «хорошей погоды» в Томске, в целом, описывается логнормальным распределением. Среднее за весь период исследования значение $\nabla\phi$ составляет -275 В/м, а медианное -248 В/м. Среднеквадратическое отклонение $\nabla\phi$ составляет 434 В/м, а его интерквартильный рамах -217 В/м. Типичные для г. Томска значения $\nabla\phi$, ограниченные процентилими 25 и 75 %, изменяются в диапазоне от 155 до 372 В/м.

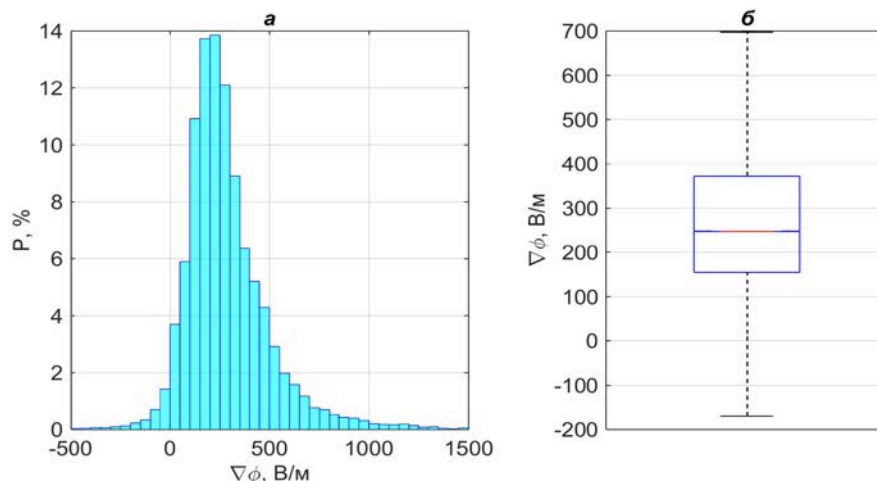


Рис. 1. Распределение значений $\nabla\phi$ в условиях «хорошей погоды» в г. Томск (а) и его описание с помощью квартильной диаграммы («Box Plot»; б).

Согласно описанной в [6] классификации, регистрируемые в Томске суточные вариации, в целом, можно отнести к первому типу – колебательные вариации континентального типа с одним максимумом и одним минимумом. К следует из рис. 2а, в среднем за год минимальные значения приходятся примерно на 7 ч. местного времени (00 UT), а максимум – на 22 ч. местного времени (15 UT). В летние месяцы также отмечаются вторичный максимум и минимум, приходящиеся на 10 и 13 ч. местного времени (3 и 6 UT), обусловленные конвективным генератором [5]. Суточная амплитуда значений $\nabla\phi$ (в среднем за год) составляет $\sim 60\%$ от среднего значения, что хорошо согласуется подобными значениями, полученными в других континентальных пунктах наблюдения [6]. В зимние месяцы амплитуда суточных изменений $\nabla\phi$ существенно превосходит среднегодовую и может достигать до 100% . Суточные изменения нормированных относительно средних значений $\nabla\phi$ в условиях «хорошей погоды» в Томске, в целом, согласуются с унитарной вариацией, однако их максимум и минимум смещены относительно кривой Карнеги на более раннее время на ~ 3 ч.

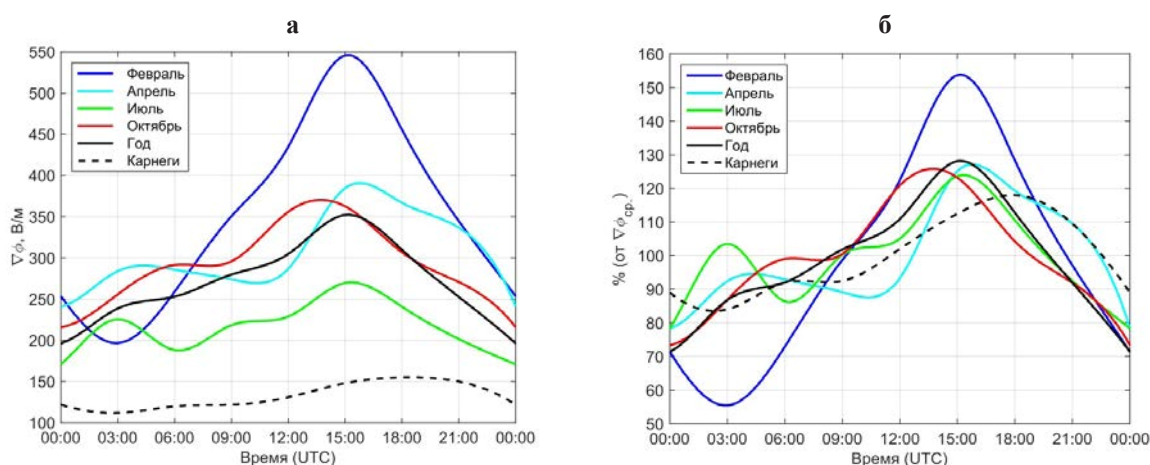


Рис. 2. Сглаженные (spline) суточные вариации абсолютных (а) и нормированных относительно среднего (б) значений $\nabla\phi$ в условиях «хорошей погоды» (за февраль, апрель, июль, октябрь и в среднем за год), рассчитанные на основе данных измерений $\nabla\phi$ в г. Томске за период 2006–2019 гг., в сравнение с унитарной вариацией (кривой Карнеги [3]).

Внутригодовую динамику среднемесячных значений градиента потенциала электрического поля в условиях «хорошей погоды» в г. Томске, можно приближённо описать простой волной с минимумом в июне-июле и максимумом в феврале (Рис. 3), что, в целом, согласуется с подобными оценками в [1, 2, 7, 8]. При этом дисперсия значений $\nabla\phi$ также увеличивается от лета к зиме. Годовая амплитуда среднемесячных значений $\nabla\phi$ в Томске составляет 50 % от среднего многолетнего значения $\nabla\phi$. Данное значение хорошо согласуется с оценками средней амплитуды годовых изменений $\nabla\phi$ для северного полушария – 48 % [2].

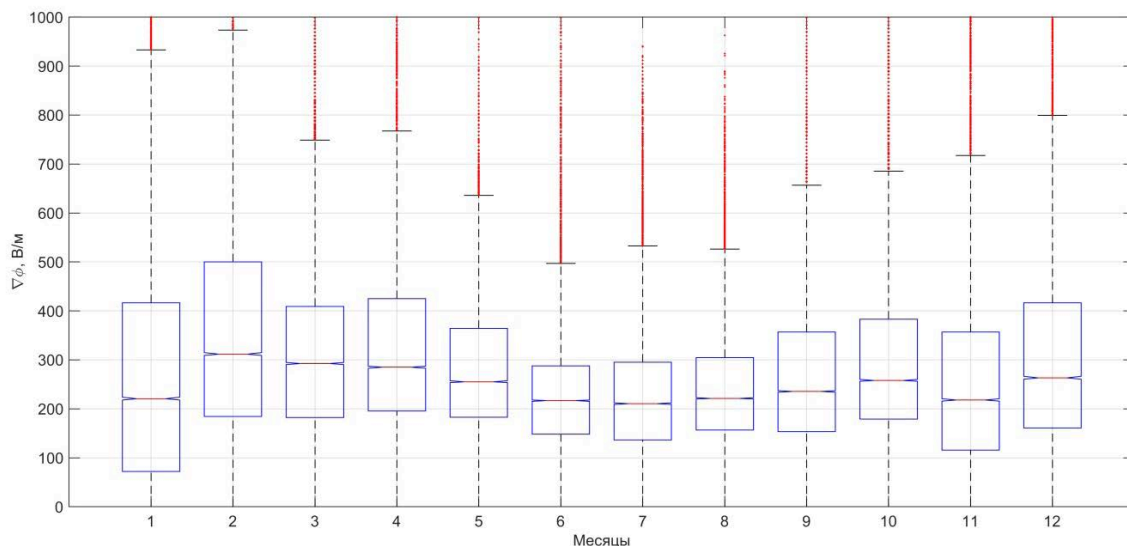


Рис. 3. Изменчивость значений $\nabla\phi$ в условиях «хорошей погоды», описываемая с помощью квартальных диаграмм («Box Plots»), для каждого месяца в г. Томске.

На рисунке 4 показана совместная сезонно-суточная изменчивость $\nabla\phi$ в г. Томске. Согласно этому рисунку, минимальные значения $\nabla\phi$ на юго-востоке Западной Сибири, в целом, отмечаются утром (около 7 ч местного времени) в летние месяцы, а максимальные – вечером (около 22 ч местного времени) в конце зимы.

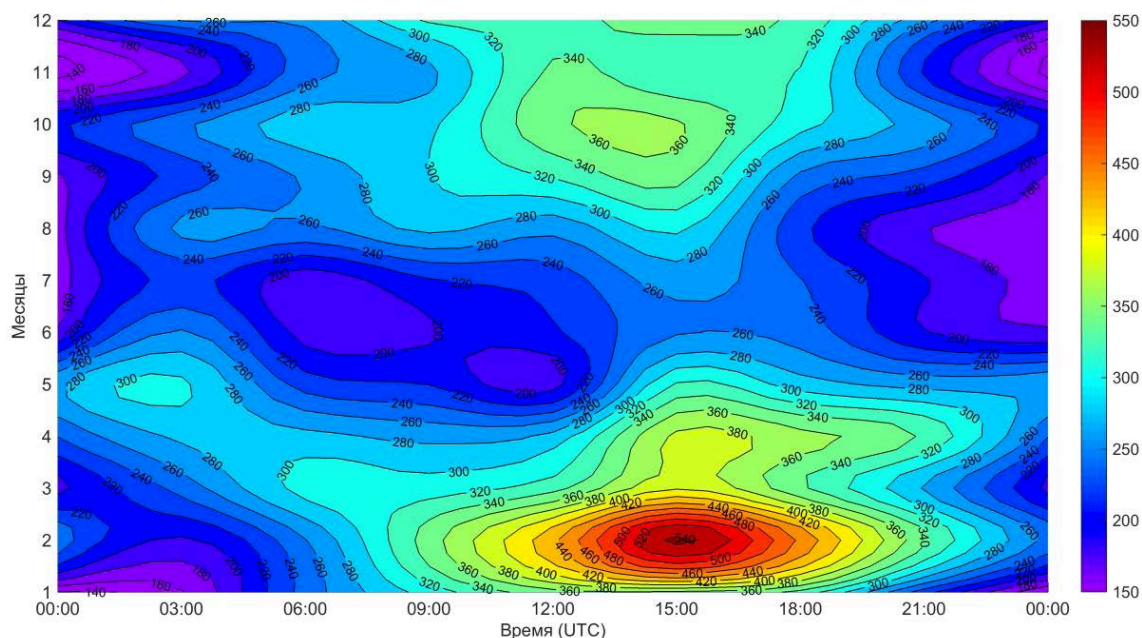


Рис. 4. Сглаженные сезонно-суточные изменения средних значений $\nabla\phi$ в невозмущённых условиях в г. Томске.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке госбюджетной темы IX.135.1 (номер госрегистрации АААА-А17-117013050031-8).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Чалмерс Дж.А. Атмосферное электричество. – Л.: Гидрометеиздат. – 1974. – 420 с.
2. Красногорская Н.В. Электричество нижних слоёв атмосферы и методы его измерения. – Л.: Гидрометиздат, 1972. – 323 с
3. Harrison R.G. The Carnegie Curve // *Surv Geophys.* – 2013. – V. 34. – P. 209–232.
4. Bennett A.J., Harrison R.G. Variability in surface atmospheric electric field measurements // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2008. – V. 142. – P. 012046.
5. Анисимов С.В., Мареев Е.А. Геофизические исследования глобальной электрической цепи // *Физика Земли.* – 2008. – №10. – С.8–18.
6. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели) / под ред. Ю. С. Седунов [и др.]. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 509 с.
7. Bennett A.J., Harrison R.G. Atmospheric Electricity in Different Weather conditions // *Weather.* – 2007. – V. 62. – P. 277–283.
8. Anisimov S.V., Afinogenov K.V., Shikhova N.M. Dynamics of undisturbed midlatitude atmospheric electricity: from observations to scaling // *Radiophys. Quantum Electron.* – 2014. – V. 56, № 11. – P. 709–722.
9. Adzhiev A.K., Kupovykh G.V. Measurements of the Atmospheric Electric Field under High-Mountain Conditions in the Vicinity of Mt. Elbrus // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* – 2015. – V. 51, № 6. – P. 633–638.
10. Yaniv R., Yair Y., Price C., Katz Sh. Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel // *Atmospheric Research.* – 2016. – V. 172–173. – P. 119–125
11. ВНИИГМИ-МЦД [Электронный ресурс]. – URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 18.02.2019).
12. РД-52.04.168-88. Методические указания. Наблюдения за атмосферным электричеством на станциях. – М.: Государственный комитет СССР по гидрометеорологии, 1989. – 35 с.

Relationship between ultraviolet radiation and total ozone content, cloudiness, aerosol optical depth and albedo of the underlying surface derived from the data of long-term measurements carried out in Tomsk

Sklyadneva T.K., Belan B.D., Ivlev G.A.

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: tatyana@iao.ru, bbd@iao.ru, ivlev@iao.ru

In this paper, an interrelationship of variations of ultraviolet radiation with the factors affecting it (total ozone content, cloudiness, aerosol optical depth and *albedo* of the underlying surface) is analyzed based on the long-term measurement data of UV-B radiation carried out in Tomsk.

The following results have been obtained.

A good inverse correlation between changes in UV-B radiation ($\Delta UV-B_i$) and the total ozone content (ΔTOC_i) was revealed, for both individual years and the entire observation period. The maximum correlation was observed in 2011 ($r = -0.42$), the minimum – in 2006 ($r = -0.22$).

The dependences of $\Delta UV-B_i$ on ΔTOC_i for different total cloud amount N_{all} range ($N_{all} \leq 2$, $2 < N_{all} \leq 4$, $4 < N_{all} \leq 6$, $6 < N_{all} \leq 8$, $8 < N_{all} \leq 10$) were revealed, for both $AOD_{500} \leq 0.15$ and without taking into account AOD.

A quantitative relationship has been found between UV – B radiation and the zenith angle of the Sun for different ranges of TOC and underlying surface (snow, no snow) (fig.1).

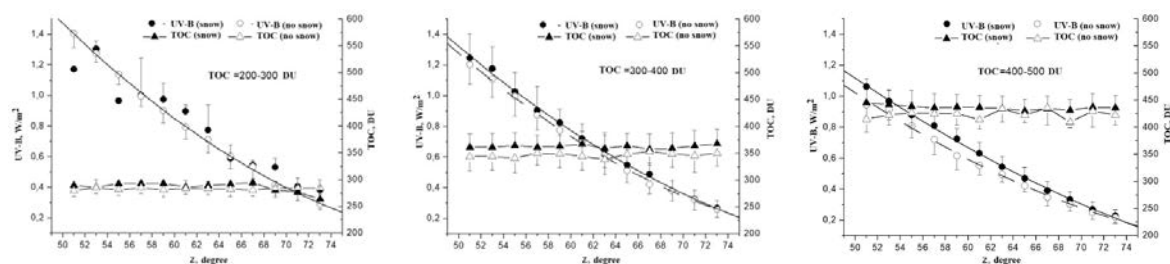


Fig. 1. The dependence of UV – B radiation on the solar zenith angle for different total ozone content range ($N_{all} = 0-2$, $AOD < 0.3$).

From figure 1 it can be seen that in case of stable snow cover, the average TOC values are higher than the average TOC values without snow. Despite this, there is an increase in the UV – B radiation level with stable snow cover on the underlying surface by 3–7% in comparison with one in the absence of snow and TOC = 300–400 DU, and by 8–13% with TOC = 400–500 DU and $52^\circ < Z < 68^\circ$.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 19-05-50024). To implement the grant, IOA SB RAS infrastructure was used, which was established and operated under State contract No. AAAA-A17-117021310142-5, including the Center for Collective Use «Atmosphere».

Взаимосвязь вариаций ультрафиолетовой радиации с изменением общего содержания озона, облачности, аэрозольной оптической толщи и альbedo подстилающей поверхности по данным многолетних измерений в Томске

Складнева Т.К., Белан Б.Д., Ивлев Г.А.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
E-mail: tatyana@iao.ru, bbd@iao.ru, ivlev@iao.ru

Ультрафиолетовая радиация (УФ), поступающая на земную поверхность, является важным фактором влияния на многие атмосферные процессы, на изменение состава атмосферы в приземном слое. Следует отметить, что данные о многолетних вариациях УФ-радиации очень важны для определения ее кумулятивного действия на атмосферные процессы.

В настоящее время более чем в 200 пунктах, расположенных по всему миру, осуществляется мониторинг солнечной радиации в области спектра УФ–В. В России мониторинг радиации в УФ–В области ведется всего на нескольких станциях [1,2]. На ТОР-станции ИОА СО РАН ($56^\circ 28' \text{ с.ш.}, 85^\circ 03' \text{ в.д.}$), расположенной в Академгородке города Томска с 2002 года ведется непрерывный мониторинг УФ–В радиации. Измерения осуществляются ультрафиолетовым пиранометром UVB-1 (Yankee Environmental Systems, Inc., США).

К основным факторам, влияющим на поступление УФ-радиации, можно отнести облачность, альbedo подстилающей поверхности, атмосферный аэрозоль, озон и некоторые другие малые газовые примеси. Для коротковолновой части спектра УФ-радиации существенно увеличивается роль общего содержания озона [3].

Целью данной работы является анализ взаимосвязи вариаций значений приземной ультрафиолетовой радиации с общим содержанием озона (ОСО), облачностью, аэрозольной оптической толщиной (АОТ) и альbedo подстилающей поверхности.

Для этого использованы следующие исходные данные:

- многолетний ряд наблюдений УФ–В радиации (2003–2016 гг.), полученный на ТОР-станции ИОА СО РАН [4];
- данные общего содержания озона, аэрозольной оптической толщи ($\lambda=500 \text{ нм}$), полученные при спутниковых наблюдениях прибором AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) и аэрозольных измерениях солнечным фотометром в Томске (программа Aerosol Robotic Network – AERONET) [5];
- синоптическая база данных, содержащая ежечасную информацию о количестве общей и нижней облачности, форме облаков.

На первом этапе работы была проведена предварительная подготовка данных для последующего анализа:

1) Рассчитаны суточные суммы УФ–В радиации по данным ежечасных наземных измерений интегральной интенсивности УФ–В радиации ультрафиолетовым пиранометром UVB-1. Суточное поступление УФ–В радиации имеет ярко выраженный годовой ход с максимумом в летний период и минимумом зимой. Поэтому для оценки взаимосвязи вариаций УФ–В радиации и ОСО использовалось сравнение отклонений суточных сумм УФ–В радиации и средних значений ОСО для каждого дня (Y_i) от средних многолетних значений для данного дня времени года ($Y_{\text{сред}}$). Полученный результат нормировался на средние многолетние значения для данного дня времени года за рассматриваемый период (2003–2016 гг.). Отклонения рассчитывались по формуле:

$$\Delta_i = (Y_i - Y_{\text{сред}}) / Y_{\text{сред}} \cdot 100\% .$$

Таким образом, было получено два многолетних ряда (2003-2016 гг.) дневных отклонений УФ-В радиации ($\Delta U\Phi-B_i$) и ОСО (ΔOCO_i), а так же ряды отклонений для каждого года.

2) Для оценки совместного влияния облачности и АОТ на суточное поступление УФ-В радиации при изменении ОСО из всего массива данных было сформировано несколько массивов, отсортированных по признаку наличия того или иного балла облачности в светлое время суток. В итоге получилось пять массивов с разным баллом общей облачности ($N_{общ}$): $N_{общ} \leq 2$, $2 < N_{общ} \leq 4$, $4 < N_{общ} \leq 6$, $6 < N_{общ} \leq 8$, $8 < N_{общ} \leq 10$. Затем внутри каждого из пяти полученных массивов данных, были выбраны дни с $AOT_{500} \leq 0,15$ (чистая атмосфера).

3) Для анализа взаимосвязей вариаций значений приземной ультрафиолетовой радиации от альбедо подстилающей поверхности из общего массива данных исключены ситуации дымов. Выделение дымовой ситуации выполнялось при условии $AOT > 0,3$. Пороговое значение выбрано с учетом среднего годового хода АОТ за 1995-2018 гг. в Томске без дымов [6]. Было исключено 195 случаев. Затем проведена группировка отобранных значений по типу подстилающей поверхности (наличие или отсутствие снежного покрова). Выделено две группы данных: при снежном покрове (снег) и отсутствии снежного покрова (нет снега). Сделана разбивка полученных двух групп данных на подмассивы по признакам нахождения Солнца в определенных диапазонах зенитных углов (Z) в момент проведения измерения УФ-радиации в диапазоне $50^\circ \leq Z < 74^\circ$. Проверена и выяснена допустимость использования данных при 0 и 1-2 балле облачности. Для исключения влияния облачности был сформирован массив данных при условии ясного неба ($N_{общ} = 0$ баллов) – 1717 случая. С целью получения большего количества случаев проанализировано насколько изменится ситуация, если к имеющимся случаям ясного неба будут добавлены случаи с облачностью 1-2 балла. Сравнение средних величин УФ-В радиации при $N_{общ} = 0$ и $N_{общ} = 0-2$ балла и разных ОСО, показало, что при расширении диапазона до 2 баллов изменение значений УФ-радиации не превысило 6% (в пределах погрешности измерительных приборов). Поэтому в дальнейшем использовался массив данных, полученный для $N_{общ} = 0-2$ балла – 2541 случаев.

В ходе проведенных исследований получены следующие результаты:

- Выявлена хорошая обратная корреляционная зависимость между изменениями УФ-В радиации ($\Delta U\Phi-B_i$) и общим содержанием озона (ΔOCO_i), как для отдельных лет, так и всего периода наблюдений. Максимальная корреляционная связь наблюдалась в 2011 году с коэффициентом корреляции $r = -0,42$, минимальная – в 2006 ($r = -0,22$). Все значения коэффициента корреляции значимы с доверительной вероятностью 99% по критерию Стьюдента.

- Выявлены зависимости приращения УФ-В радиации ($\Delta U\Phi-B_i$) от приращения общего содержания озона (ΔOCO_i) для каждого диапазона балла облачности, как для $AOT_{500} \leq 0,15$, так и без учёта АОТ. На рисунке 1 для примера показана зависимость приращения УФ-В радиации ($\Delta U\Phi-B_i$) от приращения общего содержания озона (ΔOCO_i) при облачности меньше 2 баллов. На рисунке 1а представлена ситуация в условиях $AOT_{500} \leq 4$, а на рисунке 1б – в условиях $AOT_{500} \leq 0,15$. В условиях прозрачной атмосферы с облачностью до 6 баллов приращение дневных сумм УФ-В радиации (в случае уменьшения ОСО) на 30,1% выше среднего многолетнего значения. При этом, для такого же балла облачности, но без учёта АОТ, среднее многолетнее приращение УФ-В радиации составляет уже 23%. Для облачности $6 < N_{общ} \leq 8$ и $8 < N_{общ} \leq 10$ в условиях прозрачной атмосферы приращение УФ-В радиации составляет 19,2% и 2,5% соответственно, без учёта АОТ – 14,9% и -8,4%.

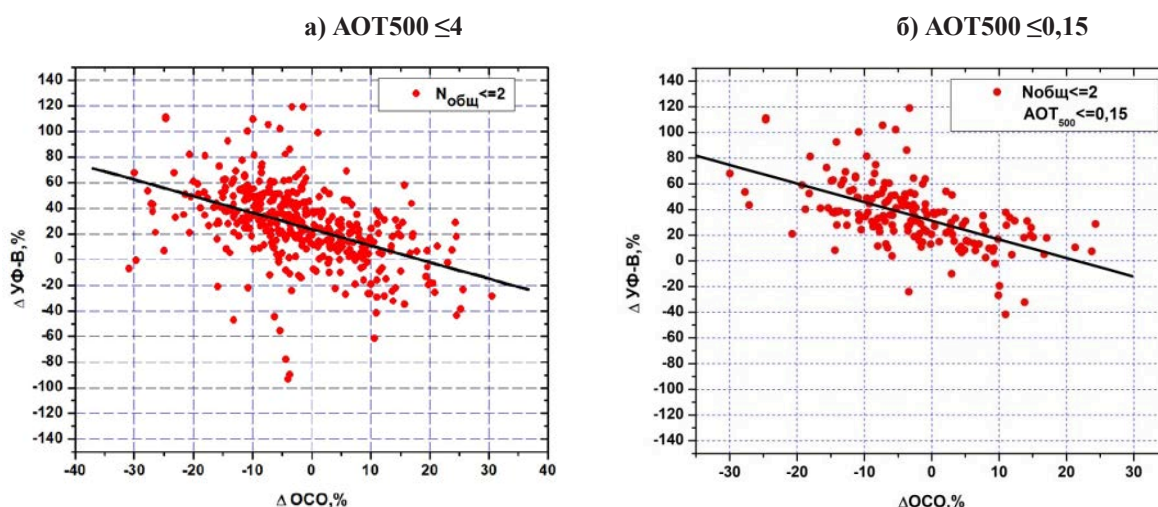


Рис. 1. Регрессионная связь $\Delta U\Phi-B_i$ и ΔOCO_i .

- Установлена количественная связь между УФ-В радиацией и зенитным углом Солнца для разных диапазонов изменения ОСО и двух типов подстилающей поверхности (снег, нет снега). В

диапазонах изменения ОСО 300-400 и 400-500 е.Д. изменение УФ-В радиации хорошо аппроксимируется полиномом 2-й степени (коэффициент детерминации $R^2=0,99$) (рис.2). Для ОСО=200-300 е.Д. картина иная: при отсутствии снега изменение УФ-радиации также хорошо описывается полиномом 2-й степени, при условии снежного покрова (из-за слабой статистической обеспеченности) – нет, поэтому выявление каких-либо закономерностей в данном диапазоне изменения ОСО не представляется возможным.

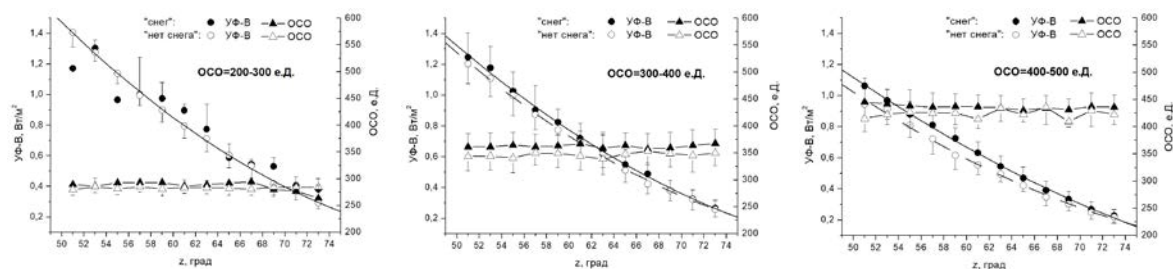


Рис. 2. Зависимость УФ-В радиаций от зенитного угла Солнца для разных диапазонов изменения общего содержания озона ($N_{\text{общ}}=0-2$ балла, $AOT<0,3$).

• **Сделаны оценки изменения УФ-В радиации при изменении типа подстилающей поверхности.** Из рисунка 2 видно, что средние значения ОСО при устойчивом снежном покрове превышают средние значения ОСО при отсутствии снега. Несмотря на это отмечается увеличение уровня УФ-В радиации при устойчивом снежном покрове на подстилающей поверхности, зенитных углах солнца $52^\circ < Z < 68^\circ$ и $ОСО=300-400$ е.Д. на 3-7% по сравнению с уровнем УФ-В радиации при отсутствии снега, на 8-13% при $ОСО=400-500$ е.Д. Приращение УФ-В радиации (Δ , %) рассчитывалось по формуле:

$$\Delta = (\text{УФ-В}_{\text{снег}} - \text{УФ-В}_{\text{нет снега}}) / \text{УФ-В}_{\text{нет снега}} * 100.$$

• **Получены соотношения относительных изменений УФ-В радиации и ОСО – RAF** (Radiation Amplification Factor) [7] ($RAF = (\Delta \text{УФ-В} / \text{УФ-В}) / (\Delta \text{ОСО} / \text{ОСО})$) для каждой пары зенитных углов $Z = Z_N - Z_{N+2}$ в диапазоне $50^\circ < Z < 74^\circ$ для двух типов подстилающей поверхности (рис.3). Как видно из рисунка 3 RAF для идентичных условий ОСО при наличии и отсутствии снега на подстилающей поверхности имеет как существенно отличающиеся значения, так и различный характер поведения в зависимости от зенитного угла Солнца.

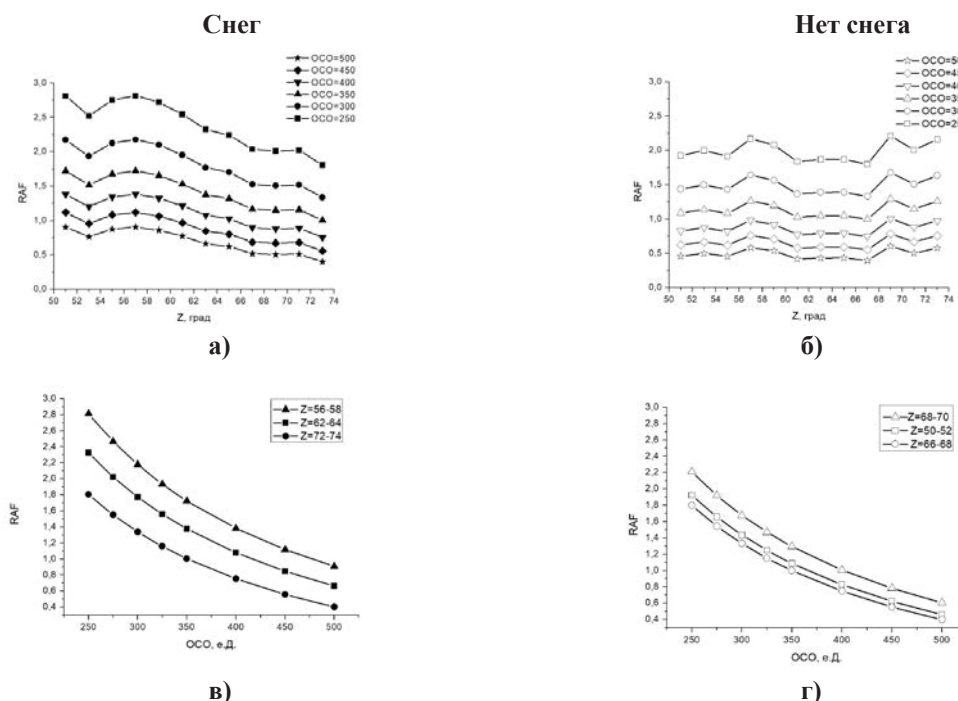


Рис. 3. RAF в зависимости от зенитных углов Солнца (а,б) и общего содержания озона (в,г) – максимальные, средние и минимальные RAF.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №19-05-50024. Для выполнения гранта использовалась инфраструктура ИОА СО РАН, созданная и эксплуатируемая по госзаданию № АААА-А17-117021310142-5, включая ЦКП «Атмосфера».

ЛИТЕРАТУРА:

1. Chubarova N., Nezval Ye. Thirty year variability of UV irradiance in Moscow // *J. Geophys. Res.* – 2000. – V. 105., No D10. – Pp. 12529–12539.
2. Нахаев М.И., Ананьев Л.Б., Иванова Н.С., Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю.. Ультрафиолетовая облученность, УФ-индекс и их прогнозирование // *Труды Гидрометцентра России.* – 2014. – Вып. 351. – С. 173-187.
3. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006* // *World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project.* – 2007. – Report No 50. – 572 p.
4. Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аришинова В.Г., Аришинов М.Ю., Ахлестин А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фазлиев А.З., Фофонов А.В. Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет TOR-станции ИОА СО РАН // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, N 10. С.845-853.
5. https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/type_one_station_opera_v2_new.
6. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С. Межгодовая и сезонная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы в районе г. Томска (1995–2018 гг.) // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т.32. №7. С.548-555.
7. Booth CR, Madronich S (1994) Radiation amplification factors: improved formulation accounts for large increases in ultraviolet radiation associated with Antarctic ozone depletion. *Ultraviolet radiation in Antarctica: measurements and biological effects.* Antarctic research series 62: 39–42.

The results of long-term ground-based measurements of the total solar radiation in West Siberia

Sklyadneva T.K., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Fofonov A.V.

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: tatyana@iao.ru, michael@iao.ru, bbd@iao.ru, denis@iao.ru, alenfo@iao.ru

The spatial and temporal variability of global solar radiation over West Siberia are analyzed in this paper. The data on ground-based measurements from eight stations were used.

Results of the monitoring of the global solar radiation, carried out at the TOR-station of IOA SB RAS in 1996-2018 are presented. It is revealed that during the period of the study quite steady radiation regime was observed with maximum of annual incoming solar radiation in 2003. The amount and variation range of the monthly solar radiation varied depending on the season. During the spring–summer period, the coefficient of variation of the monthly radiation varied from 9 to 12% and during the autumn period from 15 to 17%.

The results of analysis of spatial variability of total solar radiation in West Siberia in 2004-2018 are submitted. It is shown that the period 2004-2018 in Western Siberia had a stable radiation regime. The range of average annual incoming radiation varied from 2918 MJ/m² in the northern taiga to 4584 MJ/m² in the forest-steppe zone (fig.1). The tendency of a slight increase in the incoming solar radiation has been observing since 2013. The coefficient of variation annual sums does not exceed 6%.

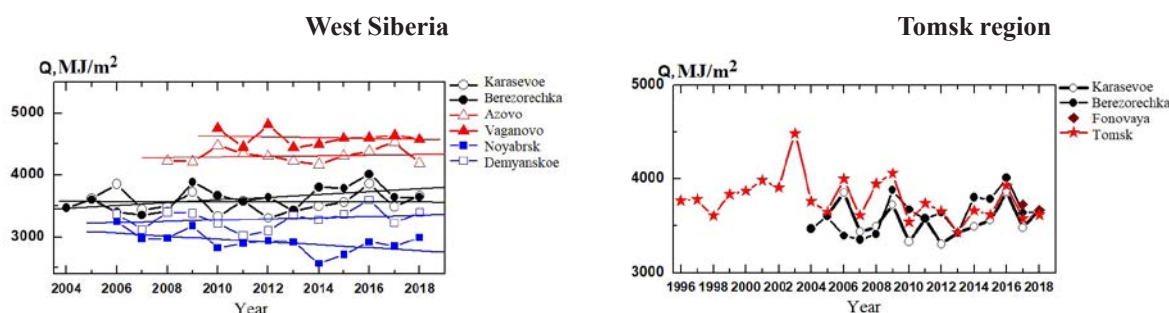


Fig. 1. Interannual variability of the total radiation at the measurement posts.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 19-05-50024). To implement the grant, IOA SB RAS infrastructure was used, which was established and operated under State contract No. AAAA-A17-117021310142-5, including the Center for Collective Use «Atmosphere».

Результаты многолетних наземных измерений суммарной солнечной радиации на территории Западной Сибири

Скляднева Т.К., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Фофанов А.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

E-mail: tatyana@iao.ru, michael@iao.ru, bbd@iao.ru, denis@iao.ru, alenfo@iao.ru

В настоящее время важная проблема, стоящая перед человечеством, – глобальное потепление климата, которое происходит неравномерно как во времени, так и в пространстве. Одним из факторов формирования термического режима является колебание потоков солнечной радиации. Приходящая солнечная радиация также играет важную роль в фотохимических и химико-биологических процессах происходящих в атмосфере Земли. Уровень и вариации приходящей солнечной радиации определяются рядом факторов, вклад каждого из этих факторов переменный и зависит от физико-географических и климатических особенностей региона. В последние десятилетия наметились новые тенденции в изменениях как радиационных, так и метеорологических параметрах атмосферы. Согласно данным наземных наблюдений, увеличение поступления солнечной радиации, наблюдаемое практически на всей территории России в последнее десятилетие XX в., не столь крупномасштабно и однозначно в начале XXI века. На Европейской части России, особенно в центральных и южных районах, сохраняется положительная тенденция поступления солнечной радиации [1]. На ряде станций значения стабилизировались на определенном уровне, хотя и не достигли максимальных значений, наблюдаемых в 1960-х годах. В тоже время отмечается, что в некоторых регионах Азиатской части России возобновилась тенденция к уменьшению прямой и суммарной радиации. Наиболее ярко это проявляется в Средней Сибири [2]. На основе анализа изменений радиационных потоков и факторов, определяющих их приход и перераспределение в атмосфере в [3] показано, что с середины 1990-х годов многие радиационные параметры приобрели тенденции, отличные от наблюдавшихся в прошлые годы. Для некоторых параметров тенденции значимы и сохраняются на протяжении длительного периода и, следовательно, являются климатическими изменениями.

В данной работе анализируется пространственно-временная изменчивость суммарной солнечной радиации (Q) на территории Западной Сибири в 1995-2018 гг.

Для этого используются многолетние ряды наблюдений Q полученные:

- а) на TOR-станции ИОА СО РАН (56028' с.ш., 85003' в.д.), расположенной на восточной окраине г. Томска [4],
- б) на базе обсерватории «Фоновая», расположенной в 60 км к западу от города на берегу р. Оби (56025' с.ш., 84004' в.д.),
- в) на российско-японской сети мониторинга парниковых газов «JR-station» развернутой на территории Западной Сибири [5].

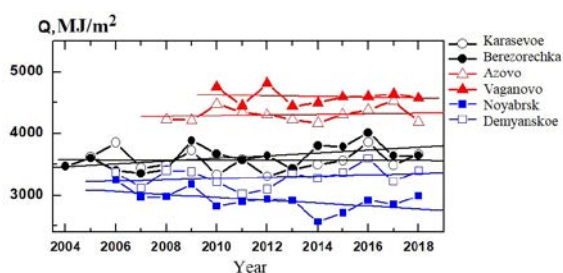
Однородность ряда измерения суммарной радиации обеспечивается использованием однотипных приборов и одинаковой методикой поверки. Измерения суммарной радиации ведутся пиранометром Ю.Д. Янишевского М-115М в спектральном диапазоне 300-2400 нм (TOR-станция) и пиранометром KIPP&Zonen Model CM3 (спектральный диапазон измерения 305-2800 нм) на сети «JR-station». Пункты наблюдения расположены в разных ландшафтных зонах: от зоны северной тайги (Ноябрьск, Демьянское) до лесостепи (Саввушка, Азово) на южных границах России.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ранее сотрудниками ИОА СО РАН в работе [6] проведён анализ пространственно-временной изменчивости суммарной солнечной радиации на территории Западной Сибири за 2004-2011 гг. Было показано, что: на юге и юго-востоке Западной Сибири отмечена тенденция отрицательного тренда приходящей солнечной радиации, а в северной части – незначительный положительный тренд. Анализ более поздних данных измерений показал, что на всех постах с 2013 года наблюдается незначительный рост поступления суммарной радиации (рис.1). Прослеживается широтная зависимость распределения Q с максимальным поступлением в лесостепной зоне (Ваганово Азово) и минимальным – в зоне северной тайги (Ноябрьске). Коэффициент вариации годовых сумм суммарной радиации на всех постах наблюдения не превышал 6%.

Одним из основных фактором, определяющим режим коротковолновой радиации в атмосфере, является облачность. В некоторых регионах России в последние 10-15 лет при сохранении тенденции к увеличению общей облачности проявилась тенденция к уменьшению количества облаков нижнего яруса из-за уменьшения повторяемости сплошной облачности. В Томске случаи отсутствия облаков в дневные часы наблюдения не превышают 9%, в остальных случаях наблюдаются облачные образования. В рассматриваемый период в Томске наблюдается рост как общей, так и нижней облачности (относитель-

Западная Сибирь



Томская область

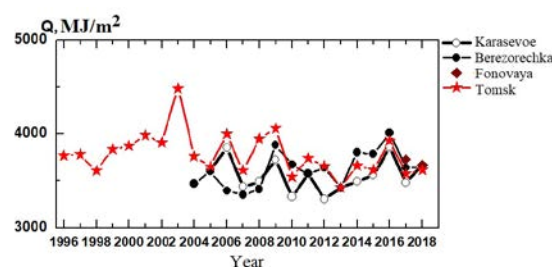


Рис. 1. Межгодовая изменчивость поступления суммарной радиации на постах измерения.

ная величина тренда 2,1% и 6,2% для общей и нижней облачности соответственно). Увеличение общей и нижней облачности определило тенденцию незначительного спада годового поступления суммарной радиации. В Томске в период 1996–2018 гг. относительная величина тренда составила -3%. В период 2004–2018 г. относительная величина тренда в Томске и на посту Карасевое (58°14'47"с.ш. 82°25'16,2" в.д.), расположенном в центре Томской области, составила -7,5% и -0,2% соответственно. Полученные результаты не противоречат работе Хлебниковой Е.И. [2], в которой отмечается, что в период 1986–2010 г. на азиатской территории России сформировалась обширная область со слабыми отрицательными трендами приходящей радиации.

Среднегодовой приход солнечной радиации в Томске составил 3781 ± 221 МДж/м² (1996–2018 гг.). Максимальное годовое поступление суммарной солнечной радиации в Томске зарегистрировано в 2003 г., минимальное – в 2013 г.

Среднегодовой приход солнечной радиации составил за период 2004–2018 гг.:

а) на территории Томской области: 3718 ± 183 МДж/м² (Томск), 3560 ± 173 МДж/м² (Карасевое), 3618 ± 192 МДж/м² (Березоречка);

б) в зоны северной тайги 2918 ± 174 МДж/м² (Ноябрьск), 3288 ± 150 МДж/м² (Демьянское);

в) в лесостепной зоне 4305 ± 118 МДж/м² (Азово), 4584 ± 126 МДж/м² (Ваганово).

Месячный приход суммарной солнечной радиации изменяется от года к году. На рисунке 2 показана изменчивость месячных сумм суммарной радиации на постах наблюдения. Величина и диапазон колебаний месячных сумм радиации зависят от сезона. В весенне-летний период коэффициент вариации месячных сумм Q меняется от 9% до 12%; в осенний период – в пределах 15–17%, а в зимний период, из-за неустойчивости циркуляционных процессов, возрастает до 20%. Минимальные вариации месячных сумм суммарной радиации наблюдались в летний период (2–5%). В районе северных мачт наиболее устойчивым оказался июнь. На юге Западной Сибири минимальные вариации месячных сумм суммарной радиации отмечены в июле в районе д. Ваганово ($V=2,4\%$).

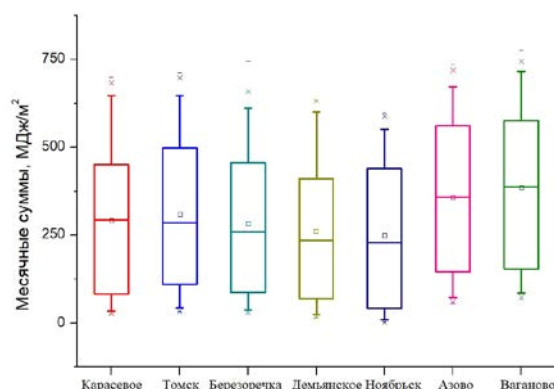


Рис. 2. Изменчивость месячных сумм суммарной радиации на постах измерения.

В Томске в период 1996–2018 гг. наблюдался ярко выраженный отрицательный тренд Q в весенний период (относительная величина тренда -1%) и незначительный отрицательный тренд Q в остальные сезоны (рис.3). Из проведенного анализа изменчивости месячных сумм суммарной радиации следует, что более подробное разбиение массива анализируемых данных не целесообразно. Также отметим, что в Томске июнь месяц, как правило, характеризовался большой изменчивостью синоптических условий. В то же время за рассматриваемый период максимальное поступление суммарной радиации в июне регистрировалось чаще, чем в июле.

Суточное поступление суммарной радиации менялось в диапазоне $0,3 \div 32$ МДж/м² (на юге) и $0,04 \div 31$ МДж/м² (на севере) Западной Сибири. На рисунке 4 приведена повторяемость суточных сумм суммарной радиации в районе Ноябрьска и Азова.

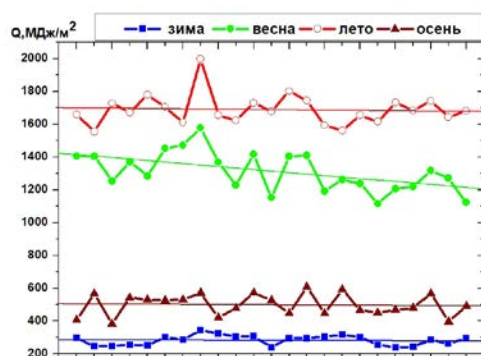


Рис. 3. Сезонная изменчивость поступления суммарной солнечной радиации в Томске за 1996–2018 гг.

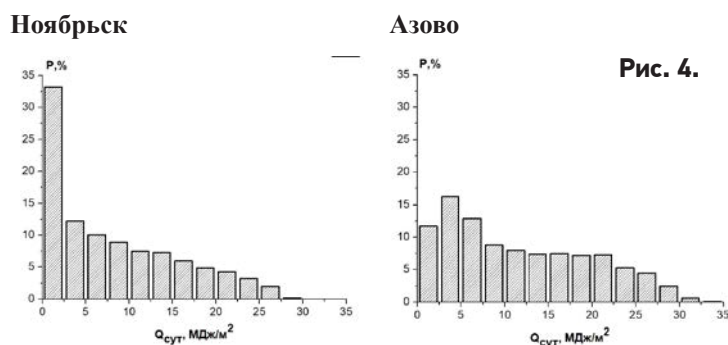


Рис. 4. Повторяемость суточных сумм суммарной радиации.

ВЫВОДЫ

Результаты анализа многолетнего мониторинга солнечной радиации на территории Западной Сибири показали:

1. По данным российско-японской сети мониторинга парниковых газов «JR-station» период 2004–2018 гг. на территории Западной Сибири характеризуется устойчивым радиационным режимом. Диапазон среднего годового поступления суммарной радиации – от 2918 МДж/м² в зоне северной тайги до 4584 МДж/м² в лесостепной зоне. С 2013 года наблюдается незначительный рост поступления суммарной солнечной радиации. Коэффициент вариации годовых сумм суммарной радиации на всех постах наблюдения не превышал 6%.

2. По данным TOR-станции увеличение общей и нижней облачности определило тенденцию незначительного спада годового поступления суммарной солнечной радиации в Томске. В период 1996–2018 гг. относительная величина тренда Q составила -3%. Годовые суммы суммарной радиации колебались в пределах 5,8%. Среднегодовое поступление суммарной солнечной радиации составило 3781 ± 221 МДж/м².

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №19-05-50024. Для выполнения гранта использовалась инфраструктура ИОА СО РАН, созданная и эксплуатируемая по госзаданию № АААА-А17-117021310142-5, включая ЦКП «Атмосфера».

ЛИТЕРАТУРА:

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2014). Т.1. - М.: Росгидромет.
2. Хлебникова Е.И., Махоткина Е.Л., Саль И.А. Облачность и радиационный режим на территории России: наблюдаемые климатические изменения // Труды ГГО. 2014. Вып. 573. С. 65-91.
3. Горбаренко Е.В. Климатические изменения радиационных параметров атмосферы по данным наблюдений в Метеорологической обсерватории МГУ // Метеор. и гидрология. 2016. №12. С.5-17.
4. Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Ахлестин А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фазлиев А.З., Фофонов А.В. Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет TOR-станции ИОА СО РАН // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, N 10. С.845-853.
5. Watai T., Machida T., Shimoyama K., Krasnov O., Yamamoto M., Inoue G. Development of an Atmospheric Carbon Dioxide Standard Gas Saving System and Its Application to a Measurement at a Site in the West Siberian Forest // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2010. V. 27. № 5. P.843–855.

6. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Складнева Т.К., Фофонов А.В., Т. Machida, M. Sasakiwa Пространственно-временная изменчивость суммарной солнечной радиации на территории Западной Сибири// *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т.26. № 8. С. 659-664.

Latitudinal trends of small-scale wildfires in Eastern Siberia observed by long-term satellite data

Tomshin O.A., Solovyev V.S.

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia

E-mail: tomshinoa@gmail.com, solovyev@ikfia.ysn.ru

Wildfires play an important role in natural cycles, performing the ecological functions of natural regeneration of forests and maintaining biodiversity. As a result of fires, a huge amount of combustion products is released that affect the physical and chemical processes in the atmosphere. Under the conditions of observed climate change, an increase in the number of fires, their area and, correspondingly, the amount of emissions is expected. The aim of this work is to study the latitudinal features of the seasonal course of wildfires in Eastern Siberia (ES) according to long-term satellite observations.

Most of the Eastern Siberia is covered by boreal forests, annually exposed to wildfires. Different climatic and geographical conditions and a variety of types of vegetation cover significantly affect the forest fire regime in the region, which is reflected in the uneven distribution of burns across ES. To take these factors into account, the territory of the aircraft was divided into 4 latitudinal zones: zone 1 - 65-70 ° N; zone 2 - 60-65 ° N; zone 3 - 55-60 ° N; zone 4 - 50-55 ° N.

For the analysis of fire activity, we used the data of a MODIS spectroradiometer (product MCD64A1 C6) installed on Terra and Aqua satellites. Product MCD64A1 C6 is a monthly burn map with a spatial resolution of 500 m for the period 2001-2019. For classification by the size of the total burns for each year, individual "burned" pixels of the product MCD64A1 C6 were grouped into clusters (burns). Pixels were considered to be part of one burnt if the distance between them did not exceed 500 m. Fire scars on cultivated agricultural land were excluded from the analysis according to the classification scheme Plant Functional Types of the product MCD12Q1 C6. The work considers the interannual seasonal dynamics of the number of burns of small fires (burning sizes of 0-40 ha).

The occurrence and development of fires is affected by a large number of meteorological factors (temperature, precipitation, humidity, etc.). Since a significant part of Eastern Siberia refers to territories with a sharply continental climate, which are characterized by high summer air temperatures with low rainfall and low humidity, the correlation of burnt areas with air temperature anomalies obtained from the ERA5-Land reanalysis was considered as part of a preliminary analysis.

An analysis of trends and correlations of the number of burns and temperature anomalies in the northern zone (1) showed the presence of a positive trend in the number of burns in June and August. A positive trend in the number of burns in June is observed along with a positive temperature trend ($R = 0.71$), which may indicate an earlier start of the fire season due to the formation of more favorable temperature conditions.

In zone 2, significant positive trends in the number of burns in June and July are observed, and in June, a positive temperature trend is also observed ($R = 0.53$), which, as in the case of zone (1), can indicate an earlier start of the fire season.

In zone 3, a positive trend in the number of burns in April, June and August was detected, and a negative trend in May. A positive trend in the number of burns in April is observed along with an increase in temperature ($R = 0.60$), which may also indicate the formation of more favorable conditions for the early start of the fire hazard season. The negative trend in the number of burns in May cannot be explained only by temperature conditions.

In zone 4, a negative trend in the number of burns in April and May was detected. A negative trend in April is observed despite a positive temperature trend. The correlation between the number of burns and the temperature in April and May shows a weak connection ($R = 0.13$ and $R = -0.27$, respectively), which indicates the prevalence of other factors affecting the fire regime

Широтные особенности трендов мелкомасштабных гарей в Восточной Сибири по данным многолетних спутниковых наблюдений

Томшин О.А., Соловьев В.С.

Институт космических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия
E-mail: tomshinoa@gmail.com, solovyev@ikfia.ysn.ru

ВВЕДЕНИЕ

Природные пожары играют важную роль в природных циклах, выполняя экологические функции естественного обновления лесов и поддержания биоразнообразия. В результате пожаров выбрасывается огромное количество продуктов горения, оказывающих влияние на физические и химические процессы в атмосфере [1-4]. На месте гарей меняется температурный режим почв, что может привести к деградации вечномёрзлых пород в зоне их распространения. В условиях наблюдаемого изменения климата, ожидается увеличение числа пожаров, их площади и, соответственно, количества выбросов. Целью данной работы является исследование широтных особенностей сезонного хода природных пожаров в Восточной Сибири (ВС) по данным многолетних спутниковых наблюдений.

Данные и методика. Большая часть территории Восточной Сибири (рис. 1) покрыта бореальными лесами, ежегодно подверженных природным пожарам [5]. Разные климатогеографические условия и многообразие типов растительного покрова заметно влияют на пожарный режим в регионе, что отражается в неравномерном распределении гарей на территории ВС (рис. 1). Для учёта этих факторов территория ВС была разделена на 4 широтных зоны (рис. 1): зона 1 – 65-70°N; зона 2 – 60-65°N; зона 3 – 55-60°N; зона 4 – 50-55°N.

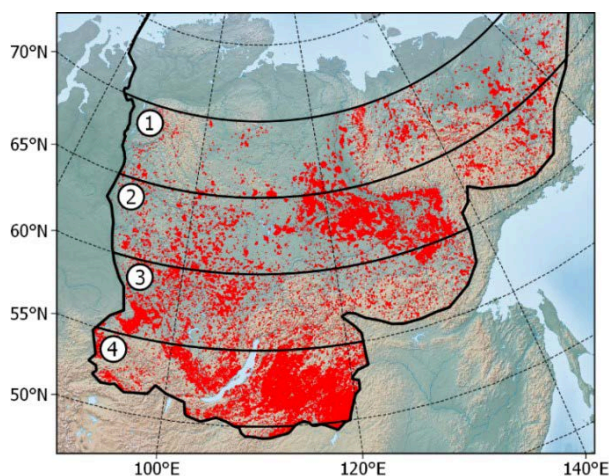


Рис. 1. Сводная карта гарей MODIS (MCD64A1 C6, красные точки) на территории Восточной Сибири за 2001-2019 гг. Цифрами обозначены рассматриваемые широтные зоны.

Для анализа пожарной активности были использованы данные спектрорадиометра MODIS (продукт MCD64A1 C6) [6], установленного на спутниках Terra, Aqua. Продукт MCD64A1 C6 представляет собой ежемесячные карты гарей с пространственным разрешением 500 м за период 2001-2019 гг. Для классификации по размеру итоговых гарей за каждый год отдельные «сгоревшие» пиксели продукта MCD64A1 C6 группировались в кластеры (гари). Пиксели считались частью одной гари, если расстояние между ними не превышало 500 м. Из рассмотрения были исключены гари, приходящиеся на культивируемые сельхоз земли, согласно схеме классификации Plant Functional Types продукта MCD12Q1 C6 [7]. В работе представлены предварительные результаты анализа межгодовой сезонной динамики природных пожаров на примере мелкомасштабных гарей (размеры гари 0-40 га). Выбор этого класса гарей обусловлен тем, что он отражает уровень пожароопасности лесов на начальном этапе сезона пожаров (доля 40-50%).

На возникновение и развитие пожаров влияет большое количество метеорологических факторов (температура, осадки, влажность и др.). Поскольку значительная часть Восточной Сибири относится к территориям с резко континентальным климатом, для которых характерны высокие летние температуры воздуха с незначительным количеством осадков и низкой влажностью, в рамках предварительного анализа рассмотрена корреляция гарей с аномалиями температуры воздуха, полученными по данным реанализа ERA5-Land [8].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для каждой широтной зоны и каждого месяца пожароопасного сезона (апрель-сентябрь) были построены графики многолетней изменчивости количества гарей и аномалий температуры воздуха (рис. 2).

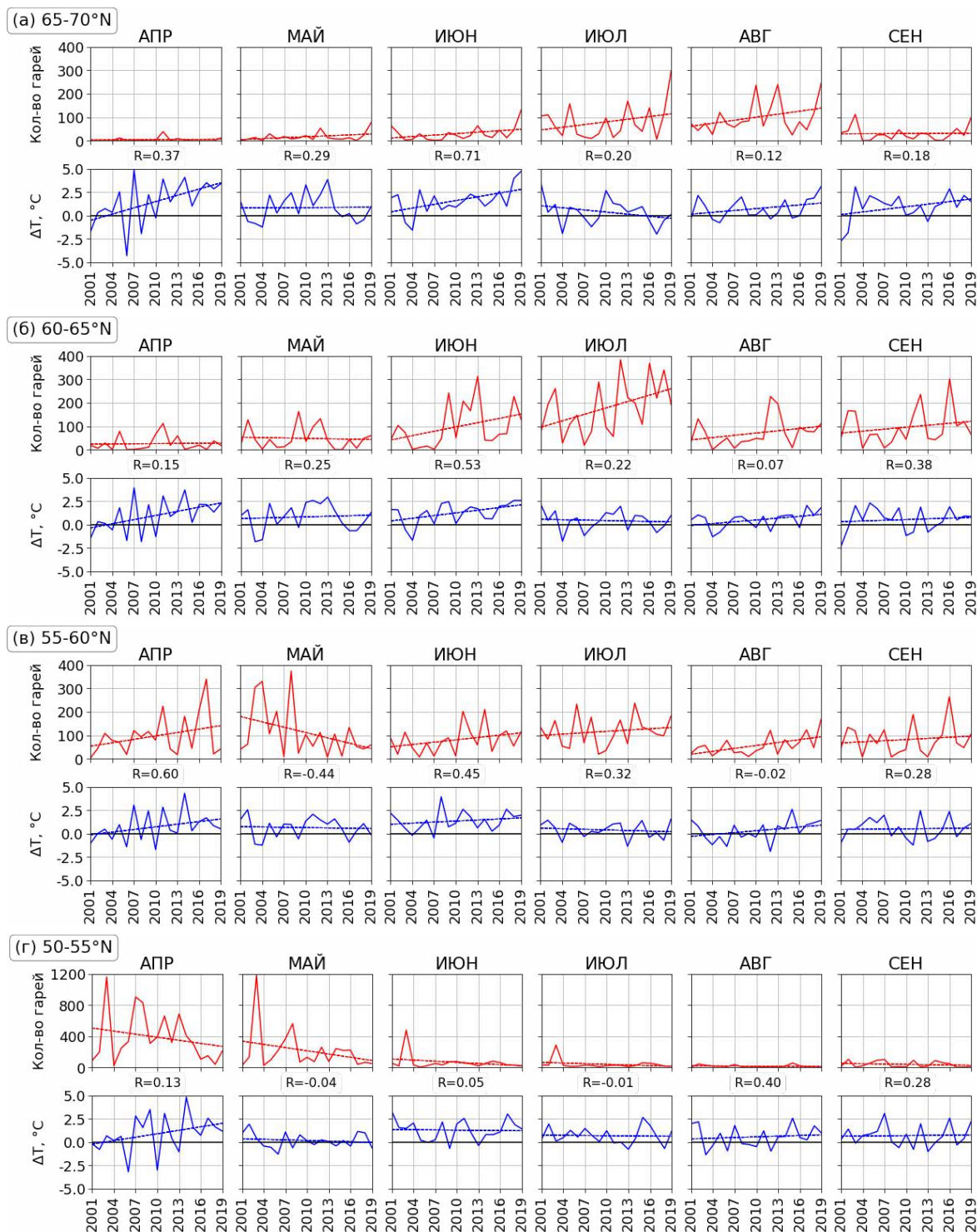


Рис. 2. Межгодовые вариации количества гарей и аномалий температуры воздуха (ΔT) в течение пожароопасного сезона (апрель-сентябрь) для рассматриваемых зон. Линейный тренд обозначен пунктирной линией. Значения коэффициентов корреляции между количеством гарей и аномалиями температуры приведены между соответствующими парами графиков.

На рис. 2г представлена межгодовая сезонная динамика гарей в зоне 4 (50-55°N). Максимум гарей в данной зоне приходится на апрель-май, после чего наблюдается спад значений, который продолжается до сентября. В апреле и мае наблюдается отрицательный тренд количества гарей. Количество гарей в июне-сентябре невелико, тренды незначительны. В вариациях аномалий температуры существенный положи-

тельный тренд наблюдается только в апреле, в остальные месяцы значения близки к среднемуголетним или несколько выше. Корреляция значений ΔT и количества гарей в апреле незначительна ($R=0,13$).

Межгодовая сезонная динамика гарей в зоне 3 ($55-60^\circ N$) представлена на рис. 2в. Чётко выраженный максимум отсутствует. Отмечается незначительный положительный тренд количества гарей в апреле, июне и августе, отрицательный – в мае. В вариациях аномалий температуры положительный тренд наблюдается в апреле (корреляция с количеством гарей $R=0,60$), июне ($R=0,45$) и августе ($R=-0,02$), в остальные месяцы значения близки к среднемуголетним или несколько выше.

На рис. 2б представлена межгодовая сезонная динамика гарей в зоне 2 ($60-65^\circ N$). Общее количество гарей в данной зоне достаточно высоко, максимум обычно наблюдается в период июнь-июль. Сильный положительный тренд количества гарей наблюдается в июне и июле, слабый – в августе и сентябре. Положительный тренд температуры наблюдается в апреле ($R=0,15$) и июне ($R=0,53$).

Межгодовая сезонная динамика гарей в зоне 1 ($65-70^\circ N$) представлена на рис. 2а. Максимум приходится на период июль-август и связан с более поздним наступлением пожароопасного сезона. Наблюдается тенденция на увеличение числа гарей в июне, июле и августе. Большие положительные тренды температуры наблюдаются в апреле и июне (корреляция с количеством гарей $R=0,37$ и $R=0,71$, соответственно). Увеличение числа гарей в июне может быть объяснено удлинением пожароопасного сезона за счёт увеличения температуры воздуха в июне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительный анализ результатов показал, что максимум сезонного хода мелкомасштабных гарей в зоне 4 наблюдается весной (апрель-май), в зоне 3 выраженный максимум отсутствует, в зоне 2 в июне-июле, в зоне 1 – в июле-августе.

Анализ трендов и корреляций количества гарей и аномалий температуры в северной зоне (1) показал наличие положительного тренда числа гарей в июне, июле и августе. Положительный тренд числа гарей в июне наблюдается на фоне положительно тренда температуры ($R=0,71$), что может говорить о более раннем начале пожароопасного сезона в последние годы за счёт формирования более благоприятных температурных условий.

В зоне 2 наблюдаются значительные положительные тренды количества гарей в июне и июле, причём в июне также наблюдается положительный тренд температуры ($R=0,53$), что, как и в случае с зоной (1) может говорить о более раннем начале пожароопасного сезона.

В зоне 3 обнаружен положительный тренд количества гарей в апреле, июне и августе, отрицательный – в мае. Положительный тренд количества гарей в апреле наблюдается на фоне повышения температуры ($R=0,60$), что так же может свидетельствовать о формировании более благоприятных условий для раннего начала пожароопасного сезона.

В зоне 4 обнаружен отрицательный тренд количества гарей в апреле и мае. Отрицательный тренд в апреле наблюдается, несмотря на положительный тренд температуры. Корреляция между количеством гарей и температурой в апреле и мае показывает слабую связь ($R=0,13$ и $R=-0,27$, соответственно).

В целом, можно отметить, что в северной части бореальных лесов Восточной Сибири (зоны 1, 2) за последние два десятилетия наблюдается заметный рост лесопожарной активности в первой половине лета, возможно связанный с эффектами потепления климата. Динамика трендов мелкомасштабных гарей в южной части (зоны 3, 4) имеет неоднозначный характер, требующий дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Соловьев В.С., Будищев А.А. Возмущения аэрозольной оптической толщины атмосферы, вызванные лесными пожарами в Якутии // *Оптика атмосферы и океана*. 2010. Т. 23. № 7. С. 626-629.
2. Tomshin O.A., Solovyev V.S. Estimation of burned area and atmospheric emissions from wildfires in Eastern Siberia / *Proceedings of SPIE on 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2019. V. 11208. P. 1120871-1.
3. Tomshin O.A., Solovyev V.S. The impact of large-scale forest fires on atmospheric aerosol characteristics // *International Journal of Remote Sensing*. 2014. V. 35. № 15. P. 5742-5749.
4. Yausheva E.P., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Shmargunov V.P. Analysis of Black Carbon fraction and aerosol scattering coefficient in smokes of remote forest fires and winter urban smogs / *Proceedings of SPIE on 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2018. V. 10833. P. 108334F.
5. Tomshin O., Solovyev V. Generating a long-term data series of burned area in Eastern Siberia using LTDR data (1984–2016) // *Remote Sensing Letters*. 2019. V.10. №10. P. 1008-1017.
6. Giglio L., Boschetti L., Roy D.P., Humber M.L., Justice C.O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 217. P. 72-85.

7. Friedl M., Sulla-Menashe D. *MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006*. 2019, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>. Accessed 10.04.2020.
8. Copernicus Climate Change Service (C3S) (2019): *C3S ERA5-Land reanalysis*. Copernicus Climate Change Service, 10.04.2020. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>

СЕКЦИЯ 2

Климатическое и
метеорологическое
моделирование

SESSION 2

Climate and Weather
Modeling

Energy of mesoscale eddies in the marginal seas of the Arctic Ocean: results of numerical simulation.

Platov G.A., Golubeva E.N.

Institute of Computational Mathematics and
Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The article describes the process of dense bottom water formation in winter in the region off the western coast of the north Novaya Zemlya and its further propagation (cascading) towards the of St. Anna trough and further into the open ocean. The goal is to show that the process of such propagation is closely related to the generation of mesoscale eddies. The data of available measurements indicate only some residual forms of such a movement, since they cover mainly the summer season. Numerical study is carried out using the system of nested models SibCIOM and SibPOM. In the course of numerical experiments, it was possible to show the ability of this system in describing the bottom structure of waters and to reproduce in detail the process of bottom water propagation. An analysis of the process revealed the energy conversion of the available potential energy of regular motion into the potential energy of eddy formations. In turn, the ageostrophicity of the eddy structures contributes to the accelerated advancement of dense shelf waters moving down along the sloping bottom. One of important features of cascading is that at the initial stage it is accompanied by an active process of eddy formation. Both processes interact energetically and contribute to an increase in heat and mass exchanges between the shelf and the open ocean. Proper description of these exchanges is a prerequisite for successful modeling of the intermediate and deep water thermodynamics in the Arctic Ocean.

Энергетика мезомасштабных вихрей окраинных морей Северного Ледовитого океана: результаты численного моделирования

Платов Г.А., Голубева Е.Н.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Формирование плотных вод в Арктике часто связывают с развитием ветровой полыньи, возникающей в результате действия ветра в случае, когда его направление способствует перемещению льда от берега и образованию открытой ото льда поверхности воды. (см., например, [1, 2]). Холодные восточные ветры в районе западных берегов Новой Земли часто способствуют формированию полыньи вдоль этих берегов [1] в результате более 10 м льда формируется в этой полынье в течение одного зимнего периода в среднем [3]. Столь активный рост молодого льда приводит к увеличению солёности и соответственно плотности воды, развитию конвективного движения и вовлечению придонных атлантических вод Баренцева моря [1, 4]. В итоге формируется придонный слой плотной воды с температурой около -0.5°C , который составляет половину потока, поступающего из Баренцева моря в Карское.

Для понимания изменчивости формирования плотных вод в этом районе необходимо изучить условия формирования плотных придонных вод на шельфе Баренцева и Карского морей и распространение их в сторону открытого океана, выяснить условия развития вихревых процессов, сопровождающих это движение.

В ходе проведенных исследований [5] мы использовали метод численного моделирования, поэтому в докладе также будут представлены результаты сравнения модельных полей с данными наблюдений.

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в области численного моделирования Северного Ледовитого океана (СЛО) [6], результаты, полученные на основе крупномасштабных моделей, могут значительно различаться. Например, в работе [7] при сравнении баланса кинетической и доступной потенциальной энергии показано, что энергетический баланс, полученный с помощью крупномасштабных моделей, существенно различается ниже уровня абиссали. Более поздние эксперименты, например, CORE-II [8] способствовали пониманию существенных регулярных ошибок при моделировании СЛО, в частности, было отмечено, что современные крупномасштабные модели нуждаются в более аккуратном описании притока атлантических вод в Арктику и формирования потоков плотной воды вдоль склонов арктического шельфа.

Для проведения исследования, в ходе которого мы пытались выявить особенности формирования плотных вод, мы использовали систему вложенных численных моделей океана и его шельфовых морей, разработанную в ИВМиМГ СО РАН и включающую модель SibCIOM [9, 10] и модель Карского моря и восточной части Баренцева моря, созданную на основе сигма-координатной шельфовый модели SibPOM, являющейся модификацией модели Принстонского Университета POM (Princeton Ocean Model, [11]). Схема вложения моделей описана ранее в работе [12].

В качестве атмосферного форсинга использовались данные реанализа CORE-2, включающие необходимый набор характеристик нижней атмосферы, скорость выпадения осадков и поступающей нисходящей длинно- и коротковолновой радиации [13].

Анализ результатов моделирования проводился для 2007-2008 гг, поскольку в этот период в соответствии с задачами Международного Полярного года был получен значительный объем данных в интересующей нас области.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования демонстрируют сложную структуру течений в интересующем нас регионе. Следует отметить, что, как и в работах [14, 15], циркуляция Карского моря существенно меняется в зависимости от времени года и преобладающего атмосферного форсинга, а взаимодействие с открытой частью СЛО осуществляется вдоль трога Св. Анны и трога Воронина.

Сравнение проводилось с данными, полученными в рамках Международного полярного года с использованием CTD профилометров, которые считаются наиболее надежными в условиях Арктики. Однако возможности таких измерений ограничены из-за ледового покрова и поэтому охватывают в основном периоды времени и районы отсутствия несудоходного льда. Тем не менее, с их помощью удалось не только идентифицировать остаточные аномалии конвективных процессов, возникающих в зоне формирования молодого льда, но и установить удовлетворительное качество описания этих процессов с помощью системы вложенных моделей.

Убедившись, что качественная картина распределения гидрологических характеристик, полученная по региональной модели SibPOM, соответствует реальному распределению, перейдем к главной задаче исследования – анализу вихревой активности и процесса каскадинга.

Рассмотрим поле вертикальной компоненты относительного вихря ζ [16]: $\zeta = (\partial v / \partial \eta - \partial u / \partial \xi) / f$, где u, v – горизонтальные компоненты скорости вдоль криволинейных координат модели ξ и η , а f – параметр Кориолиса. На рисунке 1 представлено распределение величины относительного вихря, осредненного в слое атлантических вод 100-250 м, в пограничном районе Карского и Баренцева морей в марте 2007 и 2008 гг. На этом же рисунке изображено поле горизонтальной скорости, осредненной в том же слое. Видно, что в этом районе в зимний период формируется большое количество вихрей масштаба 10-50 км, причем, как обычно, наиболее интенсивные вихри положительной завихренности преимущественно расположены слева от основной струи атлантических вод, а вихри отрицательной завихренности – справа. Район наибольших изменений относительного вихря расположен вблизи северного мыса Новой Земли и к западу от него вдоль струи атлантических вод. Справа, в области отрицательной завихренности расположена прибрежная отмель, где при условии соответствующих ветров может образовываться ветровая полынья и формироваться аномалии плотной воды.

На рисунке 2 представлены четыре сечения, перпендикулярные траектории движения атлантических вод в этом регионе, построенные по результатам расчета на 15 марта 2007 г, в период, когда, судя по рис. 1а, отмечалась высокая вихревая активность. Цветом выделена нормальная к сечению компонента скорости, причем красные тона соответствуют направлению скорости основного потока, а синие – противоположному течению. На сечении рисунка 2а видно, что движение почти однородно по вертикали и привязано к топографическому склону с перепадом примерно 100 м (от 150 до 250 м), скорость в ядре 20-30 см/с, ширина потока – примерно 40 км. Изолинии потенциальной плотности показывают, что вода имеет большую по сравнению с окружением плотность с максимальным значением возле дна около 28.0 (т.е. 1028.0 кг/м³, далее будет использоваться в этом смысле).

На следующем сечении (рис. 2b) видно, что течение несколько ослабло, в основном, из-за формирования прибрежного ответвления, по-прежнему привязано к топографическому склону на тех же глубинах, максимальные скорости до 22 см/с локализованы у дна. По положению изолиний потенциальной плотности, можно предположить образование ветровой полыньи у береговой линии с формированием в ней тяжелой воды с плотностью 28.6, которая агеострофически распространяется вниз по склону, формируя черты, характерные для каскадинга. Граница слоя каскадинга, согласно определению [17], примерно совпадает с изолинией 28.0.

Параметр h , определяемый в [17] как безразмерная толщина слоя каскадинга, для данного сечения равен единице, что говорит о том, что формирование плотных вод здесь еще не закончилось и, скорее всего, продолжается вблизи берега. Среди семи рассмотренных в [17] сечений, полученных в [18] в районе западного побережья Новой Земли, только в одном из случаев атмосферное воздействие было столь же сильным, а параметр h был равен 1.

Третье по ходу потока сечение, представленное на рис. 2с, демонстрирует концентрацию ядра струи вблизи дна в слое от 100 до 200 м по глубине и вблизи резкого склона у береговой линии (скачок от 0 до 180 м), так что ширина потока уменьшилась до 10 км. Вследствие этого, скорость возросла до 55 см/с в центре потока. Поведение изолиний потенциальной плотности также демонстрирует черты характерные для каскадинга. Однако формирование плотной воды под воздействием атмосферных условий здесь ослаблено ($h=0.39$), а процесс каскадинга хоть и находится в середине своего развития, тем не менее, более близок к затуханию.

Четвертое сечение изображенное на рис. 2d демонстрирует вертикальное распределение скорости распространения воды вдоль оси трога Св. Анны в сторону открытого океана. Ядро потока концентрируется у дна на глубине 300-500 м, максимальная скорость 22 см/с, ширина потока до 50 км. Характеристики процесса каскадинга говорят о том, что он практически не связан с атмосферными процессами ($h=0.24$), и находится в заключительной фазе своего существования. Однако, даже при столь слабом продвижении вниз по склону, на него приходится примерно 0.2 Св на каждые 100 км.

Анализ тех же сечений, полученных в сентябре, когда вихревая активность минимальна, не выявляет характерных для каскадинга особенностей распределения. Из этого мы заключаем, что развитие каскадинга стимулирует развитие вихревой активности. Механизм этой стимуляции связан с переходом высвобождающейся средней доступной потенциальной энергии в потенциальную энергию вихревого движения. Скорость конверсии связана с бароклинной неустойчивостью и может быть рассчитана по результатам моделирования с помощью формулы из [19]:

$$BC = -\frac{g^2}{N^2 \rho_0} \left(\frac{u' \bar{\rho}'}{\partial \xi} + \frac{v' \bar{\rho}'}{\partial \eta} \right),$$

где $(\bar{N}^2)$ – частота Брента-Вайсяля для средней плотности $\bar{\rho}$, а величины ρ', u' и v' – мезомасштабные пульсации плотности и горизонтальных компонент скорости.

На рисунке 1 помимо относительного вихря и поля скорости изображены также контуры величины ВС, проинтегрированной в слое верхних 250 м. При этом контуры красного цвета обводят зоны поло-

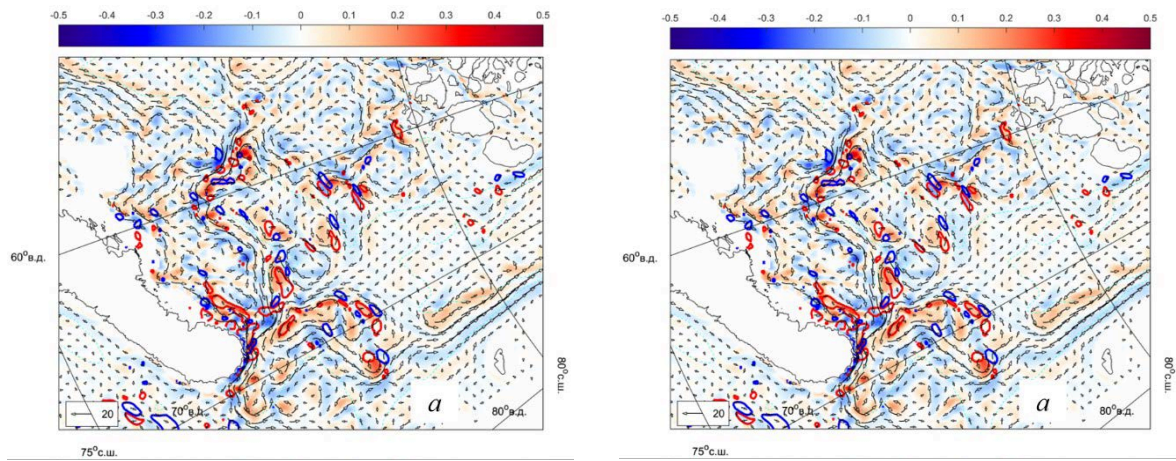


Рис. 1. Поле относительного вихря в пограничном районе Баренцева и Карского морей в марте 2007 (а) и 2008 (б) гг, осредненное в слое 100-250 м по глубине. Красные тона соответствуют циклонической завихренности, синие отрицательной, стрелки указывают направление скорости течения, осредненной в том же диапазоне глубин. Красные и синие контуры обводят районы положительной и отрицательной трансформации потенциальной энергии ВС.

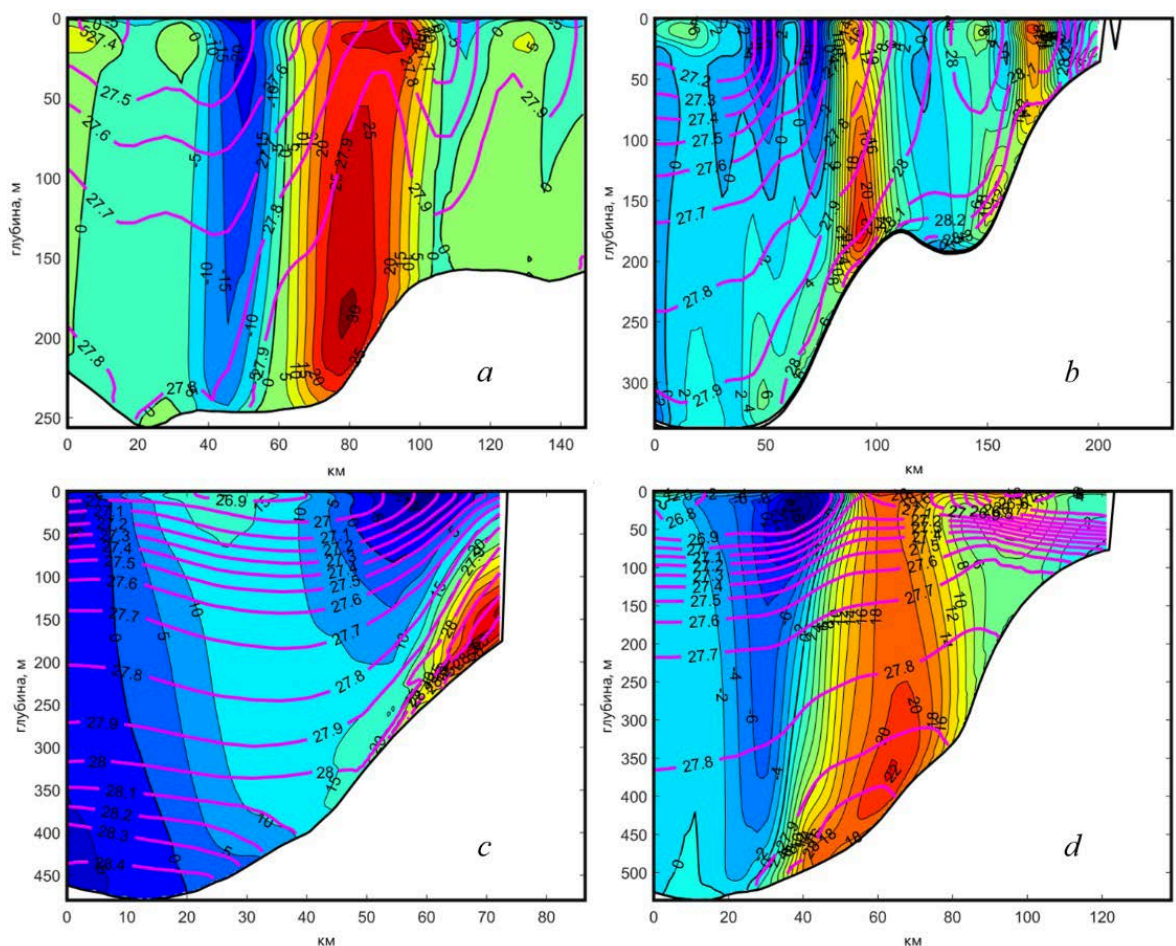


Рис. 2. Вертикальное сечение скорости течения (см/с) и потенциальной плотности ($\text{кг/м}^3 \cdot 1000$). Скорость представлена значением компоненты перпендикулярной к плоскости сечения (положительные значения соответствуют направлению вперед) и выделена контурами с цветовой заливкой. Потенциальная плотность представлена сиреневыми изолиниями поверх поля скорости. Направления сечений а)-д) соответствуют сечениям 1-4 рисунка 1б. Горизонтальная координата – расстояние вдоль сечения (км), вертикальная – глубина (м).

жительной конверсии энергии с интенсивностью более 10^{-3} Вт/м², т.е. переход средней потенциальной энергии в потенциальную энергию вихревых движений, а синие – зоны обратного перехода.

ВЫВОД

Складывающаяся в результате картина говорит о том, что процесс вихреобразования в этом районе и процесс каскадинга тесно связаны друг с другом. Формирование плотных вод в результате намерзания молодого льда в районе полыньи и его агеострофичное движение в сторону наклона рельефа приводит к формированию мезомасштабных вихрей, подпитывающихся высвобождающейся потенциальной энергией. С другой стороны, мезомасштабные вихри, развивающиеся в районе с наклонным дном, неизбежно усиливают обмен вод в направлении перпендикулярном линии изобат, что в свою очередь приводит к дальнейшему развитию каскадинга. Однако, максимальной интенсивности каскадинг достигает в конце лета, когда сформированные аномалии плотной воды подхватываются регулярными течениями. Возможными процессами, способствующими развитию каскадинга на этом этапе, являются также суб-мезомасштабные вихри, максимум активности которых приходится на июль [20], а так же вихревые движения, локализованные в районе струи и перенос в придонном экмановском слое.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда: грант №19-15-00154.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Martin, S., and D. J. Cavalieri, Contributions of the Siberian shelf polynyas to the Arctic Ocean intermediate and deep water // *J. Geophys. Res.*, 1989. 94, 12,725–12,738.
2. Schauer, U., The release of brine-enriched shelf water from Storffjord into the Norwegian Sea // *J. Geophys. Res.*, 1995. 100 (C8), 16015–16028.
3. Winsor, P., Bjork, G., Polynya activity in the Arctic Ocean from 1958 to 1997 // *J. Geophys. Res.*, 2000. 105 (C4), 8789–8803.
4. Årthun, M., et al., Dense water formation and circulation in the Barents Sea // *Deep Sea Res., Part I*, 2011. 58, 801–817, doi:10.1016/j.dsr.2011.06.001
5. Платов Г. А., Голубева Е. Н., Взаимодействие плотных шельфовых вод Баренцева и Карского морей с вихревыми структурами // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 6. С. 549–571. doi:10.22449/0233-7584-2019-6-549-571
6. Proshutinsky A., et al., Forum for Arctic Modeling and Observational Synthesis (FAMOS): past, current, and future activities // *J Geophys Res Oceans*, 2016, 121:3803–3819. <https://doi.org/10.1002/2016JC011898>
7. Uotila P., et al., An energy-diagnostics intercomparison of coupled ice-ocean Arctic models // *Ocean Modelling*, 2006, 11, 1–27, doi: 10.1016/j.ocemod.2004.11.003
8. Ilıcak M., et al., An assessment of the Arctic Ocean in a suite of interannual CORE-II simulations. Part III: Hydrography and fluxes // *Ocean Modelling*, 2016, 100, 141–161, doi: 10.1016/j.ocemod.2016.02.004
9. Голубева Е.Н., Численное моделирование динамики атлантических вод в арктическом бассейне с использованием схемы QUICKEST // *Вычислительные технологии*. 2008. Т. 13. № 5. С. 11–24.
10. Голубева Е.Н., Платов Г.А., Численное моделирование отклика арктической системы океан-лед на вариации атмосферной циркуляции 1948–2007 гг // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2009. Т. 45. № 1. С. 145–160.
11. Blumberg A.F., Mellor G.L., A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // *Three-Dimensional Coastal Ocean Models, 4 of Coastal and Estuarine Series / American Geophysical Union*, 1987, Washington, D.C.— P. 1–16.
12. Платов Г.А., Численное моделирование формирования глубинных вод Северного Ледовитого океана. Часть II: Результаты региональных и глобальных расчетов // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*, 2011, Т. 47. № 3. С. 409–425. doi: 10.1134/S0001433811020083
13. Large W.G., Yeager S.G., The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set // *Clim. Dyn.*, 2009, 33, 341–364. doi: 10.1007/s00382-008-0441-3
14. Доронин Н. Ю., и др. - Расчет баротропной циркуляции вод Карского моря // *Тр./ААНИИ*, 1991, т. 424., с. 34–41.
15. Dmitrenko I.A., et al., Atlantic water flow into the Arctic Ocean through the St. Anna trough in the northern Kara Sea // *J. Geophys. Res.: Oceans*, 2015, 120(7):5158–5178
16. Stepanov DV, Mesoscale eddies and baroclinic instability over the eastern Sakhalin shelf of the Sea of Okhotsk: a model-based analysis // *Ocean Dynamics*, 2018, 68(10), 1353–1370, <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1192-2>

17. Ivanov VV, et al., *Cascades of dense water around the world ocean* // *Progress in Oceanography*, 2004, 60, 47–98, doi:10.1016/j.pocean.2003.12.002
18. [18] Matishov G., et al., *Climatic Atlas of the Barents Sea 1998: Temperature, Salinity, Oxygen (CD-ROM)* // Murmansk Marine Biological Institute, Russia, National Oceanographic Data Center, USA. 1998.
19. Nof D, *The translation of isolated cold eddies on a sloping bottom* // *Deep-Sea Research A*, 1983, 30, 171–182.
20. Атаджанова О. А., и др. Субмезомасштабные вихревые структуры и фронтальная динамика в Баренцевом море // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. № 3. С. 237–246. doi: 10.22449/0233-7584-2018-3-237-246

Methods for determining turbulent fluxes in the atmospheric surface layer: measurement and parameterization

^{1,2,3}Repina I.A.

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Moscow, Russia

²Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

³Research Computing Center of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: repina@ifaran.ru

Without taking into account the characteristics of the air-surface interaction, it is impossible to successfully develop both atmospheric circulation modeling and the methods of long-term forecasting of weather and climate. In the general problem of energy exchange between the surface and the atmosphere, small-scale interaction occupies a special place, being a determining factor in the exchange of heat, momentum and moisture. To evaluate turbulent fluxes in this system, the Monin-Obukhov similarity theory, direct and indirect measurement methods are used. The information accumulated as a result of such experiments serves as the basis for constructing schemes for calculating the characteristics of local heat and mass transfer based on standard hydrometeorological measurements, and is also the basis for providing the boundary conditions necessary for combining atmospheric and oceanic circulation models. This work will provide an overview of measurement methods and estimates of turbulent fluxes, as well as approaches to the development of parametrizations for calculating heat, moisture and momentum fluxes in a surface-atmosphere system, and schemes of parameterizations are presented. An overview of the results of complex experiments conducted to develop and verify methods for calculating the interaction parameters of the atmosphere and various types of surfaces will be given. The mechanism of turbulent heat transfer, the basic laws, the influence of the type of underlying surface and the temperature regime of the surface skin layer will be shown, the applicability limits of various methods are shown.

This work was supported by the RFBR, grant No. 20-05-00834.

Методы определения турбулентных потоков в приземном (придонном) слое атмосферы – измерения и параметризации

^{1,2,3}Репина И.А.

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

²Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва

³Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

E-mail: repina@ifaran.ru

Турбулентность играет весьма значительную и многообразную роль в физических процессах, определяющих режим приземного и пограничного слоев атмосферы. Любая модель пограничного слоя атмосферы должна учитывать ряд основных характеристик турбулентности, таких как турбулентный перенос тепла, влаги (скрытого тепла) и количества движения. Практически во всей толще пограничного слоя, где эффекты молекулярного обмена пренебрежимо малы по сравнению с верти-

кальным турбулентным переносом импульса, тепла и влаги, эти величины характеризуют полные потоки, пересекающие подстилающую поверхность.

Без учета этих факторов невозможно правильное понимание и описание процессов взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью и процессов трансформации воздушных масс в результате такого взаимодействия.

Для решения этой проблемы необходимо непосредственное измерение турбулентных потоков в пограничном приводном слое в различных внешних условиях и последующая их параметризация внешними условиями. Информация, накопленная в результате таких экспериментов, служит основой для построения схемы расчета характеристик локального тепло- и массообмена на основе стандартных гидрометеорологических измерений. С другой стороны, она позволяет лучше понять природу взаимодействия и исследовать вклад явлений различных масштабов.

Методы определения турбулентных потоков подразделяются на три основных группы: прямые, то есть основанные на специальных измерениях атмосферной турбулентности; параметрические, использующие данные стандартных метеонаблюдений; и полуэмпирические, применяющие модельные расчеты.

В современных методах определения характеристик турбулентного обмена между поверхностью Земли и атмосферой используются теории, базирующиеся на гипотезе статистической стационарности и однородности турбулентного потока. Традиционно применяемые в атмосферном моделировании, энергобалансовых и биогеохимических расчетах параметризации основаны на выводах теории подобия Монина-Обухова (ТПМО), которая предполагает подстилающую поверхность, обладающую однородным горизонтальным распределением аэродинамической и температурной шероховатости. Несмотря на идеализированность предположений, эта теория широко используется для оценок потоков импульса, тепла и влаги, переноса примесей в приземном слое, и в частности, в моделях прогноза погоды и климата как над сушей, так и над морем. Первые эксперименты для оценки применимости ТПМО проводились над ровной, однородной поверхностью, где основные ее положения, в основном, подтверждались. Но гораздо более распространены неоднородные ландшафты, различные участки которых характеризуются различными альбедо, теплоемкостью, шероховатостью. Поверхностные неоднородности могут приводить к формированию турбулентных микромасштабных и когерентных циркуляций, которые влияют на структуру атмосферного пограничного слоя (АПС) и взаимодействие атмосферы с поверхностью.

При наличии горизонтальных и вертикальных градиентов статистических моментов метеорологических величин (в частности, потоков) применение ТПМО должно приводить к ошибкам, уровень которых к настоящему времени изучен недостаточно.

Недостаточное развитие параметризаций взаимодействия атмосферного пограничного слоя с горизонтально-неоднородной поверхностью при различной стратификации атмосферы является в настоящее время одним из основных препятствий для правильного функционирования оперативных, глобальных и региональных моделей прогноза погоды и экспертных моделей для климата и его изменений. Прежде всего, это связано с недостатком знаний о физике процессов в атмосферном пограничном слое и взаимодействующем с ним деятельном слое суши и водоёмов. Кроме того, традиционная теория удовлетворительно описывает нейтрально- и слабо-стратифицированные течения, но встречает трудности при сильно устойчивой или неустойчивой стратификации. Остается открытым вопрос о взаимодействии мелкомасштабной турбулентности и упорядоченных движений в атмосфере.

В последние десятилетия появились новые экспериментальные данные о структуре пограничного слоя атмосферы, согласно которым в нём существуют крупные спиралевидные образования с осью, направленной примерно вдоль среднего течения и сравнимые по масштабам с высотой пограничного слоя. Эти структуры могут быть связаны с конвективными процессами, внутренними волнами, локальными изменениями температуры или геометрических свойств подстилающей поверхности. Упорядоченные структуры в турбулентных потоках были обнаружены также при лабораторных исследованиях. Организованные (упорядоченные, когерентные) структуры в атмосферном пограничном слое взаимодействуют с мелкомасштабной турбулентностью, и их роль в формировании характеристик турбулентного потока может быть велика. Для идентификации когерентных структур в полях атмосферной турбулентности применяются различные статистические подходы, среди которых наиболее распространенным является вейвлет-преобразование, которое позволяет отображать временной ряд в частотно-временной области, что дает возможность определить как преобладающие моды изменчивости, так и изменение амплитуды этих мод во времени.

Геометрия подстилающей поверхности является важнейшим фактором формирования турбулентного режима приземного слоя атмосферы. В теории подобия приземного слоя Монина-Обухова фигурирует параметр аэродинамической шероховатости z_0 , формально определяемый как высота, на которой средняя скорость ветра обращается в нуль. Аналогично вводится термический коэффициент шероховатости, который появляется при интегрировании уравнения для градиента температуры в теории подобия. Параметры аэродинамической и термической шероховатости не являются напрямую измеряемыми физическими величинами. Эти параметры в общей случае зависят от геометрических свойств поверхности, скорости трения и коэффициентов молекулярных вязкости и температуропроводности.

Коэффициенты шероховатости для импульса и температуры (влажности) отличаются, так как перенос количества движения и тепло- и массообмен через шероховатую поверхность осуществляются разными механизмами. Теоретическим методам оценки аэродинамического параметра шероховатости в литературе уделено достаточно большое внимание, в то время как прогресс в развитии аналогичных методов для коэффициента термической шероховатости выглядит гораздо скромнее. Существуют разные теоретические подходы к описанию зависимости коэффициента температурной шероховатости от числа Рейнольдса шероховатости.

В соответствии с вышесказанным, основные направления доклада:

1. Методы измерений и параметризации турбулентных потоков
2. Шероховатость и теплофизические свойства различных поверхностей
3. Взаимодействие атмосферы и неоднородной подстилающей поверхности и при наличии когерентных структур.
4. Турбулентное взаимодействие атмосферы и подстилающей поверхности при различных условиях стратификации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-05-00834.

Modeling temperature and humidity conditions of mineral soils in the active layer model, taking into account changes in the thermodynamic properties of the soil in depth

^{1,2}Bogomolov V., ^{1,3}Dyukarev E., ^{2,4}Stepanenko V.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

²Research Computing Center, Moscow State University, Moscow, Russia

³Yugra State University, Khanty-Mansiisk, Russia

⁴Faculty of Geography, Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: verminrus@mail.ru

An important steps in the development of the model of the active land layer are the correct representation of the change in the mineral composition of the soil in depth, which is consistent with the types of existing landscapes above them and the related thermophysical characteristics, the transition from the approach of modeling heat and moisture transfer in a porous medium with averaged thermodynamic characteristics of soil types in the cell (porosity density hydraulic conductivity ...), simulation of heat and moisture transfer for each of the selected types with individual properties and further aggregation of flows from the surface over them to obtain average values for the cell.

This evolutionary stage, together with the transition from the basic system of equations for temperature, moisture, and ice to a system in which all the constants describing the thermodynamic properties of the soil become functions of depth, allows modeling of soils with very different properties in depth, for example, bog ecosystems. It should be understood that in the vast majority of models the soil properties do not change in depth. The consideration of such components of the active layer as wetland ecosystems, in addition to the thermodynamic properties of the soil, entails the correct reproduction of the hydrological cycle of the land in the framework of modeling the entire Earth system, which in turn has a huge fundamental and applied nature. Soil moisture significantly affects the distribution of the components of the radiation balance between the apparent and latent heat fluxes, and, thus, the diurnal course of deep convection in summer [Cioni, Hohenegger, 2017].

In order to simulate heat and moisture transfer in soil, in addition to boundary conditions, initial conditions are also necessary. The influence of the initial distribution of the moisture and thermal characteristics of the soil can have a decisive influence on the reproduction of the thermal regime of the soil cover. Therefore, at the initial time, it is necessary to know with sufficient accuracy the depth distribution of the temperature of the soil, as well as the amount of liquid and frozen moisture in fractions of dry soil. The initial temperature and humidity profile can be determined from the measurement data, and the ice content in the pore space of the soil in July can be set to zero. The calculation period was 8 years, 2011-2018, identical to the measurement period.

An analysis of the results suggests that to reproduce the temperature regime of bog ecosystems, it is not enough just to introduce a new type with its hydrodynamic properties, it is necessary to switch to the hydrodynamic properties of the soil as a function of depth for the correct reproduction of bogs with any depth of the peat deposit. Moreover, the obtained results allow us to state that in cases of oligotrophic bogs, the groundwater level can be reproduced correctly without adding any parameters related to the runoff.

Моделирование температурного и влажностного режима болотных и минеральных почв в модели деятельного слоя с учетом изменения термодинамических свойств почвы по глубине

¹Богомолов В.Ю., ^{1,3}Дюкарев Е., ^{2,4}Степаненко В.М.

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

³Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

⁴Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: verminrus@mail.ru

В настоящий момент важным этапом развития моделей деятельного слоя суши являются: корректное описание изменения минерального состава почв по глубине с сопутствующими теплофизическими характеристиками, согласование почвенной карты с типами существующих ландшафтов над ними, моделирование тепло- и влагопереноса для каждого из выделенных типов с индивидуальными свойствами и последующее агрегирование по ним потоков с поверхности для получения средних значений для ячейки.

Рассмотрение таких компонент деятельного слоя как болотные экосистемы помимо термодинамических свойств почвы тянет за собой правильность воспроизведения гидрологического цикла суши в рамках моделировании всей Земной системы, что в свою очередь имеет огромное фундаментальное и прикладное значение. Влажность почвы существенно влияет на распределение составляющих радиационного баланса между потоками явного и скрытого тепла, и, тем самым, – на суточный ход глубокой конвекции летом [Cioni, Hohenegger, 2017].

Одной из целью настоящей работы является воспроизведение температурного режима органических почв, для чего необходимо учитывать влияние содержания органического вещества на характеристики почвы. В работах [Lawrence and Slater, 2008; Willeit and Ganopolski, 2016] предлагается рассчитывать теплофизические характеристики почвы (теплоемкость, теплопроводность, пористость и пр.) как линейную комбинацию этих параметров для минеральной и органической почв с учетом массового содержания количества органического вещества. Для пористости предлагается соотношение:

$$\Pi = (1 - f_{om})\Pi_{min} + f_{om}\Pi_{om}$$

где f_{om} – объемное содержание органического вещества в почвенном слое, Π_{min} , Π_{om} – пористость минеральной и органической частей почвы. Нами данный подход применен к определению плотности, пористости и объемной теплоемкости почвы в модифицированном виде.

Объемная теплоемкость почвы вычисляется как суммарная теплоемкость сред ее составляющих:

$$c = (1 - \Pi)c_s + (\Pi - W - I)c_{vap} + Wc_{wat} + Ic_{ice}$$

где Π – пористость, $1 - \Pi$ – доля объема занимаемая твердой фазой, W , I – объемная влажность и содержание льда. Твердая фаза почвы состоит из пяти компонент: галька (v_{grav}), песок (v_{sand}), пыль (v_{silt}), глина (v_{clay}), составляющих в сумме минеральную фазу почвы (v_{min}) и из органического вещества (v_{org}) почвы.

$$v_{min} + v_{org} = 1; v_{grav} + v_{sand} + v_{clay} + v_{silt} = 1$$

Предполагая, что плотность минеральных частиц почвы ($\rho_{min} = 2700 \text{ кг/м}^3$), как и органического вещества ($\rho_{om} = 1500 \text{ кг/м}^3$) известна можем определить плотность почвы через пористость:

$$\rho = (1 - \Pi)(v_{min}\rho_{min} + v_{om}\rho_{om})$$

Теплоемкость твердой фазы почвы зависит от содержания органики и минерального компонента:

$$c_s = c_{sM} v_{min} + c_{sO} v_{org}$$

Для минеральной почвы теплоемкость почвы связана с содержанием крупной и мелкой фракций [Farouki 1981]:

$$c_{sM} = \frac{2.128 v_{sand} + 2.385 v_{clay}}{v_{sand} + v_{clay}}$$

что составляет для глин и песков около $2,1-2,3 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3/\text{К}$, а теплоемкость органического вещества, немного больше и равна $c_{sO} = 2.5 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3/\text{К}$.

Коэффициент теплопроводности почвы определяется взаимодействием твердой, жидкой и газообразной фаз почвы, поэтому существенным образом зависит прежде всего от ее влажности [Шеин,

2005]. Более того, эта связь не может быть аппроксимирована одной функцией и изменяется в зависимости от насыщенности почвы влагой. Так, при низких значениях влажности в почве преобладает молекулярный механизм переноса тепла и коэффициент теплопроводности меняется слабо. При увеличении влажности развивается пародиффузионный перенос тепла и наблюдается экспоненциальный рост коэффициента теплопроводности в зависимости от влажности почвы. Однако в насыщенных влагой почвах пародиффузионный перенос ослабляется и теплообмен сводится к конвекции, которая крайне слабо выражена в почвах, вследствие чего рост коэффициента теплопроводности практически прекращается.

Таким образом, теплопроводность почв определяется целым рядом влажностных, плотностных и температурных факторов, что выражается в возможности определения коэффициента теплопроводности через различные величины, характеризующие эти зависимости. Построения таких зависимостей выражаются в различных способах параметризации данной характеристики.

В новой версии модели деятельного слоя суши для расчета коэффициента теплопроводности используется модифицированная нами модель Йохансона [Johanssen, 1975], где теплопроводность влажной почвы зависит от наличия влаги и льда и органики.

$$k_{sat} = \begin{cases} k_{satM}^{vmin} k_{satO}^{vom} k_W^{\Pi}, & T \geq 0 \\ k_{satM}^{vmin} k_{satO}^{vom} k_W^{\Pi} k_I^{\Pi-W}, & T < 0 \end{cases}$$

Существенной модификацией модели является переход от подхода моделирования тепло- и влагопереноса в пористой среде с осреднёнными термодинамическими характеристиками типов почв в ячейке (пористость, плотность, гидравлическая проводимость...), к моделированию тепло- и влагопереноса для каждого из выделенных типов почв с индивидуальными свойствами и уже агрегированию по ним потоков с поверхности для получения средних значений для ячейки. Кроме того, в модифицированной модели все константы, описывающие термодинамические свойства почвы, являются функциями от глубины. Это позволило моделировать почвы, имеющие комплексное строение почвенного профиля, например болотные экосистемы (торфяная залежь и слой минеральной почвы под ним). При этом надо понимать, что до этого в модели вообще отсутствовал такой тип как торф или близкая к нему по гидродинамическим свойствам почва. В рамках данной работы было необходимо понять, возможно ли в рамках заложенных подходов и параметризации воспроизводить температурный и влажностный режим, как в минеральных, так и в торфяных почвах только варьируя параметры почвы, отвечающие за её гидродинамические и теплофизические свойства.

Для расчета теплофизических характеристик почв необходимо знать объемное содержание органического вещества, минеральных частиц разного размера и пористость почвы на всех глубинах.

Для нашей модели выполнен пересчет параметров почвы, задаваемых для глубин 0–0.0175, 0.0175–0.0451, 0.0451–0.0906, 0.0906–0.1655, 0.1655–0.2891, 0.2891–0.4929, 0.4929–0.8289, 0.8289–1.3828, 1.3828–2.2961 и 2.2961–3.8019 м для глубин 0.01, 0.02, 0.04, 0.08, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75,

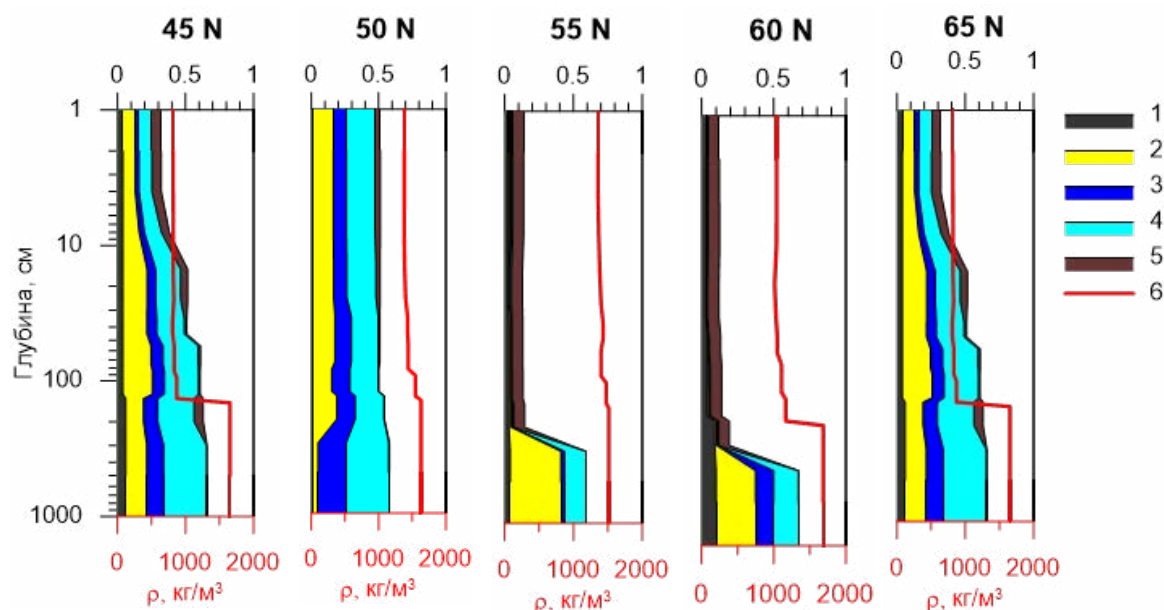


Рис. 1. Профили распределения почвенных характеристик по глубине в узлах сетки с координатами 45° с.ш., 80° в.д.; 50° с.ш., 80° в.д.; 55° с.ш., 80° в.д.; 60° с.ш., 80° в.д.; 65° с.ш., 80° в.д.. Объемное содержание гравия (1), песка (2), пыли (3), глины (4), органического вещества (5) - верхняя ось. Плотность почвы (6) – нижняя ось.

0.85, 0.95, 1.05, 1.15, 1.25, 1.35, 1.45, 1.55, 2, 3, 5, 10 м с помощью интерполяции кубическим сплайном. На глубинах 3,5 и 10 м характеристики почвы задавались равными характеристикам нижнего слоя (2.2961–3.8019 м) из базы данных.

На рис. 1 представлено распределение плотности и гранулометрического состава почв для ячеек сетки, расположенных вдоль меридиана 80° в.д. на различных широтах. Как видим, в Западной Сибири (ячейки 55 и 60 с.ш.) в верхней части почвенного профиля появляется большое количество органического вещества, что соответствует торфяным болотам. В тундровой зоне (65° с.ш.) мощность органического слоя почвы уменьшается.

Для пунктов исследования температурного режима почвы теплофизические характеристики были определены по результатам исследования образцов почвы и торфа. Торфяной слой толщиной около 200 см подстилается плотными глинами. Содержание минеральных частиц в торфе невелико и свойства почвы полностью определяются пористостью органического вещества. Плотность верхних слоев торфа невелика и хорошо согласуется с результатами натурных исследований. С глубиной возрастает плотность и уменьшается пористость торфа, а на глубинах 240 и 320 см плотность и пористость соответствуют параметрам для глины.

Расчеты по модели деятельного слоя продемонстрировали, что в рамках используемого подхода возможно правильно воспроизводить тепло- и влагоперенос как в минеральных, так и органических почвах без добавления каких-либо параметризаций связанных со стоком, а только изменяя теплофизические характеристики почвы по глубине. Было выполнено два модельных эксперимента. Внешние параметры (температура воздуха, приходящая солнечная радиация, интенсивность осадков и пр.) заданы по данным наблюдений на метеостанции Бакчар и были одинаковы в обоих экспериментах. Результаты

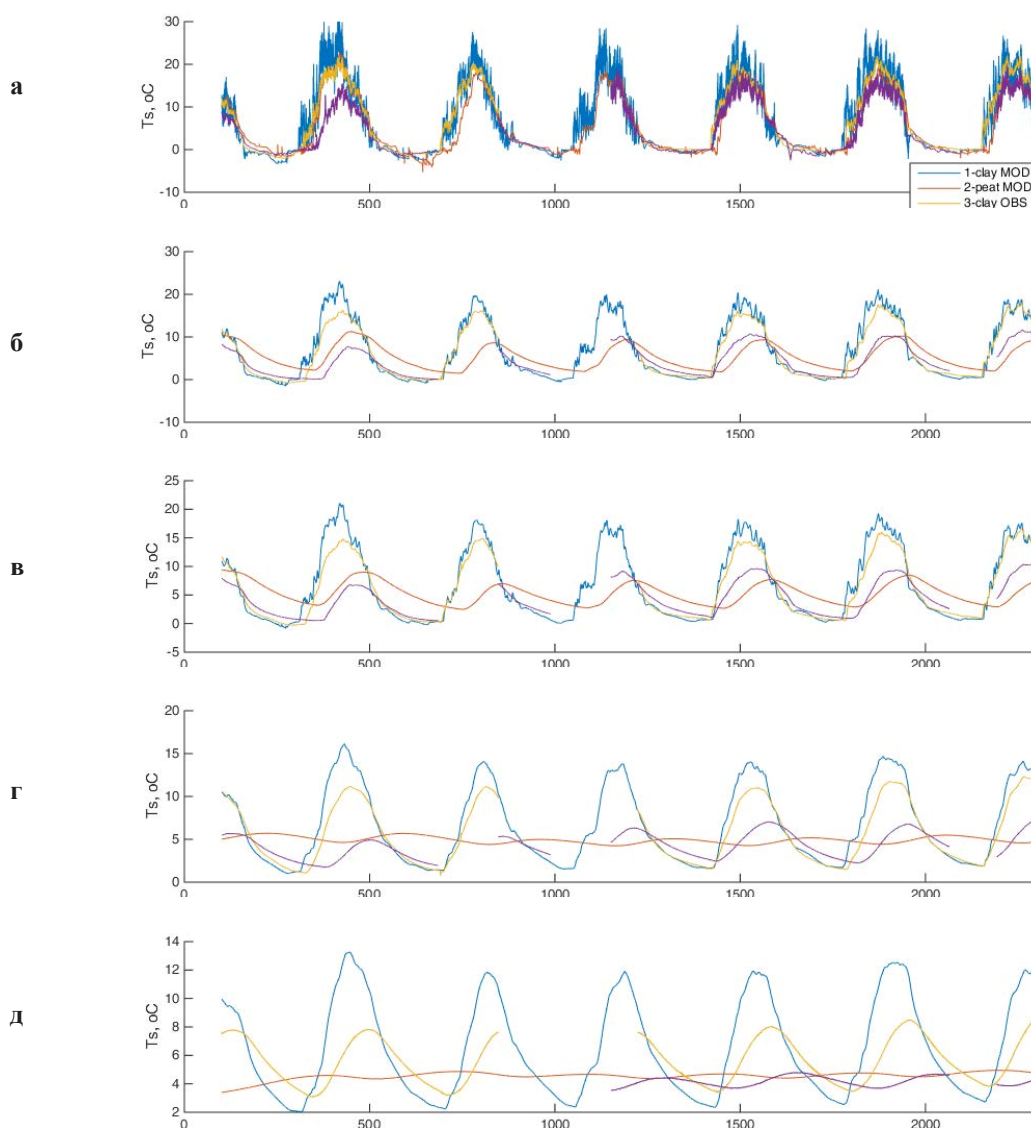


Рис. 2. Временной ход среднесуточной температуры почвы по данным наблюдений и моделирования за 2011–2017 гг на глубинах 20(а), 60 (б), 80 (в), 160 (г) и 240 (д) см. 1 – глина, модель; 2 – торф, модель; 3 – глина, наблюдения; 4 – торф, наблюдения.

модельных расчетов сопоставлялись с результатами натурных наблюдений за температурой почв (clay-OBS, peat-OBS) (Рис.2). Расчеты проведены для 2012–2017 гг. с шагом по времени в 1 час, причем для обеспечения разгона модели расчет для первых двух лет не участвовал в оценке точности модели.

Температура поверхности в активном слое полностью определяется атмосферным воздействием в обоих экспериментах. Несмотря на то, что для поверхностного слоя получена наибольшая ошибка в расчетах, по сравнению с данными наблюдений величина коэффициента корреляции между наблюдаемыми и модельными значениями очень высока. Для тяжелосуглинистой почвы с глубиной величина абсолютной ошибки уменьшается, однако для глубин 160 и 240 см уменьшается синхронность колебаний между модельными и наблюдаемыми значениями, что проявляется в уменьшении коэффициента корреляции. Анализ модельных расчетов для торфяной почвы показал высокую корреляционную зависимость рядов модельных и наблюдаемых значений температуры. Как и для тяжелосуглинистой почвы величина абсолютной ошибки уменьшается от поверхности до глубины 30 см, после чего ошибка возрастает. На глубине расхождения в воспроизведении наблюдаемых температур связаны с недостаточно точно заданными свойствами почвы и воспроизведением уровня грунтовых вод, влияющим на инерцию прогрева и процессы оттаивания и замерзания.

Глубина сезонного промерзания воспроизводится вполне корректно. Для глины это около 90 см, для торфа – 30 см. На глубине более 60 см оба типа почвы полностью насыщены водой, что характерно для Западно-Сибирской низменности. Анализ результатов показывает, что для воспроизведения температурного режима болотных экосистем недостаточно просто ввести новый тип с его гидродинамическими свойствами, необходимо провести учет изменения гидротермических свойств почвы с глубиной и использовать адекватные карты размножения болот с данными о мощности торфяной залежи. Полученные результаты позволяют утверждать, что в случае олиготрофных болот уровень грунтовых вод может быть корректно воспроизведен без добавления каких-либо параметров, связанных со стоком.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ 18-05-00306 А и РФФИ 20-05-00773 А.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Lawrence, D. M., Slater, A. G., Tomas, R. A., Holland, M. M., and Deser, C. (2008), *Accelerated Arctic land warming and permafrost degradation during rapid sea ice loss*, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L11506, doi:10.1029/2008GL033985.
2. Cioni G., Hohenegger C. *Effect of Soil Moisture on Diurnal Convection and Precipitation in Large-Eddy Simulations* // *J. Hydrometeorol.* 2017. Vol. 18. No. 7. pp. 1885–1903. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0241.1>
3. Farouki O.T. *Thermal properties of soils*. Report No. Vol. 81, No. 1, CRREL Monograph 1981
4. Шеин Е.В. *Курс физики почв: учебник для вузов М.: Издательство Московского Университета, 2005. - 432 с.*
5. Johansen, O. *Thermal conductivity of soils*. University of Trondheim, Trondheim, Norway. US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N. H. CRREL Draft English Translation - 1975.- С. - 637.

Численное моделирование процессов турбулентного перемешивания и переноса биохимических примесей во внутренних водоемах

^{1,2,3}Гладских Д.С., ^{2,4}Мортиков Е.В., ^{2,3,4}Степаненко В.М.

¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

²Научно-Исследовательский Вычислительный Центр Московского Государственного Университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

³Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

⁴Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

E-mail: daria.gladskih@gmail.com, evgeny.mortikov@gmail.com, vstepanenkomeister@gmail.com

Настоящее исследование посвящено численному моделированию термогидродинамических и биохимических характеристик озёр и водохранилищ с использованием математических моделей различной размерности, и, в частности, изучению влияния горизонтальных размеров водоема на процессы турбулентного перемешивания и переноса примесей.

Одномерные (по вертикали) и трехмерные модели широко используются для описания процессов во внутренних водоемах. Трехмерные модели, основой которых является осредненная по Рейнольдсу система уравнений термогидродинамики в приближении Буссинеска и гидростатики, позволяют получить наиболее детальное описание распределения гидродинамических величин. Одномерные модели очень эффективны в вычислительном отношении и используются для параметризации внутренних водных объектов в климатических моделях, однако при расчете больших озер и водохранилищ со сложной геометрией такие модели могут неправильно воспроизводить процессы, связанные с горизонтальной неоднородностью. Это становится особенно существенным для прогнозирования качества воды и эвтрофикации. Важным аспектом при моделировании термогидродинамики внутренних водоемов является правильное описание процессов перемешивания, в том числе связанных с гравитационными (сейшевыми) колебаниями. Сейши возникают вследствие горизонтального перераспределения массы и действия градиента гидростатического давления и не принимаются во внимание в большинстве существующих одномерных (по вертикали) моделей, что может приводить к заметной ошибке толщины перемешанного слоя.

В данной работе авторами использовались трехмерная модель [1-3], разрабатываемая в НИВЦ МГУ на основе единого гидродинамического кода, объединяющего DNS/LES/RANS подходы для расчета геофизических турбулентных течений, и одномерная модель LAKE [3], основанная на осреднении трехмерных уравнений по горизонтальному сечению водоема. Для описания процессов вертикального турбулентного обмена в обеих моделях использовалось k - ϵ -замыкание, в котором рассматриваются уравнения для кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации. Трехмерная модель была дополнена уравнениями для расчета биохимических веществ по аналогии с одномерными уравнениями биохимии, используемыми в модели LAKE. Валификация моделей проводилась в рамках численной реализации лабораторного эксперимента Като-Филлипса. В дальнейших расчетах для упрощения анализа рассмотрены водоёмы идеализированной формы с горизонтальными размерами 1000 метров и 10 метров. При этом исследовались такие характеристики, как толщина верхнего перемешанного слоя, вертикальное распределение температуры, скорости, кинетической энергии турбулентности, скорости ее диссипации и коэффициента турбулентной вязкости. Изучено влияние турбулентной диффузии и крупномасштабных движений воды на распределение поля концентрации метана и кислорода.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ для молодых ученых (МК-1867.2020.5, МД-1850.2020.5) и РФФИ (18-05-00292, 20-05-00776).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2019. V. 34, N 2. P. 119-132.
2. Gladskikh D.S., Stepanenko V.M., Mortikov E.V. On the influence of the horizontal dimensions of inland waters on the thickness of the upper mixed layer. // *Water Resources*. 2019. 18 pages. (accepted)
3. Mortikov, E.V. Numerical simulation of the motion of an ice keel in stratified flow // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2016. V. 52. P. 108-115.
4. Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A., Miettinen H., Lykosov V., and Timo V. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // *Geoscientific Model Development*. 2016. V. 9(5). P. 1977–2006.

Numerical simulation of turbulent mixing and transport of biochemical substances in inland waters

^{1,2,3}Gladskikh D.S., ^{2,4}Mortikov E.V., ^{2,3,4}Stepanenko V.M.

¹Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia

³Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

⁴Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: daria.gladskikh@gmail.com, evgeny.mortikov@gmail.com, vstepanenkomeister@gmail.com

The research is devoted to the numerical modeling of the thermohydrodynamic and biochemical characteristics of inland waters using mathematical models of various detailization, and, in particular, to the study of the effect of the horizontal dimensions of the reservoir on the processes of turbulent mixing and transport of biochemical substances.

Currently, one-dimensional and three-dimensional models are widely used to describe processes in inland water objects. One-dimensional models are highly computationally efficient and are used to parameterize inland water bodies in climate models, however, when calculating large lakes and reservoirs with complex geometry, such models may incorrectly reproduce processes associated with horizontal heterogeneity. This becomes especially important for the prediction of water quality and eutrophication. Three-dimensional models, based on the Reynolds-averaged system of thermohydrodynamic equations in the Boussinesq approximation and hydrostatics, provide the most detailed description of the distribution of hydrodynamic characteristics.

A three-dimensional model [1-3] was used as the main tool for studying the processes in inland waters. Lack of accounting the effects of short-wave radiation is physically justified on small time scales in the warm season (at night) and in winter, when the effect of wind on the hydrodynamics of a reservoir is practically absent. Thus, the problem statement in the present work is a relatively rough approximation to the natural conditions, however, it allows us to observe the effect of the horizontal dimensions of a water body on the vertical distribution of the thermohydrodynamic and biochemical characteristics, which obviously also takes place in real lakes. Under these conditions, the system of equations takes the following form:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= -A(u) + D_H(u, \lambda_m) + D_z(u, K_m + \nu) - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^\eta \rho dz' + f v, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -A(v) + D_H(v, \lambda_m) + D_z(v, K_m + \nu) - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_z^\eta \rho dz' - f u, \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= -A(T) + D_H(T, \lambda_h) + D_z(T, K_h + \chi'), \\ \rho &= \rho(T), \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} &= w\end{aligned}$$

Here $\mathbf{u} = (u, v, w)$ is the velocity vector, η is the deviation of the free surface from the equilibrium state, T – temperature, ρ is the density; $K_m(\lambda_m)$ and $K_h(\lambda_h)$ are the coefficients of vertical (horizontal) turbulent viscosity and thermal diffusivity, respectively; ν, χ' – are the coefficients of molecular viscosity and thermal diffusivity, f is the Coriolis parameter (assumed constant), g is the acceleration of gravity, z is the vertical coordinate (from the bottom of the reservoir $z = -H(x, y)$ to the surface), and t is time. $A(q)$ is the advection operator, and $D_H(q, \lambda)$ and $D_z(q, K)$ are the horizontal and vertical diffusion operators with coefficients λ and K , respectively.

As for one-dimensional models, we used the LAKE model [4], based on averaging three-dimensional equations over the horizontal section of the reservoir:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} &= \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left(A(K_h + \chi') \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} &= -\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left(A(K_m + \nu) \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) - \frac{1}{A} \frac{dA}{dz} \left((K_m + \nu) \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)_{bot} + \overline{D_H(u, \lambda_m)} + f \bar{v}, \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} &= -\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left(A(K_m + \nu) \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) - \frac{1}{A} \frac{dA}{dz} \left((K_m + \nu) \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right)_{bot} + \overline{D_H(v, \lambda_m)} - f \bar{u}.\end{aligned}$$

Here $A(z)$ is the area of the horizontal section of the reservoir, p is the hydrostatic pressure, the horizontal line means averaging over $A(z)$. In accordance with the above, the heat flux at the lower boundary (at the bottom) is set equal to 0, and the momentum flux is considered constant at the boundary of each horizontal section (values indicated by the *bot* index).

When writing systems of equations, the validity of the gradient approximation for the description of turbulent flows is also assumed. For the tasks of this paper, it seems important that vertical mixing in three-dimensional and one-dimensional models is represented in a similar way. Therefore, to calculate the coefficients K_m and K_h in both models, the two-parameter k - ϵ closure in the standard formulation [5] is used. It is based on prognostic equations for the kinetic energy of turbulence (k) and its dissipation rate.

The LAKE model takes gravitational oscillations (seiches) into account due to the parameterization of the pressure gradient and horizontal viscosity. Seiches are not taken into account in most existing one-dimensional (vertical) models. However, when modeling lakes and reservoirs with horizontal dimensions much less than the Rossby internal radius of deformation LR , gravitational oscillations play significant role compared to the rotation (Coriolis force) in the dynamics of the mixed layer, and the one-dimensional models lacking seiche parameterization overestimate the thickness of the mixed layer during the summer stratification period [2].

The three-dimensional model was supplemented by the equations for calculating biochemical substances by analogy with the one-dimensional biochemistry equations used in the LAKE model. The dynamics of two dissolved gases were considered: methane (CH_4) and oxygen (O_2).

Verification of the models was carried out using the numerical implementation of the classical laboratory experiment by Kato and Phillips [6], which is the commonly used test case for calibrating turbulent closures for shear flows in a stratified fluid. Also calculations were carried out with idealized reservoirs of rectangular verti-

cal section at various sizes. It was demonstrated that the models similarly describe the dynamics of the thickness of the mixed layer, and also good agreement with the theoretical formula by Price [7] for Kato-Phillips experiment was obtained (see Fig.1).

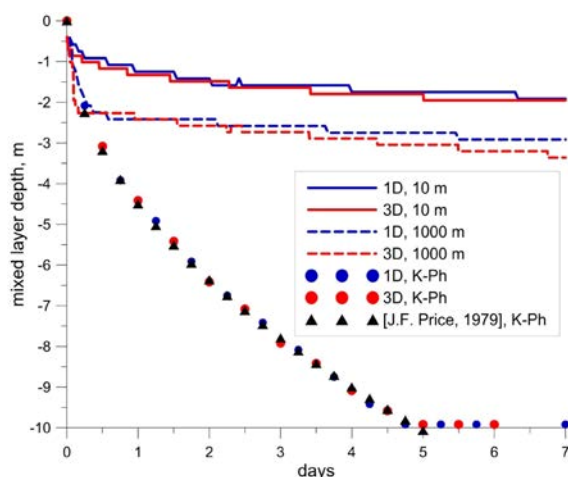


Figure 1. The dynamics of the thickness of the mixed layer in the numerical implementation of the Kato-Phillips experiment and in the idealized water objects with various horizontal dimensions.

Results of the numerical simulation showed difference in the distribution of thermohydrodynamic and biochemical variables depending on size of the lake. Such characteristics as the vertical distribution of temperature, velocity, kinetic energy of turbulence, its dissipation rate, and eddy viscosity were analyzed. Also, vertical profiles of the concentrations of oxygen and methane were calculated under various initial and boundary conditions. The influence of the horizontal dimensions of the reservoirs, flows at the boundaries, and the initial distribution on the concentration of dissolved gases were analyzed. The effect of turbulent diffusion and large-scale water movements on the distribution of a methane concentration field was studied.

The work was supported by grants of the RF President's Grant for Young Scientists (MK-1867.2020.5, MD-1850.2020.5) and by the RFBR (18-05-00292, 20-05-00776).

REFERENCES:

1. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2019. V. 34, N 2. P. 119-132.
2. Gladskih D.S., Stepanenko V.M., Mortikov E.V. On the influence of the horizontal dimensions of inland waters on the thickness of the upper mixed layer. // *Water Resources*. 2019. 18 pages. (accepted)
3. Mortikov, E.V. Numerical simulation of the motion of an ice keel in stratified flow // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2016. V. 52. P. 108-115.
4. Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A., Miettinen H., Lykosov V., and Timo V. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // *Geoscientific Model Development*. 2016. V. 9(5). P. 1977–2006.
5. Burchard H. *Applied turbulence modelling in marine waters*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2002. 218 P.
6. Kato H., Phillips O.M. On the penetration of a turbulent layer into stratified fluid // *Journal of Fluid Mechanics*. 1969. V.37, №4. P. 643.
7. Price J.F. On the scaling of stress-driven entrainment experiments. // *Journal of Fluid Mechanics*. 1979. V.90, №4. P. 509.

Simulation of the episodic near-bottom water warming in the Laptev Sea

Golubeva E., Kraineva M., Platov G.

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia
E-mail: e.golubeva.nsk@gmail.com

The observations made in the Laptev Sea, one of the most severe Arctic shelf seas, provide the evidence of episodic warming in the near-bottom waters recorded in the winter period. In this study, based on the numerical modeling using three-dimensional ice-ocean model and atmospheric reanalysis data, we simulated the variability of the Laptev Sea circulation and the heat transfer from the sea surface to the bottom layer. Our main findings are: 1) non-typical summer time heating accompanied by on-shore shelf circulation contribute to the intensive near-coast mixing and to the transport of the surface heat to the deeper layers; 2) the intensive formation of near-bottom temperature anomalies begins in August and continues through October, and this indicates the contribution of autumn mixing processes to an increase in near-bottom temperature; 3) heat anomalies entering the near-bottom layer of the sea during the autumn cooling could exist during the winter period; 4) the presence of local minima and maxima detected in the near-bottom temperature time-series during the period from September to April in our numerical results indicates the possibility of the advection of the heat anomalies in the near-bottom layer.

О формировании аномалий тепла в придонном слое моря Лаптевых

Голубева Е.Н., Крайнева М.В., Платов Г.А.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: e.golubeva.nsk@gmail.com

Арктический шельф, включающий моря Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское, Канадский и Южно-Аляскинский арктический шельфы моря Бофорта, является важнейшим звеном климатической системы Арктики. Сток рек и продукция льда в морях Сибирского шельфа являются основными составляющими пресноводного баланса СЛО [Шпайхер, 1976; Aagaard et al., 1989]. Окраинные арктические моря являются главным источником новых льдов для Арктического бассейна преимущественно за счет существования заприпайных полыней, в которых, по оценкам [Захаров, 1996], в середине XX века продуцировалось до 70% объема нового льда. В морях Сибирского шельфа благодаря стоку сибирских рек формируется слой распресненных вод [Aagaard et al., 1981], изолирующий ледовый покров океана от слоя теплых соленых атлантических вод, поступающих в Арктический бассейн через пролив Фрама и Баренцево море [Rudels et al., 1994].

Исследования, проведенные в работе [Cheng et al., 2020], представлены в виде архива данных изменения температуры воды и теплосодержания верхнего слоя океана (ОНС-ocean heat content, <http://159.226.119.60/cheng/>). Для оценки изменений в шельфовых морях мы осреднили среднемесячные данные за десятилетний период (1990-1999, 2000-2009, 2010-2019) и рассмотрели отклонения от аналогичных значений для 1960-1989. Эти данные показывают положительный тренд в оценке теплосодержания всех арктических шельфовых морей в течение трех десятилетий.

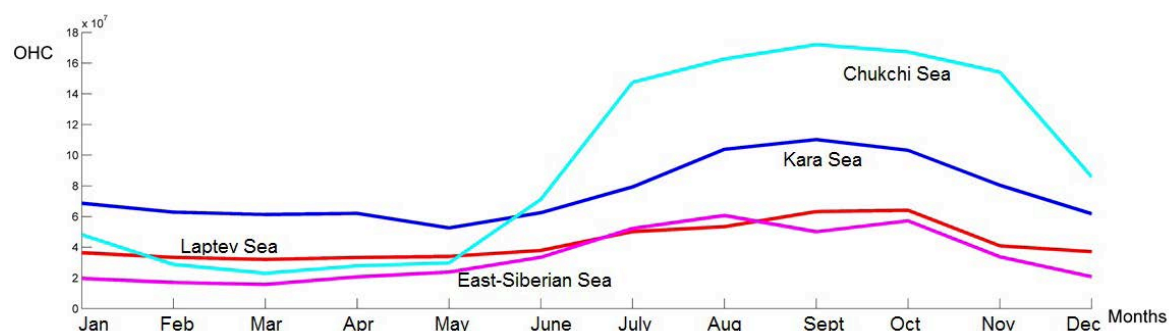


Рис. 1. Отклонение среднемесячных значений теплосодержания в верхнем 300-метровом слое арктических шельфовых морей в 2010-2019гг от соответствующих значений для 1960-1989гг.

Одним из самых суровых арктических морей считается море Лаптевых, наиболее удаленное от влияния теплых атлантических и тихоокеанских водных масс. Данные гидрологических наблюдений для 1920–2009 гг. в мелководной части шельфа и прибрежной зоне моря Лаптевых отражают значительное повышение придонной температуры (до 2.1 градуса), начавшееся с середины 1980-х годов [Dmitrenko et al., 2011]. Несколько событий беспрецедентного потепления в придонных водах, которые, как полагали, находятся на грани замерзания круглый год, наблюдались на центральном шельфе зимой. Наблюдения с двух платформ, которые были развернуты в море Лаптевых к северу от дельты Лены с сентября 2007 года по сентябрь 2009 года, показали повышение температуры воды придонного слоя на среднем шельфе более чем на 3 градуса по сравнению со средним долгосрочным периодом [Hölemann et al., 2011]. Эта аномалия считалась следствием необычно высокой летней температуры поверхностных вод. Кроме того, остатки относительно теплой донной воды наблюдались на среднем шельфе с сентября 2007 года по апрель 2008 года. Наблюдения за период 2012/2013 годов также свидетельствуют об эпизодическом потеплении в придонных водах центрального шельфа моря Лаптевых, где сохранялась положительная температура в течение ~2,5 месяцев, достигая максимума +0,6° С к середине января 2013 года [Janout et al. 2016].

В нашем предыдущем исследовании [Golubeva et al., 2018] межгодовая изменчивость гидрологических полей моря Лаптевых, вызванная изменчивостью динамики атмосферы, исследовалась на основе трехмерной крупномасштабной совместной модели океана и морского льда. Используя дополнительно вложенную численную модель моря Лаптевых с высоким разрешением, мы более детально проанализировали различия в циркуляции моря Лаптевых, вызванные различными режимами динамики атмосферы в течение летних сезонов 2007 и 2008 гг. На основе анализа результатов моделирования мы показали возможность переноса тепла, накопленного в поверхностных слоях летом в более глубокие слои в течение осеннего сезона.

В продолжение этого исследования мы рассмотрели вопрос о возможности существования длительно сохраняющихся аномалий тепла в придонном слое моря в зимний период [Kraineva et al., 2019]. Численный эксперимент с использованием океанической модели повышенного разрешения (2–5 км) был проведен на двухлетний период с сентября 2006 года по сентябрь 2008 года с использованием данных реанализа атмосферы CORE II (<https://data1.gfdl.noaa.gov/nomads/forms/core/COREv2.html>).

По результатам численного моделирования мы получили более теплое состояние моря для летнего периода 2007 г. по сравнению с 2006 г. (рис.2,3). Состояние атмосферы в регионе способствовало более сильному прогреву поверхностных вод в летний период 2007 г. по сравнению с аналогичным периодом 2006 года. Система циркуляции вод моря в 2007 г также значительно отличалась от ситуации 2006 года. Направленный к берегу поток способствовал дополнительному перемешиванию в прибрежных водах и поступлению тепла в придонный слой. Теплый придонный слой восточной части моря сохранялся в течение зимнего периода 2008 г.

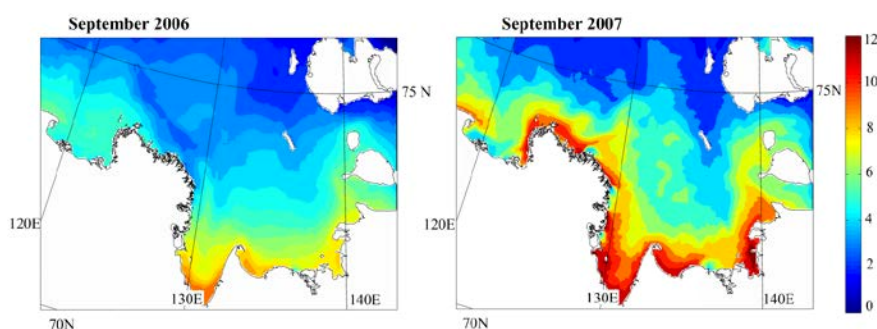


Рис. 2. Температура поверхностного слоя моря Лаптевых в летний период. Численный расчет.

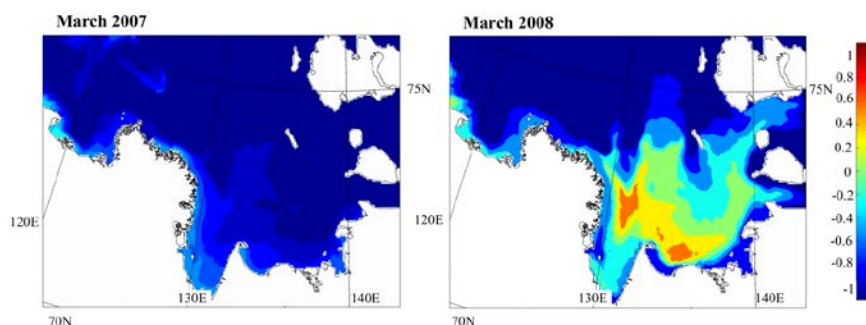


Рис. 3. Температура придонного слоя моря Лаптевых в зимний период. Численный расчет.

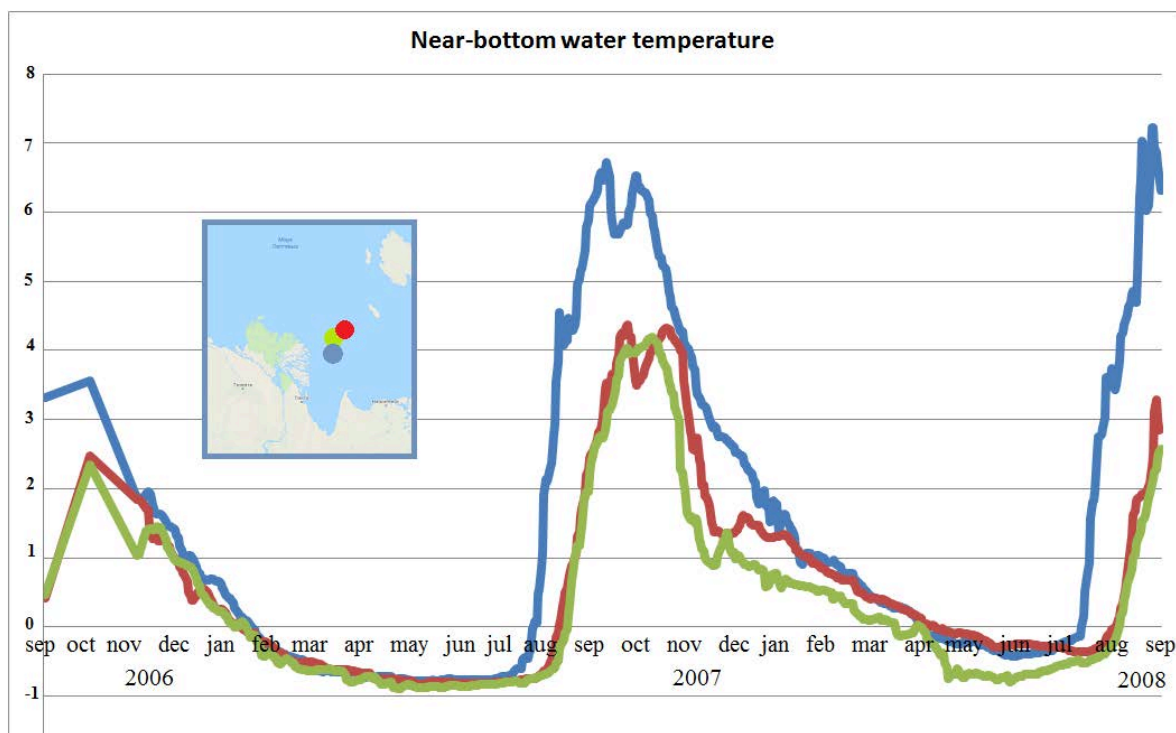


Рис. 4. Изменение температуры придонного слоя в выбранных точках в течение численного расчета

На рис.4 представлен временной ход придонной температуры в выбранных точках в течение расчетного периода. Из представленного распределения видно, что: 1) резкое формирование придонных аномалий начинается в августе и продолжается по октябрь, что указывает на вклад процессов осеннего перемешивания в повышение придонной температуры; 2) наличие локальных минимумов и максимумов в период с сентября по апрель говорит о возможности переноса аномалий тепла в придонном слое; 3) аномалии тепла, поступившие в придонный слой моря в период осеннего охлаждения, могут существовать в течение зимнего периода.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №20-11-20112.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Шнайхер А.О. Количество пресной воды в морских льдах полярных областей земного шара // Труды ААНИИ. 1976. Т. 323. С. 168–177.
2. Aagaard K., Carmack E.C. The role of sea ice and other fresh water in the arctic circulation // *J. of Geophysical Research*. 1989. N94. P. 14485-14498.
3. Захаров В.Ф. Морские льды в климатической системе. СПб.: Гидрометеоиздат, 1996. 213 с.
4. Aagaard, K., Coachman, L.K. & Carmack, E.C. (1981): On the halocline of the Arctic Ocean. - *Deep-Sea Res. A* 28: 529-545.
5. Rudels, B., Jones, E.P., Anderson, L.G., Kattner, G., 1994. On the Intermediate Depth Waters of the Arctic Ocean. In: *Geophysical Monograph Series*, vol. 85. American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 33–46. doi: 10.1029/GM085p0033.
6. Cheng, L., and Coauthors, 2020: Record-setting ocean warmth continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.*, 37(2), 137–142, <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>.
7. Dmitrenko, I. A., S. A. Kirillov, L. B. Tremblay, H. Kassens, O. A. Anisimov, S. A. Lavrov, S. O. Razumov, and M. N. Grigoriev (2011), Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability, *J. Geophys. Res.*, 116, C10027, doi:10.1029/2011JC007218.
8. Hölemann, J., Kirillov, S., Klagge, T., Novikhin, A., Kassens, H., Timokhov, L., 2011. Near-bottom water warming in the Laptev Sea in response to atmospheric and sea ice conditions in 2007. *Polar Research* 30, doi: 10.3402/polar.v30i0.6425.
9. Janout, M., J. Hölemann, B. Juhls, T. Krumpfen, B. Rabe, D. Bauch, C. Wegner, H. Kassens, and L. Timokhov (2016), Episodic warming of near-bottom waters under the Arctic sea ice on the central Laptev Sea shelf, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2015GL066565.
10. Golubeva E., Platov G., Malakhova V., Kraineva M., Iakshina D. Modelling the Long-Term and Inter-Annual Variability in the Laptev Sea Hydrography and Subsea Permafrost State, *Polarforschung*,

Анализ развития ранней стадии относительно устойчивых крупномасштабных погодных систем и связанных с ними фаз Арктических Колебаний при потеплении климата

Крупчатников В.Н., Боровко И.В., Голубева Е.Н., Платов Г.А.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: vkрупчатnikov@yandex.ru

Значительное повышение температуры и снижение зимней концентрации морского льда (SIC) в Арктике являются ключевыми характеристиками климатических изменений [1]. Какие существуют возможные механизмы, которые устанавливают связь между этими особенностями и экстремальными погодными условиями средней широты? Этот вопрос привлек внимание многих исследователей в последнее время. Стримеры и отсеченные вихри потенциальной завихренности (PV) являются индикаторами разрушения волны Россби (RWB) вблизи внетропической тропопаузы [2]. При обрушении волн Россби формируются вытянутые узкие языки - стримеры с высоким значением потенциальной завихренности в стратосфере, распространяющиеся до экватора, и языки с низким PV в тропосфере, распространяющиеся до полюса. Существует два типа обрушения волн, которые называются экваториальными и полюсными типами RWB. В этом сообщении представлены конфигурации потенциального вихревого поля для модельных данных и показаны основные области RWB для зимнего и летнего периодов. Поскольку термин «блокирование» охватывает широкий спектр синоптических структур, поэтому для выявления этих событий был разработан ряд индексов [3]. Процесс разрушения волны Россби тесно связан с характеристиками PV-стримеров, блокированием, фазой NAO / AO [4,5,6] и с климатическим дрейфом. Для изучения этих проблем используется модель климатической системы Planet Simulator [7]. Мы использовали данные моделирования зимнего сезона за шестьдесят лет, чтобы идентифицировать блокирующие события. Была рассмотрена область от 40 до 80 градусов широты. Примерно 2/3 блокирований в Западной Европе происходит с отрицательным показателем АО. Для блокировки в Восточной Европе преобладает отрицательный индекс АО, а блокирование в Америке происходит только с положительным индексом. Блокирование в Северо-Восточной Азии происходит примерно одинаково как с положительным, так и с отрицательным индексом АО. В этом сообщении мы также представляем некоторые результаты моделирования вихревых потоков. Исследование стратосферной циркуляции основано на двумерной вихревой динамике. В субтропиках количество стримеров в летний период больше, чем зимой, потому что в зимний период сильное струйное течение обеспечивает устойчивость волн Россби. Кроме того, изучена зависимость количества стримеров от масштаба [8].

Эта работа была поддержана РНФ, грант № 19-17-00154

ЛИТЕРАТУРА:

1. J. Cohen, J. A. Screen, J. C. Furtado, M. Barlow, D. Whittleston, D. Coumou, J. Francis, K. Dethloff, D. Entekhabi, J. Overland, J. Jones, Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nat. Geosci.* 7, 627–637 (2014).
2. McIntyre, Palmer T.N. Breaking planetary waves in the stratosphere. // *Nature*, 1983, Vol. 305 13, p.593-600
3. Masato G, Hoskins BJ, Woollings TJ. 2012. Wave-breaking characteristics of midlatitude blocking. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 138: 1285–1296. DOI:10.1002/qj.990
4. Thompson, D. W. J.; Wallace, J. M. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. // *Geophys. Res. Lett.* 1998, Vol.25, P. 1297-1300; DOI: 10.1029/98GL00950.
5. Baldwin, M.P.; Cheng, X.; Dunkerton, T.J. Observed correlation between winter-mean tropospheric and stratospheric circulation anomalies // *Geophys. Res. Lett.* 1994, Vol. 21, P. 1141-1144; DOI: 10.1029/94GL01010.

6. Kitoh, A.; Koide, H.; Kodera, K.; Yukimoto, S.; Noda, A. *Interannual variability in the stratospheric-tropospheric circulation in a coupled ocean-atmosphere GCM* // *Geophys. Res. Lett.* 1996, Vol 23, P. 543-546; DOI: 10.1029/96GL00158.
7. Fraedri K., Jansen H., Kirk E., Luksch U., and Lunkeit F. *The Planet Simulator: Towards a user-friendly model* // *Meteorol. Zeitschrift*, 2005, V. 14, P. 299-304.
8. Borovko I. V., Krupchatnikov V. N. *On the polar vortex streamer dynamics.* // *Bulletin of Novosibirsk Computing Center. Series: Numerical modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment Studies* (2019 г.) Issue 17.

Analysis of the development of the early stage of relatively stable large-scale weather systems and related phases of Arctic Oscillations under climate warming

Krupchatnikov V.N., Borovko I.V., Golubeva E.N., Platov G.A.

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia
E-mail: vkupchatnikov@yandex.ru

The large rise of temperature and decline of winter sea ice concentration (SIC) in the Arctic are key features of climate changes [1]. What possible mechanisms exist that establishes a link between these features and midlatitude weather extremes? This question attracted attention to many researchers in recent times.

Potential vorticity (PV) streamers and cutoffs are indicators to the Rossby wave breaking (RWB) near the extratropical tropopause [2]. In the Rossby waves breaking, the formation of elongated high-PV stratospheric air tongues extending to the equator and tropospheric low PV air tongues extending to the pole are obtained. There are two types of wave breaking, which are referred to as equatorward and poleward types of the RWB. Frequently, the PV tongues are stretched into narrow filaments, the so-called PV streamers that split to PV cutoff vortices. Here stratospheric PV streamer and cutoff are stratospheric features on isentropic surfaces. In this report, the configuration of a potential vortex field for model data is investigated and main areas of the RWB for the winter and summer periods are shown.

Process of Rossby wave breaking is strongly related to the characteristics of PV streamers, blocking, NAO/AO phase and climate drift bias. Because term “blocking” covers a wide range of synoptic patterns, therefore a range of indices has been developed to detect these events [3].

The dominant mode of atmospheric circulation in the Northern Hemisphere extratropics is the Arctic oscillation (AO) [4]. Since the 90s, this has become even more evident. It was shown that the interannual variability of the northern winter stratospheric flow in 1964-1993 was closely linked to large-scale circulation anomalies in the middle troposphere [5]. Using the EOF method of decomposition between the 500 and 50-hPa geopotential heights, a 500-hPa AO structures were produced including anomalies in eastern Siberia. Based on numerical modeling, in [6], the relationship between tropospheric and stratospheric circulation and ocean surface temperature was established.

To predict future changes in blocking and the resulting weather extremes, some studies have proposed the negative phase of Arctic Oscillation (-AO) as an analogue for Arctic Amplification because of similarities between their mean-states: reduced midlatitude-to-pole temperature gradients and weakened, equatorward-shifted jet-streams. Based on the data of modeling experiments, we plan to show the relationship of blocking variations with average state anomalies caused by internal dynamics anomalies, using the example of AO, and external factors affecting Arctic warming.

While blocking increases and its latitudinal-distribution shifts poleward in -AO, we find opposite responses when a mean-state identical to the -AO mean-state is externally forced. Findings suggest that the observed blocking-AO relationship is a correlation which does not imply that the -AO mean-state causes increased blocking, and should not be employed as a prototype for Arctic Amplification. Furthermore, results urge for a careful consideration of causality before using internal-variability to predict low-frequency response to external forcings.

To study these problems in question, climate system model, Planet Simulator, is used [7].

We used modeling data of winter season for sixty years to identified blocking events. An area of 40 to 80 degrees of latitude was considered. Approximately 2/3 of blocking in Western Europe occurs with a negative index AO. For blocking in Eastern Europe, a negative index of AO prevails. Blocking in America in the model occurs only with a positive index. The blocking in Northeast Asia is about the same with a positive and negative index AO.

In this report, we also present some results of modeling the vortex streamers. The study of the stratospheric circulation is based on the two-dimensional vortex dynamics. Two-dimensional patterns such as the streamers of vortices in straining flows have a direct application to the stratospheric wave breaking. In this report, the number of streamers and cutoffs in different seasons is computed. In the subtropics, the number of streamers in the summer period is more than in winter, because in the winter period a strong jet stream provides the stability of the Rossby waves. In addition, the dependence of the number of streamers on the scale is studied. It was found that most of streamers of vortex structure exceed 2,000 km [8].

Acknowledgements. This work was supported by RSF Grant Number 19-17-00154.

REFERENCES:

1. J. Cohen, J. A. Screen, J. C. Furtado, M. Barlow, D. Whittleston, D. Coumou, J. Francis, K. Dethloff, D. Entekhabi, J. Overland, J. Jones, *Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather*. *Nat. Geosci.* 7, 627–637 (2014).
2. McIntyre, Palmer T.N. *Breaking planetary waves in the stratosphere*. // *Nature*, 1983, Vol. 305 13, p. 593–600
3. Masato G, Hoskins BJ, Woollings TJ. 2012. *Wave-breaking characteristics of midlatitude blocking*. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 138: 1285–1296. DOI:10.1002/qj.990
4. Thompson, D. W. J.; Wallace, J. M. *The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields*. // *Geophys. Res. Lett.* 1998, Vol. 25, P. 1297–1300; DOI: 10.1029/98GL00950.
5. Baldwin, M.P.; Cheng, X.; Dunkerton, T.J. *Observed correlation between winter-mean tropospheric and stratospheric circulation anomalies* // *Geophys. Res. Lett.* 1994, Vol. 21, P. 1141–1144; DOI: 10.1029/94GL01010.
6. Kitoh, A.; Koide, H.; Kadera, K.; Yukimoto, S.; Noda, A. *Interannual variability in the stratospheric-tropospheric circulation in a coupled ocean-atmosphere GCM* // *Geophys. Res. Lett.* 1996, Vol 23, P. 543–546; DOI: 10.1029/96GL00158.
7. Fraedri K., Jansen H., Kirk E., Luksch U., and Lunkeit F. *The Planet Simulator: Towards a user-friendly model* // *Meteorol. Zeitschrift*, 2005, V. 14, P. 299–304.
8. Borovko I. V., Krupchatnikov V. N. *On the polar vortex streamer dynamics*. // *Bulletin of Novosibirsk Computing Center. Series: Numerical modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment Studies* (2019 г.) Issue 17.

Параметризация скорости диссипации кинетической энергии турбулентности в моделях пограничного слоя атмосферы и океана

^{1,2}Мортиков Е.В., ^{2,1}Глазунов А.В., ^{1,3}Дебольский А.В., ⁴Каданцев Е.В., ^{2,1}Лыкосов В.Н.,
^{5,4,6,1}Зилитинкевич С.С.

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

⁴Университет Хельсинки, Хельсинки, Финляндия

⁵Финский метеорологический институт, Хельсинки, Финляндия

⁶Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

E-mail: evgeny.mortikov@gmail.com

В докладе обсуждаются замыкания турбулентных процессов, используемые в современных моделях прогноза погоды и климата. Показано, что основные ошибки в воспроизведении устойчиво-стратифицированных пограничных слоев связаны с определением турбулентных масштабов длины и времени или скорости диссипации кинетической энергии турбулентности. Рассматривается предложенное в работе (Мортиков и др., 2019) релаксационное уравнение относительно волнового числа для полуэмпирических замыканий геофизической турбулентности. Традиционное феноменологическое уравнение для скорости диссипации кинетической энергии турбулентности можно рассматривать как аппроксимацию данного релаксационного уравнения для устойчиво-стратифицированных течений, находящихся в состоянии квази-равновесия. Такая связь позволяет соотнести выбор эмпириче-

ских констант в уравнении для скорости диссипации с заданием равновесного состояния и релаксационного временного масштаба.

Представлены численные эксперименты показывающие, что параметризация на основе релаксационного уравнения относительно волнового числа при задании равновесного состояния, согласованного с локальным обобщением теории подобия Мони́на-Обухова, позволяет воспроизвести основные характеристики нейтрально- и устойчиво-стратифицированных пограничных слоев. Обсуждается возможность уточнения замыкания за счет задания равновесных состояний и релаксационных соотношений по данным прямого и вихререзающего моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (номер гранта 20-05-00776) и гранта Президента России МК-1867.2020.5.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Мортиков Е.В., Глазунов А.В., Дебольский А.В., Лыкосов В.Н., Зилитинкевич С.С.
О моделировании скорости диссипации кинетической энергии турбулентности // Доклады Академии Наук. 2019. Т. 489, № 4. С. 414-418.

Parameterization of the dissipation rate of turbulent kinetic energy in atmospheric and oceanic boundary layer models

^{1,2}Mortikov E.V., ^{2,1}Glazunov A.V., ^{1,3}Debol'skiy A.V., ⁴Kadantsev E.V., ^{2,1}Lykosov V.N.,
^{5,4,6,1}Zilitinkevich S.S.

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

³Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

⁴University of Helsinki, Helsinki, Finland

⁵Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland

⁶Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

E-mail: evgeny.mortikov@gmail.com

INTRODUCTION

In large-scale models of the atmosphere and ocean, turbulence in the boundary layers is described using semi-empirical closures. The most common approach considers the equations for the second-order moments of hydrodynamic fields. Under the assumptions of Kolmogorov (Kolmogorov, 1942), the problem is simplified and requires determination of the dissipation rate of turbulence kinetic energy or, equivalently, finding turbulent length or time scale. Modern closures still unsatisfactorily reproduce stably stratified turbulence (Cuxart et al., 2006) and diurnal cycle dynamics (Svensson et al., 2011), and the parametrization of dissipative processes remains one of the main challenges.

We consider a relaxation equation for turbulence wavenumber in semi-empirical turbulence closures. Recently (Mortikov et al., 2019a) it was shown that the well-known phenomenological equation for the dissipation rate of turbulent kinetic energy can be related to this relaxation equation as a close approximation of the latter for stably stratified quasi-stationary flows.

In this work we show how the parameterization based on turbulence wavenumber relaxation equation may be used in atmospheric and oceanic boundary layer models to correctly simulate neutral and stable boundary layers. We discuss how the proposed approach allows clarification of turbulent closures in the boundary layers of the atmosphere and ocean by specifying the equilibrium states and relaxation relations consistent with the direct and large eddy simulation data.

TURBULENCE WAVENUMBER RELAXATION EQUATION

We assume that the evolution of the turbulent scale of the wavenumber k_T should describe the adjustment of the spectrum to the equilibrium state and restrict ourselves to the relaxation model of such an adjustment:

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} = -\frac{1}{t_R}(k_T - k_T^0),$$

where $k_T^0 = 1/l_T^0$ and l_T^0 is the equilibrium turbulent length scale determined by the geometry flow and stratification. Relaxation time $t_R = C_R^{-1} E/\varepsilon$ is assumed to be proportional to the turbulent time scale – the ratio of turbulent kinetic energy E and dissipation rate ε ; and C_R is a new empirical constant. A similar equation under the assumption of spectrum self-similarity was obtained from the spectral balance equation in (Schiestel, 1987) for homogeneous forced turbulence, e.g. $k_T^0 = 0$.

In (Mortikov et al., 2019a) the equation for the turbulent kinetic energy dissipation rate was obtained from the equation of relaxation of the turbulent wave number to its equilibrium value. It was shown that the derived equation has a form close to that of the standard phenomenological equation for the dissipation rate (Burchard, 2002). This allows to establish a relationship between the four constants in the so-called “standard” equation for the dissipation rate and the single relaxation constant C_R .

Here we specify the equilibrium state of the system using the local Monin-Obukhov similarity scaling with additional length scale correction to take rotational effects into account and then deduce the corresponding dissipation rate equation which is subsequently used in the numerical simulations. Equilibrium state is consistent with the results of direct numerical simulation and measurement data (Mortikov et al., 2019b; Zilitinkevich et al., 2019) in a wide range of stability, including conditions of strong stable stratification.

NUMERICAL SIMULATION OF STABLE BOUNDARY LAYERS

An open source framework (Debol'skiy et al., 2019) for the implementation and benchmark of turbulence closures, developed at Moscow State University, was used in numerical experiments. Two cases with available large-eddy simulation (LES) data for verification were considered. The first one was proposed in the Global Energy and Water Exchanges, Atmospheric Boundary Layer Study program (GEWEX GABLS), see (Cuxart et al., 2006), to compare turbulence models in a simulation of a height-increasing, stably-stratified atmospheric boundary layer. Figure 1 shows the profiles of temperature and wind speed averaged over the ninth hour of calculation in comparison with LES data (Glazunov et al., 2016). Note that the deviations are comparable with the discrepancies in the results of LES intercomparison study (Beare et al., 2006).

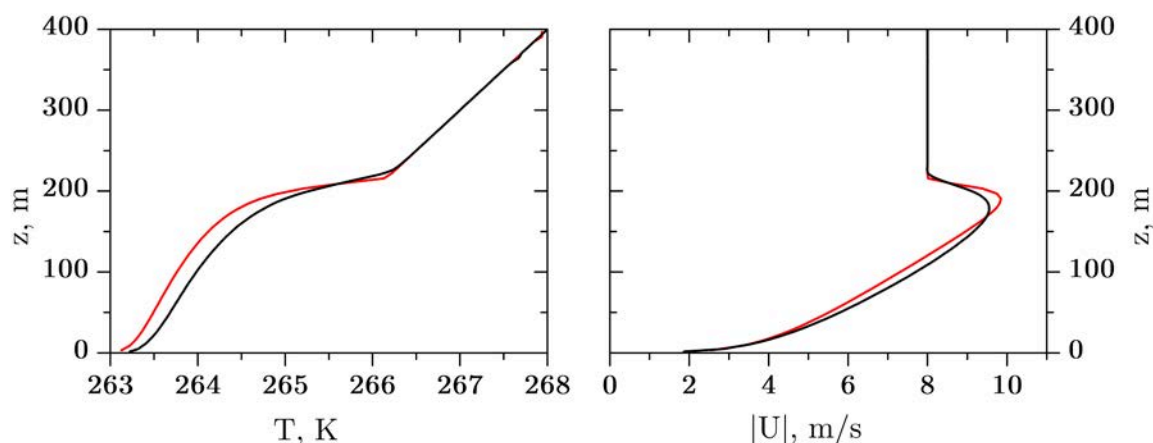


Figure 1. Vertical profiles of the potential temperature (left) and the wind speed (right). Wavenumber relaxation equation parameterization, $C_R = 0.48$ (red solid line), LES (black solid line).

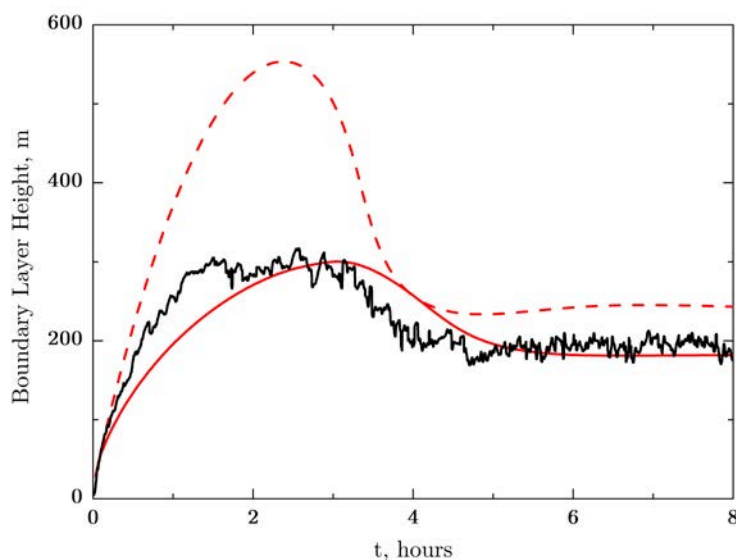


Figure 2. Boundary layer height in nocturnal boundary layer simulation. Wavenumber relaxation equation parameterization, $C_R = 0.48$ (red solid line), “standard” dissipation rate equation (red dashed line), LES (black solid line).

In the second case, nocturnal boundary layer (Zilitinkevich et al., 2012) was simulated with a prescribed surface cooling of an initially neutral boundary layer. Figure 2 shows the change in boundary layer height over time. The “standard” dissipation rate equation overestimates the increase of the boundary layer height, while the proposed model is consistent with large eddy simulation data.

The work was supported by the RF President's Grant for Young Scientists MK-1867.2020.5 and by the RFBR grant № 20-05-00776.

REFERENCES:

1. Beare R.J., Macvean M.K., Holtslag A.A.M., Cuxart J., Esau I., et al. *An intercomparison of large-eddy simulations of the stable boundary layer* // *Bound.-Layer Meteorol.* 2006. V. 118. P. 247-272.
2. Burchard H. *Applied turbulence modelling in marine waters.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002.
3. Cuxart J., Holtslag A.A.M., Beare R.J., Bazile E., Beljaars A., et al. *Single-column model intercomparison for a stably stratified atmospheric boundary layer* // *Bound.-Layer Meteorol.* 2006. V. 118. P. 273-303.
4. Debolskiy A., Mortikov E., Glazunov A. *A comprehensive suite for evaluation of single column turbulence closures* // *Geophys. Res. Abstracts.* V. 21, EGU2019-12930, 2019.
5. Glazunov A., Rannik U., Stepanenko V., Lykosov V., Auvinen M., Vesala T., Mammarella I. *Large-eddy simulation and stochastic modeling of Lagrangian particles for footprint determination in the stable boundary layer* // *Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9. P. 2925-2949.
6. Kolmogorov A.N. *The equations of turbulent motion in an incompressible fluid* // *Izv. Acad. Sci., USSR. Phys.* 1942. V. 6. P. 56-58.
7. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Debolskiy A.V., Lykosov V.N., Zilitinkevich S.S. *Modeling of the dissipation rate of turbulent kinetic energy* // *Doklady Earth Sciences.* 2019a. V. 489, N 2. P. 1440-1443.
8. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. *Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations* // *Russ. J. Numer. Analysis Math. Modelling.* 2019b. V. 34, N. 2. P. 119-132.
9. Schiestel R. *Multiple-time-scale modeling of turbulent flows in one-point closure* // *Phys. Fluids.* 1987. V. 30, N 3. P. 722-731.
10. Svensson G., Holtslag A.A.M., Kumar V., Mauritsen T., Steeneveld G.J., et al. *Evaluation of the diurnal cycle in the atmospheric boundary layer over land as represented by a variety of single-column models: The second GABLS experiment* // *Bound.-Layer Meteorol.* 2011. V. 140. P. 177-206.
11. Zilitinkevich S., Druzhinin O., Glazunov A., Kadantsev E., Mortikov E., Repina I., Troitskaya Yu. *Dissipation rate of turbulent kinetic energy in stably stratified shear flows* // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. P. 2489-2496.
12. Zilitinkevich S.S., Troitskaya Y.I., Mareev E.A., Tyuryakov S.A. *Theoretical models of the height of the atmospheric boundary layer and turbulent entrainment at its upper boundary* // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2012. V. 48, N 1. P. 133-142.

The main modes of the Arctic Ocean circulation and the relationship of their trends with the Atlantic water heat content

Platov G.A., Kraineva M.V., Golubeva E.N.

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The paper presents the results of an analysis of the dynamics of the Arctic Ocean integral characteristics, such as the transport of the main currents, the thickness and heat content of the Atlantic water (AW) layer depending on the values of the main atmospheric circulation indices, the main of which is the Arctic Oscillation (AO) Index.

Using the EOF decomposition applied to the results of numerical modeling, just a weak linear dependence of the variability of the Atlantic water layer heat content in the Arctic on the type of Arctic Ocean water circulation is shown. It was the warming of the Atlantic water layer in the Canadian basin, which is one of the main features due to climate changes in the Arctic Ocean, that turned out to be the most dependent on the Arctic Ocean oscillation (AOO) mode.

Основные моды циркуляции Северного Ледовитого океана и связь их тенденций с теплосодержанием Атлантических вод

Платов Г.А., Крайнева М.В., Голубева Е.Н.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Изменчивость структуры течений, теплозапаса и стратификации верхнего слоя Северного Ледовитого океана (СЛО), в значительной степени определяется атмосферной циркуляцией, поскольку она формирует неоднородности движения верхнего слоя и морского льда, а также ответственна за перенос тепла, облачности и влажности воздушными потоками, определяя баланс тепловых потоков на поверхности океана и льда [1,2]. Обратная связь определяется наличием участков свободных ото льда, изменением альбеда подстилающей поверхности, изменением температурно-влажностного режима приземного воздуха.

Доминирующей модой атмосферной циркуляции в Арктике и примыкающих умеренных широтах является Арктическая осцилляция (АО) [3]. Начиная с 90-х годов это стало еще более очевидно. Было показано, что межгодовая изменчивость зимнего северного стратосферного потока в 1964-1993 гг тесно связана с аномалиями крупномасштабной циркуляции в средней тропосфере. С помощью метода ЕОФ декомпозиции (разложение по естественным ортогональным функциям) проведенной для разницы высот геопотенциала 500 и 50 hPa были получены структуры АО, включающие аномалии в восточной Сибири [4]. В работе [5] на основе численного моделирования была установлена связь тропосферной и стратосферной циркуляций с температурой поверхности океана.

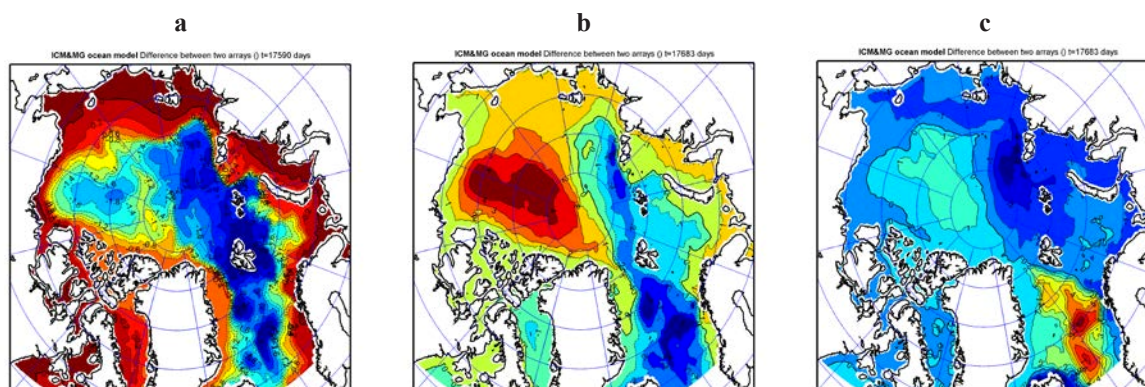


Рис. 1. Первые три моды ЕОФ разложения интегральной функции тока: а) первая, б) вторая и с) третья.

Заметное уменьшение объема и площади морского льда [6], с одной стороны связывалось с динамическими особенностями атмосферной циркуляции [7], с другой, влиянием теплых воздушных масс [8]. Благодаря [9,10] стала более очевидной связь с общей структурой атмосферной циркуляции, в значительной степени представленной АО.

Метод ЕОФ разложения, основанный на выявлении статистических закономерностей изменчивости гидродинамических характеристик, используется давно и является одним из инструментов анализа данных и результатов численного моделирования, позволяя описать характер изменчивости 2-3-мерных полей с помощью ограниченного набора собственных функций (мод) и их амплитуд (принципиальных компонент). Пользуясь статистическими методами и методом ЕОФ декомпозиции в ряде работ (например, [11-14]) показана прямая связь между модами атмосферной циркуляции (АО) и характером распределения льда в Арктике и его динамики. В работе [13] на основе наблюдений 1953-1992 гг. был предложен механизм взаимосвязей между аномалиями концентрации льда и давления на уровне моря, обеспечивающий циклическое повторение через каждые 10 лет. Усиливающийся тренд Северо-атлантической осцилляции (NAO -- North Atlantic Oscillation), согласно [10], явился причиной существенного сокращения льда в Северном Ледовитом океане.

В работе мы представляем результаты анализа динамики интегральных характеристик СЛО, таких как расходы основных течений, толщина и теплосодержание слоя атлантических вод (АВ) от значений основных индексов атмосферной циркуляции, главным из которых является индекс Арктической осцилляции (АО).

Для оценки характеристик динамики и термодинамики СЛО мы использовали результаты моделирования полученные с помощью совместной модели океана и льда Арктики и Северной Атлантики --

SibCIOM. Координатная сетка модели построена с использованием трехполярной системы и имеет $1/2^\circ$ разрешение в Северной Атлантике и разрешение в диапазоне 10-26 км в приполярных районах. По вертикали модель имеет 38 уровней, с разрешением у поверхности 5 м у поверхности, а верхний 1000 м слой содержит 24 уровня. Инициализация модели происходит с использованием данных РНС [15]. Морской лед описывается с помощью модели CICE-3. Расход основных рек региона взят из данных RivDis-1.0 [16] и ежегодно повторяет осредненный сезонный ход. Расход в Беринговом проливе задан равным 0.8 Св. На южной границе (20S) задан равномерный расход, компенсирующий все сторонние притоки.

Основная часть анализируемых результатов получена в ходе численного эксперимента по восстановлению динамики океана и морского льда в период с января 1948 по декабрь 2019. Атмосферный форсинг получен в ходе реанализа NCEP/NCAR [17] и включает в себя температуру приземного воздуха (на уровне $\sigma=995$ дб), его влажность, давление на уровне моря, скорость выпадения осадков, низходящую длинноволновую и коротковолновую радиацию, а также скорость ветра в приземном слое.

Для анализа результатов численных экспериментов будем использовать аппарат разложения по естественным ортогональным функциям (ЕОФ). Метод позволяет уменьшить размерность анализируемой системы, найти относительно небольшое число независимых переменных, которые передают наибольшую информацию об изменчивости данных, оценить относительную важность каждой структуры.

ЕОФ РАЗЛОЖЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ТОКА

На рисунке 1 представлены первые три, являющиеся невырожденными, моды ЕОФ разложения интегральной функции тока. Первая мода представляет однонаправленную (циклоническую или антициклоническую в зависимости от знака) циркуляцию во всем бассейне СЛО за исключением окраинных морей, где формируется противоположная компенсирующая циркуляция. Вторая и третья моды демонстрируют разнонаправленные циркуляции в бассейне Амундсена и в Канадском бассейне, разделенные хребтом Ломоносова. При этом в первом случае циркуляция в бассейне Амундсена сонаправлена с циркуляцией в морях северной Атлантики, а во втором направлена противоположно. Напомним, что речь идет об аномальных отклонениях от среднеклиматического распределения течений. Заметим также, что усиление второй моды соответствует формированию, так называемой, антициклонической фазы Арктической осцилляции океана (АОО) [18], а ее разворот – формированию циклонической фазы.

ЕОФ РАЗЛОЖЕНИЕ ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ СЛОЯ АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОД

Второе поле, которое мы анализировали с помощью ЕОФ разложения, это телосодержание слоя АВ. Верхняя граница слоя h_u определялась, как точка перехода температуры воды от отрицательных значений, характерных для поверхностных арктических вод, к положительным, а нижняя h_l , как обратный переход от положительных к отрицательным температурам глубинных вод. Таким образом, теплозапас НС представляет собой функцию географических координат и времени равную

$$HC(x, y, t) = \int_{h_l}^{h_u} c_p \rho T(x, y, z, t) dz$$

На рисунке 2 представлен результат ЕОФ разложения этой функции в виде трех мод. Для понимания этих мод будем предполагать, что их структура отражает реакцию на поступление аномально теплых вод через пролив Фрама, при этом знак первых двух совпадает с изображенным на рисунке, а знак третьей нужно поменять на противоположный. Первая мода дает распределение, когда одновременно с поступлением теплых АВ, происходит их остывание к северу от островов Канадского Архипелага и потепление в районе бассейна Макарова. Вторая демонстрирует остывание АВ, за исключением евразийского шельфового склона. И, наконец, третья мода практически не затрагивает большую часть СЛО, но дает существенное похолодание (обратный знак) на евразийском склоне.

СВЯЗЬ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ МОД СЛО С ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ АВ

Наибольший интерес при рассмотрении полученных мод вызывает вопрос соответствия циркуляционных мод СЛО и изменчивости теплозапаса слоя АВ. Таблица 1 демонстрирует значение коэффициентов кросс-корреляции принципиальных компонент.

Влияние первой циркуляционной мод проявляется во всех модах изменчивости теплозапаса, но особенно заметны отрицательные тенденции на евразийском шельфовом склоне третьей моды корреляция с которыми составляет -33.6%. Также заметное влияние с коэффициентом 21.1% оказывается на первую моду, связанную с потеплением в центральных районах Арктики и похолоданием к северу от Канадских островов. Однако, следует признать, что корреляция и в первом и во втором случае не является существенной.

Наиболее яркая связь, -51.9% корреляции, проявляется между второй циркуляционной модой (АОО) и второй модой изменчивости телосодержания АВ. Выражается эта связь в значительном потеплении АВ в Канадском бассейне в период формирования циклонической моды циркуляции СЛО.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции принципиальных компонент первых четырех мод интегральной функции тока Ftok1, ..., Ftok4 и теплосодержания слоя АВ Q1, ..., Q4

	Q1	Q2	Q3	Q4
Ftok1	0,210979	0,14929	-0,33611	0,093311
Ftok2	0,096857	-0,519	0,016995	-0,04121
Ftok3	0,042419	-0,11796	0,017417	0,10107
Ftok4	-0,0251	0,082926	0,001815	0,001152

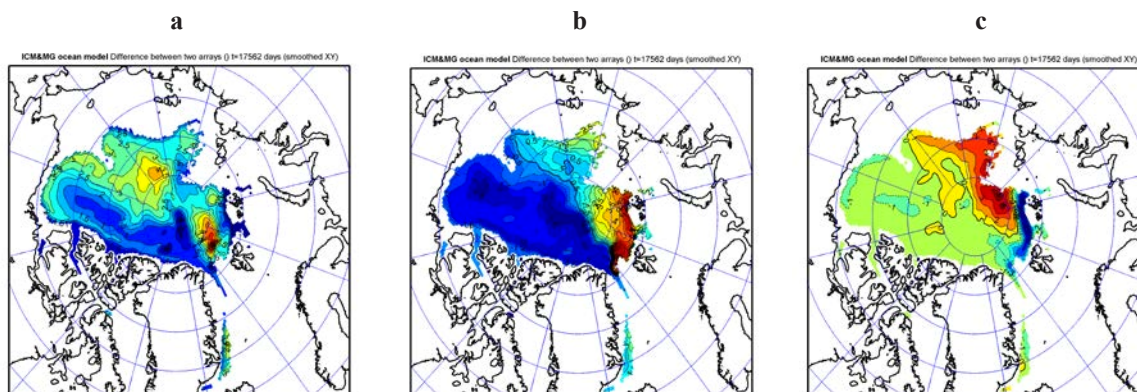


Рис. 2. Первые три моды ЕОФ разложения теплосодержания слоя АВ в СЛО: а) первая, б) вторая и с) третья.

Остальные кросс-корреляции либо слабы (менее 10%), либо связаны с потенциально вырожденными (четвертыми) модами.

ВЫВОДЫ

С помощью ЕОФ разложения, примененного к результатам численного моделирования, показана в основном слабая линейная зависимость изменчивости теплозапаса слоя Атлантических вод в Арктике от типа циркуляции вод СЛО. Наиболее сильно зависящей от Арктической осцилляции океана оказалось потепление слоя Атлантических вод в Канадском бассейне являющееся одной из основных черт в связи с климатическими изменениями в СЛО.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда: грант №19-17-00154.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Köberle, C., and R. Gerdes, *Mechanisms determining the variability of arctic sea ice conditions and export* // *J. Clim.* 2003, Vol. 16, P. 2843 – 2858, doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<2843:MDTVOA>2.0.CO;2
2. Makshtas, A. P., S. V. Shoutilin, and E. L. Andreas, *Possible dynamic and thermal causes for the recent decrease in sea ice in the Arctic basin* // *J. Geophys. Res.* 2003, Vol. 108(C7), 3232, doi: 10.1029/2001JC000878
3. Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, *The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields* // *Geophys. Res. Lett.* 1998, Vol. 25, No. 9, P. 1297-1300, doi: 10.1029/98GL00950.
4. Baldwin, M.P., X. Cheng, and T.J. Dunkerton, *Observed correlation between winter-mean tropospheric and stratospheric circulation anomalies* // *Geophys. Res. Lett.* 1994, Vol. 21, P. 1141-1144, doi: 10.1029/94GL01010
5. Kitoh, A., H. Koide, K. Koder, S. Yukimoto, and A. Noda, *Interannual variability in the stratospheric-tropospheric circulation in a coupled ocean-atmosphere GCM* // *Geophys. Res. Lett.* 1996, Vol. 23, P. 543-546, doi: 10.1029/96GL00158
6. Rothrock, D. A., Y. Yu, and G. A. Maykut, *Thinning of the arctic sea-ice cover* // *Geophys. Res. Lett.* 1999, Vol. 26(23), P. 3469– 3472, doi: 10.1029/1999GL010863
7. Deser, C., J. E. Walsh, and M. S. Timlin, *Arctic sea ice variability in the context of recent atmospheric circulation trends* // *J. Clim.* 2000, Vol. 13, P. 617–633, doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<0617:ASIV-IT>2.0.CO;2
8. Rigor, I. G., R. L. Colony, and S. Martin, *Variations in surface air temperature observations in the arctic, 1979 – 97* // *J. Clim.* (2000), Vol. 13, P. 896 – 914, doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<0896:VISATO>2.0.CO;2

9. Rigor, I. G., J. M. Wallace, and R. L. Colony, Response of sea ice to the Arctic Oscillation // *J. Clim.* 2002, Vol. 15, P. 2648 – 2663, doi: 10.1175/1520-0442(2002)015<2648:ROSITT>2.0.CO;2
10. Rothrock D. A. and J. Zhang, Arctic Ocean sea ice volume: What explains its recent depletion? // *J. Geophys. Res.* 2005, Vol. 110, C01002, doi:10.1029/2004JC002282
11. Walsh, J. E., Johnson, C. M., Interannual atmospheric variability and associated fluctuations in Arctic Sea ice extent // *J. Geophys. Res.* 1979, Vol. 84(C11), P. 6915– 6928, doi: 10.1029/JC084iC11p06915
12. Mysak, L.A., R.G. Ingram, J. Wang, A. van der Baaren, The anomalous sea ice extent in Hudson bay, Baffin bay and the Labrador sea during three simultaneous NAO and ENSO episodes // *Atmosphere-Ocean* 1996, Vol. 34(2), P. 313-343, doi:10.1080/07055900.1996.9649567
13. Mysak, L.A., S.A. Venegas, Decadal climate oscillations in the Arctic: a new feedback loop for atmosphere-ice-ocean interactions // *Geophys. Res. Lett.* 1998, Vol. 25, P. 3607-3610, doi: 10.1029/98GL02782
14. Wang, J., M. Ikeda, Arctic Oscillation and Arctic Sea-Ice Oscillation // *Geophys. Res. Lett.* 2000, Vol. 27, No. 9, P. 1287-1290, doi: 10.1029/1999GL002389.
15. Steele, M., R. Morley, and W. Ermold, PHC: A global hydrography with a high quality Arctic Ocean // *J. Clim.* 2001, Vol. 14(9), P. 2079–2087, doi: 10.1175/1520-0442(2001)014<2079:PAGOHW>2.0.CO;2.
16. Volosmarty, C. J., B. M. Fekete, and B. A. Tucker, Global river discharge, 1807-1991, Version 1.1 (RivDis) // Data set <http://www.daac.orln.gov>, Oak Ridge Natl. Lab. Distrib. Active Arch. Cent., Oak Ridge, Tenn. 1999, doi: 10.3334/ORNLDAAAC/199.
17. Kalnay, E., et al., The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1996, 77, 437– 471
18. Proshutinsky A., D. Dukhovskoy, M-L. Timmermans, R. Krishfield, J. Bamber, Arctic circulation regimes // *Phil. Trans. R. Soc. A* 2015, Vol. 373, 20140160; doi: 10.1098/rsta.2014.0160.

Представление гидрологических объектов суши в математических моделях Земной системы

^{1,2,3}Степаненко В.М., ^{4,1,2}Медведев А.И., ^{1,3,4}Дебольский А.В., ^{5,1,3}Гладских Д.С.,
^{1,3,6}Мортиков Е.В., ⁷Гусева С.П., ^{8,3}Богомолов В.Ю., ^{4,1,3}Репина И.А., ^{6,1,3,9}Лыкозов В.Н.

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

³Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

⁴Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия

⁵Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

⁶Институт вычислительной математики им. Г.И.Марчука РАН, Москва, Россия

⁷Университет Кобленц, Ландау, Германия

⁸Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

⁹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Факультет вычислительной математики и кибернетики, Москва, Россия

E-mail: stepanen@srcc.msu.ru

Гидрологические системы суши являются ключевым звеном системы влагооборота климатической системы Земли, тесно обуславливают теплооборот, а также циркуляцию атмосферы на различных пространственных и временных масштабах. Исследования последних десятилетий вскрывают многочисленные механизмы влияния водного режима деятельного слоя и водных объектов суши на потоки климатически значимых органических веществ, в первую очередь, CO₂ и CH₄. В этой связи, всё более актуальным становится детальное представление гидрологических объектов суши в математических моделях погоды и климата.

Одномерный подход при построении моделей водоёмов и водотоков получил широкое распространение в гидрометеорологии в силу наличия в этих физических объектах направления преобладающей пространственной изменчивости. Для водоёмов при этом в большинстве случаев используются уравнения вращающегося пограничного слоя, в то время как если горизонтальный размер водоёма сильно меньше внутреннего радиуса деформации Россби, сила горизонтального градиента давления определяет горизонтальное ускорение и должна быть соответствующим параметризована (Stepanenko et al., 2020). Проверка дополненной таким образом одномерной модели в полностью контролируемых условиях в широком диапазоне параметров водоёма возможна только в ходе согласованных сравнительных численных экспериментов с трёхмерной моделью водоёма (Гладских и др., в печати); показано, что

глубина перемешанного слоя в стратифицированном водоёме одномерной моделью воспроизводится удовлетворительно, а коэффициент турбулентной диффузии завышается, что требует проведения дальнейших исследований.

Биогеохимические процессы в водоёмах определяют продуктивность экосистемы, качество воды, а также эмиссию парниковых газов. Математическое моделирование эмиссии парниковых газов из *естественных* пресноводных озёр получило развитие относительно недавно (Stepanenko et al., 2016); при этом, важной с точки зрения инвентаризации антропогенных выбросов задачей является оценка эмиссий CO_2 и CH_4 с искусственно затопленных территорий (водохранилищ): здесь в одномерной (по вертикали) модели важно учитывать эффекты проточности: приток и сток массы воды, наличие средней вертикальной скорости из-за разницы уровней притоков и истока, колебания уровня воды; впервые эти параметризации внедрены в модель LAKE (Степаненко и др., в печати).

Пожалуй, наименьшей изученностью в задаче оценки эмиссии CO_2 и CH_4 из водных объектов отличаются процессы генерации и эмиссии этих газов из донных отложений. Предложена простая полуналитическая модель, впервые позволяющая оценить эффект наличия захваченных в донных отложениях пузырьков на разделение суммарного количества произведённого метана между диффузионным и пузырьковым потоками и, соответственно, на долю окисленного в водной толще метана.

Модель водоёма LAKE включена в схему деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ (Bogomolov et al., 2016), в составе этой схемы выполнены расчёты изменения во времени термодинамического режима водоёмов Земли с разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ по протоколу международного проекта ISIMIP2b (www.isimip.org), эти данные наряду с данными других аналогичных моделей в настоящее время используются для оценки изменения продолжительности ледяного покрова, продолжительности и степени летней стратификации в XXI веке.

Сети водотоков в настоящее время представлены упрощённо в моделях погоды и климата, хотя оказывают сильное влияние на формирование региональной термохалинной циркуляции океана, а также являются существенными источниками парниковых газов для атмосферы (Репина и др., в печати). Включение модели термогидродинамики речной сети на основе уравнений диффузионной волны и притока тепла позволяет существенно улучшить расчёт сезонного хода речного стока и термического режима р.Северной Двины в модели деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ (Степаненко и др., 2019). При этом, численная схема должна удовлетворять требованиям консервативности, монотонности и положительной определённости; на примере схем МакКормака, Курганова-Тадмора и Прейсмана показан предпочтительный выбор схемы в зависимости от того, для краткосрочного или климатического расчёта используется модель деятельного слоя суши.

По причине значительной генерации парниковых газов в донных отложениях рек и, предположительно, высоких значений диффузионного потока газов на дне, возникает задача о построении вычислительно эффективного турбулентного замыкания для описания вертикального распространения растворённых CO_2 и CH_4 к поверхности потока. На основе сравнения в данными натурных измерений на р.Китинен (Финляндия) показано, что стандартное $k-\epsilon$ замыкание хорошо воспроизводит значения диссипации турбулентной кинетической энергии в приповерхностном слое воды (Guseva et al., submitted), однако эта схема требует использования малых шагов по времени, что ограничивает её потенциальное использование в моделях погоды и климата. Более простые схемы, использующие диагностические формулы для коэффициента турбулентной диффузии, проходят проверку на данных прямого численного моделирования турбулентности в постановке Куэтта-Пуазейля.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 20-05-00773 и гранта Президента России МК-1850.2020.5.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гладских Д.С., В.М.Степаненко, Е.В.Мортиков. О влиянии горизонтальных размеров внутренних водоемов на толщину верхнего перемешанного слоя. Водные ресурсы, в печати.
2. Степаненко В.М., А. И. Медведев, И. А. Корпушенков, Н. Л. Фролова, В. Н. Лыкоsov. Параметризация речной сети для модели Земной системы. Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии, 20:396–410, 2019. <http://dx.doi.org/10.26089/NumMet.v20r435>
3. Степаненко В.М., М.Г.Гречушникова, И.А.Репина. Численное моделирование эмиссии метана из водохранилища. Фундаментальная и прикладная и климатология, в печати.
4. Репина И.А., К.В. Барсков, А.Ю. Артамонов, В.М. Степаненко, О.В. Дударев, Д.А. Космач, И.П. Семилетов, Н.Е. Шахова. Потоки парниковых газов в системе река-атмосфера по данным измерений на реках Обь и Лена. Метеорология и гидрология, в печати.
5. Bogomolov V., V. Stepanenko, and E. Volodin. Development of lake parametrization in the INMCM climate model. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 48(1):12005, 2016. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/48/1/012005>

6. Guseva S., M. Aurela, D. Bastviken, A. Cortés, E. Lotsari, S. MacIntyre, I. Mammarella, J.M. Melack, A. Ojala, R. Kivi, V. Stepanenko, P. Uotila, A.J.A. Vähä, T. Vesala, M. Wallin and A. Lorke. *Physical drivers of near-surface turbulence in a regulated river. Submitted to Water Resource Research.*
7. Stepanenko V. M., G. Valerio, and M. Pilotti. *Horizontal pressure gradient parameterization for one-dimensional lake models. Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(2):e2019MS001906, 2020. <http://dx.doi.org/10.1029/2019ms001906>
8. Stepanenko V., I. Mammarella, A. Ojala, H. Miettinen, V. Lykosov, and V. Timo and. *LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes. Geoscientific Model Development*, 9(5):1977–2006, 2016. <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-9-1977-2016>

Representation of land water objects in the Earth system models

^{1,2,3}Stepanenko V.M., ^{4,1,2}Medvedev A.I., ^{1,3,4}Debolskiy A.V., ^{5,1,3}Gladskikh D.S., ^{1,3,6}Mortikov E.V.,
⁷Guseva S.P., ^{8,3}Bogomolov V.Yu., ^{4,1,3}Repina I.A., ^{6,1,3,9}Lykosov V.N.

¹Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

³Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

⁴A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

⁵Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

⁶G.I. Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

⁷Koblenz University, Landau, Germany

⁸Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

⁹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Moscow, Russia

E-mail: stepanen@srcc.msu.ru

Terrestrial hydrological objects are a key element of the moisture circulation chain in the Earth's climate system, they are closely coupled to heat dynamics in the land-atmosphere system, as well as to atmospheric circulation at various spatial and temporal scales. Studies of the last decades reveal numerous mechanisms connecting the soil active layer water regime, land water objects and the fluxes of climatically significant organic substances, primarily CO₂ and CH₄. In this regard, a detailed representation of the land hydrological objects in mathematical models of weather and climate becomes increasingly relevant.

A one-dimensional approach for simulation of lakes and streams has become widespread in hydrometeorology due to the presence of direction with prevailing spatial variability in these physical objects. In most lake models, the equations of a rotating boundary layer are used, while if the horizontal size of the lake is much smaller than the internal Rossby radius of deformation, the horizontal pressure gradient force determines the horizontal acceleration and it should be parameterized accordingly (Stepanenko et al., 2020). Verification of the one-dimensional lake model supplemented with such parameterization under completely controlled conditions in a wide range of water basin parameters is possible only during harmonized comparative numerical experiments with a three-dimensional hydrodynamic model (Gladskikh et al., in press); it is shown that the depth of the upper mixed layer in the stratified lake is reproduced satisfactorily by the one-dimensional model, while the turbulent diffusion coefficient is overestimated, which requires further research.

Biogeochemical processes in water bodies determine ecosystem productivity, water quality, and greenhouse gas emissions. Mathematical modeling of greenhouse gas emissions from natural freshwater lakes has been developed recently (Stepanenko et al., 2016); at the same time, an anthropogenic emissions inventory includes estimating CO₂ and CH₄ fluxes from artificially flooded territories (reservoirs): for this task, in a one-dimensional (in vertical) model, it is important to take into account throughflow effects: inflow and outflow of water masses, the presence of an average vertical velocity due to elevation between inflows and effluent at the dam, fluctuations in water level; the original parameterizations of those effects were introduced into the LAKE model (Stepanenko et al., in press).

Perhaps the least studied issue in the problem of estimating CO₂ and CH₄ emissions from freshwater bodies are the processes of production and emission of these gases from bottom sediments. A simple semi-analytical model is proposed, which allows to evaluate the effect of bubbles trapped in bottom sediments on the separation of the total amount of methane produced in sediments between diffusion and bubble fluxes and, accordingly, on the fraction of methane oxidized in the water column.

The LAKE model is included in the INM RAS-MSU land surface scheme (Bogomolov et al., 2016); being a part of this scheme, the evolution of the thermodynamic regime of the Earth's lakes under a resolution of 0.5°

x 0.5° was calculated following the protocol of the ISIMIP2b international project (www.isimip.org); the data of those simulations, along with the data from other lake models, are currently used to assess changes in ice cover duration, duration and degree of summer stratification in lakes in the 21st century.

River networks are currently represented simplistically in weather and climate models, although they impose a strong influence on the formation of regional thermohaline ocean circulation, and are also significant sources of greenhouse gases for the atmosphere (Repina et al., in press). The inclusion of the river network model based on the diffusive wave and heat balance equations significantly improves simulation of the seasonal course of flow discharge and thermal regime of the Severnaya Dvina River in the INM RAS-MSU land surface model (Stepanenko et al., 2019). The numerical scheme used in river network model should be conservative, monotonous and positive definite; using the McCormack, Kurganov-Tadmor and Preissmann schemes, the preferred choice of the scheme is shown depending on whether the land surface model is used for short-term or climatic calculations.

Due to significant production of greenhouse gases in bottom sediments of rivers and, presumably, the high values of diffusion gas fluxes at the bottom, a computationally efficient turbulent closure to describe the vertical transport of dissolved CO₂ and CH₄ to the river flow surface is needed. Based on field measurements data collected on the Kitinen River (Finland), it was shown that the standard k-ε closure reproduces well the dissipation values of turbulent kinetic energy in the surface water layer (Guseva et al., submitted), however, this scheme requires small steps in time, which limits its potential use in weather and climate models. Simpler schemes using diagnostic formulas for the coefficient of turbulent diffusion are tested on the data of direct numerical simulation of the Couette-Poiseuille turbulent flow.

This work is partially supported by the RFBR grant 20-05-00773 and the grant of the President of Russia MK-1850.2020.5.

REFERENCES:

1. Gladskikh D.S., V.M.Stepanenko, E.V.Mortikov. On the Influence of Horizontal Lake Dimensions on the Depth of Upper Mixed Layer (in Russian). Water Resources, in press.
2. Stepanenko V.M., Medvedev A.I., Korpushenkov I.A., Frolova N.L., Lykosov V.N. A River Routing Scheme for an Earth System Model (in Russian) // Numerical Methods and Programming. 2019. 20. 396-410. doi:10.26089/NumMet.v20r435
3. Stepanenko V.M., M.G.Grechushnikova, I.A.Repina. Numerical Simulation of Methane Emission from an Artificial Reservoir (in Russian). Fundamental and Applied Climatology, in press.
4. Repina I.A., K.V. Barskov, A.Yu.Artamonov, V.M.Stepanenko, O.V. Dudarev, D.A. Kosmach, I.P. Semiletov, N.E. Shakhova. Greenhouse gases fluxes in a system “river-atmosphere” measured at Ob and Lena rivers (in Russian). Russian Meteorology and Hydrology, in press.
5. Bogomolov V., V. Stepanenko, and E. Volodin. Development of lake parametrization in the INMCM climate model. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 48(1):12005, 2016. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/48/1/012005>
6. Guseva S., M. Aurela, D. Bastviken, A. Cortés, E. Lotsari, S. MacIntyre, I. Mammarella, J.M. Melack, A. Ojala, R. Kivi, V. Stepanenko, P. Uotila, A.J.A. Vähä, T. Vesala, M. Wallin and A. Lorke. Physical drivers of near-surface turbulence in a regulated river. Submitted to Water Resource Research.
7. Stepanenko V. M., G. Valerio, and M. Pilotti. Horizontal pressure gradient parameterization for one-dimensional lake models. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 12(2):e2019MS001906, 2020. <http://dx.doi.org/10.1029/2019ms001906>
8. Stepanenko V., I. Mammarella, A. Ojala, H. Miettinen, V. Lykosov, and V. Timo and. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes. Geoscientific Model Development, 9(5):1977–2006, 2016. <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-9-1977-2016>

Исследование степенных зависимостей затухания кинетической энергии турбулентности в моделях атмосферного пограничного слоя

¹Ткаченко Е.В., ^{1,2}Дебольский А.В., ^{1,3}Мортиков Е.В.

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

E-mail: evtkachenko@hotmail.com

Вечерний переход, имеющий место в атмосферном пограничном слое между дневным конвективным и ночным устойчивым пограничными слоями, характеризуется затуханием кинетической энергии турбулентности (КЭТ), которое следует степенному закону $E(t) \sim t^{-\alpha}$, где $E(t)$ – нормированная на масштаб скорости $w_{*0} = (F_b h_{CBL})^{1/3}$ КЭТ (h_{CBL} – высота конвективного пограничного слоя), t – нормированное на $t_* = h_{CBL}/w_{*0}$ время ($F_b = g\theta_0^{-1} F_s$ – поток плавучести на поверхности), и параметр α определяется теоретически или экспериментально. Разными исследователями были найдены различные значения параметра α , в частности Guernaoui et al. (2019), путём проведения экспериментов с достаточно высоким пространственным разрешением в расчётах, определили, что данный параметр принимает наибольшее значение $\alpha =$ от 1.6 до 1.7 в середине вечернего перехода, что близко к значениям α , полученным теоретически в предшествующих работах, а в начале и в конце перехода изменение КЭТ происходит медленнее. В данной работе исследуется воспроизведение вечернего переходного периода на разных стадиях в одномерных k - ϵ моделях атмосферного пограничного слоя в присутствии геострофического ветра. Рассматривается, как параметризация турбулентного масштаба длины влияет на динамику затухания КЭТ при различных потоках тепла на поверхности.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента России МК-1867.2020.5

The analysis of the turbulent kinetic energy decay power law in atmospheric boundary layer models

¹Tkachenko E.V., ^{1,2}Debol'skiy A.V., ^{1,3}Mortikov E.V.

¹Moscow State University, Moscow, Russia

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

³Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: evtkachenko@hotmail.com

INTRODUCTION

The atmospheric boundary layer (ABL) is the lowest part of the atmosphere, where most of the transport processes take place. The ABL is directly influenced by the contact with the earth's surface and responds to the surface forcing, such as frictional drag, heat transfer, pollutant emission, evaporation and transpiration, and terrain induced flow modifications. One of the key characteristics of the boundary layer is the diurnal variation taking place within it, for example temperature variations, which is insignificant in the free atmosphere. Another is turbulence - one of the most important transport processes, the dynamics of which are affected by the heat flux from the ground. These processes are interdependent and strongly influence one another (Stull, 1988).

The diurnal cycle consists of the boundary layer changing its state between stably stratified boundary layer (SBL) and convective boundary layer (CBL). Two transitional periods are distinguished: the morning (from SBL to CBL) and the evening (from CBL to SBL) transition. The morning transition is initiated when the surface heat flux becomes positive and a shallow entraining mixed layer grows into the surface inversion. The evening transition starts when the surface heat flux becomes negative, and it consists of the decay of the convective turbulence through dissipation. Therefore, when it comes to singling out transitional periods, one can use the following criteria, taken from the BLLAST study (Carreras, 2014): The morning transition starts when the heat flux starts to grow and ends when it changes its sign (from negative to positive). The evening transition starts when the heat flux changes its sign (from positive to negative) and ends when the SBL is well-established.

The evening transition is characterized by the decay of the convective turbulence. The turbulence decay rate obeys the power law $E(t) \propto t^{-\alpha}$, where $E(t)$ is the normalized TKE and t is the normalized time. The parameter α can be found theoretically or empirically.

The value of α is generally predicted to be $\alpha = 10/7$ for the decay of unbounded turbulence, which was obtained by using the hypothesis of the Loitsyansky invariant, supported by laboratory (Mohamed & Larue 1990) and numerical (Perot, 2011) experiments. The assumption of a constant integral turbulence length scale, which reflects the strong turbulent kinetic energy concentration on the largest scales, results in $\alpha = 2$ for the decay of boundary layer turbulence (George & Wang, 2009; Oberlack & Zieleniewicz, 2013), with the Reynolds number decreasing with time. Some of the latest studies, in particular the analysis of the LITFASS-2003 observational data (Nadeau et al., 2011) and simulations of CASES-99 data by Rizza et al. (2013) suggest much faster decay with $\alpha = 6$. Guernaoui et al. (2019) found through LES experiments that α is between 1.6 and 1.7 in the main stage of the evening transition, and the decay is slower in the beginning and the end of the transition period.

EXPERIMENT SETUP

Here, we use the single-column standard two-equation $k-\varepsilon$ model implementation (which contains prognostic equations for the TKE and its dissipation rate). The standard $k-\varepsilon$ model is widely used in weather forecast and climate large-scale models and, while imperfect, does a better job at modelling the ABL than first-order models, such as the one used in INM RAS climate model (INMCM, Volodin et al., 2017). Thus, the idea of adapting two-equation models to parameterize turbulence mixing in large scale models appears plausible and, as shown in recent studies (e.g. Burchard, 2002; Mortikov et al., 2019), to be worth looking into.

Wind velocity and potential temperature (in this particular study, hereafter “temperature” means potential temperature) equations are averaged by horizontal coordinates:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} K_m \frac{\partial U}{\partial z} &= f(V - V_{geo}) - w_{sub} \frac{\partial U}{\partial z} \\ \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} K_m \frac{\partial V}{\partial z} &= -f(U - U_{geo}) - w_{sub} \frac{\partial V}{\partial z} \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} K_m \frac{\partial \theta}{\partial z} &= -w_{sub} \frac{\partial \theta}{\partial z}, \end{aligned}$$

where K_m, K_h are turbulent coefficients.

TKE and dissipation rate equations are:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_k}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} K_m \frac{\partial E_k}{\partial z} &= P + B - \varepsilon \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} K_m \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} &= \frac{\varepsilon}{E_k} (C_{1\varepsilon} P - C_{2\varepsilon} \varepsilon + C_{3\varepsilon} B), \end{aligned}$$

where P is the production of TKE by shear, B is the buoyancy term, $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ are model constants (Burchard, 2002).

All experiments were conducted with the aid of the CBL experiment setup (Debolskiy et al, 2019) on a one-dimensional uniform grid of 256 cells, with the vertical domain of 2314 m, which equals to the resolution utilized in Guernaoui et al. (2019) experiments.

The scenario of the experiment follows that of Guernaoui's et al. (2019). During the 12-hour run, for the first 6 hours the surface kinematic heat flux is set to be $F_s = 0.15 \text{ K m s}^{-1}$, then it changes abruptly to $F_s = 0$ (the neutral boundary layer), $F_s = -0.01 \text{ K m s}^{-1}$ (the SBL) and $F_s = -0.02 \text{ K m s}^{-1}$ (the strong SBL) in runs 1, 2 and 3, respectively. The free atmosphere temperature gradient was set at $\partial\theta / \partial z = 0.0156 \text{ K m}^{-1}$ (simulation of the

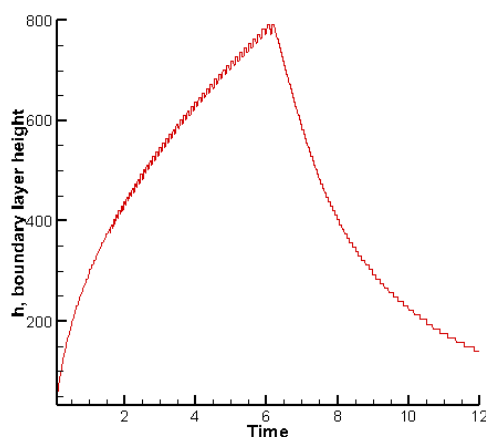


Figure 1. Change of the ABL height with time for Run 1 with $U_{geo} = 0.01$.

development of the shear-free CBL). To analyze the influence of the geostrophic wind, all 3 runs were simulated with and without it. The geostrophic wind was weakened with setting parameters at $U_{geo} = 0.01 \text{ m s}^{-1}$ and $V_{geo} = 0 \text{ m s}^{-1}$, and then introduced with parameters $U_{geo} = 7.5 \text{ m s}^{-1}$ and $V_{geo} = 0 \text{ m s}^{-1}$. The aerodynamic roughness was set at $z_0 = 0.1 \text{ m}$.

At the end of the 6th hour of the run, the thickness of the CBL reaches its maximum height of $h_{CBL} = 790.9 \text{ m}$ (Figure 1). Deardorff velocity scale (Deardorff, 1970) is $w_{*0} = (F_b h_{CBL})^{1/3} = 1.517 \text{ m s}^{-1}$. The surface buoyancy flux $F_b = g\theta_0^{-1} F_s = 490.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$, where $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$ is the gravitational acceleration and $\theta_0^{-1} = 0.003 \text{ K}^{-1}$ is the air temperature expansion coefficient. The turbulence turnover time scale is $t_* = h_{CBL} / w_{*0} = 521.3 \text{ s}$. Thus, the normalized quantities for the decay power law are $E_n = E / w_{*0}^2$, $t_n = t / t_*$ (Guernaoui's et al., 2019).

RESULTS

It can be seen that the pattern, proposed by Guernaoui et al. (2019), does not hold as precisely as suggested in his study for either experiment. With no geostrophic wind, the TKE evolves in a way that the value of the parameter α gets established shortly after the surface temperature flux is changed, and then remains relatively consistent during all 3 hours (Fig. 2a). When the geostrophic wind is introduced, the decay pattern becomes more intricate (Fig. 2b). Single-column model results follow LES experiments data by from Guernaoui et al. (2019), the parameter α approaches 0 at the later stage of the evening transition. Moreover, in Run 1, in the presence of the geostrophic wind, the value of the parameter α reaches 0 at the main stage of the transition, and at the later stage, the TKE starts to grow.

When it comes to the sensitivity to parametrization constants of single-column model results in absence of the geostrophic wind, the turbulent Schmidt number σ_ϵ poses a particular interest due to its influence on how fast the length scale reaches the state of equilibrium (Mortikov et al, 2019). We can see that it is possible to force the decay to slow down in the late stage by changing the value of σ_ϵ (Fig. 4a). Upon the introduction of geostrophic wind (Fig. 4b), the speed of decay inevitably reaches the state of equilibrium, and the bigger the value of σ_ϵ is, the sooner it happens.

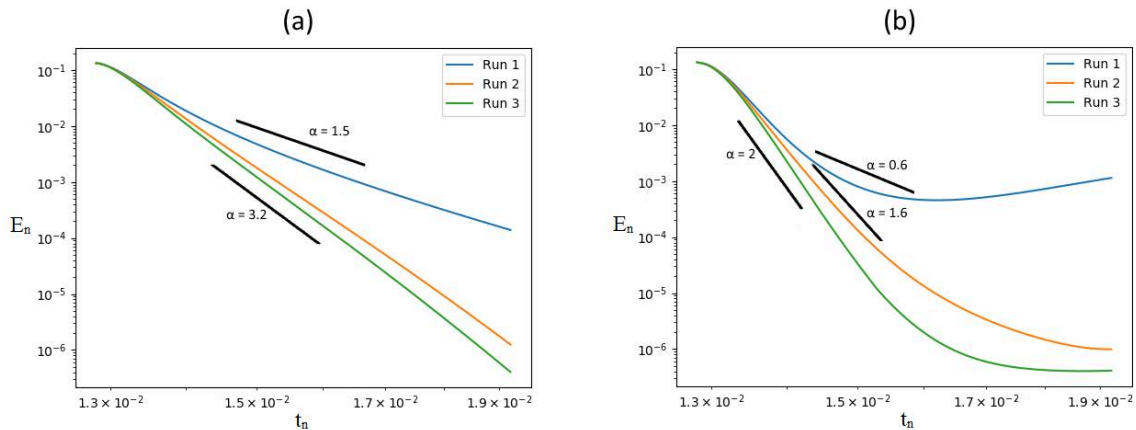


Figure 2. The TKE decay without (a) and with (b) geostrophic wind.

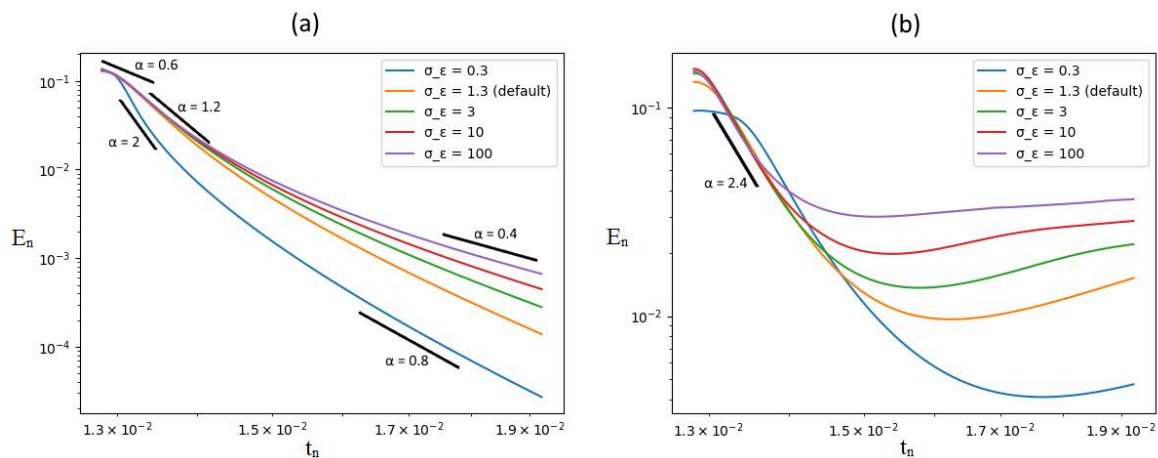


Figure 4. The difference in TKE decay with different values of σ_ϵ for Run 1 without (a) and with (b) geostrophic wind

This study was funded by the grant of the RF President within the MK-1867.2020.5 project.

REFERENCES:

1. Burchard, H., 2002: *Applied Turbulence Modelling in Marine Waters*. Berlin, Germany: Springer.
2. Carreras, E.B., 2014: *Transitional periods of the atmospheric boundary layer*. Catalonia, Spain :Universitat Politècnica de Catalunya
3. Deardorff, J.W., 1970. *Convective velocity and temperature scales for the unstable planetary boundary layer and for Rayleigh convection*. *Journal of the atmospheric sciences*, 27(8), pp.1211-1213.
4. Debolskiy, A., V. Stepanenko, A. Glazunov, S. Zilitinkevich, 2019: *Bulk models of sheared boundary layer convection*, *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 55(2), 139-151, DOI: 10.1134/S000143381902004X
5. Guernaoui, O. El, B. Maronga, J. Reuder, I. Esau, T. Wolf, 2019: *Scaling the Decay of Turbulence Kinetic Energy in the Free-Convective Boundary Layer*. *Boundary-Layer Meteorology*, DOI: 10.1007/s10546-019-00458-z
6. George, W.K. and H. Wang, 2009: *The exponential decay of homogeneous turbulence*, *Physics of Fluids*, 21, 025108, DOI: 10.1063/1.3081557
7. Mohamed, M.S., and J.C. Larue, 1990: *The decay power law in grid-generated turbulence*, *J. Fluid Mech.* 219, 195-214.
8. Mortikov E. V., A. V. Glazunov, A. V. Debolskiy, V. N. Lykosov, S. S. Zilitinkevich, 2019: *Modeling of the Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy*. *Doklady Earth Sciences*, 489(2): 1440-1443, DOI: 10.1134/S1028334X19120067
9. Nadeau, D.F., E.R. Pardyjak, C.W. Higgins, H.J.S. Fernando, and M.B. Parlange, 2011: *A simple model for the afternoon and early evening decay of the convective turbulence over different land surfaces*, *Boundary-Layer Meteorology*, 141, 301–324.
10. Oberlack, M. and A. Zieleniewicz, 2013: *Statistical symmetries and its impact on new decay modes and integral invariants of decaying turbulence*, *J. Turbulence*, 14:2, 4-22, DOI: 10.1080/14685248.2012.75922
11. Perot, J.B., 2011: *Determination of the decay exponent in mechanically stirred isotropic turbulence*, *AIP Advances*, 1, 022104; DOI: 10.1063/1.3582815
12. Rizza, U., M.M. Miglietta, G.A. Degrazia, O.C. Acevedo and E.P. Marques Filho, 2013: *Sunset decay of the convective turbulence with Large-Eddy Simulation under realistic conditions*, *Physica A*, 392, 4481-4490.
13. Stull, R.B., 1988: *An Introduction To Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
14. Volodin E. M., E. V. Mortikov, S. V. Kostykin, V. Ya. Galin, V. N. Lykosov, A. S. Gritsun, N. A. Dianzky, A. V. Gusev, N. G. Iakovlev, 2017: *Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5*, *Climate Dynamics*, February 2017, DOI: 10.1007/s00382-017-3539-7

Parameterization of wetlands water level in land surface model

^{1,2}Bogomolov V., ^{1,3}Dyukarev E., ^{2,4}Stepanenko V.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

²Research Computing Center, Moscow State University, Moscow, Russia

³Yugra State University, Khanty-Mansiisk, Russia

⁴Faculty of Geography, Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: verminrus@mail.ru

The lack of knowledge about the state of the ground surface is a problem in forecasting climate change. Problems are mainly related to the determination of fluxes of energy, moisture and greenhouse gases from surface, temperature and humidity of surface layer, state of vegetation. In addition, accurate maps of the distribution of various types ecosystems are often lacking. The currents on the underlying surface are characterized by complex feedbacks between the atmosphere and terrestrial ecosystems. These connections have a pronounced regional specificity and a special character in the wetlands of Western Siberia. Wetlands ecosystems are included in some modern climate models as a special type of underlying surface. However, all the variety of wetlands is reduced to one type - the waterlogged type of soil. In fact, a combination of the prevailing vegetation cover (moss, grass, shrubs, trees), the level regime of wetland waters, and various thicknesses of peat deposits form specific types of wetland ecosystems. Different types of wetland ecosystems make significantly different contributions to the formation of heat and moisture fluxes at the surface-atmosphere interface.

Thermal diffusivity of peat deposits in bogs, especially during the period of freezing and thawing, depends on the processes of heat release or absorption associated with phase transformations of water. Therefore, the rate of heat propagation in the deposit is determined by the value of the effective thermal diffusivity coefficient, which directly depends on the correctness of reproduction.

Параметризация уровня болотных вод в рамках модели деятельного слоя суши

¹Богомолов В.Ю., ^{1,3}Дюкарев Е., ^{2,4}Степаненко В.М.

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

³Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

⁴Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: verminrus@mail.ru

Важной проблемой в прогнозировании изменений климата является недостаточность знаний о состоянии наземной подстилающей поверхности. Проблемы в основном связаны с определением потоков энергии, влаги и парниковых газов с поверхности, температуры и влажности поверхностного слоя, состояния растительности. Кроме того, часто отсутствуют точные карты распределения экосистем различного типа. Потоки на подстилающей поверхности характеризуются сложными обратными связями между атмосферой и наземными экосистемами. Эти связи имеют выраженную региональную специфику и особый характер на заболоченных территориях Западной Сибири. Болотные экосистемы включены в некоторые современные климатические модели в виде особого вида подстилающей поверхности. Однако все разнообразие болот сводится к одному типу – переувлажненному типу почв. В действительности сочетание преобладающего растительного покрова (мох, трава, кустарнички, деревья), уровня режима болотных вод, различной толщины торфяной залежи формируют специфические типы болотных экосистем. Различные типы болотных экосистем вносят существенно разный вклад в формирование потоков тепла и влаги на границе поверхность-атмосфера

Тепловые режимы торфяных и минеральных почв существенно различаются. Торфяная залежь представляет собой сложную органоминеральную систему, обладающую специфическими свойствами: высокой обводненностью и пористостью, содержанием большого количества малоразложившегося органического вещества [1]. На низких влажных местах с большим количеством органики слабая теплопроводность часто провоцирует заморозки на поверхности почвы весной и осенью, а сильно заторфованные почвы северных широт способствуют подъему уровня многолетней мерзлоты и продвижению ее в более южные районы [2]. Температуропроводность торфяной залежи болот особенно в период ее промерзания и оттаивания зависит от процессов выделения или поглощения тепла, связанных с фазовыми превращениями воды. Поэтому скорость распространения тепла в залежи определяется величиной эффективного коэффициента температуропроводности, который устанавливается экспериментально [3]. Модельным оценкам теплофизических характеристик почвы в тундровой зоне по результатам измерений профиля температуры посвящен ряд работ [4]. Изучение температурного режима торфяных почв является актуальной задачей, поскольку наибольшие скорости современного потепления приходятся на северные широты [5], где и расположены основные запасы торфа (и углерода). В России запасы углерода в виде торфа оцениваются в 215 млрд. т. [6].

Болотные экосистемы играют значительную роль в глобальном круговороте углерода, являясь источниками и стоками парниковых газов. На территории Западной Сибири болота занимают свыше 36 % площади. Согласно оценкам МГЭИК, эмиссия метана из естественных болот составляет 61-82% от всех природных источников метана. Интенсивность потоков парниковых газов управляется гидрологическим и термическим режимом торфяной залежи. Повышение приземной температуры воздуха и снижение уровня вод вызывает иссушение торфа, повышение температуры и аэрируемости, что способствует росту эмиссии парниковых газов. Температурный режим почв является важнейшим фактором управляющим биохимическими процессами в торфяной залежи. Тепловые режимы торфяных и минеральных почв существенно различаются. Торфяная залежь представляет собой сложную органоминеральную систему, обладающую специфическими свойствами: высокой обводненностью и пористостью, содержанием большого количества малоразложившегося органического вещества. На низких влажных местах с большим количеством органики слабая теплопроводность часто провоцирует заморозки на поверхности почвы весной и осенью, а сильно заторфованные почвы северных широт способствуют подъему уровня многолетней мерзлоты и продвижению ее в более южные районы. Температуропроводность торфяной залежи болот особенно в период ее промерзания и оттаивания зависит от процессов выделения или поглощения тепла, связанных с фазовыми превращениями воды. Поэтому скорость распространения тепла в залежи определяется величиной эффективного коэффициента температуропроводности.

Например мониторинг температуры олиготрофных болотных почв, в период с августа 2014 года по сентябрь 2018 г. позволил исследовать воздействие снижения уровня болотных вод вследствие осушения на температурный режим шести олиготрофных облесенных болот. При сравнительном анализе

площадок наблюдения, выявлено, что торфяные почвы осушенного рослого рьяма холоднее почв низкого рьяма на 2-3 °С в среднем по всему почвенному профилю. Рослый рям незначительно холоднее низкого рьяма. В летний период на глубинах от 60 до 120 см разница температур составляет 0-1 °С, в слое 120-240 см 0 +2 °С. В зимний период на глубинах 60-240 °С разница температур 0-1 °С, за исключением зимы 2016/2017 гг., когда разница составляла около -2 °С по всей глубине. В целом, площадки с пониженным уровнем болотных вод (УБВ) холоднее ненарушенного рьяма на 1-3 °С. Разность температур тем выше, чем ниже УБВ.

Падение УБВ на 12 см или уменьшение высоты снега на 10 см оказывает охлаждающее воздействие на торфяную толщу аналогичное уменьшению средней температуры зимних месяцев на 1 °С и вызывающее увеличение глубины промерзания на 2 см. Было установлено, что в теплый период болота с низким уровнем болотных вод холоднее болот с высоким УБВ. В холодный период – наоборот: обводненные топи холоднее рьямов. Температуропроводность торфяной залежи болот особенно в период ее промерзания и оттаивания зависит от процессов выделения или поглощения тепла, связанных с фазовыми превращениями воды. Поэтому скорость распространения тепла в залежи определяется величиной эффективного коэффициента температуропроводности который напрямую зависит от правильности воспроизведения (УБВ).

Положение уровня вод относительно поверхности болота является не только основным показателем степени обводненности болот, но и важной характеристикой водного режима болот: стока, испарения, влагосодержания, и т. д. Как известно, изменения уровня воды на болотах определяются целым рядом факторов: осадками, испарением, стоком и водно-физическими свойствами деятельного слоя болот. Поскольку структура и водно-физические свойства деятельного слоя различных болотных микроландшафтов отличаются друг от друга, то даже при одних и тех же погодных условиях колебания уровня воды будут различаться если не характером хода уровня, то его амплитудой [1].

При выпадении осадков уровень воды в большинстве случаев повышается. Существуют также случаи, когда выпадение относительно большого количества осадков не сопровождается значительным повышением уровня вод. Такая закономерность может являться следствием того, что до этого продолжительное время не было дождей, и уровень болотных вод был достаточно низок какой-то промежуток времени.

Воспроизведение уровня (УБВ) в рамках модели деятельного слоя суши будет определяться правильным описанием механических свойств торфа грунтов, теплового баланса и водного баланса на поверхности. Так же добавлением слагаемого в уравнение влагопереноса отвечающего за горизонтальное просачивание влаги в верхнем слое описывающее естественный сток осадков с центра болота к периферии характерного для олиготрофных болот. Фактически все будет определяться высотой возвышения центра болотной шапки и скоростью просачивания влаги, что в свою очередь зависит от гидрологической проводимости и механических свойств почвы. Сами же процессы тепло влага обмена будут описываться уравнениями в рамках модели деятельного слоя ИВМ-НИВЦ МГУ. Данный подход позволяет достаточно правильно воспроизводить колебание уровня грунтовых вод для олиготрофных болот где УВД зависит в большей степени от осадков выпадающих непосредственно на болотную экосистему, а не от стока с соседних участков как в случае с эвтрофных болот.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Романов В.В. *Гидрофизика болот*. Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 365 с.
2. Марчик Т.П., Ефремов А.Л. *Почвоведение с основами растениеводства; Учреждение образования “Гродненский гос. Ун-т. Им. Я.Купалы”*. – Гродно: ГрГУ, 2006. 249 с
3. Иванов К.Е., Новиков С.М. *Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим*. Л.: Гидрометеиздат, 1976, 447с.
4. Parazoo, N. C., Koven, C. D., Lawrence, D. M., Romanovsky, V., and Miller, C. E. *Detecting the permafrost carbon feedback: Talik formation and increased cold-season respiration as precursors to sink-to-source transitions // The Cryosphere Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/tc-2017-189>, in review, 2017.
5. IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
6. Botch M.S., Kobak K.I., Vinson T.S., Kolchugina T.P. *Carbon pools and accumulation in peatlands of the former Soviet Union // Global Biogeochemical Cycles*. – 1995. – V.9. – N.1. – P.37-46. CLM4 in CESM1.0.4 User's Guide

Assessment of the influence of various tree species and their parameters on the behavior of wind flows in urban environments (on the example of the RUDN University campus, Moscow)

¹Bukin S.S., ^{1,2}Konstantinov P.I., ¹Riccardo Valentini, ¹Vasenev V.I.

¹RUDN University, Laboratory of smart technologies for sustainable development of urban environment under global changes, Moscow, Russia

²Moscow State University, Russia

E-mail: book_inc@mail.ru, kostadini@mail.ru, rik@unitus.it, vasenyov@mail.ru

The urban environment is constantly growing, as a result of which the natural surface cover (green areas) is replaced by artificial materials. This significantly changed the surface roughness of the earth. These changes have a strong impact on wind fields in the urban environment, changing the speed and direction of wind flows. Said changes in the behavior of wind flows can lead to the formation of gusts several times higher than the input wind speed.

It is necessary to create a favorable environment for people in the conditions of residential development of the city, especially in difficult climatic conditions. Wind conditions at the pedestrian level are one of the first microclimatic problems that should be taken into account in modern urban planning and building design.

The aim of this study was to establish the effect of various tree species on the behavior of wind flows in an urban environment. The study was conducted in the Moscow city on the campus of RUDN University. Ten different proportions of trees were identified with characteristics such as tree height, crown width, trunk height and LAD index. In addition, 6 species of trees present on the site were identified. For these species, a similar analysis was carried out to assess their impact on the wind field.

The study was conducted using meteorological data for May 29, 2017, when high wind speeds were observed in Moscow. The EnviMet software package was used to model wind fields. Field measurements were used to determine the position and types of trees, and tree proportions as well. A map of the area was created using the QGIS system and field measurements.

A strong influence of tree parameters on the behavior of wind flows was revealed. The height of the trunk has a significant effect on the wind field at a pedestrian level; depending on the parameter, the wind speed and the area of wind gusts increase. Large crowns create a protective barrier, reducing wind activity. At the same time, a high LAD index creates low wind permeability, as a result of which wind flows are refracted, and dangerous zones arise. On the other hand, a high LAD index reduces the area of wind gusts. In addition, it was found that among the tree species present on the plot, *Populus Tremula* most favorably affects wind activity, while *Acer platanoides* has the most negative effect.

Оценка влияния различных пород деревьев и их параметров на поведение ветровых потоков в условиях городской среды (на примере кампуса РУДН, Москва)

¹Букин С.С., ^{1,2}Константинов П.И., ¹Рикардо Валентини, ¹Васенев В.И.

¹Научный центр «Смарт технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений» РУДН, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

E-mail: book_inc@mail.ru, kostadini@mail.ru, rik@unitus.it, vasenyov@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Исследование поведения ветровых течений в городской среде набирает популярность и является актуальной проблемой городской климатологии. Ветровые потоки оказывают разнообразное влияние на городской климат: распространение загрязнителей [1], уровень комфортности пешеходов [2], оценка рисков ветровальности [3]. В последнее время данная проблема является актуальной и множество ученых исследует поведение ветра в городе с использованием микромасштабных моделей [4-6].

Городская структура существенно влияет на поведение ветровых течений. Здания, деревья и другие препятствия меняют направление и скорость ветра, способствуя образованию зон с пониженной аэрацией [7], или напротив, приводя к ускорению скорости ветра, вплоть до опасных значений, способных привести к разрушениям [3, 8]. Однако, большинство ученых нацелены исключительно на исследование влияния городской застройки на ветровые потоки, при этом не уделяя должного внимания зеленой инфраструктуре, как естественному препятствию. В отличие от других препятствий, деревья имеют более сложную и разнообразную структуру. Ветровые потоки около деревьев и непосредственно внутри их растительного покрова характеризуются образованием вихрей, высоким сопротивлением и сложной турбулентностью [11, 12]. Для достоверного численного моделирования принято рассматривать растительность как пористую поверхность.

Область исследований влияния деревьев на ветровые течения на момент написания данной статьи остается малоизученной. При этом существует множество работ, описывающих влияние ветра на деревья [13, 14]. Кроме того, основная часть работ связанных с влиянием ветра на деревья сосредоточена на ветровальности в естественных лесах [9, 10].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на территории кампуса Российского Университета Дружбы Народов, расположенного на юго-западе г. Москвы. Для получения прозрачных результатов использовались метеоданные от 29 мая 2017 года, когда в Москве наблюдались экстремально высокие скорости ветра. Средняя скорость входящего потока в проведенных экспериментах составляет около 12 м/с, направление юго-западное. Были использованы данные TreeTalkers и полевые измерения для определения положения и видов деревьев. Карта местности была создана с использованием системы QGIS и полевых измерений.

Для моделирования ветровых течений в данной работе использовался пакет программного обеспечения EnviMet. Данный инструмент основывается на методе вычислительной гидродинамики с использованием уравнений Навье-Стокса, усредненных по Рейнольдсу [5, 15, 16]. Были использованы данные TreeTalkers и полевые измерения для определения положения и видов деревьев. Карта местности была создана с использованием системы QGIS и полевых измерений.

ВВОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для моделирования ветровых течений с использованием EnviMet требовались следующие вводные данные:

- шейп-файл зданий (полигон), с указанными в атрибутивной таблице значениями высоты для каждого здания;
- шейп-файл деревьев (точки), с указанными в атрибутивной таблице идентификационными номерами;
- метеоданные в формате csv.

Шейп-файлы были получены, путем проведенных полевых работ. Были проведены замеры высоты зданий, определены виды деревьев, присутствующие на участке, и их параметры (высота, ширина кроны, диаметр ствола). Метеоданные предоставлены обсерваторией Московского Государственного Университета. Анализировался участок размером 615м на 333м. На экспериментальном участке присутствует 815 деревьев и три здания.

СПЕЦИФИКАЦИЯ ВИДОВ

Для всесторонней оценки влияния деревьев на ветровое поле в условиях города были выделены основные параметры деревьев, которые в различной степени меняют дерево, как естественное препятствие для ветровых течений: высота дерева, ширина кроны, высота кроны над уровнем земли (высота ствола) и индекс плотности лиственного покрова (LAD). В таблице 1 приведены 10 гипотетических видов деревьев с разнообразными вариациями данных параметров.

Таблица 1. Параметры видов деревьев.

ID	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Высота дерева	5	5	10	10	10	10	15	15	10	10
Ширина кроны	3	3	7	7	3	3	11	11	7	7
Высота ствола	1	3	1	3	1	3	2	4	1	1
LAD	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.3	2

Также был проведен объективный анализ, основанный на использовании существующих видов деревьев, присутствующих на данном участке. В таблице 2 перечислены шесть видов, присутствующих на территории кампуса РУДН. Также в таблице отмечены все ранее выделенные параметры деревьев для каждого вида. Высота дерева была установлена 15 метров для всех видов, для объективности анализа.

Таблица 2. Виды деревьев на экспериментальном участке.

ID	Вид	Высота, m	Ширина, m	Высота ствола, m	Форма дерева	LAD
TS-10	Acer Platanoides	15	7	5	Oval	2
TS-11	Betula Pendula	15	7	3	Oval	0,9
TS-12	Tilia Cordata	15	13	4	Pyramidal	1
TS-14	Picea Abies	15	11	3	Pyramidal	0,5
TS-15	Pine	15	7	4	Conical	0,7
TS-17	Populus Tremula	15	5	5	Conic-pyramidal	0,4

Моделирование проводилось для каждого из выделенных видов деревьев, при этом в каждом эксперименте на участке были размещены деревья одного конкретного вида, на одинаковых позициях для всех экспериментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Было выявлено сильное влияние параметров дерева на поведение ветровых потоков. Высота ствола оказывает существенное влияние на ветровое поле на пешеходном уровне; в зависимости от параметра увеличивается скорость ветров и площадь ветровых порывов. Широкие кроны создают защитный барьер, снижая ветровую активность. В то же время высокий индекс LAD создает низкую ветровую проницаемость, вследствие чего ветровые течения преломляются, и возникают опасные зоны. С другой стороны, высокий индекс LAD уменьшает площадь ветровых порывов.

Кроме того, было установлено, что среди присутствующих на участке видов деревьев, *Populus Tremula* наиболее благоприятным образом влияет на ветровую активность, а *Acer platanoides* оказывает наиболее негативное влияние. Оценка проводилась на основе сравнительного анализа площадей на экспериментальных участках с плохой аэрацией, с повышенной ветровой активностью, максимальной и минимальной скоростями ветра, наблюдаемых на участках. В таблице 3 приведены процентные соотношения указанных зон для экспериментальных участков, и максимальные и минимальные скорости ветра.

Таблица 3. Данные для участков TS-10 – TS-17.

ID	Вид	Низкая аэрация, %	Идеальные условия, %	Повышенные значения, %	Макс скорость, м/с	Средняя скорость, м/с
TS-10	Acer platanoides	23,35	52,49	5,18	16,43	8,50
TS-11	Betula Pendula	14,22	62,06	3,77	15,46	9,09
TS-12	Tilia Cordata	24,22	52,56	4,81	15,06	8,43
TS-14	Picea Abies	18,66	58,44	3,76	14,96	8,76
TS-15	Pine	16,72	60,05	4,20	15,20	8,90
TS-17	Populus Tremula	8,95	68,03	2,88	15,31	9,63

Исследование было выполнено при поддержке проекта РНФ № 19-77-30012

ЛИТЕРАТУРА:

1. Нутерман Роман Борисович. Моделирование турбулентных течений и переноса примеси в элементах городской застройки
2. Blocken, B., Janssen, W. D., & van Hooff, T. (2012). CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus. *Environmental Modelling and Software*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.11.009>
3. Gross, G. (2018). A windthrow model for urban trees with application to storm "Xavier." *Meteorologische Zeitschrift*. <https://doi.org/10.1127/metz/2018/0905>

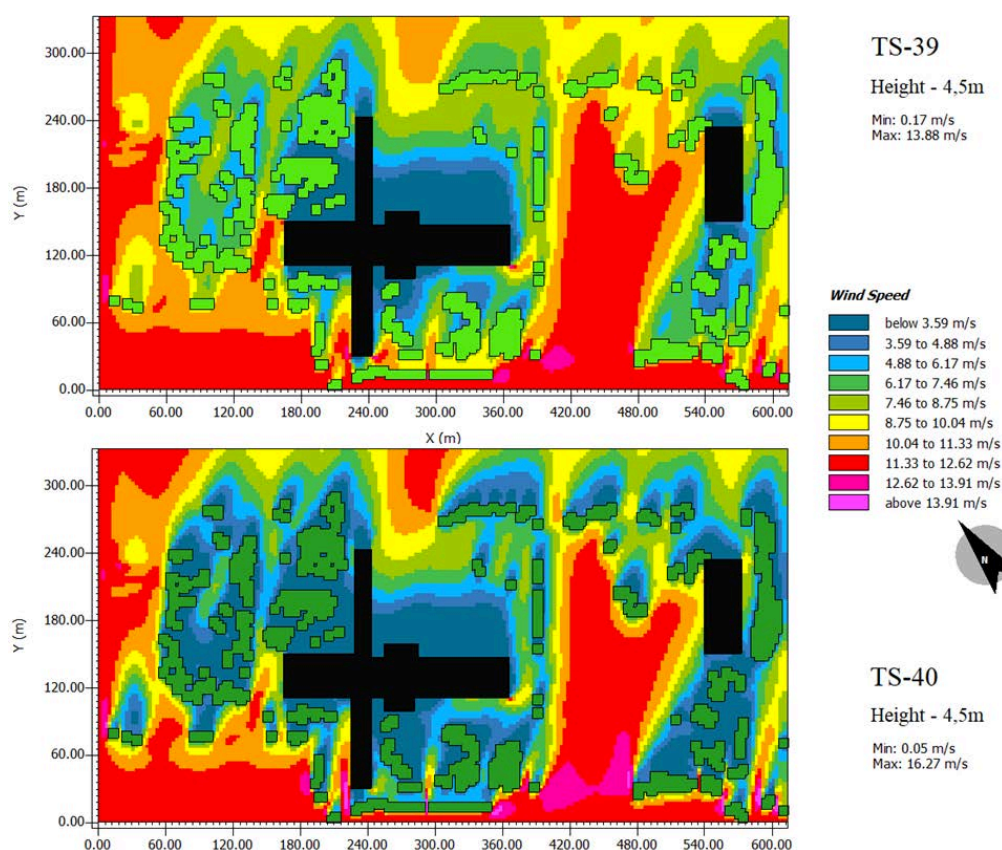


Рисунок 1 Карты поля ветра для участков TS-39 и TS-40. Влияние индекса LAD

4. Liu, S., Pan, W., Zhang, H., Cheng, X., Long, Z., & Chen, Q. (2017). CFD simulations of wind distribution in an urban community with a full-scale geometrical model. *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.021>
5. Huttner, S. (2012). Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met. Mainz: Johannes Gutenberg-Universität in Mainz.
6. Blocken, B., Stathopoulos, T., & van Beeck, J. P. A. J. (2016). Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment. In *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.004>
7. Ramponi, R., Blocken, B., de Co, L. B., & Janssen, W. D. (2015). CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths. *Building and Environment*, 92, 152–166. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.018>
8. Fukui, Y., Miyamoto, T., Tamai, Y., Koizumi, A., & Yajima, T. (2018). Use of DNA sequence data to identify wood-decay fungi likely associated with stem failure caused by windthrow in urban trees during a typhoon. *Trees - Structure and Function*. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1679-y>
9. Viro, E., Ponomarenko, A., Dehandschoewerker, Quéré, D., & Clanet, C. (2016). Critical wind speed at which trees break. *Physical Review E*. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.93.023001>
10. Schelhaas, M. J., Kramer, K., Peltola, H., van der Werf, D. C., & Wijdeven, S. M. J. (2007). Introducing tree interactions in wind damage simulation. *Ecological Modelling*, 207(2–4), 197–209. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.04.025>
11. Дубов А.С., Быкова Л.П., Марунин С.В. Турбулентность в растительном покрове. – Л.: Гидрометеиздат, 1978.
12. Ishikawa, H., Amano, S., & Yakushiji, K. (2007). Flow around a living tree. *JSME International Journal, Series B: Fluids and Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1299/jsmeb.49.1064>
13. Thevs, Niels, Gombert, Alina & Streng, Eva & Lleshi, Roland & Aliev, Kumar & Emileva, Begaiym. (2019). Tree Wind Breaks in Central Asia and Their Effects on Agricultural Water Consumption. *Land*. 8. 167. [10.3390/land8110167](https://doi.org/10.3390/land8110167).
14. Filenkova, N & Soukhovolsky, V. & Zakharov, Yuri & Ovchinnikova, N. (2020). MODEL OF TREES WIND STABILITY WITH EFFECT OF INTERACTIONS BETWEEN NEIGHBOURS.
15. Quarteroni, A. (2017). Navier-Stokes equations. In *Modeling, Simulation and Applications*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49316-9_17
16. Doering, C. R. (2009). The 3D Navier-Stokes Problem. *Annual Review of Fluid Mechanics*. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.010908.165218>

Numerical simulation of particle transport in urban boundary layer

^{1,2}Varentsov A.I., ^{3,1,2}Stepanenko V.M., ^{3,2}Mortikov E.V., ¹Konstantinov P.I.

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

²Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia

E-mail: jdeadfox17@gmail.com

It is difficult to imagine the functioning of modern cities, especially the most populated, without vehicles, industry, energy – sources of particulate pollutants in the atmosphere. Large concentrations of anthropogenic aerosols can lead to consequences from mild haze to smog, from allergies to cancer. Nowadays there is a predominance of growing urban population over rural. This necessitates the improvement of air quality forecasting for healthcare and the economy, as well as the development of research tools, among which physical and mathematical modeling plays a key role. This work is devoted to the study and implementation of methods for modeling the processes of propagation of suspended particles in the air with high spatial and temporal resolution in the context of complex urban geometry.

In meteorology, atmospheric aerosol is suspended in the air solid and liquid particles, which size varies from 10^{-4} to 10^2 microns [2]. Small particles cause various forms of respiratory diseases and increase the chance of developing lung cancer. Traditionally, atmospheric pollution has been considered on a scale from region to city district, but under the current requirements for air quality, the problem of aerosol pollution on a micro scale becomes acute. Due to the high cost of instruments, networks of measuring complexes are developed in few cities and have low density [1]. Remote methods cover the atmosphere only over rooftops. In this regard, one of the modeling tasks is to restore the field of concentration of high-resolution particles from a small number of measurements.

The problems of measuring aerosol characteristics and its monitoring in urban conditions pose the problem of finding a new method of study, which is modeling. There are two main modern approaches: Lagrangian and Eulerian. In this work, the Lagrangian method was chosen, since it allows one to calculate the characteristics of motion and interaction with surfaces for each particle separately, which is extremely important in conditions of complex urban geometry.

In the developed Lagrangian model, the equation of motion based on Newton's second law is used to calculate the trajectory of a particle suspended in air. Particle collisions are not taken into account here, since they are very rare when concentrations are not very high.

Three different turbulent parameterizations are implemented in order to take into account influence of stochastic vortices on the particle motion. In two of them wind speed fluctuation component is generated at each time step along a particle trajectory. In the last method the time of interaction of a particle with a turbulent eddy is introduced, during which the fluctuation component acting on the particle is considered constant [4].

The model computes the motion of arbitrary number of particles, tracking trajectory of each particle, diagnosing particles concentrations and surface deposition rate in a limited three-dimensional area with given boundary geometry and continuous medium characteristics. The code is implemented in C++. The domain boundary conditions for particles in the model are realized as follows. When there is no solid surface at the boundary, the periodic conditions or transparent boundary conditions are applied. Particles interactions with solid surfaces are divided into two types: deposition and elastic rebound.

The developed model was successfully verified during experiments with precise analytical solutions. Concentrations calculated in the Lagrangian model were compared to Eulerian solutions [3] with a high compliance as a result.

The next step was the reproduction of particle transport in a typical building geometry - a series of urban canyons. Six square-section canyons are located perpendicular to the direction of the wind in the region. Input data were calculated using the ENVI-met model [5]. Particle transfer with a finite half-life simulating SARS-CoV-2 virions was also calculated. Based on the calculation results, the influence of stratification, particle size, and particle lifetime on aerosol transport under typical urban conditions was estimated. As a result, this work presents the development and application of a numerical physico-mathematical model of particle transport in the atmospheric boundary layer over urbanized territories. The model verification procedure was performed on two exact analytical solutions, the possibility of studying bioaerosols was realized, and the transport of suspended particles in a series of urban canyons was investigated.

The work is partially supported by RFBR grant 18-05-60126.

REFERENCES:

1. Ed. A.O. Kulbachevsky. Report «O sostoyanii okruzhayushchej sredy v gorode Moskve v 2017 godu». 2018. Pub. M.: DNMEPM. 358 p.
2. Timofeev Y.M., Vasil'ev A.V. *Teoreticheskie osnovy atmosfernoj optiki.*: S-P.: Nauka, 2003. 474 p.
3. Durbin P.A. *Stochastic differential equations and turbulent dispersion.* NASA, USA, 1983.
4. Gosman A.D., Loannides E. *Aspects of Computer Simulation of Liquid-Fueled Combustors* // *Journal of Energy.* 1983. Vol. 7. No. 6. pp. 482–490.
5. ENVI_MET - Decoding urban nature [Электронный ресурс]. URL: <https://www.envi-met.com/> (дата обращения: 20.03.2019).

Численное моделирование переноса взвешенных частиц в пограничном слое атмосферы над урбанизированной территорией

^{1,2}Варенцов А.И., ^{3,1,2}Степаненко В.М., ^{3,2}Мортиков Е.В., ¹Константинов П.И.

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, Москва, Россия

²Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

E-mail: jdeadfox17@gmail.com

Функционирование современных городов, особенно самых населённых, сложно представить без автотранспорта, промышленности, энергетики – источников загрязняющих веществ в атмосфере. К таким веществам относятся и различные аэрозоли – взвешенные в воздухе частицы. Большие концентрации антропогенных аэрозолей могут приводить к последствиям от слабой дымки до смога, от аллергии до онкологических заболеваний. В мире наблюдаются превалирование городского населения над сельским и бурный рост городов в развивающихся странах. Это обуславливает необходимость совершенствования прогноза качества воздуха для здравоохранения и экономики, а также разработки исследовательских инструментов, среди которых ключевую роль играет физико-математическое моделирование. Данная работа посвящена изучению и реализации методов моделирования процессов распространения взвешенных в воздухе частиц с высоким пространственным и временным разрешением в условиях сложной геометрии городской застройки.

В метеорологии атмосферный аэрозоль – это взвешенные в воздухе твёрдые и жидкие частицы [2]. Размер частиц аэрозоля варьируется в пределах от 10–4 до 102 мкм. Их опасность заключается в проникающей способности. Чем меньше размер и растворимость аэрозоля, тем глубже внутрь дыхательной системы он может проникнуть. Частицы, не поглощённые организмом и оставшиеся в лёгких, вызывают различные формы респираторных заболеваний и увеличивают шанс развития рака лёгких, к таким относится, в частности, чёрный углерод, один из самых распространённых видов городского аэрозоля. Будучи центрами концентрации транспорта и промышленности, города ответственны за наибольшую часть выбросов в атмосферу антропогенного аэрозоля. Традиционно рассматривалось загрязнение атмосферы на масштабах от региона до района города, но в условиях современных требований к качеству воздуха острой становится проблема аэрозольного загрязнения на микромасштабе.

Сети измерительных комплексов из-за дороговизны приборов развиты в немногих городах и имеют низкую плотность: на 2017 год в Москве работало 53 автоматических станции, что обеспечило покрытие лишь трети районов города [1]. Метод контактных наблюдений обеспечивает контроль аэрозольного загрязнения в реальном времени, но не имеет необходимого пространственного разрешения, а дистанционные методы покрывают атмосферу только над городской застройкой. В связи с этим, одной из задач моделирования становится восстановление поля концентрации частиц высокого разрешения по данным малого числа измерений.

Проблемы измерений характеристик аэрозоля и его мониторинга в городских условиях ставят задачу поиска нового способа изучения, которым является моделирование. Первой в истории моделью распространения аэрозоля стало описание диффузионных свойств шлейфов, выпускаемых промышленными дымовыми трубами. Простая эмпирическая модель, сформулированная по экспериментальным данным, позволяла вручную рассчитать зону максимального воздействия шлейфа. В эпоху развития компьютеров и численного моделирования были реализованы два основных современных подхода: лагранжевы и эйлеровы.

При эйлеровом подходе к моделированию рассчитываются перенос и диффузия концентрации частиц, и при дискретной реализации исследуемая область делится на ячейки расчётной сетки. Благодаря такому ограничению становится возможным одновременное отслеживание неограниченного числа частиц в заданной области с учётом их эмиссии и выведения. Перенос частиц описывается уравнением адвекции и диффузии.

При моделировании лагранжевым методом каждая исследуемая частица отслеживается вдоль своей траектории, для неё рассчитываются скорость и ускорение в каждый момент времени. Лагранжев подход часто используется для отслеживания пути конкретной частицы и удобен для моделирования переноса небольшого количества частиц на большие расстояния или в течение длительных периодов времени, так как для него не требуется решения трёхмерного уравнения на подробной сетке. Отметим, что при известных траекториях частиц несложно рассчитать концентрацию, в то время как при известной концентрации невозможно рассчитать траектории; поэтому лагранжев подход является более информативным и перспективным для ряда задач, хотя и, как правило, требующим большего количества вычислений, поскольку для получения статистически значимых оценок концентрации необходимо вычислять движение достаточно большого количества частиц.

В данной работе выбран лагранжев метод, так как он позволяет рассчитывать характеристики движения и взаимодействия с поверхностями для каждой частицы отдельно, что крайне важно в условиях сложной геометрии городской застройки.

В разработанной лагранжевой модели для расчёта траектории взвешенной в воздухе частицы используется уравнение движения. Оно основывается на втором законе Ньютона, который в модели имеет следующий вид:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_D(u - u_p), \quad (1)$$

$$\frac{dx_p}{dt} = u_p, \quad (2)$$

где u_p – скорость частицы, x_p – её координата, t – время, g – ускорение силы тяжести, ρ_p – плотность частицы, ρ – плотность окружающего воздуха, u – его скорость, F_D – коэффициент силы сопротивления среды.

Здесь не учитываются столкновения частиц, т.к. они при не очень больших концентрациях редки. Также в правой части уравнения (1) могут быть учтены дополнительные силы (термодиффузионная, броуновская и др.), но в данной модели предполагается, что плотность частиц много больше плотности воздуха, так что указанные в уравнении внешние силы становятся преобладающими. При необходимости расширения области применения модели отдельные силы могут быть добавлены в виде новых слагаемых.

Влияние стохастических турбулентных вихрей на движение частицы учтено в модели путём использования турбулентных параметризаций – описания подсеточных вихрей, не разрешённых явно в поле скорости потока. Учёт влияния турбулентности важен при описании движения частиц в данной модели, так как аэрозоли имеют размер значительно меньше шага сетки входных данных и могут продолжительное время находиться внутри одной ячейки, попадая под влияние подсеточных вихрей. В данной модели реализовано три параметризации: простая гауссова, модель случайных смещений и модель случайных блужданий. Во всех трёх пульсационная компонента скорости – нормально распределённая случайная величина, но в первых двух параметризациях она генерируется на каждом шаге по времени лагранжевой модели, а в последнем – вводится время взаимодействия частицы с турбулентным вихрем, на протяжении которого пульсационная компонента скорости, воздействующая на частицу, остаётся постоянной, характеризуя влияние конкретного вихря [4].

Граничные условия для частиц в модели при отсутствии твёрдой поверхности на краю расчётной области могут иметь вид прозрачной границы, когда частицы считаются улетевшими, или периодический, когда вылетевшая наружу частица переносится и влетает в область с противоположной стороны. При контакте частицы с твёрдой поверхностью происходит или её прилипание, или упругий отскок.

В модель включена возможность расчётов переноса биоаэрозолей, которые, в отличие от большинства неорганических частиц, имеют время жизни, причём различное для разных типов биологически активных частиц. Для этого была реализована возможность отмирания каждой частицы на каждой итерации на основе закона полураспада.

Для получения траектории каждой частицы необходимо решить уравнения (1) и (2) – для этого используется конечно-разностные методы: явный Эйлера 1-го порядка и Кранка-Николсон. В итоге в разработанной модели внутри ограниченной трёхмерной области с заданными геометрией границ и характеристиками среды воспроизводится взаимодействие сферических аэрозолей с воздушным потоком и твёрдыми поверхностями с возможностью отслеживания их траекторий, концентраций, скорости осаждения и накопления на поверхностях.

Разработанная модель была успешно протестирована на случаях идеализированных вихревых и однородных по горизонтали течений над плоской подстилающей поверхностью. Однако её использова-

ние для решения прикладных задач невозможно без понимания точности модели в задачах с известным решением. Такие аналитические решения в терминах концентраций могут быть получены только при использовании эйлерова подхода. При этом доказано: точные решения уравнений лагранжевого и эйлерового методов эквивалентны в терминах поля концентраций при использовании метода случайных смещений [3]. В качестве точных решений были рассмотрены два случая: пограничный слой и течение Куэтта над плоской поверхностью. В обоих случаях на нижней границе области задавался поток частиц. При расчёте переноса частиц в модели случайных смещений задавался соответствующий вертикальный профиль коэффициента турбулентной диффузии; сравнение концентрации из лагранжевой модели производилось с аналитическим решением для этой концентрации из эйлерового уравнения стационарной вертикальной диффузии.

Результаты показали очень высокие коэффициенты корреляции точного и численного решений и их соответствие. В целом можно говорить об успешной верификации модели на данных аналитических решениях, что позволяет перейти к её уверенному использованию и тестированию в условиях более сложных исследовательских и прикладных задач.

Следующим этапом стало воспроизведение переноса частиц в условиях типичной геометрии застройки – серии городских каньонов. Перпендикулярно направлению ветра в области размещены семь зданий, а между ними – шесть одинаковых каньонов с квадратным сечением. Входные данные были рассчитаны при помощи модели ENVI-met [5]. Область является трёхмерной, но вдоль каньонов среда считалась однородной. Площадной источник частиц размещён на нижней поверхности второго справа каньона. Расчёты проведены для конфигураций неустойчивой (рис. 1) и устойчивой стратификаций и для частиц трёх разных размеров: 1, 10 и 25 мкм. Также рассчитан перенос частиц с конечным периодом полураспада, имитирующих вирионы SARS-CoV-2.

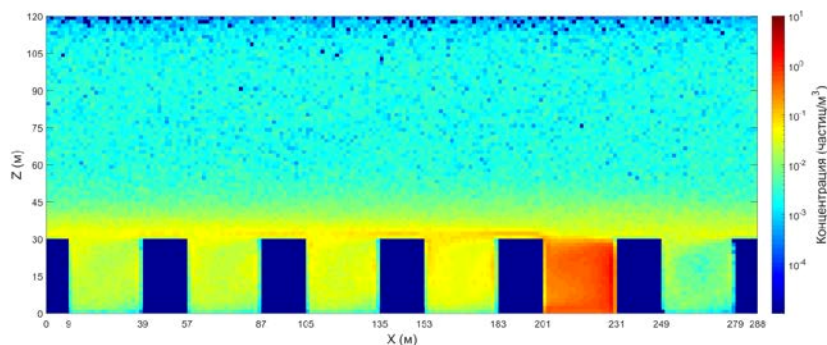


Рис. 1. Пространственное распределение осреднённой вдоль каньонов концентрации частиц размером 1 мкм для случая неустойчивой стратификации и умеренного ветра.

По результатам расчётов оценено влияние стратификации, размера и времени жизни частиц на перенос аэрозолей в условиях типичной городской застройки. В итоге в данной работе представлены развитие и применение численной физико-математической модели переноса частиц в пограничном слое атмосферы над урбанизированными территориями. Выполнена процедура верификации модели на двух точных аналитических решениях, реализована возможность исследования биоаэрозолей и исследован перенос взвешенных частиц в условиях серии городских каньонов.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 18-05-60126.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Под ред. А.О. Кульбачевского. Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2017 году». 2018. Вып. М.: ДПиООС. 358 с.
2. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики.: СПб.: Наука, 2003. 474 с.
3. Durbin P.A. Stochastic differential equations and turbulent dispersion. NASA, USA, 1983.
4. Gosman A.D., Loannides E. Aspects of Computer Simulation of Liquid-Fueled Combustors // Journal of Energy. 1983. Vol. 7. No. 6. pp. 482–490.
5. ENVI-MET - Decoding urban nature [Электронный ресурс]. URL: <https://www.envi-met.com/> (дата обращения: 20.03.2019).

Research of surface-based temperature inversions in Nadym according direct measurement and simulation

¹Vorotilova P., ^{1,2}Konstantinov P.

¹RUDN University, Laboratory of smart technologies for sustainable development of urban environment under global changes, Moscow, Russia

²Moscow State University, Russia

E-mail: vorotilova99@mail.ru, kostadini@mail.ru

Frequent surface-based inversions are a persistent feature of the Arctic climate, in particular, its Russian part. Exactly in this region, during the winter period, the most favorable conditions for temperature inversion's formation are observed. An example of such conditions can be: surface radiation cooling for a long time and domination of the winter anticyclone. Surface-based inversions formed in cities are the most interesting for research because of their impact on the people's health. Besides it, "urban" surface-based inversions are different from "rural" ones, because of presence of urban heat island (UHI).

Inversions can be detected by using reanalysis, soundings, satellite and contact measurement data. However, satellite data doesn't allow to get vertical profile of air temperature, reanalysis data has too low resolution to give information about "urban" inversions. The radiosonde stations usually are located in the background area, so their data doesn't allow to study "rural" inversions, finally, there are not so many meteorological stations in the Russian Arctic. Thus, the surface-based inversions of the Arctic cities are poorly understood.

The purpose of this work is the estimation of surface-based inversions' frequency and spatial distribution in Nadym (Yamalo-Nenetsky Avtonomny Okrug) according direct measurement and simulation.

As object of this study, Nadym was chosen because of location in subarctic climate and flat relief, so orographic inversions can be excluded.

For achievement of the goal, gradient observation complexes, based on the automatic temperature recorder HOBO MX2303 Two External Temperature Sensors Data Logger with sensors at altitudes of 1.5 and 3 meters, respectively, were installed in the Nadym. Within city there is a pair of the above-mentioned complexes was installed - directly in the city center and in rural area. Measurement were conducted during period 18.12.2018r. - 15.10.2019. Data, obtained from these complexes, were analyzed.

Also the vertical structure of the atmospheric boundary layer in Nadym was simulated with the mesoscale model Weather Research and Forecasting (WRF), version 4.0. Numerical experiment was realized for 22.12.2018 and 23.12.2018. Calculations were made in three nested domains with the shared center at 65.5°N, 72.3°E. As an initial data, ERA5 data was used. The obtained data was visualized on NCL and data for background zone was compared with measurement of microwave temperature profiler MTP-5.

The obtained data allow us to estimate the spatial heterogeneity and frequency of the surface-based inversions depending on the level of anthropogenic transformation of the landscape and also make a conclusion about quality of simulation of the vertical structure of the atmospheric boundary layer in Nadym.

Исследование пространственно-временных характеристик приземных инверсий г. Надым (ЯНАО) по данным прямых измерений и данным моделирования

¹Воротилова П.Г., ^{1,2}Константинов П.И.

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

²Научный центр «Смарт технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений» РУДН, Москва, Россия

E-mail: vorotilova99@mail.ru, kostadini@mail.ru

Одной из наиболее характерных черт климата Арктики являются приземные инверсии температуры. Именно в этом регионе наблюдаются наиболее благоприятные условия для их формирования (длительное радиационное выхолаживание, а в восточной его части – сильное влияние Сибирского антициклона [1]. Приземные инверсии температуры, развивающиеся в городах, являются наиболее интересными для изучения, так как скопление примесей под инверсионным слоем может представлять серьезную опасность для здоровья населения [4]. Кроме того, на городские приземные инверсии и на инверсии, формирующиеся вне города (в фоновой зоне), влияет разный набор факторов. Так, например, важной

характеристикой антропогенно-преобразованной территории является наличие острова тепла – области с температурой, более высокой, чем у окружающей территории (фоновой зоны) [7].

В высоких широтах городской остров тепла (особенно в зимнее время), в основном, формируется за счет антропогенной деятельности, однако его интенсивность значительно превышает интенсивность городского острова тепла в более низких широтах [2].

В настоящее время приземные инверсии в большинстве арктических городов остаются слабоизученными ввиду труднодоступного географического положения и экстремально низких температур в зимнее время.

Целью данной работы является исследование приземных инверсий температуры в г. Надым (Ямало-Ненецкий автономный округ), оценка их повторяемости и пространственного распределения по результатам контактных измерений и моделирования.

Изучаемый город был выбран для исследования в силу положения в субарктическом климате и равнинного характера рельефа (что позволяет исключить орографический тип инверсий).

Исследование приземной структуры атмосферы в городе Надым проводилось в период с 18.12.2018г. по 15.10.2019. Для сбора данных контактных измерений в центре города (возле музея «Дом природы») и в фоновой зоне (аэропорт) были установлены комплексы градиентных наблюдений на основе автоматического температурного регистратора HOBO MX2303 Two External Temperature Sensors Data Logger с датчиками на высотах 1.5 и 3 метра соответственно. Измерения проводились раз в полчаса, с точностью 0,25°. Максимально возможный диапазон измерений при помощи таких датчиков составляет от -40°C до 70°C [8].

В процессе обработки полученные данные были очищены от заведомо неверных результатов, вызванных переохлаждением или перегревом датчиков и проанализированы при помощи различных методов статистического анализа. Полученные для дневных и ночных часов функции распределения градиентов температуры представлены на рис.1.

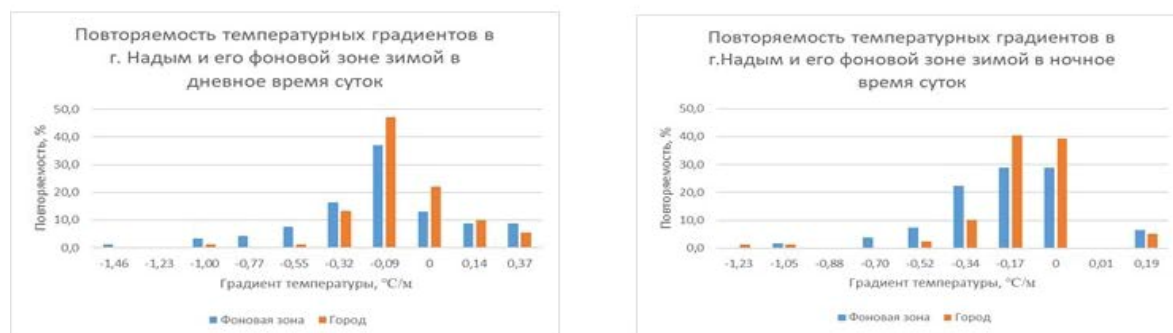


Рис. 1. Функции распределения градиентов температуры для г.Надым и его фоновой зоны в дневное и ночное время суток (случаи инверсии соответствуют отрицательным градиентам температуры).

Видно, что в Надыме и его фоновой зоне зимой доминирует устойчивая стратификация, что объясняется мощнейшим радиационным выхолаживанием, характерным для этого времени года. Распределение температурных градиентов для фоновой зоны в обоих случаях сдвинуто в сторону более интенсивных инверсий, что, по-видимому, является следствием влияния городского острова тепла [6].

Для исследования приземных инверсий при помощи данных моделирования использовалась региональная мезомасштабная модель WRF (Weather Research&Forecasting) версии 4.0. В качестве начальных данных использовались данные реанализа ERA5.

Для расчетов были использованы четыре вложенных области с общим центром в точке с координатами: 65,5° с.ш., 72,3° в.д. (г. Надым). Для моделирования был выбран один из двух наиболее холодных случаев за период наблюдений: 22.12.2018 – 24.12.2018. Он характеризовался влиянием отрога Сибирского антициклона и чрезвычайно низкими температурами.

При проведении численного эксперимента в модели блок микрофизики облачности описывался с помощью WSM 5-class scheme, блок конвективной облачности через Kain-Fritsch scheme, длинноволновая радиация - RRTMG scheme, коротковолновая - Goddard short wave scheme. Планетарно-пограничный слой описывался параметризацией Mellor-Yamada, приземный – через параметризацию Монина-Обухова.

В результате численного эксперимента было установлено, что инверсии температуры в фоновой зоне модель воспроизводит лучше, чем инверсии, сформировавшиеся в городе, в связи с чем в дальнейшем данные моделирования сравнивались с измерениями температурного профилера МТР-5, расположенного в аэропорту. Пример результатов сравнения приведен на рис.2.

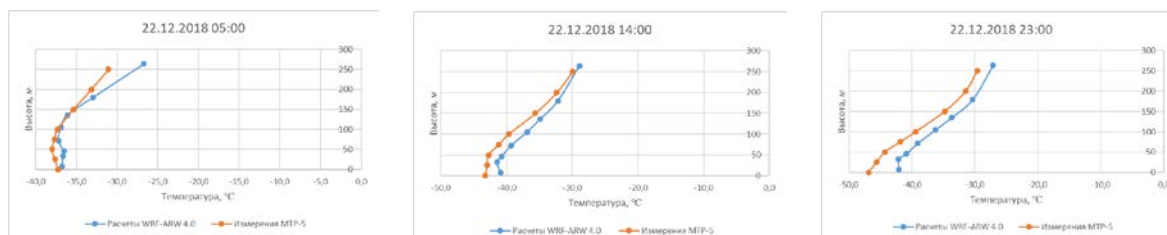


Рис. 2. Пример сравнения результатов расчетов модели WRF-ARW 4.0 и измерений при помощи МТР-5 для фоновой зоны г.Надым 22.12.2018 г.

Видно, что модель достаточно хорошо отображает форму профиля температуры, однако завышает сами значения. Можно заметить, что по мере выхолаживания поверхности разница между измеренной температурой и вычисленной становится больше. Скорее всего, это объясняется техническим несовершенством модели в воспроизводстве SBL – устойчиво стратифицированного пограничного слоя [3]: подобные проблемы при расчетах в условиях высокого давления, слабого ветра и мощной температурной инверсии наблюдались и в более старых версиях [5].

Полученные данные позволяют оценить пространственно-временную неоднородность приземных инверсий в зависимости от степени антропогенной преобразованности ландшафта, а также сделать вывод о качестве воспроизведения моделью реальной структуры приземного слоя атмосферы в г. Надым и его фоновой зоне.

Авторы выражают особую благодарность Михаилу Варенцову, научному сотруднику лаборатории суперкомпьютерного моделирования природно-климатических процессов НИВЦ, за предоставленные результаты измерений профилемера МТР-5 и Александру Тимажеву, инженеру лаборатории теории климата ИФА РАН, за неоценимые советы и помощь в работе с WRF ARW 4.0.

Исследование было выполнено при поддержке проекта РФФИ 18-05-60126

ЛИТЕРАТУРА:

1. Безуглая Э.Ю, Берлянд М.Е //Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере– Ленинград, Гидрометеиздат, 1983 - 328с.
2. Константинов П.И, Грищенко М.Ю., Варенцов М.И. 2015. Картографирование островов тепла городов Заполярья по совмещенным данным полевых измерений и космических снимков на примере г. Анапиты (Мурманская область). – Исследование Земли из космоса, № 3, с. 27 – 33с
3. Atlaskin E. Evaluation of NWP results for wintertime nocturnal boundary-layer temperatures over Europe and Finland./ Atlaskin E, Vihma T// Q. J. R. Meteorol. Soc., 2012 - vol.138, pp.1440–1451
4. Han L. Meteorological and urban landscape factors on severe air pollution in Beijing/ Han L., Zhou W., Li W. et al.// J Air Waste Manag Assoc, 2015, vol.65, pp.782-787.
5. Kilpeläinen T. Modelling the vertical structure of the atmospheric boundary layer over Arctic fjords in Svalbard/ Kilpeläinen T,Vihma T, Manninen M et al.// Q. J. R. Meteorol. Soc., 2012, vol.138, pp.1867–1883.
6. Konstantinov P. A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic./ Konstantinov P., Varentsov M., and Esau I.// Environmental Research Letters, 13(7), 2018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacb84>.
7. Oke T.R. 1995. The heat island of the urban boundary layer: Characteristics, causes and effects. In Cermak, J. E. et al. (eds.), Wind Climate in Cities, Kluwer Academic Publishers, 81-107.
8. [Электронный ресурс] <https://www.hobodatologgers.com.au/mx2303>

Time series analysis and forecasting using SSA

Doktorov M.G., Botygin I.A.

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS
E-mail: mgd8@tpu.ru, bia@tpu.ru

Singular Spectrum Analysis (SSA) is a method of analysis and forecasting time series. SSA includes elements of classical time series analysis, dynamical systems, signal processing, multidimensional statistics and geometry. SSA is used to make a decomposition of the original time series in the sum of a small number of independent and interpretable components such as a slightly varying trend, oscillatory components.

The SSA method is similar to principal component analysis (PCA) of multidimensional data. But it differs in that PCA are presented in the form of an $n \times p$ matrix (where n is the number of samples, p is functions), and in SSA the source data are time series that are converted to a Hankel matrix. In PCA, n and p are fixed, while in SSA the number of rows and columns can be varied by changing the length. Also, these two methods use Singular value decomposition (SVD) in their algorithms.

The paper describes the use of SSA for forecasting time series. The algorithm is based on the selection from the studied time series of a certain set of its main components and the subsequent construction of the forecast for the selected period.

Анализ и прогнозирование временных рядов с использованием SSA

Докторов М.Г., Ботыгин И.А.

Томский политехнический университет, Томск, Россия
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
E-mail: mgd8@tpu.ru, bia@tpu.ru

За последние два десятилетия сингулярный спектральный анализ стал мощным средством для анализа различных временных рядов [1, 2]. Анализ сингулярного спектра (SSA) – это метод анализа и прогнозирования временных рядов, включающий элементы классического анализа временных рядов, динамических систем, обработку сигналов, многомерные статистику и геометрию [1]. В целом алгоритм SSA похож на анализ главных компонент (PCA). Но отличается тем, что данные в PCA представлены в форме матрицы $n \times p$ (где n – количество выборок, p – функции), а в SSA исходные данные представляют собой временные ряды, которые преобразуются в ганкелеву матрицу. В PCA n и p являются фиксированными, в то время как в SSA количество строк и столбцов можно варьировать, изменяя длину. Также эти два метода используют сингулярное разложение (SVD) в своих алгоритмах.

В работе описывается применение SSA для прогнозирования временных рядов. Алгоритм основан на выделении из изучаемого временного ряда некоторого набора его главных компонент и последующего построения прогноза по выбранному периоду.

Для проведения анализа сингулярного спектра было разработана программа, обрабатывающая данные, представленные Системой климатического мониторинга Института Мониторинга Климатических и Экологических Систем СО РАН в г. Томске [3]. Данные содержат в себе основные метеорологические величины (температура, скорость ветра, атм. давление, влажность воздуха и т.д.) в формате .txt со станции №80 (12430АМК-03) за период с 2019-04-10 по 2020-04-10 года. Данные были предварительно обработаны и добавлены заголовки в соответствии с метеопараметрами. Структура файла с метеорологическими с обработанными данными в формате .csv представлена на рис. 1.

В программных экспериментах по реализации SSA использовались среднесуточные данные за весь период наблюдения. Разработка программного кода выполнялась в интерактивной вычислительной среде Jupiter Notebook.

Ниже приведен фрагмент программного кода для получения среднесуточных данных.

```
means80 = data80.groupby(pd.Grouper(freq='D')).mean()
```

Результат выполнения кода представлен на рис. 2.

Для исследования была выбрана среднесуточная температура (Tmean) за год наблюдений.

```
DateTime,AffinityIndex,SerialNumber,H,Tmean,WindSpeed,WindDirection(°),Wmin,Wmax,Wmean,AtmosphericPressure,RelativeHumidity,
2019-04-10 00:05:00,10,12430AMK-03,10,-0.52,0.54,291.8,0.25,0.88,0.08,756.39,77.08,-4.03,5.91315,4.70657,0.000128501,331.63
2019-04-10 00:06:00,10,12430AMK-03,10,-0.65,0.39,320.0,0.3,0.5,0.07,756.39,76.83,-4.2,5.85743,4.66445,0.000128566,331.54
2019-04-10 00:07:00,10,12430AMK-03,10,-0.58,0.51,332.7,0.39,0.66,0.05,756.4,76.69,-4.16,5.88738,4.68709,0.000128533,331.59
2019-04-10 00:08:00,10,12430AMK-03,10,-0.65,0.71,330.3,0.65,0.82,0.1,756.41,76.64,-4.24,5.85743,4.66445,0.000128569,331.54
2019-04-10 00:09:00,10,12430AMK-03,10,-0.61,0.56,321.2,0.41,0.72,0.07,756.41,76.71,-4.18,5.87453,4.67738,0.000128549,331.57
2019-04-10 00:10:00,10,12430AMK-03,10,-0.48,0.41,304.8,0.32,0.53,0.07,756.41,76.78,-4.04,5.93039,4.7196,0.000128484,331.65
2019-04-10 00:11:00,10,12430AMK-03,10,-0.62,0.5,308.0,0.4,0.62,0.1,756.42,76.74,-4.19,5.87025,4.67414,0.000128556,331.56
2019-04-10 00:12:00,10,12430AMK-03,10,-0.63,0.42,315.1,0.35,0.45,0.06,756.43,76.85,-4.19,5.86598,4.67091,0.000128563,331.55
2019-04-10 00:13:00,10,12430AMK-03,10,-0.52,0.36,295.1,0.31,0.44,0.03,756.44,77.13,-4.02,5.91315,4.70658,0.000128509,331.63
2019-04-10 00:14:00,10,12430AMK-03,10,-0.4,0.4,276.1,0.32,0.49,0.03,756.44,77.56,-3.83,5.965,4.74575,0.00012845,331.7
2019-04-10 00:15:00,10,12430AMK-03,10,-0.35,0.58,285.2,0.45,0.78,0.04,756.46,78.03,-3.71,5.98672,4.76216,0.000128428,331.73
2019-04-10 00:16:00,10,12430AMK-03,10,-0.38,0.73,295.6,0.65,0.84,0.04,756.5,78.73,-3.62,5.97368,4.75231,0.00012845,331.71
2019-04-10 00:17:00,10,12430AMK-03,10,-0.37,0.78,294.2,0.63,0.92,0.03,756.55,79.91,-3.41,5.97803,4.7556,0.000128453,331.73
2019-04-10 00:18:00,10,12430AMK-03,10,-0.34,0.64,309.4,0.52,0.77,0.07,756.59,81.16,-3.17,5.99108,4.76546,0.000128445,331.75
2019-04-10 00:19:00,10,12430AMK-03,10,-0.35,0.52,332.2,0.4,0.65,0.05,756.62,82.2,-3.01,5.98673,4.76217,0.000128455,331.75
2019-04-10 00:20:00,10,12430AMK-03,10,-0.34,0.31,73.1,0.17,0.48,0.11,756.61,83.05,-2.86,5.99108,4.76546,0.000128449,331.76
2019-04-10 00:21:00,10,12430AMK-03,10,-0.31,0.48,51.7,0.43,0.55,0.09,756.58,83.66,-2.73,6.00415,4.77533,0.000128428,331.78
2019-04-10 00:22:00,10,12430AMK-03,10,-0.22,0.56,49.5,0.45,0.78,0.19,756.54,84.13,-2.57,6.04353,4.80506,0.000128377,331.84
2019-04-10 00:23:00,10,12430AMK-03,10,-0.18,0.29,104.0,0.07,0.67,0.06,756.51,84.44,-2.48,6.0611,4.81833,0.000128352,331.87
2019-04-10 00:24:00,10,12430AMK-03,10,-0.24,0.39,150.2,0.03,0.85,0.11,756.57,84.61,-2.51,6.03476,4.79844,0.000128392,331.83
2019-04-10 00:25:00,10,12430AMK-03,10,-0.35,0.44,329.2,0.22,0.65,0.08,756.64,84.67,-2.61,5.98673,4.76217,0.000128459,331.76
2019-04-10 00:26:00,10,12430AMK-03,10,-0.32,0.44,324.2,0.35,0.59,0.03,756.73,84.76,-2.57,5.99979,4.77204,0.00012845,331.78
2019-04-10 00:27:00,10,12430AMK-03,10,-0.25,0.39,320.7,0.31,0.54,0.04,756.75,84.89,-2.48,6.03038,4.79514,0.000128428,331.82
2019-04-10 00:28:00,10,12430AMK-03,10,-0.22,0.22,319.3,0.13,0.37,0.04,756.73,85.03,-2.43,6.04353,4.80507,0.000128409,331.84
2019-04-10 00:29:00,10,12430AMK-03,10,-0.12,0.27,108.7,0.1,0.41,0.03,756.7,85.09,-2.32,6.08755,4.83829,0.000128354,331.91
2019-04-10 00:30:00,10,12430AMK-03,10,-0.07,0.37,92.8,0.31,0.43,0.11,756.65,85.07,-2.27,6.10967,4.85498,0.000128321,331.94
```

Рис. 1. Структура файла с метеорологическими данными.

DateTime	AffinityIndex	H	Tmean	WmeanH	WindDirection(H(°))	WminH	WmaxH	WmeanV	AtmosphericPressure	RelativeHumidity	TdewPoint(°C)
2019-04-10	10	10	0.953653	1.273069	175.509743	0.800223	1.834210	0.189241	761.282958	52.009875	-8.441461
2019-04-11	10	10	3.040520	1.204289	205.786745	0.666100	1.844261	0.021256	761.203199	47.807849	-7.993289
2019-04-12	10	10	7.867897	1.760139	202.093963	0.888057	2.873858	-0.031353	755.839924	54.268931	-1.337113
2019-04-13	10	10	8.263294	1.897878	204.509015	1.106817	2.859390	0.117178	750.478225	64.842552	0.327060
2019-04-14	10	10	1.290799	2.152153	187.586875	1.302083	3.208243	0.305035	755.283903	53.964278	-7.727153

Рис. 2. Среднесуточные значения метеопараметров.

```
#pd.set_option('display.max_rows', 500)
per_temp80 = means80['Tmean']
per_temp80
```

На рис.3 приведен линейный график изменения температуры.

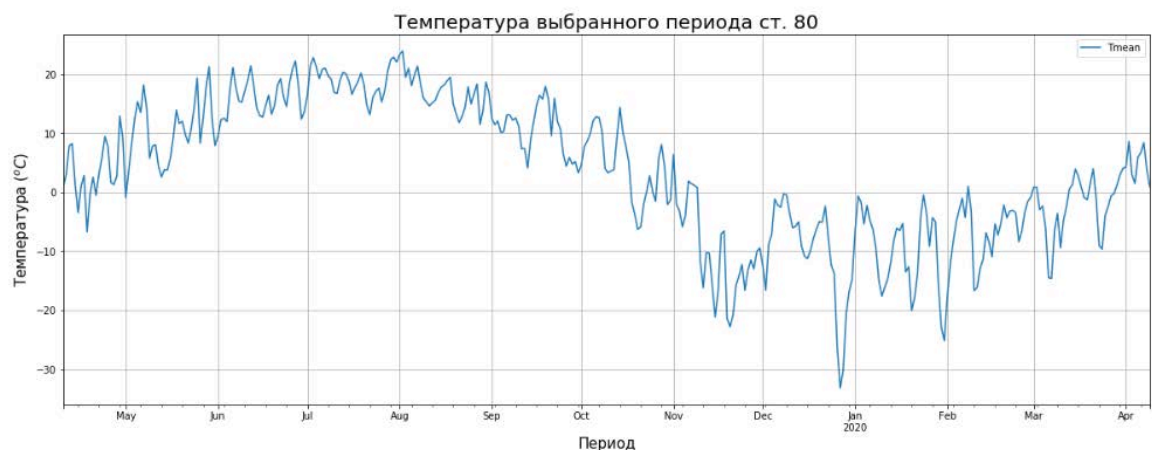


Рис. 3. Визуализация среднесуточной температуры.

Метод SSA включают два отдельных этапа: этап декомпозиции и этап реконструкции. На первом этапе временной ряд декомпозируется на компоненты, а на втором этапе – восстанавливается исходный ряд и используется для прогнозирования новых точек данных [1].

На рис. 4 иллюстрируется вклад каждого из компонентов. Видно, что большая часть переменных содержится в первом компоненте.

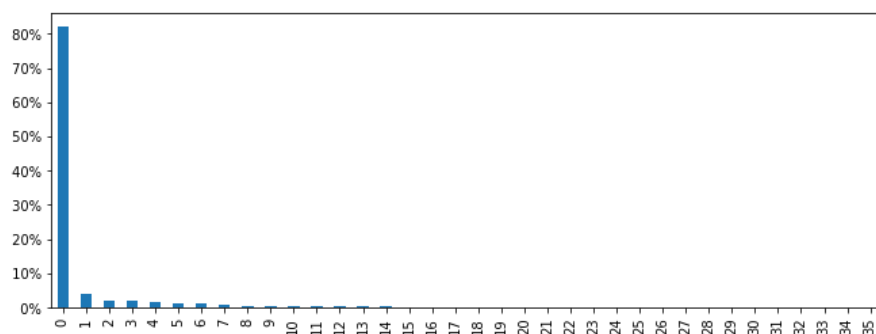


Рис. 4. Разложенный температурный ряд.

Используя разложенные компоненты ряда (рис. 5) восстанавливаем исходный временной ряд (рис.6).

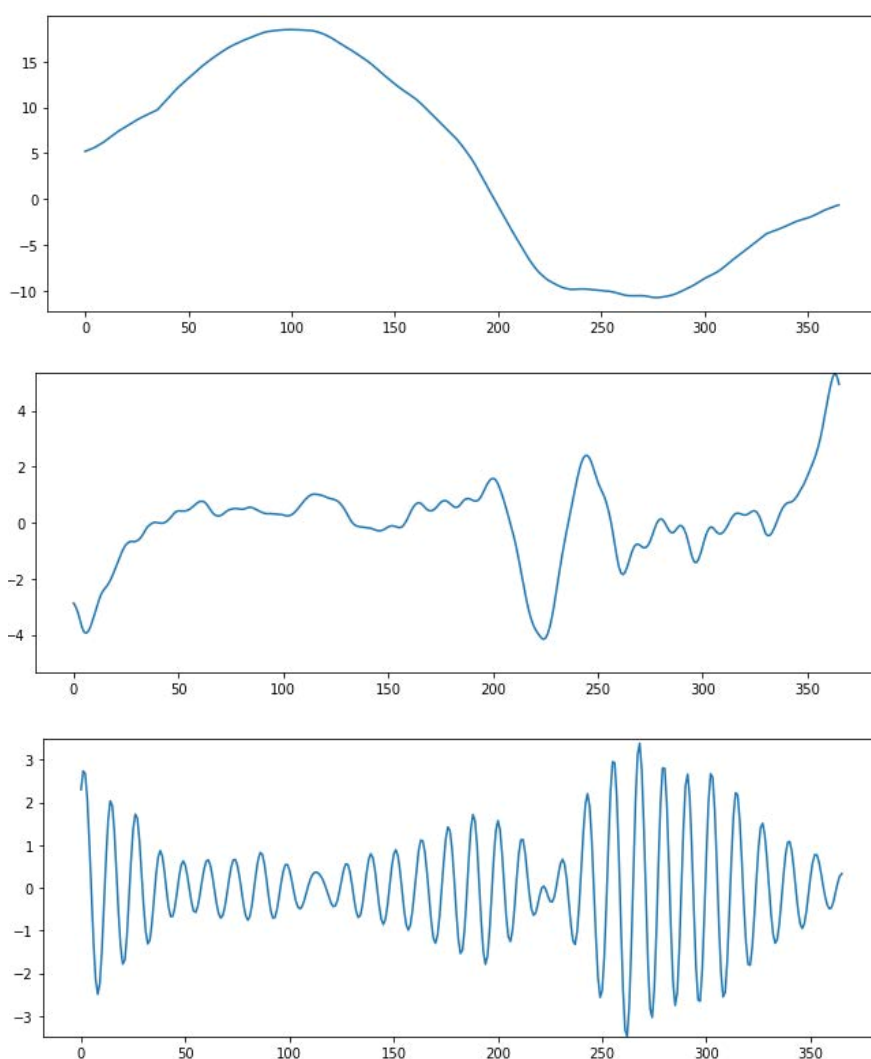


Рис. 5. Компоненты разложенного температурного ряда.

На рис. 6 приведен скриншот восстановленного температурного ряда.

На рис. 7 представлены совмещенные оригинальный и реконструированный временные ряды за весь период. Видно, что, в целом, модель реконструкции достаточно правдоподобно восстанавливает исходный температурный ряд.

Количество прогнозируемых значений можно увеличить или уменьшить, изменив значение переменной «steps» в программном коде. В данном примере прогнозируются следующие 60 дней. Ниже представлен фрагмент кода.


```
ssa.forecast(steps=60, singular_values=ts, plot=True)
```

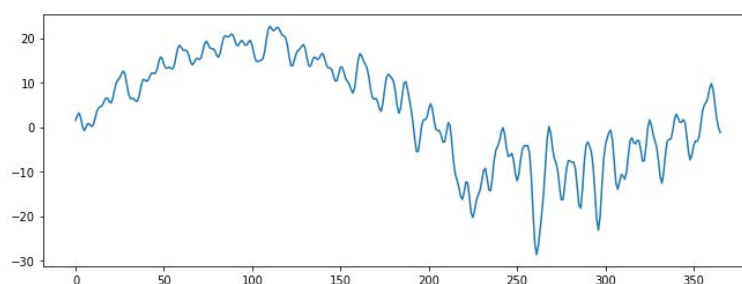


Рис. 6. Восстановленный ряд на основе разложенного.



Рис. 7. Совмещенные временные ряды.

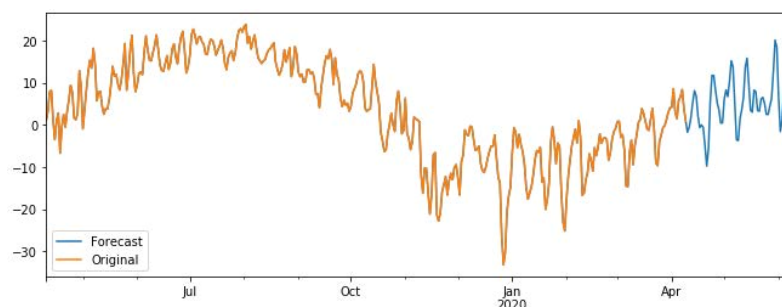


Рис. 8. Прогноз на следующие месяцы.

Конечно, данный способ не учитывает многие факторы, необходимые для проведения более точного прогнозирования. Но SSA, как метод прогнозирования в метеорологических временных рядах, дал очень многообещающие результаты. Раскрыть весь его потенциал можно построением точных интервалов прогнозирования, сравнением с другими методами прогнозирования и это будет предметом будущих исследований.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: учеб. пособие. – СПб., 2004. – 76 с.
2. Hassani, H., Xu, Z. and Zhigljavsky, A. A. 2011. Singular spectrum analysis based on the perturbation theory. *Nonlinear Analysis: Real World Applications* 12(5), pp. 2752-2766.
3. Система климатического мониторинга // URL: <http://mon.imces.ru/> (дата обращения: 22.03.2020).

Parameterization of the thermal conductivity of soil in the active land layer block of the INM RAS-MSU model

¹Drozdov E.D., ^{2,1}Stepanenko V.M., ^{3,4}Voropay N.N., ³Dyukarev E.A., ⁵Kokoreva A.A.,
⁴Cherkashina A.A.

¹Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

²Moscow State University, Scientific Research Computing Center, Moscow, Russia

³Institute of Monitoring of Climate and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

⁴Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

⁵Moscow State University, Faculty of Soil Science, Moscow, Russia

E-mail: drozdov.jeka@yandex.ru, vstepanenkomeister@gmail.com, voropay_nn@mail.ru, egor@imces.ru, kokoreva.a@gmail.com, anna_cher.87@mail.ru

The active land layer is a significant reservoir of heat accumulation in the Earth system [2]. Thermal inertia of soil at depths affect atmospheric circulation over land on time scales from weeks to several months [4]. Therefore, improving the parameterization of the thermal conductivity of soil is important in models of the Earth system. In the active land layer block of the earth system model of INM RAS-MSU [1] soil thermal conductivity is given by a simplified parametrization of R. Pielke [5], which doesn't account a number of significant factors of thermal conductivity of soil.

To improve the description of heat and moisture transfer in the INM RAS-MSU model were chosen more physically based parameterizations of Johansen [5] and Cote-Konrad [3] with a high degree of accuracy [8]. Also, in this study the fractal model of thermal conductivity [7] was firstly performed for the earth system models.

During the field studies in the Tunkinsky depression in Buryatia in August 2019, the values of density, porosity and initial moisture distribution were obtained at depths up to 50cm for 7 points with different soil types. The simulation results were compared with the data of unique measurements of soil temperature at depths up to 10 meters in increments of 1 hour, carried out in the study area by Tunkinsky depression station of IG SB RAS (Irkutsk).

In the study has been shown that the surface temperature values weakly depend on the parameterization of the thermal conductivity of soil. Using the Pielke model leads to an overestimation of the thermal conductivity and, thus, of the amplitude of temperature fluctuations in the daily course at depths. Maximum errors were observed near the surface due to inaccuracies in modeling of heat balance of the surface. At the levels of 30cm and below the value of modeling errors are near of the measurement error.

Also, has been shown that for all soil types the Pielke parameterization didn't produce the most accurate results. Choosing the Cote-Konrad parameterization allows to obtain the most approximate results in loam and sandy soils. Due to the calibration parameters, high accuracy of results was achieved by using the fractal model of thermal conductivity for moisture-saturated organic soil.

Thus, R. Pielke parameterization used in the basic version of the model is less accurate than more modern parameterizations of thermal conductivity. The fractal model of thermal conductivity has a greater potential for improving accuracy, but it's limited by the lack of global databases for a number of its parameters. For the global grid of the earth system model INM RAS-MSU, is proposed choosing the Cote-Konrad parameterization [3] of the soil thermal conductivity.

The work is partially supported by RFBR grants 20-05-00773, 18-05-00306, 20-04-00142.

Параметризация коэффициента теплопроводности почвы в блоке деятельного слоя суши модели ИВМ РАН-МГУ

¹Дроздов Е.Д., ^{2,1}Степаненко В.М., ^{3,4}Воропай Н.Н., ³Дюкарев Е.А., ⁵Кокорева А.А.,
⁴Черкашина А.А.

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

³Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

⁴Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

⁵Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Факультет почвоведения, Москва, Россия

E-mail: drozdov.jeka@yandex.ru, vstepanenkomeister@gmail.com, voropay_nn@mail.ru, egor@imces.ru, kokoreva.a@gmail.com, anna_cher.87@mail.ru

Деятельный слой суши является значимым резервуаром аккумуляции тепла в Земной системе [2]. Термическая инерция почвы на глубинах и ее влажность оказывают влияние на атмосферную циркуляцию над сушей на временных масштабах от недель до нескольких месяцев [4]. Одним из определяющих теплофизических параметров теплопереноса в почве является коэффициент теплопроводности. Поэтому в моделях Земной системы важно совершенствовать параметризацию коэффициента теплопроводности почвы.

В блоке деятельного слоя суши модели Земной системы ИВМ РАН-МГУ [1] коэффициент теплопроводности почвы задается упрощенной параметризацией, которая не учитывает вклада в теплопроводность почвы ряда существенных факторов. Однако в физике почв и физике пористых сред существует ряд других методов описания коэффициента теплопроводности. Выбор более физически обоснованной параметризации коэффициента теплопроводности почвы может существенно улучшить описание тепловлагопереноса в модели ИВМ РАН-МГУ.

МОДЕЛИ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОЧВЫ

В базовой версии модели ИВМ РАН-МГУ коэффициент теплопроводности почвы рассчитывается по формуле Р. Пильке [6]. Данный подход использует эмпирическую связь с влажностью почвы через величину потенциала почвенной влаги. При этом пористость, минералогический и гранулометрический состав в ней учитываются лишь косвенно.

Наиболее распространенный в современном почвоведении метод оценки коэффициента теплопроводности почв [5] основан на геометрическом осреднении значений соответствующих коэффициентов для воды и твердого вещества почвы. Для условий ненасыщенных почв была введена концепция нормированного коэффициента теплопроводности. Данная полуэмпирическая модель использует параметры, которые могут быть выражены через пористость и плотность почвы, но не учитывает в явном виде минералогический состав почв и их гранулометрическую типизацию.

Концепция нормированной теплопроводности была усовершенствована в параметризации Коте-Конрада [3] за счет более явного учета типа почвы и распределения почвенных частиц по размерам.

Показано [8], что модели Йохансена и Коте-Конрада с достаточно высокой степенью точности воспроизводят измеренные значения коэффициента теплопроводности почвы. Они имеют физически содержательную теоретическую основу и используют доступные для эмпирического определения свойства почвы. Поэтому эти параметризации были выбраны для внедрения в схему деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ.

Фрактальная модель коэффициента теплопроводности [7] построена на законе теплопроводности Фурье, примененного к отдельным частицам почвы. Основной концепцией метода является возможность описания распределения твердых частиц почвы по размерам в терминах фрактальной геометрии. Данная параметризация включает ряд калибровочных параметров, обеспечивающих потенциал повышения точности моделирования. В данной работе фрактальная модель была впервые реализована в блоке почвенного покрова модели Земной системы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Полевые работы и последующие численные эксперименты проводились для точек Тункинской котловины в Республике Бурятия с различными типами почв. При небольшом расчетном периоде для всех моделируемых типов почвы метеоусловия можно считать близкими, а различия термического режима обуславливаются только теплофизическими свойствами почв.

В ходе полевых исследований в августе 2019 года буровым методом были получены значения плотности, пористости и начальное распределение влажности на глубинах до 50 см для 7 точек с различными

ми типами почв. Таким образом, параметры почв и начальные условия в модели наиболее приближены к действительным. Моделирование производилось с 8 по 15 августа 2019 года с шагом по времени 1 ч. Сравнение результатов моделирования осуществлялось с данными уникальных измерений датчиками температуры почвы на глубинах до 10 м с шагом 1 час, проводимых на базе Тункинского котловинного стационара ИГ СО РАН (г. Иркутск).

ЭФФЕКТЫ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОЧВЫ

Представление результатов моделирования в виде временных рядов температуры на разных глубинах демонстрирует, что временная изменчивость воспроизводится удовлетворительно при использовании всех параметризаций коэффициента теплопроводности в почвах различных типов. При этом для всех точек ошибки значений температуры на поверхности слабо зависят от параметризации теплопроводности почвы. Для влажной торфяной болотной почвы (Рис. 1) заметно, что по модели Пильке коэффициент теплопроводности оказывается существенно завышенным, что приводит к завышению амплитуды колебаний температуры в суточном ходе на глубинах.

Полученные вертикальные распределения статистических показателей указывают на уменьшение ошибок модели с глубиной (Рис. 2). Как правило, на уровнях 30 см и ниже величина ошибок моделирования приближается к погрешности измерений (0.1°C). Максимальные ошибки наблюдаются вблизи поверхности, что связано с неточностями моделирования теплового и радиационного баланса поверхности.

Для исключения влияния ошибки теплового баланса на поверхности была введена новая метрика воспроизведения моделью теплопереноса в почве. По закону теплопроводности Фурье отношение размаха колебаний на каждом уровне σ_i к размаху колебаний на поверхности σ_s определяется исключительно значением коэффициента температуропроводности. В таком случае качество воспроизведения моделью значений коэффициента теплопроводности определяется близостью вертикального распределения σ_i/σ_s к профилю той же метрики для данных наблюдений.

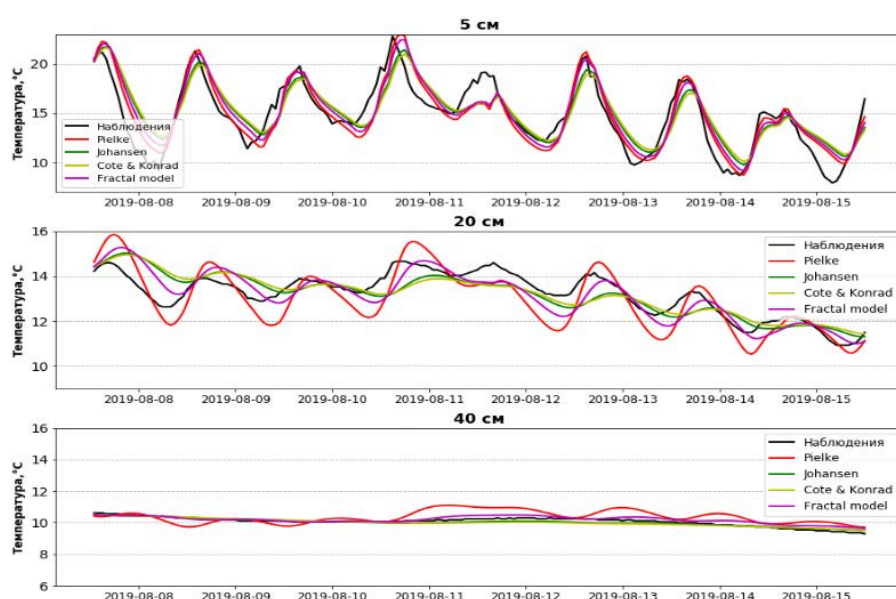


Рис. 1. Временные ряды температуры на различных глубинах для торфяной болотной почвы.

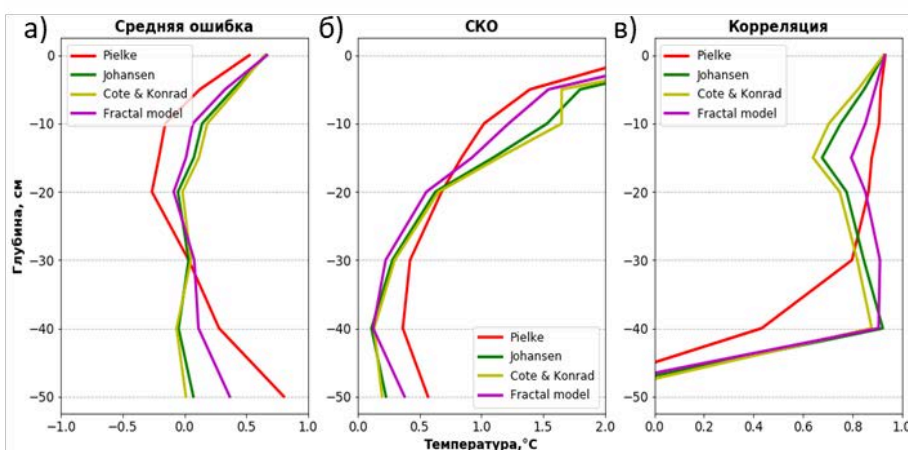


Рис. 2. Метрики ошибки моделирования для торфяной болотной почвы.

Для всех типов почв (Рис. 3) параметризация Пильке не дала наиболее точного результата. Выбор параметризации Коте-Конрада позволяет получить наиболее приближенные результаты в условиях суглинка и песков. За счет калибровочных параметров удалось добиться высокой точности результатов по фрактальной модели теплопроводности для влажной торфяной болотной почвы.

Таким образом, было показано, что параметризация Р. Пильке, используемая в базовой версии модели ИВМ РАН-МГУ, уступает в точности более современным параметризациям теплопроводности. Фрактальная модель теплопроводности имеет больший потенциал повышения точности, однако ее использование ограничено отдельными почвенными колонками (для ряда её параметров не существует глобальных баз данных). На глобальной сетке модели Земной системы ИВМ РАН-МГУ предлагается переход к параметризации Коте-Конрада [3] коэффициента теплопроводности почвы.

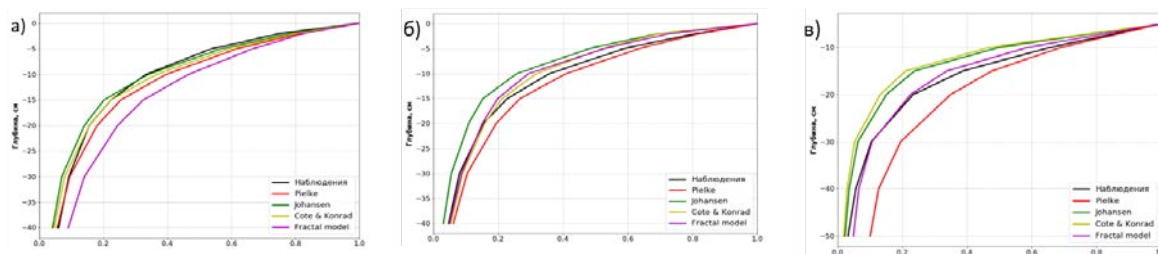


Рис. 3. Метрика воспроизведения коэффициента теплопроводности почвы для суглинка (а), песчаной почвы (б) и торфяной болотной почвы (в).

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 20-05-00773, 18-05-00306, 20-04-00142.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я., Лысков В.Н. Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН: описание модели A5421 версии 1997 года и результатов эксперимента по программе AMIP II. // М.: Деп. ВИНТИ, 1998. - № 2086-B98. - 215 с.
2. Beltrami H., Smerdon J. E., Pollack H. N., Huang S. Continental heat gain in the global climate system. // *Geophysical Research Letters*. – 2002. - 29(8). – С. 1167.
3. Cote J., Konrad J.-M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. // *Canadian Geotechnical Journal*. - 2005. - №42(2). - С. 443-458.
4. Fatichi S., Or D., Walko R., Vereecken H., Young M.H., Ghezzehei T.A., Hengl T., Kollet S., Agam N., Avissar R. Soil structure is an important omission in Earth System Models. // *Nature Communications*. – 2020. - №11(552). – С. 1 - 11.
5. Johansen O. Thermal conductivity of soils. // *University of Trondheim, Trondheim, Norway*. - 1975. - С. 637.
6. McCumber M.C., Pielke R.A. Simulation of the effects of the surface fluxes of heat and moisture in a mesoscale numerical model. Part 1. Soil layer. // *Journal of Geophysical Research*. – 1981. - V.86, №C10. - С. 9929-9938.
7. Qin X., Cai J., Xu P., Dai S., Gan Q. A fractal model of effective thermal conductivity for porous media with various liquid saturation. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – №128. – С. 1149 - 1156.
8. Zhang N., Wang Z. Review of soil thermal conductivity and predicative models. // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2017. - №117. - С. 172-183.

Parameterization of snow accumulation processes under a canopy vegetation in the land model of the INM RAS – MSU

¹Marchuk E.A., ^{1,2}Stepanenko V.M.

¹Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

²Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia

E-mail: murchuk-ekaterin@mail.ru, stepanen@srcc.msu.ru

The modern model of the Earth system is a complex system that includes a description of the processes taking place not only in the ocean and atmosphere, but also on the surface of the earth. Models of the active land layer (LMS, Land Surface Model) include a large number of parameterizations of the physical processes occurring in the atmosphere-underlying surface system.

During this work a new algorithm for calculating the snow cover was developed, including parameterization of interception of solid precipitation by vegetation, evaporation and melting from the surface of the forest snow cover and intercepted snow. New prognostic variables have been introduced: water-equivalent snow cover thicknesses under the forest canopy $S_{we,veg}$ and in open areas $S_{we,soil}$.

Numerical experiments were carried out with a version of the active layer model of the INM RAS - Moscow State University with a resolution of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, with a time step of 1 hour. The computational domain covers the river basin of the Northern Dvina ($42^\circ - 79^\circ$ N, $20^\circ - 70^\circ$ E).

Comparison of modeling and measurement data by three key values is given: snow water equivalent (SWE) on average per cell, SWE in open areas and SWE under the forest canopy. Satisfactory reproduction by the model of the seasonal variation of SWE was demonstrated; at the same time, an underestimation of the water model by the average snow equivalent of ~ 2 cm per cell throughout the entire cold period was revealed (excluding the snowmelt period). It was shown that the long-term variability of the maximum (March) snow reserves is also successfully reproduced by the model; however, agreement with the observational data is better in the north ($r = 0.6-0.9$) than in the south ($r = 0.1-0.4$) of the territory under consideration.

The model improvements described represent the first step towards the description in the INM RAS-MSU model of a complex of processes that determine snow accumulation in forest ecosystems, in particular, downward thermal study of crowns, snowstorm transport at the forest / field [1], etc.

REFERENCES:

1. Fang X., J. W. Modelling blowing snow redistribution to prairie wetlands, *V.23, I.18, 2009, P. 2557-2569.*

Параметризация процессов снегонакопления под пологом растительности в модели суши ИВМ РАН – МГУ

¹Марчук Е.А., ^{1,2}Степаненко В.М.

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

E-mail: murchuk-ekaterin@mail.ru, stepanen@srcc.msu.ru

Современная модель Земной системы – это сложный комплекс, включающий в себя описание процессов происходящих не только в океане и атмосфере, но и на поверхности земли. Модели деятельного слоя суши (LMS, Land Surface Model) включают большое количество параметризаций физических процессов, происходящих в системе атмосфера - подстилающая поверхность.

Одним из ключевых процессов на поверхности суши является снегонакопления. Снежный покров является важной частью климатической системы в первую очередь из-за своих физических свойств: высокого альбедо и низкой теплопроводности. Снежный покров служит резервуаром для талой воды, оказывает влияние на сток, влажность почвы, испарение, осадки и на другие составляющие гидрологического цикла.

Описания физических процессов, связанных со снежным покровом на открытых поверхностях, вообще говоря, не достаточно. Примерно до 90-х годов XX века схемы процессов в снежном покрове

тестировались в основном на данных измерений, произведённых на территориях, не покрытых высокой растительностью. Одновременно с этим приходило осознание того, что моделирование снега не является полным без учёта процессов, происходящих под пологом леса. Одно из таких исследований на чувствительность модели общей циркуляции атмосферы показало, что «удаление» всех лесов севернее 45° с.ш. приводит к снижению температуры и к задержке снеготаяния посредством увеличенного альбедо поверхности [4]. Поскольку Россия является северной страной, а также одной из самых залесённых стран в мире, то для нашей территории особенно важно уметь параметризовать процессы в снежном покрове под лесным пологом [1].

Улучшение представления процессов в снежном покрове в модели деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ в данной работе происходило путём внедрения следующих параметризаций: задержания кронами деревьев снежной массы и баланса массы снега внутри лесного полога. Также осуществлялась проверка на соответствие результатов моделирования данным наблюдений.

В ходе работы был разработан новый алгоритм расчёта снежного покрова, включающий параметризацию перехвата твёрдых осадков растительностью, испарение и таяние с поверхности лесного снежного покрова и перехваченного снега. Теперь в холодное время года водно-эквивалентная толщина (ВЭТ) снега, усреднённая по ячейке, рассчитывается следующим образом:

$$\frac{\partial S_{we}}{\partial t} = P_{sn}(1 - \beta \alpha f_{veg}) - (E_{snow} + M_{soil})$$

Приходной частью этого уравнения являются осадки в виде снега P_{sn} , покрывающие равномерно всю ячейку, из которых вычитается количество осадков, перехваченное растительностью $P_{sn} \beta \alpha f_{veg}$ (где β = 1-доля ячейки, занятая атмосферными осадками, α - эффективность перехвата осадков растительностью, f_{veg} - доля ячейки, занятая растительностью). Также эта масса снега изменяется в ходе испарения E_{snow} и таяния M_{soil} . Здесь учитывается, что при наступлении положительной приземной температуры воздуха, часть снежного покрова ещё не успевает растаять. Стоит отметить, что в предыдущей версии модели эффективность перехвата составляла 0.5.

Введены новые прогностические переменные: водно-эквивалентные толщины снежного покрова под пологом леса $S_{we,veg}$ и на открытых участках $S_{we,soil}$.

Водно-эквивалентная толщина снега под растительностью есть не что иное, как избыток снега, который не может быть удержан на ветвях деревьев P_{unload} , при этом он также подвержен испарению $S_{we,veg}$ и таянию $M_{we,soil}$:

$$\frac{\partial S_{we,veg}}{\partial t} = P_{unload} - (E_{snow} + M_{soil}) \frac{S_{we,veg}}{S_{we}},$$

где введена замыкающая гипотеза, что скорость испарения и таяния снега под растительностью пропорциональна скорости этих процессов в среднем по ячейке и отношению ВЭТ в лесу к средней по ячейке величине ВЭТ.

Очевидно, что избыток влаги, который не может быть удержан кронами деревьев, есть разница между текущим значением ВЭТ задержанного кронами снега и максимально возможным количеством влаги, которое может быть удержано деревьями $W_{skin,max}$, последнее, в свою очередь, зависит от суммы листового и стеблевого индекса TL :

$$W_{skin,max} = W_{skin,max,0} * f_{wveg} * TL$$

Водно-эквивалентная толщина снежного покрова на открытых поверхностях вычисляется диагностически:

$$S_{we,soil} = S_{we} - S_{we,veg}$$

Для сравнения с данными наблюдений величины, осреднённые по ячейке, следует перевести в ВЭТ, осреднённые в пределах растительности и открытых участков, соответственно (обозначены ниже звёздочками):

$$S_{we,soil}^* = S_{we,soil} / (1 - f_{veg})$$

$$S_{we,veg}^* = S_{we,veg} / f_{veg}$$

Численные эксперименты проводились с версией модели деятельного слоя ИВМ РАН - МГУ с разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, с шагом по времени 1 час. Расчётная область охватывает речной бассейн Северной Двины ($42^\circ - 79^\circ$ с.ш., $20^\circ - 70^\circ$ в.д.). В качестве граничных условий для данной модели использовался реанализ ERA-Interim с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе и шагом по времени 6 часов на выбранную территорию. Данные реанализа охватывают промежуток с 01.01.1979 по 31.12.1994. К значениям атмосферных осадков из массива ERA-Interim применяется коррекция с привлечением данных станционных измерений, описанная в [3].

Производился отбор данных снегомерных съёмок на территории бассейна Северной Двины. Критерием отбора выступало наличие достаточного количества данных о водно-эквивалентной толщине снега одновременно на поле и в лесу. В результате отобрано 17 станций, на которых путём анализа доступных месячных измерений, был выбран оптимальный период для сравнения с модельными данными: 1979 – 1994 гг.

Производилось сравнение данных моделирования и измерений по трём ключевым величинам: водно – эквивалентной толщине снега в среднем по ячейке, ВЭТ на открытых участках и ВЭТ под пологом леса.

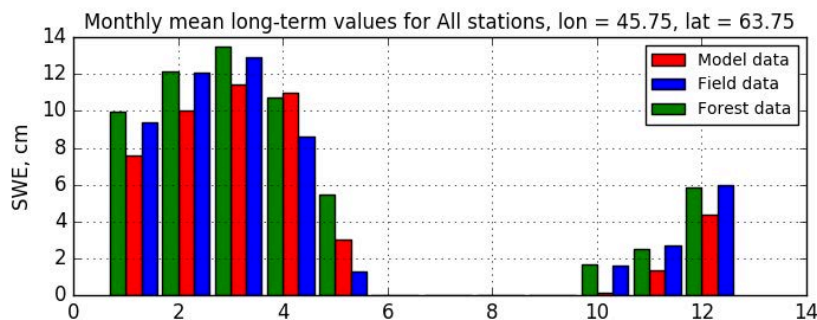


Рис. 1. Среднемесечные значения водного эквивалента снега за период 1979-1994 гг., осреднённые по 17 станциям и ближайшим к ним ячейкам модели. Сравнение модельных данных (среднее по ячейке, S_{we}) и данных наблюдений снегомерной съёмки (Field – на открытых участках, Forest – на залесённых).

Из рис.1. следует удовлетворительное воспроизведение моделью сезонного хода ВЭТ; при этом, было выявлено занижение моделью водного эквивалента снега в среднем по ячейке на ~2 см на протяжении всего холодного периода (исключая период снеготаяния). Это может быть связано с чувствительностью модели к данным реанализа в период установления устойчивого снежного покрова (и, следовательно, с более поздней датой установления устойчивого снежного покрова), а также с некорректным воспроизведением альбеда поверхности в этот период. Подобная ошибка выявлена и в других моделях [2].

Межгодовая изменчивость максимальных (мартовских) снегозапасов также удачно воспроизводится моделью; однако, согласие с данными наблюдений при этом лучше на севере ($r=0.6-0.9$), чем на юге ($r=0.1-0.4$) рассматриваемой территории.

Стоит также отметить, что модель воспроизводит выявленную при анализе данных наблюдений зависимость: водный эквивалент снега в лесу выше по сравнению с открытыми участками. Регулируется это отношение в модели с помощью коэффициента эффективности перехвата твёрдых осадков кронами α . Произведены численные эксперименты со значениями $\alpha = 0.5, 0.7, 0.85, 1$. На рисунках 2 и 4 по сравнению с рисунками 3 и 5 демонстрируется большее занижение ВЭТ в модели на открытых участках (около ~3 см) и меньшее занижение ВЭТ в модели на лесных участках (около ~2 см). Очевидно, что, чем выше коэффициент эффективности перехвата твёрдых осадков кронами, тем больше массы добавляется к резервуару перехваченной растительностью влаги, и впоследствии больше снега добавляется под полог леса ($W_{skin} > W_{skin,max}$).

$\alpha=0.85$

$\alpha=1$

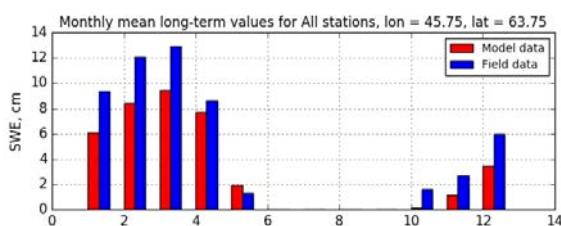
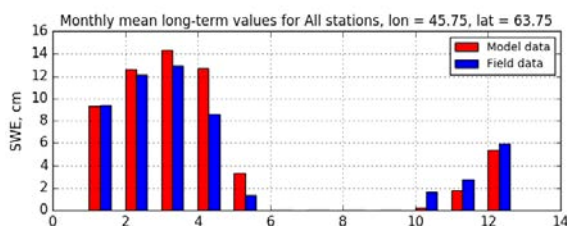


Рис. 2. (a,b) Среднемесечные значения водного эквивалента снега на открытых участках ($S_{we,soil}$) за период 1979-1994 гг., осреднённые по 17 станциям (снегомерные съёмки) и ближайшим к ним ячейкам модели.

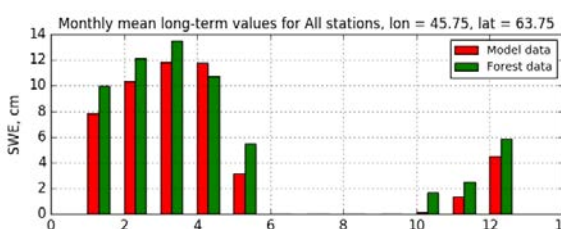
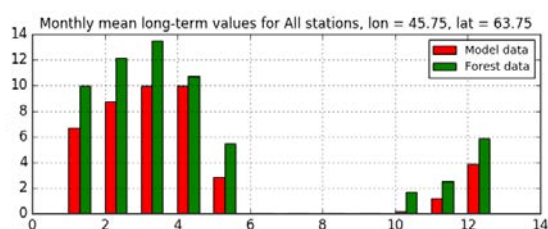


Рис. 3. (a,b) Среднемесечные значения водного эквивалента снега на участках под высокой растительностью ($S_{we,veg}$) за период 1979-1994 гг., осреднённые по 17 станциям (снегомерные съёмки) и ближайшим к ним ячейкам модели.

Приведённые выше усовершенствования модели представляют собой первый этап на пути к описанию в модели ИВМ РАН-МГУ комплекса процессов, определяющих снегонакопление в лесных экосистемах, в частности, нисходящего теплового изучения крон, метелевого переноса на границе лес/поле [5] и др.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 20-05-00773.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Параметризация процессов тепловлагообмена в бореальных лесных экосистемах // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 37. № 2. С. 182-200.
2. Казакова Е. В., Розинкина И. А., Мачульская Е. Е. Результаты тестирования новой схемы параметризации снежного покрова в условиях таяния снега в модели COSMO-Ru. — Труды Гидрометцентра России, вып. 344, Физика атмосферы и прогноз погоды, М., 2010, с. 147—164
3. Степаненко В.М., Медведев А.И., Корнушенков И.А. и др. Параметризация речной сети для модели Земной системы // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии. — 2019. — Т. 20. — С. 396–410.
4. Bonan, G.B., F.S. Chapin III, and S.L. Thompson, Boreal forest and tundra ecosystem as components of the climate system, *Clim. Change*, 29, 145 – 167, 1995.
5. Fang X., J. W. Modelling blowing snow redistribution to prairie wetlands, , *V.23, I.18*, 2009, P. 2557-2569.

The influence of the outer parameters on river runoff value in the land surface model INM – MSU (on the case of Severnaya Dvina)

^{1,2,3}Medvedev A., ^{1,2,4}Stepanenko V.

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, RCC MSU, Moscow, Russia

³A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

⁴Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Russia

E-mail: medvedev_ai@geogr.msu.ru, stepanen@srcc.msu.ru

The land surface model INM – MSU is now used for study of the importance of detailed accounting of hydrological processes for modeling the Earth system. This report highlights some of the results of the study of the effect on the calculated river flow of the choice of reanalysis as a source of atmospheric forcing and the choice of a surface map.

In the INM – MSU model such meteorological characteristics as wind speed, pressure, temperature, humidity, precipitation, descending short-wave and long-wave radiation fluxes are necessary for calculating the state of the land. They are set from reanalysis. Since reanalyses can produce significant errors in precipitations, which are important components of the hydrological cycle, we decide to compare precipitation in them and choose the most acceptable.

A series of monthly sums of precipitation for 2008–2015 was calculated for the Northern Dvina basin using reanalyses and data from a network of weather stations corrected according to the VNIIGMI – MCD method taking into account the systematic errors of precipitation instruments. Modern reanalyses covering the designated time period and available on a global scale were selected for comparison – ERA5, ERA-Interim, MERRA-2, JRA-55 and NCEP-DOE.

For all 23 stations taken into consideration, the ERA5 reanalysis was a clear leader in the reproduction of precipitation. If all other reanalyses are characterized by a statistical overstatement of monthly precipitation, ERA5 gives an error close to random. However, the effect from using ERA5 on the river runoff could not be traced – perhaps because previously we used ERA-Interim that not much differ from it.

The model uses a latitude-longitude grid of $0.5 \times 0.5^\circ$ and a mosaic approach to take into account the sub-grid surface heterogeneity. We use SiB classification of surface types that have 17 types. The map of the global distribution of surface types used is constructed from data mainly obtained in pre-satellite time, has significant inaccuracies and a rough resolution of $1.5 \times 2^\circ$. The question was raised about replacing the map, while remaining within the framework of the type classification used. Among the well-known products, there is only one map that also use the SiB classification – it is GLCCv2. The map was built on the basis of satellite imagery data

AVHRR with a resolution of 1 km in 1992–1993. Surface types were distinguished by clustering k-means of monthly maximums NDVI. The map is quite accurate, so it was included in the model. To transfer its to the $0.5 \times 0.5^\circ$ grid, the area occupied by different types of surface was calculated within each cell. The changes in runoff in experiments with the old and new maps also was small – possibly because the data on the territory of the Northern Dvina basin less differ from each other than in other places.

Numerical experiments did not show a notable sensitivity of the Northern Dvina runoff to the choice of reanalysis and surface map, however, the data presented demonstrate that the differences in products can be significant. Probably, the problem lies in the unsuccessful design of the experiment, and to evaluate the studied effect it is necessary to make calculations for rivers in other geographical conditions.

The work is partially supported by RFBR, grant 20-05-00773.

Влияние внешних параметров на величину речного стока в модели деятельного слоя суши ИВМ – МГУ (на примере р. Северная Двина).

^{1,2,3}Медведев А.И., ^{1,2,4}Степаненко В.М.

¹Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

⁴Московский Центр фундаментальной и прикладной математики, Россия

E-mail: medvedev_ai@geogr.msu.ru, stepanen@srcc.msu.ru

В основе модели деятельного слоя суши ИВМ – МГУ лежит система уравнений состояния подстилающей поверхности, отделенная от остальных компонент модели Земной системы INMCM (Volodin et al, 2017) – известной российской модели, принимающей участие в ключевых международных проектах по исследованию природной среды (AMIP-II, CMIP3, CMIP5, CMIP6). Модель ИВМ – МГУ применяется как для верификации новых алгоритмов перед их включением в основную модель, так и для самостоятельных исследований (например, принимает участие в секторе Lake проекта ISIMIP2b).

Одно из приоритетных направлений развития модели INMCM – повышение детальности представления климатической системы, в частности, получение реалистичного воспроизведения гидрологического режима рек и озер. Модель достоверно вычисляет многолетнюю величину стока средних и крупных рек (Nasonova et al, 2018), что свидетельствует о соблюдении баланса между многолетними суммами осадков и испарения, однако точность воспроизведения конкретных годовых гидрографов оставляет желать лучшего. В то же время, корректная величина речного стока необходима для расчета термохалинной циркуляции в океане, переноса химических элементов с суши в океан и т. п. Особенно требовательной к корректности является оценка отклика характеристик стока на изменения климата.

В рамках данного направления, на основе модели ИВМ – МГУ проводятся исследования перспективных для включения в модель Земной системы параметризаций. В частности, было показано, что учет перемещения стока по графу речной сети (в виде уравнений диффузионной волны) и учет фазовых переходов вода – лед в толще снежного покрова позволяют достичь удовлетворительного воспроизведения среднемесячных и среднедекадных значений стока (на примере Северной Двины – Степаненко и др, 2019; Медведев и др, 2019). Важным этапом исследований видится оценка чувствительности стока к разного рода факторам – используемым замыкающим соотношениям, константам, численным схемам и т. п. В представляемом докладе освещены некоторые результаты по исследованию влияния на рассчитываемую величину речного стока выбора реанализа в качестве источника атмосферного форсинга и выбора карты поверхности.

Реанализ. В модели ИВМ – МГУ, отделенной от модели общей циркуляции атмосферы, необходимые для расчета состояния суши метеорологические характеристики (скорость ветра, давление, температура, влажность, осадки, потоки нисходящей коротковолновой и длинноволновой радиации) могут задаваться произвольными входными данными. Обычно для этого используются значения из реанализа на поверхности и нижнем уровне модели. Наиболее значительные ошибки в современных реанализах наблюдаются в величинах осадков. В то же время, осадки являются основным компонентом гидрологического цикла и непосредственно определяют величину рассчитываемого речного стока, поэтому вопрос выбора реанализа в качестве форсинга имеет первостепенное значение.

Для бассейна Северной Двины и его окрестностей было проведено сравнение рядов месячных сумм осадков за 2008–2015 гг., рассчитанных по реанализам и по данным сети метеостанций, скорректированным по методике ВНИИГМИ – МЦД с учетом систематических погрешностей осадкомерных приборов (Богданова и др, 2002). Для сравнения были выбраны современные реанализы, охватывающие обозначенный временной период и доступные на глобальном масштабе – ERA5, ERA-Interim, MERRA-2, JRA-55 и NCEP-DOE. Затем исследовались различные статистические характеристики рядов разностей месячных сумм, полученных по реанализу и по данным наблюдений (из реанализа бралась ячейка, содержащая метеостанцию).

По всем 23 станциям, взятых к рассмотрению, однозначным лидером в воспроизведении осадков оказался реанализ ERA5. Если для всех прочих реанализов характерно статистическое завышение месячных сумм осадков, ERA5 дает ошибку, близкую к случайной. На рис. 1 и в табл. 1 приведены полученные ряды и их характеристики для наиболее показательной ст. Усть-Цильма; тем не менее, и для других станций общая картина сохраняется.

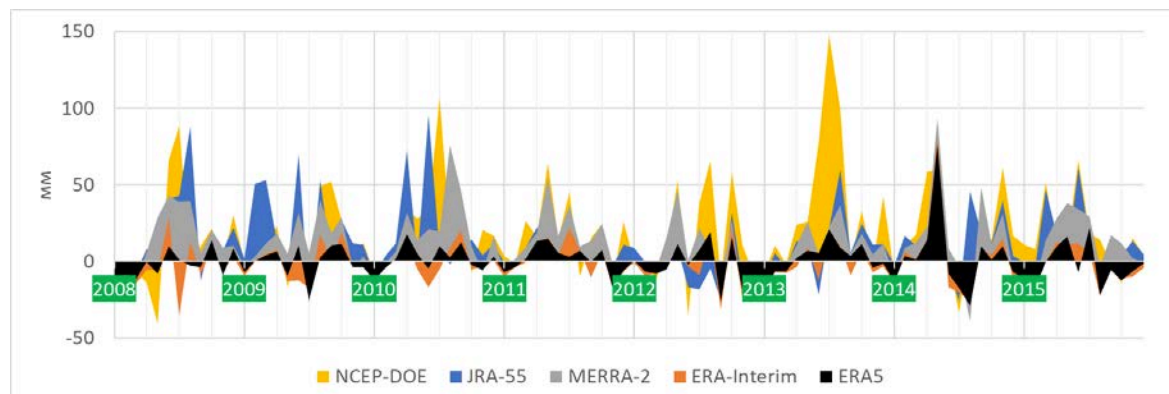


Рис. 1. Разности месячных сумм осадков по данным реанализов и по данным наблюдений на ст. Усть-Цильма за 2008–2015 гг.

Таблица 1. Статистические характеристики рядов разностей месячных сумм осадков по данным реанализов и по данным наблюдений на ст. Усть-Цильма за 2008–2015 гг.

Характеристика	ERA5	ERA-Interim	MERRA-2	JRA-55	NCEP-DOE
Минимум, мм	-28.89	-35.37	-39.05	-27.40	-40.50
25%-квартиль, мм	-6.88	-10.21	-1.29	-0.80	-1.16
Медиана, мм	-0.12	-3.22	10.22	7.71	14.43
75%-квартиль, мм	7.90	7.26	23.14	19.04	31.00
Максимум, мм	76.26	80.91	92.99	95.70	147.36
Среднее, мм	0.23	-1.22	13.10	12.93	19.09
Средняя ошибка, мм	9.38	11.02	17.32	18.06	25.36
Среднекв. откл-е, мм	13.27	15.03	20.00	23.92	31.19
Ковариация	558.55	525.91	644.92	612.36	572.84
Линейный к-т корреляции	0.91	0.87	0.82	0.73	0.60
К-т детерминации	0.72	0.64	0.35	0.08	-0.57

Таким образом, для дальнейшего использования в качестве форсинга для моделирования режима Северной Двины нами был принят ERA5. Результаты моделирования гидрографов с ERA5 и используемым ранее ERA-Interim приведена на рис. 2 – изменения невелики, т.к. выбранные реанализы построены по практически аналогичным методикам. Однако следует учитывать, что для других географических районов и временных промежутков полученных вывод применять некорректно.

Карта поверхности. Широотно-долготная сетка модели имеет разрешение $0.5 \times 0.5^\circ$. Чтобы учесть неоднородность поверхности подсеточного масштаба, в модели применяется мозаичный подход – в каждой ячейке предполагается наличие нескольких типов поверхности. Уравнения модели записываются для каждого типа отдельно; затем нужные величины взвешенно осредняются по ячейке. В модели предусмотрены следующие типы поверхности суши: 13 типов растительности (типы заимствованы из модели SiB (Sellers et al, 1986)), открытый грунт, озера, снег и слой перехваченной влаги. Для задания покрытия ячеек сетки перечисленными типами используются некоторые карты (за исключением двух последних типов – их покрытие определяется из погодных условий).



Рис. 2. Среднедекадный расход в устье р. Северная Двина, рассчитанный с использованием реанализов ERA-Interim и ERA5.

В модели ИВМ – МГУ для большей части типов поверхности используется карта Wilson and Henderson-Sellers, 1985. Эта карта на сетке $1 \times 1^\circ$ была сконструирована специально для моделей общей циркуляции атмосферы на основе широкого спектра географических карт, выпущенных в 1950–1970 гг. В ней выделяется 53 типа поверхности (из них 47 типов растительности), каждая ячейка характеризуется 2 типами растительности — первичным (занимающим более 50% ячейки) и вторичным (занимающим 25–50%). Для использования в модели INMCM, а затем и в модели ИВМ – МГУ, 53 типа поверхности были приведены к используемым 13, а сама карта была переведена на сетку $1.5 \times 2^\circ$.

Так как современное разрешение модели ИВМ – МГУ составляет $0.5 \times 0.5^\circ$, представляется необходимым заменить существующую карту поверхности на более детальную. Кроме того, данные, на основе которых строилась, были получены преимущественно без использования спутниковых данных и представляются неточными. Современные технологии позволяют получить глобальное распределение типов поверхности со значительно большей детальностью и точностью.

В качестве альтернативной была выбрана карта GLCCv2 (Loveland et al, 2000). Карта построена на основе данных спутниковой съемки AVHRR разрешением 1 км в 1992–1993 гг. Типы поверхности выделялись методом кластеризации k-средних по месячным максимумам NDVI и приводились к 94 классам экосистем. В дальнейшем, экосистемы приводились к другим популярным на тот момент классификациям типов поверхности, среди которых также используемая в модели ИВМ – МГУ классификация SiB. Оценки точности карты для растительности составляют: точность LAI на единицу площади – 90.2%, точность уровня шероховатости на единицу площади – 87.8%. Кроме того, карта GLCCv2 представляется не только достаточно точной альтернативой используемой, но и единственной – так как других широко известных карт в классификации SiB не существует, а вопрос пересмотра используемой классификации не ставился.

На рис. 3 изображены карта Wilson and Henderson-Sellers и карта GLCCv2. Видно, что используемая карта имеет не только слишком грубое разрешение, но и значительные расхождения с действительностью. Таким образом, для дальнейшего использования в качестве карты внешних параметров в модели ИВМ – МГУ была принята GLCCv2. Для перевода на сетку $0.5 \times 0.5^\circ$ в пределах каждой ячейки подсчитывалась площадь, занимаемая разными типами поверхности. Результаты моделирования гидрографов со старой и новой картой поверхности приведены на рис. 4. Изменения невелики возможно потому, что на территории бассейна Северной Двины карты поверхности различаются в малой степени.

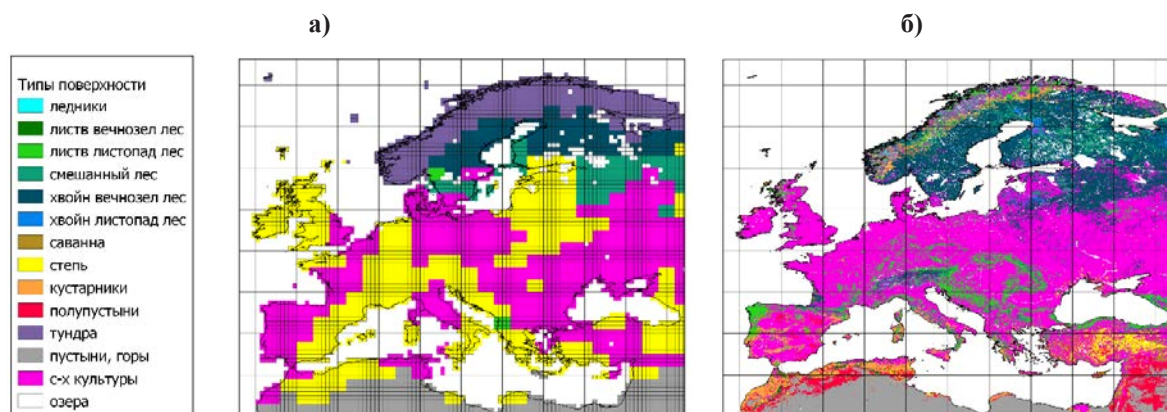


Рис. 3. Территория Европы: а) доминирующий тип поверхности в ячейках модели $0.5 \times 0.5^\circ$; б) карта GLCCv2 с разрешением 1 км.

Проведенные численные эксперименты не показали выраженной чувствительности стока Северной Двины к выбору реанализа и карты поверхности, хотя приведенные данные демонстрируют, что различия продуктов могут быть значительными. Вероятно, причины этого – а) небольшие различия реанализов ERA5 и ERA-Interim; б) небольшие различия карт поверхности GLCCv2 и Wilson & Henderson-Sellers в бассейне Северной Двины. Поэтому для оценки исследуемого эффекта требуется провести

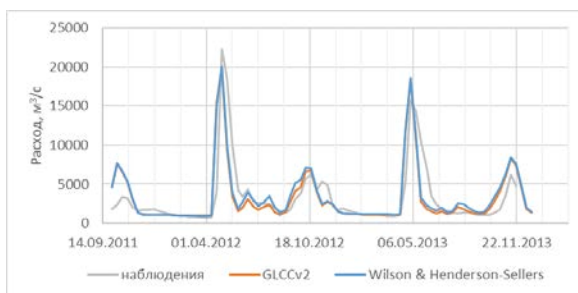


Рис. 4. Среднедекадный расход в устье р. Северная Двина, рассчитанный с использованием карт поверхности Wilson & Henderson-Sellers и GLCCv2.

расчеты с реанализами, построенными по различным методикам, и для рек в разных географических условиях.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант 20-05-00773.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Богданова Э. Г. и др. Новая модель корректировки измеренных осадков и ее применение в полярных районах России // *Метеорология и гидрология*. – 2002. – №. 10. – С. 68-94.
2. Медведев А. И., Степаненко В. М., Богомолов В. Ю. Развитие параметризации речного стока в модели суши ИВМ РАН-МГУ // *CITES'2019*. – 2019. – С. 224-227.
3. Степаненко В. М. и др. Параметризация речной сети для модели Земной системы // *вычислительные методы и программирование*. – 2019. – Т. 20. – С. 396-410.
4. Loveland T. R. et al. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DIS-Cover from 1 km AVHRR data // *International Journal of Remote Sensing*. – 2000. – Т. 21. – №. 6-7. – С. 1303-1330.
5. Nasonova O. N. et al. Application of the land surface model SWAP and global climate model INMCM4.0 for projecting runoff of northern Russian rivers. 1. Historical simulations // *Water resources*. – 2018. – Т. 45. – №. 2. – С. 73-84.
6. Sellers P. J. et al. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 1986. – Т. 43. – №. 6. – С. 505-531.
7. Volodin E. M. et al. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // *Climate dynamics*. – 2017. – Т. 49. – №. 11-12. – С. 3715-3734.
8. Wilson M. F., Henderson-Sellers A. A global archive of land cover and soils data for use in general circulation climate models // *Journal of Climatology*. – 1985. – Т. 5. – №. 2. – С. 119-143.

Microscale simulation of wind speed in urban areas during extreme weather events

¹Nikolaeva E., ¹Kospanov A., ²Bukin S., ^{1,2}Konstantinov P.

¹RUDN University, Laboratory of smart technologies for sustainable development of urban environment under global changes, Moscow, Russia

²Moscow State University, Russia

E-mail: nikolael99@mail.ru

Urban meteorology has been experiencing substantial development in the preceding 60 years. The advancements could be traced to the developments in computation capacities as well as better understanding and modeling of microscale interactions. These interactions greatly influence the urban microclimate and include plant to air, soil to air, building to air and other interactions.

One of the many hazards that a city might be susceptible to is strong gusting winds in the event of a strong squall. Influenced by the cityscape and topography, the windspeeds may be significantly increased leading to destruction and sometimes fatalities. One of such examples is the squall event in Moscow on 29th of May 2017. The recorded squall could not be traced to a typical supercell genesis, yet it was produced by a rapidly progressing cold front with the speeds of around 100 km/h. The decrease in observed temperature was 10°C in 12 minutes, the maximum observed wind gust speed was 28,3 m/s.

To investigate the spatial differentiation of the windspeed field a well-known territory of the MSU campus was chosen. The advantage of the chosen territory is also in the various types of land use represented on the

studied territory. The land use includes buildings of various heights, different types of vegetation (dense tree cover of both conifers and deciduous species as well as open spaces with grass cover)

To investigate the positions of the zones of possible hazards a model of the territory was developed using the ENVI-met software. The ENVI-met complex is based on a three-dimension non-hydrostatic microclimate model. A typical spatial resolution of the model is 0,5-10 meters and the resolution in time is up to 15 seconds. A crucial advantage of the used model is the modelling of the interactions between the atmosphere, the soil, vegetation, and buildings. A possibility of modelling every single tree or building plays a significant role in the precise forecast of the main meteorological parameters. The used forecast parameters include wind direction and speed, air temperature, humidity, turbulence, radiation flows, bioclimatology, and particle diffusion and dispersion.

The goals of the work are:

- To develop an ENVI-met model for the area of research
- To test the stability of the modelling outputs
- To graph the wind speed map for 4 primary wind directions (0, 90, 180, 270)
- To highlight the hazardous zones for the MSU campus
- To investigate the dependence of local wind speed variability on the mesoscale wind speed

The input data consisted of wind speed (maximum gust speed) and direction (245°), temperature and humidity from the observations of the MSU meteorological observatory (located within the studied area). To test the stability of the outputs the wind direction was slightly varied in the runs (up to 10° in each direction). As a result, there are 5 maps of wind speeds with close wind directions. The similarity of the outputs indicates the stability of the modeling scenarios.

To detect the hazardous zones the area was studied for the significant wind speed increases (based on the maps of modelling outputs). An important issue to be considered is the interaction of the trees and atmosphere in great wind speeds. The trees decrease the wind speed significantly, exposing themselves to great wind pressure, which can lead to the trees falling.

Микромасштабное моделирование скорости ветра в городской застройке во время экстремальных погодных событий

¹Николаева Е.В., ¹Коспанов А.А., ²Букин С.С., ^{1,2}Константинов П.И.

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова Географический факультет, Москва, Россия

²Научный центр «Смарт технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений» РУДН, Москва, Россия

E-mail: nikolael99@mail.ru

Городская метеорология, как самостоятельное направление, начала развиваться около 60 лет назад. Основой данного направления является изучение взаимодействия окружающей среды и городских структур в ходе антропогенного преобразования естественных природно-климатических условий на территориях, занятых городской застройкой. Ежегодно в мире происходит увеличение степени урбанизации. Люди проводят много времени на улицах, в парках, рекреационных зонах и очень важным является обеспечение комфортности пребывания человека на городской территории. Поэтому необходимо обеспечивать оперативный прогноз экстремальных погодных явлений, таких как шквалы или смерчи. При отсутствии своевременного предупреждения об опасном погодном событии может быть нанесен ущерб как людям, так и городской среде в виде жертв среди населения, поваленных деревьев, повреждений жилых зданий и автотранспорта. Также может нарушаться работа общественного транспорта, наноситься значительный ущерб инфраструктуре.

Основной целью исследования является моделирование ветровых потоков при различных направлениях для территории кампуса МГУ и нахождение потенциально «опасных зон» для пребывания человека. Для решения цели были поставлены и в дальнейшем выполнены следующие задачи:

- Развертывание модели ENVI-met для территории кампуса МГУ
- Проверка устойчивости результатов моделирования к неточности входных данных
- Построение ветровых карт по 4 основным румбам (0, 90, 180, 270)
- Выявление «опасных зон» на исследуемой территории
- Оценка чувствительности локального увеличения скорости ветра к исходной скорости и направлению основного потока

Данная работа проводилась на основе данных, полученных в Метеорологической обсерватории МГУ во время шквала 29 мая 2017 года. Исследуемый случай шквала был нетипичным, поскольку не сопровождался ни грозой, ни высокими значениями верхней границы облаков. Очевидно, он был вызван в первую очередь обострённым холодным фронтом, прошедшим Москву днём и хорошо прослеживаемым по спутниковым данным об облачности, и очень высокой скоростью его передвижения (около 100 км/ч). В 15-16 часов по московскому времени через г. Москва прошел холодный фронт. Обостренный в период максимального прогрева холодный фронт стал причиной комплекса неблагоприятных и опасных явлений погоды. Это подтверждают данные автоматического комплекса АМК с поминутной регистрацией основных метеорологических величин. Происходило резкое уменьшение температуры воздуха, которое составило в МГУ 10°C всего за 12 минут: с 25,0°C в 15:39 до 15,2°C в 15:51 и 14,9°C в 15:52. Обостренный в период максимального прогрева холодный фронт стал причиной комплекса неблагоприятных и опасных явлений погоды. Именно в данный период времени произошло явление шквала, отражённое в резком увеличении средних минутных значений скорости ветра: с 5,9 м/с в 15:38 до 10,2 м/с в 15:48. Максимальный порыв скорости ещё в 15:38 составлял хоть и большое, но вполне обычное значение: 19,4 м/с. Минуту спустя (в 15:39) он возрос до 27,9 м/с, а ещё через минуту (в 15:40) достиг аномально высокого значения 28,3 м/с.

Моделирование ветровых полей производилось на основе микрометеорологического комплекса ENVI-met. Это трехмерная негидростатическая микроклиматическая модель. Основное различие ENVI-met и крупномасштабных атмосферных моделей, используемых для прогнозирования суточной погоды или будущих климатических изменений, заключается во временном и пространственном разрешении модели. Типичное разрешение сетки в ENVI-met от 0,5 до 10 метров в пространстве и до 15 секунд во времени. Происходит расчет динамики микроклимата в течение суточного цикла (от 24 до 48 часов) при использовании фундаментальных законов гидродинамики и термодинамики. Достоинство используемой модели в том, что происходит моделирование взаимодействий между атмосферой, почвой, растительностью и зданиями на микроуровне. Каждое отдельное растение и каждая городская структура могут быть явно смоделированы, что делает ENVI-met идеальным инструментом для градостроителей, архитекторов и городских климатологов, которые хотят моделировать метеорологические компоненты городской среды. Основными прогностическими переменными программы являются скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, турбулентность, радиационные потоки, биоклиматология и дисперсия газа и частиц.

Для исследования был выбран участок на территории кампуса МГУ. Исследуемый участок включает в себя территории с различной плотностью застройки и растительного покрова. Например, это могут быть как значительные по площади области сплошной лесной растительности, так и протяженные открытые участки, на которых может происходить фокусировка и усиление ветра. Также стоит отметить большой высотный разброс зданий (от 10 м до более чем 70 м) на описываемой территории. Стоит отметить, что кампус МГУ имеет довольно специфическое строение и не может отражать городскую застройку в целом, но на его основе можно показать общие характеристики пространственной неоднородности ветрового поля.

При изучении распределения ветрового поля в городе одни и те же синоптические ситуации, вызывающие опасные погодные явления, по-разному проявляют себя в скоростях ветра и его направлениях. Особенно это касается приземных слоев, так называемой «пешеходной зоны». Здесь на ветровое поле дополнительное влияние оказывают препятствия в виде зданий различной высоты, видов и форм деревьев, более мелкой растительности и других городских объектов. Поэтому необходимо изучать распределение ветра в городской среде, в частности образование сильных порывов ветра, для обеспечения комфортности пребывания человека на улице.

Определение устойчивости результатов моделирования к небольшим изменениям входных параметров происходило на примере максимального значения порыва ветра и его направления при шквале 29 мая 2017 года. Метеорологические данные для эксперимента были взяты из базы данных Метеорологической обсерватории МГУ с использованием автоматизированного комплекса Vaisala с временным разрешением 1 секунда. В качестве входной скорости ветра задавалось значение максимального порыва, которое составило 28,3 м/с и направлением 245°. Далее 2 раза производилось изменение направления ветра по 5° в обе стороны от исходного значения. Результатом получились карты распределения ветра на высоте 12,5 метров со скоростью 28,3 м/с для следующих румбов: 235°, 240°, 245° (эталонный), 250° и 255°. На всех картах ветровое поле практически не меняется, что говорит об устойчивости моделирования.

После обработки результатов моделирования и создания карт скоростей ветра на высотах 1,5 и 12,5 м (уровень «пешеходной зоны» и средняя высота деревьев) были выявлены области наибольшего усиления ветра, которые при сочетании с распределением деревьев могут стать наиболее опасными при штормовом ветре как из-за скорости ветра, так и возможности падения деревьев.

Направление входящего потока	245	235	240	250	255
Максимальное значение	32,88	32,25	32,18	33,44	33,75
Минимальное значение	0,06	0,14	0,26	0,15	0,14
Среднее значение	19,13	18,90	19,03	19,32	19,53
Дисперсия	57,62	58,87	58,30	57,25	56,68
Мода	27,05	27,00	27,03	27,07	27,09
Количество ячеек с V>30 м/с	20/0,08%	56/0,23%	26/0,11%	14/0,06%	11/0,05%
Количество ячеек с V>25 м/с	6873/28,7%	6564/27,4%	6743/28,2%	7160/29,9%	7482/31,3%
Количество ячеек с V<10 м/с	4010/16,8%	4372/18,3%	4110/17,2%	3839/16%	3642/15,2%
Пространственные различия					
Координаты ячейки с максимальным значением	126,161	87,169	126,161	126,161	126,161
Координаты ячейки с минимальным значением	113,105	105,105	53,147	113,105	98,151

Табл. 1.
Статистические данные эксперимента по устойчивости модели к входным данным.

Для рассмотренного события области со скоростями ветра более 25 м/с занимают более четверти от исследуемой территории. Подобные значения скоростей ветра образуются при взаимодействии набегающего потока с застройкой или высокими деревьями. При этом во внутренних дворах зданий и внутри зон сплошной древесной растительности скорость ветра минимальна, что верно отражает реальную неоднородность распределения поля ветра на территории.

Важным объектом для исследования остается вопрос влияния скорости исходного набегающего потока. Иначе говоря, насколько чувствительна данная территория к изменению скоростей и направлений ветра? При изучении различных направлений ветра были выявлены критические точки, в которых ветер усиливается всегда. Следующая задача – выяснить, насколько сильно будут изменяться и повторяться потенциально опасные зоны, когда в качестве изменяемого входного параметра будут различные скорости ветра.

Карты на высоте 1,5 метра

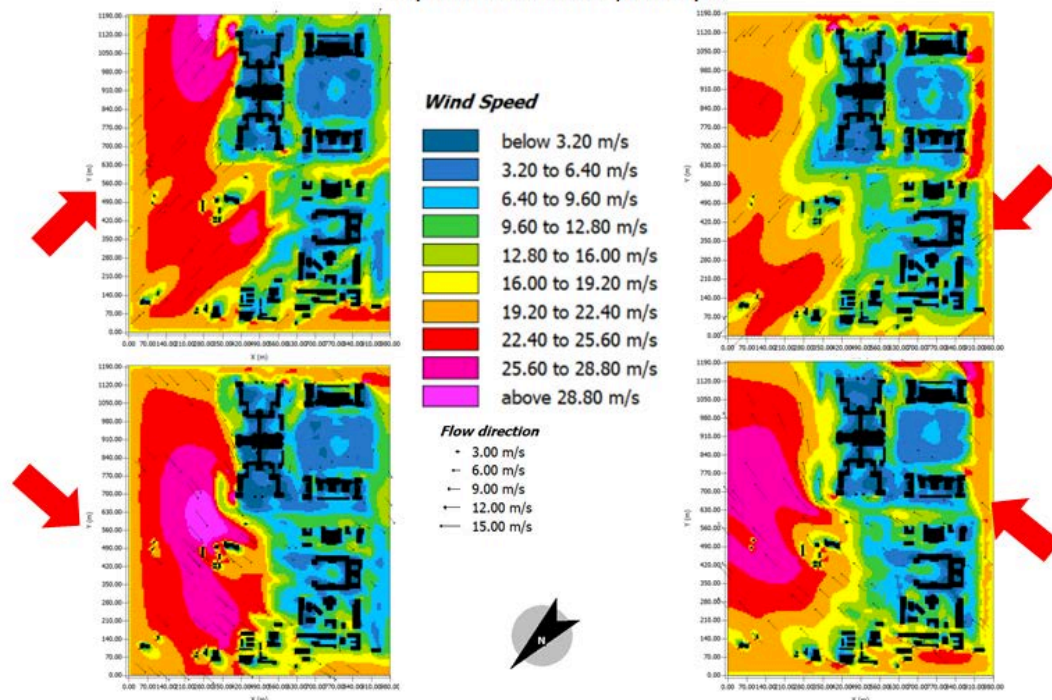


Рис. 1. Распределение ветрового поля на территории кампуса МГУ при различных направлениях ветра на высоте 1,5 м. Красными стрелками показано направление ветрового потока.

Эксперимент с изменением скоростей ветрового потока может показать как отдельные участки значительного возрастания значений скорости ветра, привязанные исключительно к событиям с повышенными до аномальных для Москвы значениям ветра, так и наоборот показать усиление ветра при любых входных данных. Такой результат может дать основание для информирования населения о потенциальной опасности именно данного участка рассматриваемой территории.

В качестве результатов данного исследования так же будут построены карты выходных параметров моделирования, будет проводиться статистический анализ распределения скорости ветра по данной территории и относительного усиления ветра при различных параметрах исходной скорости.

В настоящее время возможность исследования микроклиматических взаимодействий атмосферы в условиях городской застройки с подстилающей поверхностью – шаг вперед в области моделирования комфортности городской среды. Выявление особо опасных участков и точный прогноз распределения неблагоприятных погодных условий на микроуровне поможет предотвратить жертвы и сократить экономический ущерб. Поэтому важно прорабатывать известные участки городской застройки для валидации микроклиматических моделей, направленных на улучшение качества жизни в городской среде.

Исследование было выполнено при поддержке проекта РФФИ 19-35-70009 мол_а_вед. Работа С.С. Букина в части адаптации модели ENVI-met к условиям г.Москвы была поддержана проектом РНФ № 19-77-30012

Accuracy assessment of short-range forecast of heavy precipitations over the Kama river basin in 2019 with ICON and GFS atmospheric models

Shikhov A.N., Abdullin R.K.

Perm State University, Perm, Russia
E-mail: and3131@inbox.ru

Recent decades, there has been an increase in the contribution of convective precipitation to the total precipitation amount in the Northern Eurasia, which leads to the rise of the frequency of heavy rainfall events (Chernokulsky et al., 2019). In the second half of the summer 2019, the precipitation amount in the Western Ural region exceeded the climatic average values by 2–3 times. Heavy rainfalls caused a series of rain floods on the rivers, which caused substantial economic losses.

In this study, we estimated the accuracy of short-term (for 15–27 h) forecasts of heavy precipitation events which observed during 2019 in the Kama river basin with the use of two global numerical weather prediction (NWP) models: ICON (DWD, Germany) and GFS (NCEP, U.S.). Model forecasts and observed precipitation data from 95 weather stations were obtained for the period from May 1 to November 30, 2019.

In total, 59 heavy rainfall events (≥ 30 mm/12h), as well as two heavy snowfall events (≥ 20 mm/12h), were reported by weather stations during the period under consideration. According to the observations, 53 out of 61 events were related to the convective precipitation. The number of days with heavy precipitation is 30, and on July 15, heavy rainfall was recorded immediately at 7 weather stations.

NWP models data were resampled to 5 km grid cells using bilinear interpolation and then compared with weather stations data. We used the NWP models forecasts for 15 and 27 hours, obtained from 12.00 UTC. All dates when heavy rainfalls (≥ 30 mm/12h) were observed at the weather stations, as well as when such events were forecasted according to the NWP models (at least at one weather station) have been considered. Two metrics such as the Critical Success Index (CSI) and the Extreme Dependency Score (EDI) were used to evaluate the forecast accuracy: The calculated CSI and EDI values are shown in Table 1.

Table 1. Accuracy assessment of short-range forecasts of heavy precipitations with ICON and GFS models.

NWP model	True Positive	False Negative	False Positive	True Negative	SCI	EDI
ICON	11	51	17	3436	0.14	0.51
GFS	18	43	5	3450	0.28	0.69

According to the table 1, the models underestimated the precipitation intensity. The number of false negative forecasts substantially exceeded the same of true positive forecasts and false alarms. Moreover, according to the NWP models data, some heavy rainfall events (≥ 30 mm/12h) are not reproduced not only at the weather station, but also between them. The proportion of such cases was 23% and 33% according to the ICON and GFS models respectively. This indicates a more substantial underestimation of precipitation amount according to the GFS model comparing with the ICON model. The shift of the simulated areas with heavy precipitation relative to their actual location also affects the forecast accuracy.

The key factor determining the accuracy of heavy rainfall forecasts by the global NWP models is the nature of the event. Indeed, local convective events (when heavy precipitation was observed only at one weather station), were not reproduced by both NWP models. In turn, if heavy rainfalls (convective or stratiform) covered large areas, the proportion of false-positive forecasts sharply increases. In general, the obtained SCI and EDI values indicate a moderate accuracy of heavy rainfall forecasts according to the ICON and GFS models.

The study was funded by the RF President grant number MK-313.2020.5

REFERENCES:

1. Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I.I. and Semenov V.A. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // *Environ. Res. Lett.* 2019, Vol 14, Art. No. 045001.

Оценка достоверности краткосрочного прогноза сильных осадков в 2019 г. в бассейне р. Камы по моделям ICON и GFS

Шихов А.Н., Абдуллин Р.К.

Пермский государственный университет, Пермь, Россия
E-mail: and3131@inbox.ru

В последние десятилетия на большей части Северной Евразии отмечается рост доли ливневых осадков в годовой сумме осадков. При этом годовая сумма осадков за период с 1966 по 2016 гг. также статистически значимо увеличилась в ряде регионов, в том числе на Урале (Chernokulsky et al., 2019). Эти тенденции подтверждаются в частности тем, что в последние годы в регионе зафиксировано несколько случаев экстремально сильных осадков с суточной суммой ≥ 100 мм.

Во второй половине лета 2019 г. в ряде районов Пермского края и Республики Коми выпало наибольшее количество осадков за всю историю инструментальных наблюдений. Например, в Перми за июль и август 2019 г. выпало 368 мм осадков при норме 146 мм, в Оханске только в июле выпало 246 мм осадков (около 350% от месячной нормы), в Ухте в июле 2019 г. выпало 284 мм (417% от месячной нормы).

Экстремальные осадки вызвали формирование нескольких волн дождевых паводков, наиболее высокие из которых прошли 16-19 июля на реках бассейна Верхней Камы и правобережных притоках Камского водохранилища. На трех гидропостах Пермского края уровни воды превысили высшие исторически наблюдаемые в период дождевых паводков (<http://svgimet.ru/?p=36704>). В селах Кува, Юрла и в г. Кудымкаре были затоплены жилые дома, проводилась эвакуация населения (Аномальные гидрометеорологические..., 2019). Среднемесячный приток воды в Камское водохранилище в августе 2019 г. оказался наибольшим за весь период наблюдений. Экстремальное количество осадков во второй половине лета 2019 г. повлекло переувлажнение почвы на обширной территории и чрезвычайную ситуацию для сельского хозяйства в Пермском крае.

В настоящей работе рассмотрены оценки достоверности краткосрочных (с заблаговременностью 15-27 ч) прогнозов сильных осадков, наблюдавшихся в течение 2019 г. на Урале и в Предуралье по данным глобальных моделей численного прогноза погоды (ЧПП), основные характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики моделей ЧПП.

Модель ЧПП	Разработчик модели	Шаг сетки, км	Число вертикальных уровней	Шаг сетки выходных данных	Ссылка на получение данных
GFS	Национальный центр по прогнозированию окружающей среды (NCEP), США	13	64	0,25°	http://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/
ICON	Метеослужба Германии (DWD)	13	90	0,125°	http://ftp-outgoing2.dwd.de/gds/ICON/grib/europe/

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫБОРКИ СЛУЧАЕВ

В качестве области анализа был выбран бассейн р. Камы. Данные об осадках были получены с 95 метеостанций Росгидромета, из которых 72 расположены в пределах бассейна и 23 – в непосредственной близости от его границ. Рассматривался период с 1 мая по 30 ноября 2019 г.

Всего за рассматриваемый период метеостанциями было зафиксировано 59 случаев сильного дождя с интенсивностью ≥ 30 мм/12ч, а также два случая очень сильного снега (≥ 20 мм/12ч). По данным метеостанций, в 8 случаях осадки были обложного характера, в остальных 53 случаях – ливневого. Отмечено 7 случаев опасного явления «очень сильный дождь» (≥ 50 мм/12ч). Общее количество дней с сильными осадками – 30, причем 15 июля сильные осадки отмечены сразу на 7 метеостанциях. Большинство случаев сильных дождей зафиксировано в период между 29 июня и 20 августа, когда над Европейской Россией господствовала высотная ложбина, а Предуралье часто оказывалось под влиянием малоподвижных атмосферных фронтов или активных южных циклонов.

Сравнение сумм осадков по данным метеостанций и по моделям производилось без использования объектно-ориентированного подхода, так как он обычно используется при оценке прогнозов региональных моделей (Вельтищев и др., 2008). Данные моделей ЧПП были пересчитаны на сетку с размером ячейки 5 км методом билинейной интерполяции. Оценивались прогнозы от 12 ч Всемирного скоординированного времени (BCV) с заблаговременностью 15 и 27 ч. Рассмотрены все даты, когда по данным метеостанций зафиксированы случаи сильных дождей (≥ 30 мм/12ч), а также когда такие случаи не отмечались, но прогнозировались по данным моделей хотя бы на одной метеостанции.

Для оценки успешности прогноза использованы две метрики – индекс критического успеха (Critical Success Index, CSI) и оценка экстремальной зависимости (Extreme Dependency Score, EDI). Более подробная информация об этих критериях приведена в работе (Муравьев и др., 2015). Важно отметить, что EDI является наиболее простым из показателей качества прогнозов экстремальных явлений, который не зависит от частоты явления. Метрики CSI и EDI рассчитываются на основе значений таблицы сопряженности прогнозов и наблюдений рассматриваемого явления по следующим формулам:

$$SCI = TP / (TP + FP + FN)$$

$$EDI = \frac{\log F - \log H}{\log F + \log H}$$

Для расчета индекса EDI предварительно вычисляется доля попаданий H и доля ложных тревог F :

$$H = TP / (TP + FN)$$

$$F = FP / (FP + TN)$$

где TP – число оправдавшихся прогнозов (попаданий), FN – число пропусков явления, FP – число ложных тревог, TN – число верных прогнозов отсутствия явления. Оценка успешности прогнозов на основе метрик CSI и EDI приведена в табл. 2.

При построении таблицы сопряженности как оправдавшиеся прогнозы (попадания, H) рассматривались все случаи, когда фактическое и прогностическое количество осадков превышало 30 мм. К ним были добавлены случаи, когда прогностическое количество осадков меньше 30 мм, но отличается от фактического менее чем в 1,5 раза. Например, если факт – 32 мм, а прогноз – 28 мм, такой прогноз оценивался как оправдавшийся.

Как следует из табл. 2, в большинстве рассмотренных случаев модели недооценивают интенсивность осадков. На это указывает значительное преобладание числа пропусков явления над суммой успешных прогнозов и числа ложных тревог. Более того, по данным моделей в ряде случаев сильные осадки (≥ 30 мм/12ч) не воспроизводятся не только в точке, где они наблюдались, но и между метеостанциями. Доля таких случаев по модели ICON составила 23%, а по модели GFS – 33%. Это в совокупности с меньшим числом ложных тревог указывает на более существенное занижение осадков по модели GFS в сравнении с моделью ICON.

Таблица 2. Оценка краткосрочного прогноза сильных осадков по моделям ICON и GFS.

Модель ЧПП	TP	FN	FP	TN	SCI	EDI
ICON	11	51	17	3436	0.14	0.51
GFS	18	43	5	3450	0.28	0.69

Вторым фактором, негативно влияющим на точность прогноза, является смещение прогностических зон осадков относительно их фактического положения. Влияние этого фактора можно было бы уменьшить, если оценивать сумму осадков не непосредственно в ячейке, соответствующей метеостанции, а в пределах определенного радиуса вокруг метеостанции.

Ключевым фактором, определяющим воспроизводимость случаев сильных осадков глобальными моделями ЧПП, является локальность выпадения осадков. В случаях с локальными ливнями, когда сильные осадки (≥ 30 мм/12ч) отмечались только на одной метеостанции, доля успешных прогнозов была нулевой по обоим моделям. В свою очередь в случаях, когда сильные осадки охватывали обширные территории (как правило, летом 2019 г. они были связаны с южными циклонами), значительной была доля ложно-положительных прогнозов.

Полученные значения критериев SCI и EDI указывают в целом на невысокую воспроизводимость случаев сильных осадков по моделям ICON и GFS в летний период 2019 г. Более высокие оценки оправданности прогноза могут быть получены при корректировке методики оценивания с включением элементов объектно-ориентированного подхода.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ № МК-313.2020.5

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бережная Т.В., Голубев А.В., Паришина Л.Н. Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в июле 2019 г. // *Метеорология и гидрология*. 2019. №10. С. 132–141.
2. Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Бундель А.Ю., Дмитриева Т.Г., Смирнов А.В. Верификация прогнозов метеорологических явлений со значительными воздействиями в районе проведения Олимпиады «Сочи-2014». Часть I. Детерминированные прогнозы в тестовый период // *Метеорология и гидрология*. 2015. №9. С. 31–48.
3. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д., Павлюков Ю.Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 1. С. 5–18.
4. Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I.I. and Semenov V.A. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // *Environ. Res. Lett.* 2019, Vol 14, Art. No. 045001.

Environments and modelling of two destructive squalls (derechoes) in the European Russia in summer 2010

¹Shikhov A.N., ²Chernokulsky A.V., ³Sherstyukov B.G., ²Kurgansky M.A., ¹Kalinin N.A., ¹Bykov A.V.

¹Perm State University, Perm, Russia

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Moscow, Russia

³All-Russian hydro-meteorological information institute – World Data Center, Obninsk, Russia

E-mail: and3131@inbox.ru

The summer of 2010 in the European part of Russia (ER) was remarkable due to extreme heat wave, drought and catastrophic wildfires (Lupo et al., 2012). But it's less well known, that at the same period ER was affected by several devastating convective storms, which caused fatalities, substantial economic losses and unprecedented damage to forests. Two storms occurred June 27, 2010 in Yaroslavl and Wologda regions and July 29, 2010 in the northwestern part of the ER and Finland have a particularly high intensity. They totally damaged ~125 thous. ha of forests in Russia and Finland (38.5 of the entire area of stand-replacing windthrows in the ER over 1987-2017). The length of damage track (> 600 km) allows you to classify both storms as derechos. Derechos are determined as a large-scale and long-lived convective windstorms (a family of downbursts), producing by an extratropical convective system (Johns and Hirt 1987). In this study, we investigated the atmospheric conditions, development and evolution of storms, estimated storm-related forest damage based on Landsat images and performed numerical simulation in cloud-resolving mode.

The synoptic-scale environments of storms formation have many similarities. Storms occurred in a transition zone between long-lived blocking settled in the ER and a deepening trough on the west side of it. In both cases, the axis of tropospheric ridge shifted east and increasing horizontal pressure gradient enhanced the advection of warm and moist airmass to the northern part of ER. Both derechos were formed in the dates of termination of the blocking events, determined by 500 hPa height values (Lupo et al., 2012). In further studies, this pattern may be considered in relation to other similar blockings.

Derecho-producing mesoscale convective systems (MCSs) formed on the cold fronts with strong temperature gradients, under moderate thermodynamic instability and precipitable water, but very high vertical wind

shear (DLS >20 m/s). Previously, the key contribution of the DLS to derechos formation has been emphasized for the U.S. (Weisman and Trapp, 2003) and Europe (Celiński-Mysław et al., 2019).

Considering the results of numerical simulations, we can conclude that the WRF model started on ERA-5 initial data reproduced both storms more successfully than with CFSR initial conditions. At the storm 27.06.2010, both simulations reproduced a typical squall line instead of derecho-producing storm, and wind gusts are significantly underestimated. At the event 29.07.2010, the model successfully reproduced the main features of the MCS life cycle, but CFSR-based simulation substantially underestimated wind speed and affected area. All numerical experiments do not confirm the presence of mesovortices embedded in MCSs.

The study was funded by the RFBR grant number 20-35-70044.

REFERENCES:

1. Celiński-Mysław D., Palarz A. and Łoboda L. Kinematic and thermodynamic conditions related to convective systems with a bow echo in Poland // *Theoretical and Applied Climatology*, 2019. Vol. 137, PP. 2109–2123.
2. Lupo A.R., Mokhov I.I., Akperov M.G., Chernokulsky A.V., and Athar H. A dynamic analysis of the role of the planetary- and synoptic-scale in the summer of 2010 blocking episodes over the European part of Russia // *Advances in Meteorology*, 2012, Art. No. 584257.
3. Johns R.H and Hirt W.D. Derechos: Widespread convectively induced windstorms // *Weather and Forecasting*, 1987, Vol. 2, PP 32-49.
4. Weisman M L and Trapp R J 2003 Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part I: Overview and sensitivity to environmental vertical wind shear. *Mon. Wea. Rev.* 131 2779–2803.

Условия возникновения и моделирование двух разрушительных шквалов (деречо) в Европейской России летом 2010 г.

¹Шихов А.Н., ²Чернокульский А.В., ³Шерстюков Б.Г., ²Курганский М.А., ¹Калинин Н.А.,
¹Быков А.В.

¹Пермский государственный университет, Пермь, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, Обнинск, Россия

E-mail: and3131@inbox.ru

Лето 2010 г. на Европейской территории России было самым жарким в истории метеорологических наблюдений в связи с влиянием долгоживущего блокирующего антициклона (Lupo et al., 2012). Помимо катастрофической засухи и лесных пожаров, летом 2010 г. наблюдалось несколько конвективных штормов редкой интенсивности, которые вызвали гибель людей, значительный экономический ущерб и крупномасштабные нарушения лесного покрова. По данным (Potapov et al., 2015, Shikhov et al., 2020) площадь сплошных ветровалов в лесах ЕТР, произошедших летом 2010 г., оказалась в несколько раз больше, чем за любой другой год в период с 1987 по 2017 гг.

Наиболее разрушительные шквалы летом 2010 г. прошли 27 июня через Ярославскую и Вологодскую области и 29-30 июля через территорию Новгородской, Ленинградской областей, Карелии и Финляндии. Второй случай известен как шторм Аста (Suvanto et al., 2016), в результате его прохождения в Ленинградской области погибли как минимум 13 человек и 6 пропали без вести (<https://iz.ru/news/475440>). Площадь только сплошных ветровалов в лесных массивах ЕТР была оценена в 50 тыс. га и 63.9 тыс. га соответственно в результате шквалов 27 июня и 29-30 июля. Это составляет свыше 38% от общей площади сплошных ветровалов в лесной зоне ЕТР за период 1987-2017 гг. (Shikhov et al., 2020). По данным лесохозяйственных служб регионов (Государственный доклад, 2009-2011), которые учитывают не только сплошные, но и частичные ветровалы, площадь поврежденных лесов оказалась больше в 1,5-2 раза. В Финляндии шквал в ночь на 30 июля 2010 г. повалил 8.1 млн. м³ леса (Astola et al., 2014). Таким образом, шквалы 27 июня и 29 июля 2010 г. можно считать исключительными по интенсивности на ЕТР за последние 30 лет.

В настоящей работе проведен анализ синоптических и мезомасштабных условий возникновения шквалов, а также оценена возможность их воспроизведения мезомасштабной численной моделью атмосферы WRF.

Для анализа использованы данные метеостанций Росгидромета, а также отчеты региональных управлений гидрометслужбы (<http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=582>) и данные из Европейской базы опасных явлений погоды ESWD (<https://eswd.eu/>). Также были уточнены площади ветровалов, вызванных шквалом 29 июля 2010 г. на территории Финляндии. С учетом этих данных, общая площадь сплошных ветровалов, вызванных шквалом 29 июля 2010 г. составляет около 75 тыс. га.

Для синоптического и мезомасштабного анализа получены данные реанализов CFS (Saha et al., 2010) и ERA-5 (ERA-5 data documentation). По данным реанализов рассчитаны диагностические переменные, характеризующие конвективную неустойчивость и сдвиг ветра (табл. 1).

Таблица 1. Максимальные значения индексов неустойчивости при возникновении шквалов 27.06.2010 и 29.07.2010 в радиусе 100 км вокруг трека ветровала. В числителе – по данным реанализа CFS, в знаменателе – по данным реанализа ERA-5.

Дата, время	TT	K	MU CAPE	SWEAT	DLS	MLS	LLS	WMAX- SHEAR	ENI	PREC- WAT
27.06.2010 8-15 ч BCB	52/51	37/35	1670/ 534	404/288	27/17	23/18	16/13	1250/547	1.8/ 0.2	35.1/ 37.8
29.07.2010 17-23 ч BCB	53/54	36/38	1120/ 2291	421/342	30/21	28/19	18/14	970/1066	1.2/ 1.3	42.3/ 43.2

Проведено моделирование возникновения шквалов с помощью мезомасштабной модели атмосферы WRF. В качестве начальных и граничных условий для запуска модели использованы данные реанализов CFS и ERA-5. Моделирование производилось на сетке с горизонтальным шагом 3 км в расчетной области размером 2000×2000 км, что достаточно для воспроизведения глубокой конвекции без параметризации (Weisman et al., 2008). Вложенные сетки не использовались по причине большой протяженности пути изучаемых штормов (свыше 600 км). Результаты моделирования были сопоставлены с данными наблюдений метеостанций, контурами ветровалов и снимками Terra/Aqua MODIS.

Синоптические условия возникновения шквалов 27 июня и 29 июля 2010 г. имеют ряд общих особенностей. Оба шквала возникли на западной периферии долгоживущего блокирующего антициклона с центром над ЕТР, вдоль которой усиливался заток тропического воздуха. При этом ось высотного гребня значительно смещалась к востоку. Мезомасштабные конвективные системы (МКС), с которыми были связаны шквалы, сформировались на холодных фронтах со значительным градиентом температуры (свыше 8° C/500 км), на фоне умеренной конвективной неустойчивости и влагосодержания воздушной массы, но при сильном вертикальном сдвиге ветра в слое 0–6 км (DLS >20 м/с). Ранее ключевое влияние этого параметра на возникновение долгоживущих МКС со шквалами было установлено для территории США (Weisman and Trapp, 2003) и Европы (Celiński-Mysław et al., 2019). Продолжительность существования обоих МКС со шквалами составила свыше 6 ч, а протяженность полосы разрушений превысила 600 км. Это позволяет отнести рассматриваемые случаи шквалов к категории деречо – долгоживущих МКС, вызывающих шквалистые ветра (обычно в виде нисходящих порывов) с большим охватом территории и протяженностью полосы разрушений свыше 400 км (Johns and Hirt, 1987).

В случае 27.06.2010 максимум интенсивности шквала отмечался около 11.00 по BCB, что соответствует дневному максимуму развития конвекции. В этот период шквал проходил через Первомайский район Ярославской области и Грязовецкий район Вологодской области, где вызвал сплошной ветровал в полосе шириной до 10 км. В случае 29.07.2010 шквал развивался в вечернее и ночное время, периодически ослабевая и затем вновь усиливаясь. Наиболее крупные ветровалы обнаружены на северо-востоке Нижегородской области, в Приозерском районе Ленинградской области и вблизи границы Карелии и Финляндии.

Основной вывод по результатам проведенного моделирования с помощью модели WRF состоит в том, что модель лучше воспроизводит эволюцию МКС при использовании данных реанализа ERA-5 в качестве начальных условий. В случае 27.06.2010, по результатам моделирования воспроизводится линия шквалов без доминирующего шторма. В результате скорость порывов ветра существенно недооценивается (максимальные значения составляют 31 м/с, а преобладающие – 20–26 м/с). В случае 29.07.2010 модель WRF успешно воспроизводит основные особенности жизненного цикла МКС. При использовании данных CFS в качестве начальных условий скорость ветра при шквале, а также площадь, подвергшаяся его воздействию, существенно недооцениваются. В то же время при запуске модели WRF на начальных данных ERA-5 получены более реалистичные оценки максимальной скорости ветра при шквале – от 28 до 40 м/с (по данным метеостанций отмечены порывы ветра до 30 м/с). Результаты моделирования не подтверждают наличие мезоциклонов в МКС. В то же время по спутниковому снимку признаки мезоциклона в виде долгоживущего пробоя тропопаузы прослеживаются в случае 27.06.2010 г. (рис. 1, а) Пример сопоставления результатов моделирования со спутниковыми данными Terra/Aqua MODIS приведен на рис. 1.

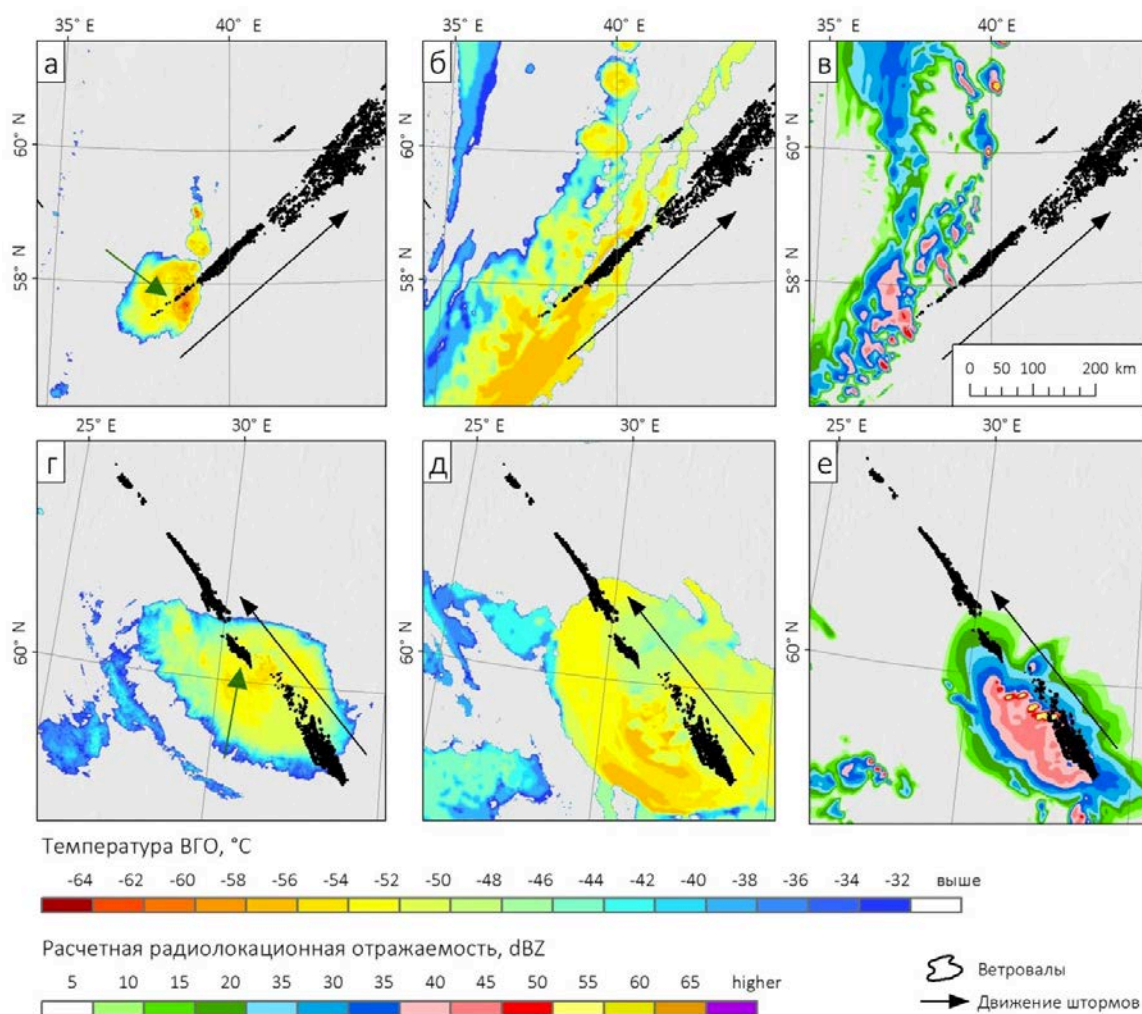


Рис. 1. Температура ВГО по спутниковым данным, температура ВГО по модели WRF и максимальная отражаемость по модели WRF (с начальными условиями ERA-5) при прохождении шквалов в 10.00 BCB 27.06.2010 г. (а, б, в) и в 19.30 BCB 29.07.2010 г. (г, д, е).

Исследование выполнено при поддержке проекта РФФИ № 20-35-70044-а и РНФ № 18-77-10076

ЛИТЕРАТУРА:

1. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Вологодской области в 2011 г. URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/doklad11/text.pdf>.
2. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Ярославской области в 2009-2010 гг. URL: https://www.yarregion.ru/depts/doosp/DocLib/Doklady_OOS/.
3. Astola H., Molinier M., Simons M. and Susila P. Forest stem volume and storm damage mapping in Finland and Russia // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2014, Art. No. 6946932.
4. Celiński-Mysław D., Palarz A. and Łoboda L. Kinematic and thermodynamic conditions related to convective systems with a bow echo in Poland // *Theoretical and Applied Climatology*, 2019. Vol. 137, PP. 2109–2123.
5. Doswell C.A III and Schultz D.M. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms // *Electronic Journal of Severe Storms Meteorology*, 2006, Vol. 1, PP. 1–14.
6. Johns R.H and Hirt W.D. Derechos: Widespread convectively induced windstorms // *Weather and Forecasting*, 1987, Vol. 2, PP 32-49.
7. Lupo A.R., Mokhov I.I., Akperov M.G., Chernokulsky A.V., and Athar H. A dynamic analysis of the role of the planetary- and synoptic-scale in the summer of 2010 blocking episodes over the European part of Russia // *Advances in Meteorology*, 2012, Art. No. 584257.
8. Potapov P.V, Turubanova S.A, Tyukavina A., Krylov A.M, McCarty J.L, Radeloff V.C. and Hansen M.C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // *Remote Sensing of Environment*, 2015. Vol. 159, PP. 28–43

9. Saha S, Moorthi S, Pan H.-L, Wu X, Wang J, Nadiga S, Tripp P, Kistler R, Woollen J, Behringer D, Liu H, Stokes D, Grumbine R, Gayno G, Wang J, Hou Y.-T, Chuang S, Van Den Dool H, Kumar A, Wang W, Long C, Chelliah M, Xue Y, Huang B, Schemm J.-K, Ebisuzaki W, Lin R, Xie P, Chen M, Zhou, S, Higgins W, Zou, C.-Z, Liu Q, Chen Y, Han, Y, Cucurull L, Reynolds R W, Rutledge G and Goldberg M. The NCEP climate forecast system reanalysis // *Bulletin of Amer. Meteor. Society*, 2010, Vol. 91(8), PP. 1015–1057.
10. Shikhov A.N., Chernokulsky, A.V., Azhigov, I.O. and Semakina A.V. A satellite-derived database for stand-replacing windthrows in boreal forests of the European Russia in 1986–2017 // *Earth System Science Data Discussion*, <https://doi.org/10.5194/essd-2020-91>, in review, 2020.
11. Suvanto S., Henttonen H.M., Nöjd P. and Mäkinen H. Forest susceptibility to storm damage is affected by similar factors regardless of storm type: Comparison of thunder storms and autumn extra-tropical cyclones in Finland // *Forest Ecology and Management*, 2016, Vol. 381, PP. 17–28.
12. Weisman M.L. and Trapp R.J. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part I: Overview and sensitivity to environmental vertical wind shear // *Monthly Weather Review*, 2003, Vol. 131, PP. 2779–2803.

Numerical simulation of intense precipitation in the Moscow region: a case study of heavy rainfall event on 30th June 2017

^{1,2}Yarinich Yu.I., ^{2,3,4}Varentsov M.I., ¹Platonov V.S., ^{3,1}Stepanenko V.M.

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Moscow, Russia

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia

⁴Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

E-mail: julia.yarinich@yandex.ru, mvar91@gmail.com, vplatonov86@gmail.com, stepanen@srcc.msu.ru

The paper considers the physical and synoptic causes of extreme rainfall on June 30, 2017 in the central part of the European territory of Russia, which determined the record precipitation amount per day in Moscow (65 mm) since 1970. Based on meteorological observations, radar data and reanalysis ERA5 [Hersbach et al., 2020] we showed that rainfall was associated with three mesoscale convective systems (two squall lines [Markowski, Richardson, 2010] and one meso-beta scale convective system [Veltishchev, 1990]). These systems arose in the warm sector of the cyclone in a strip of anomalously high moisture content for the considered region (with a maximum value of $41.5 \text{ kg} / \text{m}^2$ exceeding the 0.995 percentile in the data of sounding over Moscow [Durre et al., 2006] for the period 1957 – 2017). An analysis of the water vapor balance components using ERA5 reanalysis showed that advection of water vapor was the main factor in the appearance of the quasilinear region of an extremely high moisture content. A smaller but very noticeable role was played by evaporation from the surface of the earth.

For a more detailed study of an extreme precipitation's formation mechanisms the mesoscale non-hydrostatic model COSMO 5.05 [Doms et al., 2015] with 3 km grid was used. The simulation result confirmed an idea of the significant role of evaporation from the earth's surface in precipitation intensity: a 10 times decrease in soil moisture in the initial conditions led to a three times decrease in the daily amount of precipitation in the study area.

The impact of urban environment was also investigated. Coupling a bulk urban canopy model TERRA_URB [Wouters et al., 2016] to COSMO did not cause a noticeable increase in the amount of precipitation in the Moscow region, but led to some redistribution within it: a daily precipitation amount increased on the leeward side of the Moscow.

REFERENCES:

1. Doms G., Baldauf M. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part I: Dynamics and Numerics. COSMO-Model 5.05. Offenbach, 2015, 158 p., <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/cosmoDyncsNumcs.pdf>
2. Durre I., Vose R. S., Wuertz D. B. Overview of the integrated global radiosonde archive // *Journal of Climate*. – 2006. – T. 19. – №. 1. – С. 53-68
3. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2020.

4. Markowski P., Richardson Y. *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. Penn State University, USA. 2010. – 407 p
5. Veltishchev N.F., *Mesometeorology and Short-Range Forecasting, Lectures Notes and Student's Workbook for Training Class 1 and Class 2 Meteorological Personal*, No 701, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 163 p, 1990
6. Wouters H., Demuzere M., Blahak U., Fortuniak K., Maiheu B., Camps J., Tielemans D., van. Lipzig N.P.M. *Efficient urban canopy parametrization for atmospheric modelling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian Summer // Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9. P. 3027–3054

Численное моделирование интенсивных осадков в Московском регионе на примере случая 30 июня 2017 года

^{1,2}Ярынич Ю.И., ^{2,3,4}Варенцов М.И., ¹Платонов В.С., ^{3,1}Степаненко В.М.

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

⁴Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия
E-mail: julia.yarinich@yandex.ru, mvar91@gmail.com, vpatonov86@gmail.com, stepanen@srcc.msu.ru

Значительная часть опасных явлений погоды связана с мезомасштабными циркуляциями и, прежде всего, с системами глубокой конвекции. На сегодняшний день прогноз таких явлений вызывает ряд трудностей по причине их малого пространственно-временного масштаба, значительного влияния стохастических процессов, явное воспроизведение которых современными численными моделями не осуществимо, а также недостаточной изученности механизмов возникновения мезомасштабных конвективных систем (МКС). Именно поэтому подробное исследование наблюдаемых экстремумов в каждом отдельно взятом случае может быть весьма полезным.

Целью данной работы является анализ метеорологических условий в центральной части Европейской территории России (ЕТР) 30 июня 2017 года и определение физико-синоптических механизмов экстремального ливня, определившего рекордное для Москвы количество осадков за сутки в июне с 1970 года (65 мм).

МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ

В работе использовался широкий спектр данных, полученных непосредственно контактными измерениями (данные автоматической метеостанции метеорологической обсерватории МГУ; данные сети метеостанций Росгидромета; данные радиозондирования атмосферы), средствами дистанционного зондирования (радиолокационные данные); реанализа (ERA5 [Hersbach et al., 2020]) и моделирования (мезомасштабной негидростатической модели COSMO версии 5.05 [Doms et al., 2018]).

Для определения факторов, способствовавших возникновению интенсивных осадков, с использованием данных реанализа ERA5 были оценены компоненты уравнения баланса водяного пара в атмосфере [Матвеев, 1984] в пределах Московского региона (54–57° с.ш., 35–40° в.д.): интегральные значения удельной влажности атмосферы (по объёму), вертикального турбулентного потока водяного пара на поверхности (по поверхности), функции источников/стоков – количество осадков и изменение содержания жидких и твёрдых облачных частиц (по объёму); а также потоки водяного пара через границы рассматриваемого объёма

Для более подробного изучения механизмов формирования экстремального количества осадков в рассматриваемом случае была проведена серия численных экспериментов с моделью COSMO по динамической детализации данных реанализа ERA5 (реанализ использован в качестве начальных и граничных условий в модели). Область моделирования охватывала центральную часть ЕТР, шаг сетки составил 3 км. В четырёх сериях экспериментов, включающих по 11 экспериментов с различной заблаговременностью моделирования (50 – 60 часов до начала рассматриваемого периода), было исследовано влияние уменьшения влажности почвы в начальных условиях (в 10 раз до глубины 1.65 м) и подключения параметризации городской застройки TERRA_URB [Wouters et al., 2016] на количество осадков и структуру конвективных систем. В качестве базовой была выбрана серия экспериментов с исходной влажностью почвы и с отключённой параметризацией TERRA_URB.

СИНОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И МЕЗОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА МКС

По данным радиолокационных наблюдений показано, что за временной промежуток 12:00–22:00 МСК (9:00–19:00 UTC) 30 июня 2017 года в окрестностях Московского региона наблюдались три конвективные системы (рис. 1а), заметно проявившиеся в ходе приземных метеорологических величин (рис. 1б): две линии шквалов масштаба мезо- α (500 км) – под номерами 1 и 3, и одна гряда кучево-дождевых облаков масштаба мезо- β (60 км) – под номером 2.

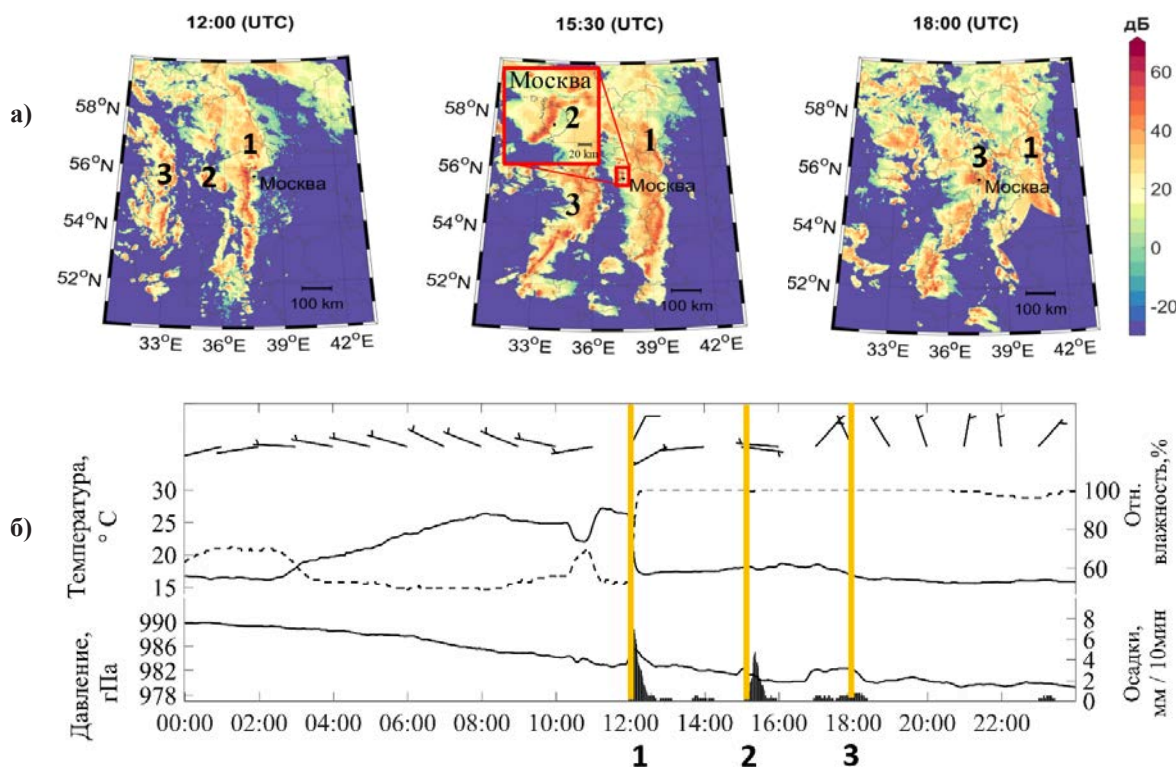


Рис. 1. (а) Максимальное значение радиолокационной отражаемости в столбе атмосферы (дБ) по данным ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» за 12:00, 15:30 и 18:00 UTC. (б) Основные приземные метеорологические величины по данным автоматической метеостанции Метеорологической обсерватории МГУ за сутки 30.06.2017. (1), (3) – линейные конвективные системы масштаба мезо- α , (2) – конвективная гряда масштаба мезо- β .

30 июня 2017 года описанные конвективные системы сформировались в тёплом секторе циклона на фоне наиболее благоприятного для их возникновения комплекса факторов [Markowski, Richardson, 2010]: неустойчивости атмосферы (энергия неустойчивости до 1200 Дж/кг), сдвига ветра в слое 0 – 6 км (20 м/с) и аномально высокого для рассматриваемого региона влагосодержания атмосферы (41.5 кг/м³), превышающего процентиль уровня 0.995 в данных аэрологического зондирования [Durre et al., 2006] на аэрологической станции Долгопрудный за летние сезоны 1957–2018 гг.

По результатам анализа компонент уравнения баланса водяного пара в атмосфере показано, что преобладающую роль в увеличении интегрального влагосодержания, определившего экстремум осадков над Московским регионом, сыграла адвекция водяного пара; меньшую, но заметную роль – испарение с поверхности земли.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Значимая роль испарения с поверхности также подтверждена серией численных экспериментов с моделью COSMO: десятикратное уменьшение влажности почвы в начальных условиях привело к значительному уменьшению количества осадков и их интенсивности (рис. 2д): в 3 раза по сравнению с базовой серией экспериментов (рис. 2б).

В экспериментах с уменьшенной влажностью также наблюдалось уменьшение области высокого влагосодержания атмосферы (рис. 2е) и соответствующее уменьшение области высокой радиолокационной отражаемости (рис. 2г), а также более разрозненное расположение конвективных ячеек, не оформленных в единую линейную систему.

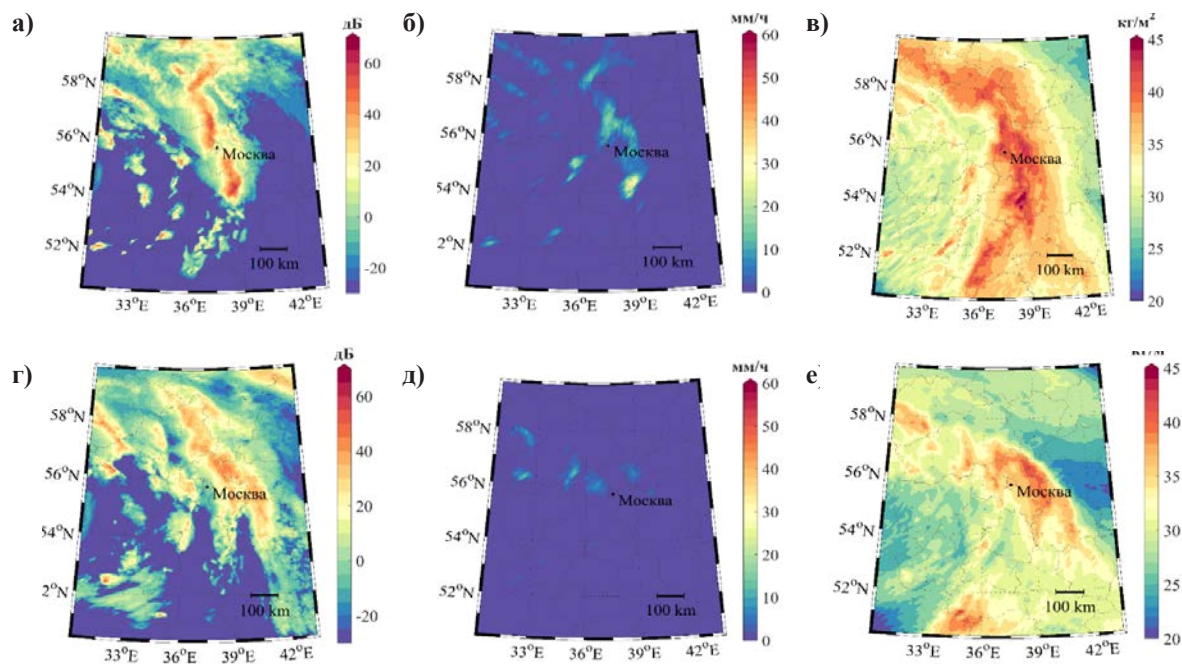


Рис. 2. (а),(г) – радиолокационная отражаемость на территории ЦФО в 15:00 UTC 30.06.2017, осреднённая по всем экспериментам серий: базовой серии и серии с изменённой влажностью почвы соответственно; (б),(д) – интенсивность осадков (аналогично); (в),(е) – интегральное влагосодержание атмосферы (по аналогии).

Подключение параметризации городской застройки TERRA_URB практически не повлияло на среднюю сумму осадков за сутки по Московскому региону, однако привело к некоторому их перераспределению в его пределах: в частности, к увеличению суточной суммы осадков с подветренной стороны Москвы как в случае с исходной влажностью почвы (рис. 3а), так и в случае с уменьшенной (рис. 3б).

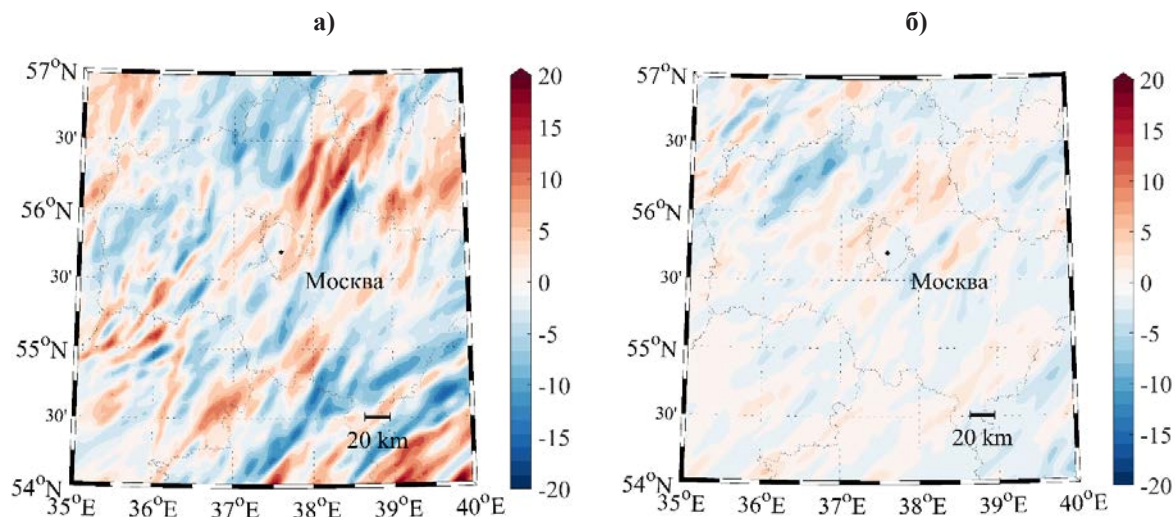


Рис. 3. Аномалия средней по серии экспериментов суммы осадков за сутки 30.06.17 на территории ЦФО (а) – разность между серией с исходной влажностью почвы и подключённой параметризацией TERRA_URB и базовой серией без городской параметризации. (б) – разность между сериями с изменённой влажностью почвы (с наличием города и без).

В целом же модель COSMO удовлетворительно воспроизвела динамику и структуру линий шквалов, прошедших над центральной частью ЕТР 30 июня 2017 года, а также связанный с ними экстремум осадков (64 мм), имеющий в модели иную, по сравнению с эмпирическими данными, локализацию (юго-восток Московской области). При этом в базовой серии экспериментов только первая линия шквалов (под номером 1 на рис. 1) имела упорядоченную квазилинейную структуру и сопровождалась выраженным экстремумом осадков. Вторая линия шквалов (под номером 3 на рис. 1) имела вид разрозненных очагов конвекции, с меньшей интенсивностью осадков, нежели наблюдалась в реальности. Обе

конвективные системы в модели проходили над Москвой с некоторым запаздыванием относительно наблюдавшихся – в среднем позже на 1-3 часа.

В рамках данной работы в дальнейшем планируется более детальное исследование влияния влажности почвы и испарения с поверхности земли на количество осадков конвективной природы и структуру мезомасштабных конвективных систем в центральной части Европейской территории России. Кроме того, открытым остаётся вопрос о значимости влияния аэродинамических и термодинамических эффектов, обуславливаемых крупными мегаполисами, на интенсивность явлений глубокой конвекции и связанные с ними осадки.

Благодарности. Результаты мезомасштабного моделирования получены посредством расчётов на многопроцессорном вычислительном комплексе МГУ им. М. В. Ломоносова – СК «Ломоносов-2». Авторы выражают благодарность коллективам ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» и Метеорологической обсерватории МГУ им. М. В. Ломоносова за предоставление доступа к данным.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Вельтищев Н.Ф. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование. ВМО № 701, сборник лекций. Л., Гидрометиздат, 1988. – 136 с.
2. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 751 с.
3. Doms G., Baldauf M. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part I: Dynamics and Numerics. COSMO-Model 5.05. Offenbach, 2018, 158 p., <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/cosmoDyncsNumcs.pdf>
4. Durre I., Vose R. S., Wuertz D. B. Overview of the integrated global radiosonde archive // *Journal of Climate*. – 2006. – Т. 19. – №. 1. – С. 53-68.
5. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2020.
6. Markowski P., Richardson Y. *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. Penn State University, USA. 2010. – 407 p
7. Wouters H., Demuzere M., Blahak U., Fortuniak K., Maiheu B., Camps J., Tielemans D., van. Lipzig N.P.M. Efficient urban canopy parametrization for atmospheric modelling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian Summer // *Geosci. Model Dev*. 2016. V. 9. P. 3027–3054

СЕКЦИЯ 3

Отклик наземных
экосистем Северной
Евразии
на климатические
изменения

SESSION 3

Response
of Terrestrial
Ecosystems
of Northern Eurasia
to climate change

Floristic diversity of vascular plants in the closed forests at the lower forest belt line of the Severo-Chuisky Range (Russian Altai)

Belova M.N., Timoshok E.E., Timoshok E.N., Rayskaya Yu.G.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia
E-mail: marina_dirks@mail.ru, timoshokee@mail.ru, ten80@mail.ru, raiskaya.julia@mail.ru

The problem of the dynamics of terrestrial ecosystems under the influence of climate change is currently one of the most important. Particularly dramatic climate changes affect forest ecosystems at the borders of ecological areas. Such ecosystems include border closed forests at the lower part of the forest belt of the Severo-Chuisky Range, bordering the mountain steppes of the Kurai depression.

126 species of vascular plants from 31 families and 79 genera were recorded in the border closed forests at the lower forest belt line. The leading families with the maximum number of species are 7 families combining 82 species (65.1%): *Poaceae*, *Rosaceae*, *Asteraceae*, *Ranunculaceae*, *Caryophyllaceae*, *Fabaceae*, *Cyperaceae*. The largest genera are *Carex*, *Potentilla*, *Artemisia*, *Poa* and *Spiraea*.

Species with large areas predominate in the chorological spectrum, and Eurasian species (49.2%) do among them. We identified four Altai-Sayan endemic species (*Delphinium mirabile*, *Festuca sphagnicola*, *Geranium laetum*, *Thymus schischkinii*) and five endemic of the Southern Siberia Mountains (*Bromopsis austrosibirica*, *Poa krylovii*, *Potentilla altaica*, *P. crebridens*, *Ranunculus propinguus*).

The mountain-plain plurizonal species (31.7%) prevail in the spectrum of ecological-geographical groups, mountain-plain forest species (23.8%) and mountain-plain steppe species (19.8%) have close values.

In the ecological spectrum, more than half of the species (61.1%) are mesophytes. Xerophytes also have a significant role (16.7%).

The vast majority of species (108 species, 85.7%) in the ecological-coenotic spectrum are found in several types of plant communities (mainly two or three). Forest (68.3%), meadow (66.7%), steppe (50%) and rocky (24.6%) species predominate among them. Coenotically faithful species found in one type of vegetation are represented by forest, steppe (6 species each), meadow (4 species) and rocky (2 species) species. 11 (8.7%) pasture species were identified in the floristic list.

The floristic list of the forests of medium altitude levels is characterized by the greatest species

richness (76 species, 60.3% of the total list) from 52 genera and 25 families. 63 species (50% of the total list) of 45 genera and 22 families were noted in the floristic list of the forests of low altitude levels. The floristic list of the upper level forests at the foot of the Bish-Yirdu mountain junction is characterized by the lowest species richness and includes 47 species (38.5% of the total list) from 41 genera and 21 families.

14 species are common for floristic lists of border forests of all altitude levels. Most of them have Eurasian areas (7 species), are mountain-plain forest (7 species) and belong to mesophytes (11 species). The Altai-Sayan endemic *Geranium laetum* and the South Siberian endemic *Potentilla crebridens* are noted among the common species. The value of the Jacquard Index is low for all pairs of floristic forest lists. Its greatest value (0.38) was calculated for lists of forests of medium and low altitude levels, the smallest one (0.17) did for lists of forests of high and low altitude levels. The Jacquard Index is 0.24 for forests of upper and middle altitude levels.

Thus, at present, the border closed forests at the lower part of the forest belt in the Kurai depression are characterized by rather high floristic diversity. Forest species predominate in the composition of the tree, shrub, and herb-shrub layers of forest communities at all altitude levels, but the participation of steppe species is also significant. While maintaining the current trend towards climate aridization, an increase in the number of steppe as well as synanthropic species and typical species of disturbed grazing habitats is possible.

Флористическое разнообразие сосудистых растений в сомкнутых пограничных лесах нижней части лесного пояса Северо-Чуйского хребта (Русский Алтай)

Белова М.Н., Тимошок Е.Е., Тимошок Е.Н., Райская Ю.Г.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: marina_dirks@mail.ru, timoshokee@mail.ru, ten80@mail.ru, raiskaya.julia@mail.ru

Проблема динамики наземных экосистем под влиянием изменений климата в настоящее время одна из важнейших. Особенно резко изменения климата влияют на лесные экосистемы на границах экологических ареалов. К таким экосистемам относятся пограничные сомкнутые леса нижней части лесного пояса Северо-Чуйского хребта, граничащие с горными степями Курайской котловины.

Курайская межгорная котловина имеет координаты 50°12'40" с.ш. и 87°54'18" в.д., и вытянута с юго-востока на северо-запад. С северо-восточной стороны она граничит с Курайским хребтом, с юго-западной – с Северо-Чуйским хребтом. Котловина находится на высотах 1500–1700 м над ур. моря и занимает площадь около 17,8 тыс. га. Климат резко континентальный. Продолжительность безморозного периода – 55-60 дней. Годовая сумма осадков – 150-200 мм. Сумма температур выше 10°C – 1100-1250.

Важнейшим лимитирующим климатическим фактором для существования лесных экосистем на границе леса и степи является соотношение температуры и осадков. К настоящему времени в межгорных котловинах Алтая отмечены наиболее резкие изменения климата и его аридизация – с 80-х гг. XX в. среднегодовая температура повысилась на 3,8°, а количество осадков с 2000 г. уменьшилось почти на 10% (Kharlamova et al., 2019).

Столь значительные изменения температуры на фоне уменьшения количества летних осадков могут привести к негативной трансформации флористического разнообразия пограничных лесных экосистем вследствие увеличения числа лесных пожаров, вырубок, перевыпаса скота, что при сохраняющихся тенденциях изменения климата может привести к антропогенно обусловленному повышению нижней границы леса.

До настоящего времени можно считать справедливым мнение Г.Н. Огуревой (1980) о том, что сведений о лесах нижней части лесного пояса Алтая очень мало. Специальных исследований сомкнутых лесов на границе леса и степи в межгорных котловинах Русского Алтая не проводилось. А.В. Кумина (1960) отмечала лишь, что нижняя граница леса, определяется сочетанием степных ассоциаций и лиственных лесов, представленных парковыми лиственными насаждениями по пологим нижним склонам и широким днищам долин, и лиственными перелесками в ложках южных склонов. А.В. Кумина предполагала, что во многих степных котловинах Алтая, покрытых в настоящее время сухой злаковой степью, лиственные леса на границе сомкнутых лесов и степи исчезли под влиянием хозяйственной деятельности человека.

Обследованные пограничные сомкнутые леса в нижней части лесного пояса Северо-Чуйского хребта приурочены к высотам 1650–1750 м над ур. м. (Бочаров, Савчук, 2015, Савчук, Луговская, 2019). В древесном ярусе сомкнутых лесов абсолютно преобладает лиственница сибирская; участие кедра си-

бирского и ели сибирской незначительно и отмечено в локальных местообитаниях – прирусловых участках горных рек Актру, Корумду, Тете. К настоящему времени все сомкнутые леса на границе лесного пояса и Курайской степи нарушены неоднократными пожарами и рубками, о чем свидетельствует наличие обгоревших пней срубленных деревьев.

Целью наших исследований явилось изучение современного состояния флористического разнообразия сосудистых растений в сомкнутых пограничных лиственничниках нижней части лесного пояса Северо-Чуйского хребта как основы его многолетнего мониторинга.

Материалом для данной работы послужили массивы многолетних оригинальных данных экспедиционных исследований пограничных сомкнутых лесов на границе лес-степь в Курайской межгорной котловине, заложенных по высотным эколого-ценотическим профилям на трех высотных уровнях. На наиболее высоко расположенных уровнях (1700-1740 м), у подножья горно-ледникового узла Биш-Иирду, обследованы пограничные лиственничные бруснично-зеленомошные и кедрово-лиственничные закустаренные вейниково-бруснично-зеленомошные леса, а на прирусловом участке р. Актру – фрагменты елово-кедровых разнотравных лесов. На средних высотах (1685-1725 м) обследованы лиственничные закустаренные разнотравные леса. На наиболее низких высотных уровнях (1670-1685 м над ур.м.) обследованы лиственничные закустаренные ирисово-разнотравные леса и лиственничные закустаренные разнотравные леса.

В пограничных сомкнутых лесах на нижней границе леса зарегистрировано 126 видов сосудистых растений из 31 семейства и 79 родов. Ведущими семействами с максимальным числом видов являются 7 семейств, объединяющих 82 вида (65,1%): *Poaceae*, *Rosaceae*, *Asteraceae*, *Ranunculaceae*, *Caryophyllaceae*, *Fabaceae*, *Cyperaceae*. Остальные 24 семейства включают 44 вида (34,9%): *Scrophulariaceae*, *Brassicaceae* (по 4 вида), *Lamiaceae*, *Pinaceae*, *Apiaceae*, *Geraniaceae* (по 3 вида), *Iridaceae*, *Rubiaceae*, *Caprifoliaceae*, *Violaceae*, *Polygalaceae* (по 2 вида), *Alliaceae*, *Boraginaceae*, *Campanulaceae*, *Ericaceae*, *Euphorbiaceae*, *Gentianaceae*, *Liliaceae*, *Onagraceae*, *Orchidaceae*, *Paeoniaceae*, *Polemoniaceae*, *Polygonaceae*, *Santalaceae* (по 1 виду). Доля одновидовых семейств значительна – 41,9% (от всех семейств). Наиболее крупными родами являются *Carex*, *Potentilla*, *Artemisia*, *Poa* и *Spiraea*. Доля одновидовых родов – 68,4% (от всех родов). Высокие проценты одновидовых и однородовых семейств свидетельствуют о гетерогенности флоры, сформировавшейся в основном за счет миграционных процессов.

В хорологическом спектре виды с обширными ареалами преобладают над азиатскими видами. Почти половина видов представлена евразийской группой (49,2%). Среди азиатских видов преобладают виды североазиатской и южносибирско-среднеазиатско-центральноазиатской групп (по 13,5%). Такое же значение имеют голарктические виды. Во флористическом списке выявлено 4 Алтае-Саянских эндемика (*Delphinium mirabile*, *Festuca sphagnicola*, *Geranium laetum*, *Thymus schischkinii*) и 5 эндемиков гор Южной Сибири (*Bromopsis austrosibirica*, *Poa krylovii*, *Potentilla altaica*, *P. crebridens*, *Ranunculus propinquus*).

В спектре эколого-географических групп преобладают виды, встречающиеся как в горах, так и на равнине. Наибольшую роль играют горно-равнинные плюризональные виды (31,7%), близкие значения имеют горно-равнинные лесные (23,8%) и горно-равнинные степные виды (19,8%). Интересно, что горная и альпийская группы (по 8,7%) имеют большее значение, чем горно-лесная и горно-степная (по 3,2%). Незначительна роль арктоальпийской группы (0,8%).

В экологическом спектре более половины видов (61,1%) являются мезофитами. Значительна роль ксерофитов (16,7%), меньше участие психрофитов (10,3%) и петрофитов (7,9%). Очень незначительно участие гигрофитов и галофитов (по 0,8%).

В эколого-ценотическом спектре абсолютное большинство видов (108 видов, 85,7%) встречается в нескольких типах растительных сообществ (в основном в двух-трех). Среди них преобладают лесные (68,3%), луговые (66,7%), степные (50%) и скальные (24,6%) виды. Ценотически верные виды, встречающиеся в одном типе растительности, представлены лесными, степными (по 6 видов), луговыми (4 вида) и скальными (2 вида) видами.

Во флористическом спектре выявлено 11 (8,7%) пастбищных видов.

По числу видов общий флористический список пограничных лесов, в основном лиственничников, на нижней границе леса Северо-Чуйского хребта несколько богаче, чем таковой высокогорных лиственничников этого хребта (102 видов, Тимошок и др., 2019). Общими для этих лесов являются 43 вида (34,1% от списка видов лесов нижней границы леса). Большинство общих видов имеют евразийские (37,2%), южносибирско-среднеазиатско-центральноазиатские (23,3%) и североазиатские (16,3%) группы ареалов. По поясно-зональной приуроченности общие виды являются горно-равнинными лесными (37,2%), горно-равнинными плюризональными (30,2%) и альпийскими (16,3%). По экологической приуроченности они в основном относятся к мезофитам (62,8%) и психрофитам (16,3%). Коэффициент видового сходства Жаккара сравниваемых лесов невысокий – 0,24.

Флористический список пограничных лесов нижней границы леса Северо-Чуйского хребта включает 15 видов (12,3%) постоянных видов лиственничных лесов Алтая (Куминова, 1960).

Сравнительный анализ флористических списков пограничных лесов нижней границы леса Северо-Чуйского хребта показал, что наибольшим видовым богатством характеризуется список лесов сред-

них высотных уровней – 76 видов сосудистых растений (60,3% от общего списка) из 52 родов и 25 семейств. Ведущими семействами являются *Poaceae*, *Asteraceae*, *Rosaceae*, *Ranunculaceae*, *Caryophyllaceae* и *Fabaceae*. Наиболее крупным родом является *Artemisia* с 5 видами. Здесь обнаружены два алтае-саянских и три южносибирских эндемика. В эколого-географическом спектре по сравнению с таковым общего флористического списка и списков лесов других высотных уровней выше доля горно-равнинных плуризональных и горных видов. Соотношение групп в экологическом спектре близко к таковому общего флористического списка. В эколого-ценотическом спектре этого флористического списка, по сравнению с таковыми других списков, отмечена наибольшая роль степных видов (57,9%). Ценотически верными являются лесные, степные, луговые (по 3 вида) и скальные (1 вид) виды. Пастбищных видов 5. Для этого флористического списка выявлено наибольшее число специфических видов, встречающихся только в данном списке, – 28 (22,2% от всего списка).

Во флористическом списке лесов низких высотных уровней было отмечено 63 вида (50% от общего списка) из 45 родов и 22 семейств. Ведущие семейства – *Rosaceae*, *Asteraceae*, *Poaceae*, *Caryophyllaceae*, *Fabaceae* и *Cyperaceae*. Выявлено три преобладающих рода (по 4 вида в каждом): *Carex*, *Artemisia* и *Potentilla*. Здесь найдены два эндемика Алтая и Саян и два эндемика гор Южной Сибири. В спектре эколого-географических групп по сравнению с таковым общего флористического списка и списков других высотных уровней выше процент горно-равнинных степных и горных степных видов. В экологическом спектре отмечено наибольшее участие ксерофитов и наименьшее – мезофитов, психрофитов и петрофитов. Эколого-ценотический спектр содержит наименьшую долю лесных (65,1%) и луговых (65,1%) видов. Среди ценотически верных видов в этом списке наибольшее среди всех списков число степных (4) и наименьшее – лесных (2) видов. Луговых и скальных видов, как и в списке лесов средних высотных уровней 3 и 1 вид, соответственно. Здесь отмечено наибольшее среди всех списков число (6) пастбищных видов. В этом списке выявлено 23 специфических вида (18,3% от всего списка).

Флористический список наиболее высокорасположенных пограничных лесов у подножья горного узла Биш-Иирду отличается наименьшим видовым богатством и включает 47 видов (38,5% от общего списка) из 41 рода и 21 семейства. Для этих лесов, в наиболее увлажненных условиях характерна другая структура семейственного и родового и видового спектров. Здесь выявлено наименьшее число ведущих семейств: *Poaceae*, *Rosaceae*, *Ranunculaceae* и *Fabaceae*. Ведущие роды отсутствуют. Здесь отмечены два алтае-саянских и два южносибирских эндемика. В эколого-географическом спектре по сравнению с общим флористическим списком и списками лесов более низких высотных уровней обращает на себя внимание значительно более высокое участие горно-равнинных лесных видов и наиболее низкое участие горно-равнинных степных видов. Выше доля альпийских и горно-лесных видов. В спектре экологических групп по сравнению с таковым общего списка и списков лесов средних и низких высотных уровней отмечена наибольшая доля мезофитов и наименьшая – ксерофитов, психрофитов и петрофитов. Эколого-ценотический спектр характеризуется наибольшими значениями лесных (91,5%) и луговых (68,1%) видов. Из ценотически верных видов отмечено наибольшее (5) среди флористических списков число лесных и наименьшее (1) степных видов. Для этих лесов зарегистрировано наименьшее число (3) пастбищных видов. Здесь также выявлено наименьшее число специфических видов – 21 (16,7% от всего списка).

Для флористических списков пограничных лесов всех высотных уровней общими являются 14 видов. Большинство из них имеют евразийский ареал (7 видов), являются горно-равнинными лесными (7 видов) и относятся к мезофитам (11 видов). Среди общих видов отмечен алтае-саянский эндемик *Geranium laetum* и южносибирский эндемик *Potentilla crebridens*.

Значение коэффициента видового сходства Жаккара для всех пар флористических списков лесов невысокое. Наибольшее его значение (0,38) рассчитано для списков лесов средних и низких высотных уровней, наименьшее (0,17) – для списков лесов высоких и низких высотных уровней. Для лесов верхнего и среднего высотных уровней коэффициент Жаккара составляет 0,24.

Таким образом, в настоящее время сомкнутые пограничные леса нижней части лесного пояса Курайской котловины на всех высотных уровнях характеризуются довольно высоким флористическим разнообразием. В составе древесного, кустарникового и травяно-кустарничкового ярусов лесных сообществ всех высотных уровней преобладают лесные виды, но также значительно участие степных видов. При сохранении современной тенденции к аридизации климата возможно увеличение количества степных, а также синантропных видов и видов, типичных для нарушенных выпасом местообитаний.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бочаров А.Ю., Савчук Д.А. Структура лесов и климатический отклик деревьев в зоне контакта «лес-степь» (Горный Алтай) // Журнал Сибирского Федерального университета. Биология. 2015. Т. 8. № 4 (20). С. 424-438.
2. Куминава А. В. Растительный покров Алтая. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1960. – 450 с.

3. Огуреева Г.Н. Ботаническая география Алтая. Монография. М.: Наука, 1980. 190 с.
4. Савчук Д.А., Луговская Н.С. Мониторинг возрастной структуры лиственничников зоны контакта леса и степи (Курайская котловина, Северо-Чуйский хребет, Горный Алтай) // XIII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатно-экологическому мониторингу: Тез. докл. / Под ред. М.В. Кабанова, Томск, 15–19 октября 2019 г. Томск: Аграф-Пресс, 2019. С. 226–227.
5. Тимошок Е.Е., Белова М.Н., Тимошок Е.Н., Скороходов С.Н. Биоразнообразие сосудистых растений в высокогорных лиственничниках Северо-Чуйского хребта // Проблемы региональной экологии. 2019. № 3. С. 23–27.
6. Kharlamova N., Sukhova M., Chlachula J. Present climate development in Southern Siberia: a 55-year weather observation record // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. 395. Vol. 48. P.1–6.

Dynamics of vegetation cover and quantitative paleoclimate reconstructions in Western Sayan mountains from Late Glacial to the present time according to palynological study of Yuzhno-Buybinskoe mire

Blyakharchuk T.A.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Россия

E-mail: blyakharchuk@mail.ru

The integration of fossil-based vegetation reconstructions with modeling and the projection of Earth's future climate and vegetation in light of anthropogenic global warming are key topics in the earth sciences (IPCC, 2013). In this research we present results of palaeopalynological research of Buibinskoye Mire, located in central part of the Western Sayan Mountains in Alati-Sayan mountain region in south Siberia (Russia). This present day moss mire originated from lake and most of its 600 cm deposits are composed by lake sediments - gyttja. Sedge-moss peat forms only upper 130 cm of sediments. In common peat and lake's sediments cover without interruption Late Glacial and Holocene. Five radiocarbon dates were obtained by AMS method for sediment section. Spores-pollen diagram reflects changes of the three main types of vegetation which dominated the study area from the Late Glacial to modern time. The beginning of the lake sedimentation started in the cryo-arid landscapes of the Yanger Dryas covered by unique complex vegetation of forest-tundra-steppe. About 11 000 cal. a BP this type of vegetation was quickly replaced by mountain forests dominated by fir (*Abies sibirica*) and Siberian pine (*Pinus sibirica*). Pine forests with birch spread on foothills of the Western Sayan Mountains. During next stage of vegetation development, which started about 5000 cal. a BP domination in mountain forests passed from fir to Siberian pine. His type of vegetation cover is character also for modern mountain forests of the Western Sayan. With the reduction of the role of fir in mountain forests the belt of subalpine shrubs began to expand like during Late Glacial time. Quantitative palaeoclimatic reconstructions based on pollen data evidence about cryo-arid climate in Late Glacial till 11000 cal. yr BP, humid moderate cool climate in Middle Holocene and humid and cool climate - in late Holocene after 5000 cal yr BP.

Динамика растительного покрова и количественные реконструкции палеоклимата гор Западного Саяна с позднеледниковья до современности по данным палинологического изучения болота Южно-Буйбинское

Бляхарчук Т.А.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: blyakharhuk@mail.ru

Интеграция реконструкций долговременной динамики растительного покрова и климата на основе ископаемых биоиндикаторов с моделированием их возможного изменения в будущем при современном глобальном потеплении климата является одной из ключевых задач в науках о Земле (IPCC, 2013). Для этого необходима представительная база палеоклиматических данных по различным регионам Земли. В данном исследовании впервые приводятся палеопалинологические данные по Западнему Саяну Алтае-Саянской горной области (рис. 1). Кроме первой для этой территории спорово-пыльцевой диаграммы, охватывающей весь голоцен и позднеледниковое время с 13000 кал. лет назад до современности, в данной работе представлены количественные палеоклиматические реконструкции на основе палеопалинологических данных с использованием переходной функции, построенной по 130 современным спорово-пыльцевым спектрам (СПС), отобранным из различных фитоценозов в разных высотных поясах Алтае-Саянской горной области.

ПАЛЕОПАЛИНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ БОЛОТА ЮЖНО-БУЙБИНСКОЕ

Болото Южно-Буйбинское расположено в центральной части гор Западного Саяна в пределах заповедника Ергаки (52° 50' 22" с.ш., 93° 31' 23" в.д., 1377 м.н.у.м.). Котловинное болото имеет озёрное происхождение и большая часть его 600 см отложений сложена озёрным сапропелем. Торф формирует только верхние 130 см. Между торфом и сапропелем имеется водная прослойка мощностью около 20 см. Озёрно-болотные отложения разреза Южно-Буйбинское охватывают позднеледниковье и голоцен до современности. Для разреза получено 5 радиоуглеродных датировок методом АМС и 1 датировка – методом жидкостной сцинтилляции. Радиоуглеродные даты были откалиброваны с использованием программы IntCal13 (Reimer et al., 2013). Возраст каждого образца рассчитан с использованием алгоритма Bacon (Christen and Perez, 2010; Blaauw and Christen, 2011). Полученная спорово-пыльцевая диаграмма (рис. 1) отразила смены трёх основных типов растительного покрова с соответствующими переходами, доминировавших на исследуемой территории с позднеледникового времени до современности. Кластерный анализ, выполненный в программе Tilia (Grimm, 2004) позволил выделить 5 спорово-пыльцевых зон отразивших смены растительного покрова за время осадконакопления. Озерное осадконакопление началось около 13000 кал. лет назад в открытых ландшафтах позднего дриаса, представленных своеобразным комплексным растительным покровом лесо-тундро-степи. Около 11000 кал. л.н. этот тип растительности стремительно сменился горными лесами в которых доминировали горные кедрово-пихтовые фитоценозы. Сосновые леса с берёзой распространились на северных и южных предгорьях хребтов Западного Саяна. Около 5000 кал. л. н. сформировался третий тип растительного покрова в котором доминирование в горных лесах перешло от пихты к кедру сибирскому. Пихта отступила на более низкие гипсометрические уровни горных лесов. Этот тип растительного покрова характерен и для современных горных лесов Западного Саяна. С сокращением роли пихты, вновь, как и в позднеледниковье, стал расширяться пояс кустарников в высокогорном поясе. В современном растительном покрове Западного Саяна над горными лесами располагается субальпийский кедрово-кустарниковый пояс.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ

Для количественных реконструкций палеоклимата мы использовали переходные функции (табл. 1), полученные методом взвешенной средней по 118 современным СПС Алтае-Саянского региона с использованием многомерного статистического анализа в пакете программы Past. Оптимумы пыльцевых таксонов в отношении к климатическому параметру определялись по их взвешенной средней в современных СПС, а толерантность – как ошибка взвешенной средней (Lakin, 1990). Значения климатических параметров (средняя t° июля, средняя t° января и годовое количество осадков) по оптимумам пыльцевых таксонов в ископаемых образцах определялись с использованием модели переходной функции, предложенной Тер Брааком с соавторами (Braak et al., 1989), которая основана на подсчете взвешенной средней подсчитываемых таксонов, учитывая значения толерантности. Реконструкции были проведены путём калибровки палеопалинологических данных по оптимумам переходной функции для

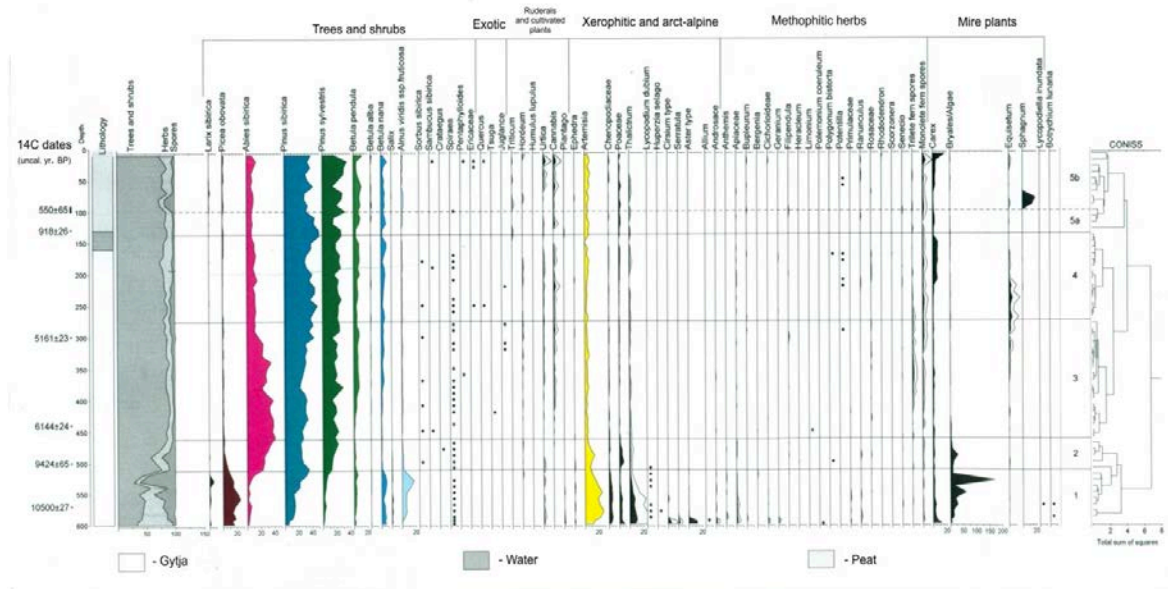


Рис. 1. Спорово-пыльцевая диаграмма болота Южно-Буйбинское в горах Западного Саяна.

годового количества осадков, средней температуры июля и средней температуры января (рис. 2). Мы исключили из расчетов компоненты СПС локального происхождения, дальнезаносные и переотложенные экзоты, а также пыльцу и споры, встречающиеся не регулярно по пыльцевому профилю. Для расчетов были использованы следующие пыльцевые таксоны: *Pinus sylvestris*, *Pinus sibirica*, *Abies*, *Picea*, *Larix*, *Betula pendula*, *Betula alba*, *Betula nana*, *Artemisia*, – являющиеся наиболее информативными при определении широтных растительных зон и высотных растительных поясов в горах юга Западной Сибири. Для расчетов использовались программы PAST 1.87, Statistica и Excel.

Таблица 1. Переходные функции, рассчитанные методом взвешенной средней по 118 современным пыльцевым спектрам Алтае-Саянского региона.

	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sibirica</i>	<i>Abies sibirica</i>	<i>Picea obovata</i>	<i>Larix sibirica</i>	<i>Betula pendula</i>	<i>Betula alba</i>	<i>Betula nana</i>	<i>Artemisia</i>
Переходная функция для среднеянварской температуры									
Оптимум	-22,3696	-23,9217	-19,6304	-23,8789	-24,4796	-20,1474	-21,2609	-22,4826	-27,8822
Толерантн.	5,06748	5,44401	2,86387	5,55169	5,77281	3,30622	4,34973	4,85509	6,40755
Максимум	66,4336	66,1538	32,5397	32,6087	11,7647	65,415	17,7725	48,6772	85,6079
Переходная функция для среднеиюльской температуры									
Оптимум	16,0256	15,2797	17,0553	15,8173	15,2419	16,6769	16,4126	15,5336	16,622
Толерантн.	1,78663	1,68745	1,62067	1,73939	1,52726	1,45922	1,76083	1,67788	1,65888
Максимум	66,4336	66,1538	32,5397	32,6087	11,7647	65,415	17,7725	48,6772	85,6079
Переходная функция для годового количества осадков									
Оптимум	525,762	472,404	896,016	521,377	345,167	681,102	596,725	335,871	335,871
Толерантн.	309,585	329,616	440,358	344,8	226,016	375,436	338,568	257,187	257,187
Максимум	66,4336	66,1538	32,5397	32,6087	11,7647	65,415	17,7725	85,6079	85,6079

Исследования современных пыльцевых спектров Алтае-Саянского региона (Blyakharchuk, 2017) показали, что в пыльцевых спектрах высокогорных тундро-степных ландшафтов Юго-Восточного Алтая и Юго-Западной Тувы довольно много пыльцы кедр (Pinus sibirica) за счет её ветрового заноса из горно-таёжных ландшафтов, распространённых севернее и в более низких высотных поясах гор. Это несколько сдвигает климатический оптимум сибирского кедра в созданной переходной функции в более аридный и тёплый климат степи. В результате этого, оптимум увлажнения, рассчитанный для сибирского кедра по современному пыльцевому спектру (472,404 мм/год) оказался ниже, чем для сосны лесной (681,102 мм/год) и даже ниже, чем для берёзы (681,102 мм/год). Так же, за счет значительного участия дальнезаносной пыльцы сосны лесной и берёзы в степных спектрах, расчетные оптимумы этих пыльцевых таксонов могут быть несколько сдвинуты, и это следует учитывать при использовании полученных количественных палеореконструкций. Тем не менее, мы полагаем, что указанные сдвиги оптиму-

мов в ретроспективном плане действовали постоянно и на общий тренд изменения количественных палеоклиматических параметров не повлияли.

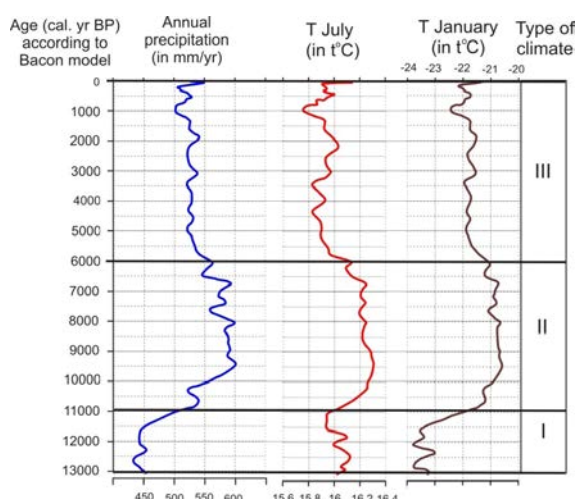


Рис. 2. Количественные реконструкции палеоклимата по спорово-пыльцевым данным болота Южно-Буйбинское в горах Западного Саяна.

С помощью представленной переходной функции (табл. 1) по палеопалинологическим данным болота Южно-Буйбинское были реконструированы количественные изменения среднеиюльских и среднеянварских температур и годового количества осадков с позднеледникового 13500 кал.л.н. до современности (рис. 2). Полученные нами палеорекострукции показали, что на исследуемой территории в период с позднеледникового до современности сменилось три типа климата (рис. 2, I-III):

I. Так, количественные палеоклиматические реконструкции по пыльцевым данным болота Южно-Буйбинское указывают на то, что в позднеледниковое время (13000-11000 кал.л.н.) в горах Западного Саяна климат был холодным и сухим (рис. 2). Атмосферных осадков выпадало на 150-100 мм меньше, чем реконструировано для настоящего времени. Здесь нужно отметить, что реконструированное современное количество осадков мы получили примерно на 450 мм меньше, чем отмечается на ближайшей метеорологической станции Оленья Речка. Это уменьшение вызвано влиянием дальнезаносной пыли на переходную функцию годовых осадков. По этой же причине мы получили среднеянварскую современную реконструированную температуру на 4,3° выше, чем по данным метеостанции. В то же время среднеиюльская реконструированная современная температура почти равна наблюдаемой на ближайшей метеостанции Западного Саяна. Всё это, однако, не влияет на общий тренд изменения климатических параметров в течение 13000 лет. Поэтому в дальнейших рассуждениях мы используем не абсолютные значения реконструированных климатических параметров, а их относительное изменение по сравнению с современными реконструированными значениями климатических параметров или с реконструкциями для предшествующего периода.

II. Реконструкции количественных показателей палеоклимата раннего и среднего голоцена (11000-6000 кал.л.н.) отражают более влажный климат в горах Западного Саяна, чем в настоящее время. В этот период в горах Западного Саяна выпадало на 75 мм осадков больше современного их количества, а зимние температуры были на 1°С выше современных. Так же выше современных на 1°С были среднеиюльские температуры. Количественные реконструкции палеоклимата этого периода указывают на снижение континентальности климата за счет увеличения его влажности и потепления зимних сезонов в горах. Однако в горах и в межгорных котловинных степях Алтае-Саянской горной области изменения климата могли иметь разный характер, в силу особенностей формирования микроклимата этих ландшафтных единиц.

III. Во второй половине голоцена (после 6000 кал.л.н.) региональный климат стал суше и холоднее, чем в предшествующий период. Среднеянварские температуры понизились на 1°С. Реконструкция среднеиюльских температур указывает на некоторое похолодание – примерно на 0,4°С. На 75 мм меньше, чем в предыдущий период, стало выпадать осадков. В целом проявилась тенденция усиления континентальности климата. Средневековая климатическая аномалия (МСА) на реконструкциях болота Южно-Буйбинское показана, как сухой и холодный период. Следует подчеркнуть, что именно на начало МСА на болоте Южно-Буйбинском приходится смена озёрного осадконакопления на торфяное. Это усыхание озера и формирование на его месте болота может быть следствием воздействия более сухого климата.

Таким образом, количественные палеоклиматические реконструкции по палинологическим данным болота Южно-Буйбинское (Западные Саяны), выполненные с помощью переходных функций на основе современных пыльцевых спектров из Алтае-Саянской горной области, выявили смену 3-х типов климата в течение последних 13500 лет: I – холодного и сухого в позднеледниковье (13000-11000

кал.л.н.); II – влажного и относительно тёплого в раннем и среднем голоцене (11000–6000 кал.л.н.); III – менее влажного и более континентального в позднем голоцене (после 6000 кал.л.н.). Максимальная амплитуда изменения количества годовых осадков за период в 13000 лет достигала 160 мм/год, максимальная амплитуда изменения среднеиюльских температур составила 0,5°C, а среднеянварских температур – 3°C.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 17-55-52020/MHT_a, № 20-55-53015/20 и бюджетной темы ИМКЭС СО РАН- ААААА-А16-116041356666-6

ЛИТЕРАТУРА:

1. Blyakharchuk T. Peculiarities of contemporary surface spore-pollen spectra from southern Siberia (Tyva and Khakassia republics). *Ecological questions* 26 (2017), 49–52. <http://www.eq.umk.pl/>
2. Braak et al., 1989 ter Braak C. J. F., van D am H. Inferring pH from diatoms: a comparison of old and new calibration methods // *Hydrobiologia*. 1989. Vol. 178. P. 209–223.
3. Blaauw, M. & Christen, J.A., Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*. 2011;6:457–474.
4. Christen J.A. & Perez E.S. A new robust statistical model for radiocarbon data. *Radiocarbon*. 2010. № 51. PP. 1047–1059.
5. Grimm E.T. *TGView Version 2.0.2*. Springfield Ill: Illinois State Museum research and Collections Center, 2004.
6. IPCC, 2013: *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
7. Лакин Г. Ф. *Биометрия*. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.
8. Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blachwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafflidason H., Hajdas I., Hatte C., Heaton T.J., Hoffmann d.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott M.E., Southon J.R., Turney C.S.M., van der Plicht J. *IntCal13 and Marine 13 radiocarbon age calibration age curves 0–50,000 yr cal BP*. *Radiocarbon*. 2013; (4): 1869–1887.

Transformation of vegetable of bogs at different stages of pyrogen succession

Gashkova L.P.

Siberian Institute of Agriculture and Peat – branch of the Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnology RAS, Tomsk, Russia

E-mail: gashkova-lp@rambler.ru

The aim of the work was to assess the restoration of phytocenosis in post-pyrogenic bogs, to varying degrees affected by the fire. The study was conducted in 10 areas of mires, 5 of which were exposed to fire in different years. The remaining sites are in close proximity to post-pyrogenic, with the most similar biogeocenoses. A detailed geobotanical description we made on each site.

One of the sites is located in the Gavrilovka River basin and is a birch-shrub-moss mire. The fire in this mire occurred in 2016. Compared to the background, in the post-pyrogenic area, a complete death of the tree layer represented by *Pinus sylvestris* with a small admixture of *Betula pubescens* is observed. In the moss layer in the depressions, sphagnum mosses almost completely burned out, on the trunk-stem elevations the projective cover of *Pleurozium schreberi* was reduced to single specimens. The grass-shrub layer has recovered almost completely, its composition is similar to that in the background, but the total projective cover is still 20% less.

The second section is located on the terrace of the Ob River and currently represents a pine-birch-shrub-grass-moss mire. In peat, at a depth of 5–10 cm, a layer of burnt peat was discovered, indicating a fire in this area that occurred more than 30 years ago. Compared to the background plot, the post-pyrogenic one has a smaller amount and height of pine. The closeness of pine crowns decreased from 0.1 to single trunks, height from 8 to 5 m. The grass-shrub layer in composition and projective cover is similar to the background plot, only the ratio of species has changed, in favor of increasing the projective cover of *Eriophorum vaginatum* and *Vaccinium uliginosum*. The projective coverage of the moss layer in the post-pyrogenic area increased by 20% due

to an increase in the abundance of *Polytrichum strictum*, the abundance of *Sphagnum magellanicum* decreased significantly and *Pleurozium schreberi* completely disappeared.

The third section is located in the Elovka River basin and is a pine-birch-herb-sphagnum mire, on which a fire occurred in 2012. Compared to the background plot, 60% of the trees died. The undergrowth of *Abies sibirica*, *Picea obovata*, and *Salix cinerea* is completely absent. In the grass layer, the *Menyanthes trifoliata* and *Thelypteris palustris* were replaced by *Naumburgia thyrsiflora* and *Chamaenerion angustifolium*. In the moss layer at elevations, *Sphagnum* is partially replaced by *Polytrichum strictum*.

The fourth section is located on the terrace of the Bakchar River and is a birch-pine-shrub-moss mire, burned down in 2012. During the fire, the death of the tree layer occurred, the height of which in the background reaches 10 m. The grass-shrub layer differs from the background by a 20% decrease in projective cover and the appearance of *Chamaenerion angustifolium*. In the moss layer, *Sphagnum fuscum* changed to *Polytrichum strictum*.

The fifth section is located between the rivers Iksa and Bakchar and is a pine-birch-shrub-sphagnum mire, which suffered a fire in 1998. In comparison with the background site, the death of the tree layer, in which *Pinus sylvestris* dominated, and the resumption of mainly deciduous species were noted. In the post-pyrogenic area, the projective cover of the grass-shrub layer increased by 30%, compared with the background, and reached 90%. The projective cover of the moss layer is lower than in the background, instead of *Sphagnum fuscum*, *S. magellanicum* dominates on the bumps.

Thus, on bogs, the tree layer is most affected by fires. Regardless of the degree of burnout, shoots of hard-wood (*Betula pubescens*, *Populus tremula* and *Salix*) begin to appear in post-pyrogenic areas already in the second year after the fire. Pine shoots appear later, the timing depends on the degree of burnout of the moss layer and peat deposits. Pine shoots were recorded only in the fourth year after the fire. In the moss layer, sphagnum mosses and *Pleurozium schreberi* are most affected by fire. Their abundance steadily decreases in all post-pyrogenic areas, being replaced by *Polytrichum strictum*. The recovery of the moss layer is observed already in the first year after the fire. Plants of the grass-shrub layer, even when the aboveground part is completely burned out, are restored already in the first year after the fire, due to renewal from underground shoots. Already in the third year after the fire, shrubs bloom profusely and bear fruit. In the first years after a fire, only the projective cover of shrubs decreases, due to a decrease in the length of their shoots. In subsequent years, the projective cover of the grass-shrub layer may become even larger than in the background. On transitional mires, the tree layer is restored much faster because there is no change in species composition. Deciduous tree species, in addition to renewing from seeds, while maintaining the root system give root growth, forming undergrowth in the first year after the fire. Only the species diversity of woody plants is reduced, since during the fire the structure of the tree and shrub layers is violated, with coniferous species and undergrowth most affected. The restoration of the grass-shrub and moss layers in the transitional bog is similar to the upland bogs; a feature is the loss from the phytocenosis of some typically bog grasses in the post-pyrogenic areas.

Трансформация растительного покрова болот на разных стадиях пирогенной сукцессии

Гашкова Л.П.

Сибирский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Томск, Россия
E-mail: gashkova-lp@rambler.ru

Небольшое количество осадков, а также обильные запасы сухого или мертвого растительного материала, способствуют возникновению природных пожаров [Reinhardt and Holsinger 2010]. Например, в Сибири и Северной Америке ежегодно сгорает 10–15 миллионов гектаров [Flannigan et al., 2009; Turetsky et al., 2011]. Хотя обычно болота являются более влажными экосистемами, чем леса, они часто страдают от пожаров [Sillasoo et al., 2011]. Пожары высокой интенсивности в бореальной зоне на начальной стадии сукцессии приводят к снижению видового разнообразия, изменению горизонтальной структуры микрогруппировок, смене доминантов напочвенного покрова [Ковалёва и др., 2012; Ахметьева и др., 2012]. Восстановление сфагнового мохового покрова происходит многоступенчато, начинаясь с печёночников, продолжается поселением зелёных мхов, и только затем сфагновых [Копотева, Купцова, 2017]. В процессе восстановления растительного покрова увеличиваются запасы живой фитомассы и продукция экосистемы в целом [Косых, 2012].

Цель работы состояла в оценке восстановления фитоценоза на постпирогенных болотах, в различной степени пострадавших от пожара. Исследование проводилось на 10 участках болот, 5 из которых

подвергались пожару в разные годы. Остальные участки находятся в непосредственной близости от постпирогенных, с максимально сходными биогеоценозами. На каждом участке проводилось детальное геоботаническое описание.

Один из участков находится в бассейне р. Гавриловка и представляет собой берёзово-кустарничково-моховое болото. Пожар на данном болоте произошёл в 2016 году. В древесном ярусе преобладает подрост берёзы (*Betula pubescens* Ehrh.) высотой до 1,5 м, с проективным покрытием 10%. В возобновлении, наряду с берёзой, присутствует осина (*Populus tremula* L.) и ива (*Salix pentandra* L.). Взрослые деревья отсутствуют. В травяно-кустарничковом ярусе преобладает хамедафне (*Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench) и багульник (*Ledum palustre* L.), с примесью осоки (*Carex globularis* L.), морошки (*Rubus chamaemorus* L.) и брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.). Мхи сосредоточены в основном на приствольных повышениях, примерно в одинаковом соотношении сфагновые мхи (*Sphagnum capillifolium* Ehrh., *Sphagnum angustifolium* (Russ. ex Russ.) C. Jens. и *Sphagnum magellanicum* Brid.) Hedw. и *Polytrichum strictum* Brid., общее проективное покрытие мохового яруса всего 20%. В сравнении с фоновым, на постпирогенном участке наблюдается полная гибель древесного яруса, представленного сосной (*Pinus sylvestris* L.) с небольшой примесью берёзы (*Betula pubescens*). В моховом ярусе в понижениях почти полностью выгорели сфагновые мхи, на приствольных повышениях проективное покрытие *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. сократилось до единичных экземпляров. Травяно-кустарничковый ярус восстановился почти полностью, состав его сходен с таковым на фоновом участке, но общее проективное покрытие пока меньше на 20%.

Второй участок находится на террасе р. Обь и в настоящее время представляет собой сосново-берёзово-кустарничково-травяно-моховое болото. В торфе, на глубине 5-10 см, обнаружен слой сгоревшего торфа, свидетельствующий о пожаре на данном участке, произошедшем более 30 лет назад. В древесном ярусе доминирует берёза (*Betula pubescens*) (сомкнутость крон 0,6), с примесью сосны (*Pinus sylvestris*). В травяно-кустарничковом ярусе преобладает пушица (*Eriophorum vaginatum* L.) с проективным покрытием 30%, хамедафне (*Chamaedaphne calyculata*) (20%), и *Rubus chamaemorus* (10%), единично встречается *Vaccinium uliginosum* L. Основу мохового яруса составляет *Polytrichum strictum* (80%) и *Sphagnum angustifolium* (10%) с единичными вкраплениями *S. magellanicum*. По сравнению с фоновым участком, на постпирогенном меньшее количество и высота сосны. Сомкнутость крон сосны сократилась с 0,1 до единичных стволов, высота с 8 до 5 м. Травяно-кустарничковый ярус по составу и проективному покрытию сходен с фоновым участком, изменилось лишь соотношение видов, в пользу увеличения проективного покрытия пушицы (*Eriophorum vaginatum*) и снижения голубики (*Vaccinium uliginosum*). Проективное покрытие мохового яруса на постпирогенном участке увеличилось на 20% за счёт увеличения обилия *Polytrichum strictum*, значительно сократилось обилие *Sphagnum magellanicum* и полностью исчез *Pleurozium schreberi*.

Третий участок расположен в бассейне р. Еловка и представляет собой сосново-берёзово-разнотравно-сфагновое болото, на котором произошёл пожар в 2012 году. Древесный ярус с сомкнутостью крон 15-20%, доминирует берёза (*Betula pubescens*) с единичной примесью сосны (*Pinus sylvestris*). Деревья обгорели снизу до высоты около 1,5 м. В травяно-кустарничковом ярусе доминирует вейник (*Calamagrostis obtusata* Trin.) с примесью осоки (*Carex canescens* L.), наумбургии (*Naumburgia thyrsoflora* (L.) Rchb.), морошки (*Rubus chamaemorus* L.), сабельника (*Comarum palustre* L.) и иван-чая (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.). В моховом покрове преобладают *Sphagnum centrale* C.E.O. Jensen (П.П. 10%), с примесью *S. girgensohnii* Russow, *S. angustifolium* и *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. В сравнении с фоновым участком, 60% деревьев погибли. Полностью отсутствует подлесок из пихты (*Abies sibirica* Ledeb.), ели (*Picea obovata* Ledeb.) и ивы (*Salix cinerea* L.). В травяном ярусе вахта (*Menyanthes trifoliata* L.) и телиптерис (*Thelypteris palustris* Schott) сменились наумбургией (*Naumburgia thyrsoflora*) и иван-чаем (*Chamaenerion angustifolium*). В моховом ярусе на повышениях *Sphagnum* частично замещается на *Polytrichum strictum*.

Четвертый участок расположен на террасе р. Бакчар и представляет собой берёзово-сосново-кустарничково-моховое болото, сгоревшее в 2012 году. Древесный ярус представлен подростом сосны (*Pinus sylvestris*), берёзы (*Betula pubescens*) высотой до 1 м и всходами сосны, берёзы и ивы (*Salix cinerea*). Кустарнички с ОПП 60% представлены голубикой (*Vaccinium uliginosum*), хамедафне (*Chamaedaphne calyculata*) и багульником (*Ledum palustre*). Иван-чай (*Chamaenerion angustifolium*) и морошка (*Rubus chamaemorus*) занимают менее 10% площади. Моховой покров (ОПП 25%) представлен *Polytrichum strictum* и *Cladonia* sp. В процессе пожара произошла гибель древесного яруса, высота которого на фоновом участке достигает 10 м. Травяно-кустарничковый ярус отличается от фонового снижением проективного покрытия на 20% и появлением иван-чая. В моховом ярусе произошла смена *Sphagnum fuscum* на *Polytrichum strictum*.

Пятый участок расположен в междуречье р. Икса и Бакчар и представляет собой сосново-берёзово-кустарничково-сфагновое болото, подвергнувшееся пожару в 1998 году. Древесный ярус представлен берёзой (*Betula pubescens*) и сосной (*Pinus sylvestris*) примерно в равном количестве. Сомкнутость крон составляет 0,3. В подросте преобладает берёза (*B. pubescens* (10%)), сосна (*P. sylvestris* (5%)), единично

ива (*Salix pentandra*) и осина (*Populus tremula*). Кустарничковый ярус с ОПП 60% представлен преимущественно хамедафне (*Chamaedaphne calyculata*) и багульником (*Ledum palustre*). Моховой покров с ОПП 80% представлен сфагновыми мхами с доминированием *Sphagnum magellanicum* и примесью *S. angustifolium* и *Polytrichum strictum*. В сравнении с фоновым участком отмечена гибель древесного яруса, в котором доминировала сосна (*Pinus sylvestris*), и возобновление преимущественно лиственными породами. На постпирогенном участке проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса увеличилось на 30%, по сравнению с фоновым, и достигло 90%. Проективное покрытие мохового яруса ниже, чем на фоновом участке, вместо *Sphagnum fuscum* на кочках доминирует *S. magellanicum*.

Основываясь на сравнении фитоценозов с различным сроком постпирогенного возобновления между собой и с фоновыми участками, можно реконструировать процесс их восстановления. Обнаружено, что восстановление верховых и переходных болот имеет некоторые особенности.

На верховых болотах в результате пожаров наиболее страдает древесный ярус. Независимо от степени выгорания, на постпирогенных участках уже на второй год после пожара начинают появляться всходы лиственных пород (*Betula pubescens*, *Populus tremula* и *Salix*). Всходы сосны появляются позже, сроки зависят от степени выгорания мохового яруса и торфяной залежи. Всходы сосны зафиксированы только на четвертый год после пожара. В моховом ярусе наиболее страдают от пожара сфагновые мхи и *Pleurozium schreber*. Их обилие стабильно снижается на всех постпирогенных участках, замещаясь *Polytrichum strictum*. Восстановление мохового яруса наблюдается уже на первый год после пожара. Растения травяно-кустарничкового яруса, даже при полном выгорании надземной части, восстанавливаются уже в первый год после пожара, за счёт возобновления от подземных побегов. Уже на третий год после пожара кустарнички обильно цветут и плодоносят. В первые годы после пожара снижается лишь проективное покрытие кустарничков, за счёт уменьшения длины их побегов. В последующие годы проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса может стать даже больше, чем на фоновом участке.

На переходных болотах древесный ярус восстанавливается гораздо быстрее за счёт того, что не происходит смены видового состава. Лиственные породы деревьев, помимо возобновления от семян, при сохранении корневой системы дают корневую поросль, образуя подрост уже в первый год после пожара. Сокращается лишь видовое разнообразие древесных растений, так как в процессе пожара нарушается структура древесного и кустарничкового ярусов, при этом больше всего страдают хвойные породы и подлесок. Восстановление травяно-кустарничкового и мохового ярусов на переходном болоте сходно с верховыми болотами, особенностью является выпадение из фитоценоза некоторых типично болотных трав на постпирогенных участках.

Работа выполнена в рамках проведения фундаментальных научных исследований по Государственному заданию № 007-00496-16 ПР

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ахметьева Н.П. Естественное восстановление болот после пожаров / Н.П. Ахметьева, С.Э. Белова, Р.Г. Джамалов, И.С. Куличевская, Е.Е. Лапина, А.В. Михайлова // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 4. С. 343-354.
2. Ковалева Н.М. Формирование живого напочвенного покрова на начальной стадии пирогенной сукцессии в сосняках нижнего Приангарья / Н.М. Ковалева, С.В. Жила, Г.А. Иванова // Хвойные бореальной зоны. XXX. № 3-4. 2012. С. 265-269.
3. Копотева Т.А. Результаты восьмилетнего мониторинга за восстановлением растительности после пожаров на торфяном болоте Среднеамурской низменности / Т.А. Копотева, В.А. Купцова // Углеродный баланс болот Западной Сибири в контексте изменения климата. Материалы международной конференции. Под ред. Е.Д. Лапишиной, Н.П. Миронычевой-Токаревой. 2017. С. 70-73.
4. Косых Н.П. Пирогенная сукцессия на болотах лесостепной зоны / Н.П. Косых // Степи Северной Евразии. Материалы VI международного симпозиума и VIII международной школы-семинара "Геоэкологические проблемы степных регионов" - Оренбург: ИПК "Газпромнефть". 2012. С. 408-411.
5. Flannigan M.D. Implications of changing climate for global wildland fire. / M.D. Flannigan, M.A. Krawchuck, W.J. de Groot, B.M. Wotton, L.M. Gowman, // International Journal of Wildland Fire, 18. 2009. 483-507.
6. Reinhardt E.D. Effects of fuel treatments on carbon-disturbance relationships in forests of the northern Rocky Mountains Forest / E.D. Reinhardt, L. Holsinger // Ecology and Management. 2010. 259(8):1427-1435 DOI: 10.1016/j.foreco.2010.01.015.
7. Turetsky M.R. Recent acceleration of biomass burning and carbon losses in Alaskan forests and peatlands / M.R. Turetsky, E.S. Kane, J.W. Harden, R.D. Ottmar, K.L. Manies, E. Hoy, E.S. Kasischke // Nat. Geosci. 2011. 4, 27-31, doi: 10.1038/ngeo1027.

Assessment of emission and accumulation of greenhouse gases by peatland ecosystems in Nefteyugansky District in Khanty-Mansi Autonomous Okrug, Russia

^{1,2}Dyukarev E.A., ^{2,3}Sabrekov A.Z., ^{2,3,4,5}Glagolev M.V., ¹Kiselev M.V., ²Filippov I.V., ²Lapshina E.D.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological System SB RAS, Tomsk, Russia

²Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

³Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Moscow, Russia

⁴Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁵Institute of Forest Science RAS, Uspenskoe, Russia

E-mail: dekot@mail.ru

Peatlands are the most significant long-term accumulator of atmospheric carbon on the land. The important climate-forming role of large peatland systems is related to their influence on the regional balance of carbon dioxide, methane, heat and moisture. This report summarizes the results of field studies of carbon dioxide and methane fluxes in peatland ecosystems on the territory of the licensed areas of the Salym Petroleum oil fields (Khanty-Mansiysk Autonomous Region, Russia), the total annual greenhouse gas fluxes and suggest recommendations on the exploitation of oil fields aimed at increasing greenhouse gas accumulation by peatlands.

The results of field measurements of greenhouse gas fluxes were extrapolated for the entire growing season using mathematical models. The net ecosystem exchange is formed as the difference between photosynthetic assimilation of carbon dioxide by plants and CO₂ emissions in the process of respiration of plants and microorganisms. Peatland ecosystems with large biomass storages, including those in the tree layer, have significant fluxes (more than 1500 gCO₂ m⁻²) associated with photosynthesis, but the ecosystem respiration component (750 - 2200 gCO₂ m⁻²) is also high. As a result, the highest net carbon dioxide accumulation was observed in the mesotrophic sedge-sphagnum fen and in the treed bog, taking into account the tree layer (603 gCO₂ m⁻²). The other types of bogs accumulate 244 - 466 gCO₂ m⁻².

The total methane emission from the studied bogs has the highest values (32.6 gCH₄ m⁻²) at mesotrophic sedge-sphagnum fen. The other types of wetlands are divided into waterlogged (characterized by flux of 7–11 gCH₄ m⁻²) and relatively dry (with the level of bog waters 20-30 cm below the surface) (flux 4-6 gCH₄ m⁻²).

Essential fluxes of carbon dioxide and methane were recorded from the surface of the disturbed bogs - clearings along the low treed bog, where, depending on the ground cover, CO₂ emission vary in range 339 - 1267 2200 gCO₂ m⁻², and CH₄ emission is 12.5 gCH₄ m⁻². An assessment of the regional greenhouse gas balance for an area of 1,497 km² showed that in total terrestrial ecosystems absorb about 666 000 t in CO₂ equivalent per year. Forests annually accumulate 558 500 t, and peatland ecosystems absorb a total of 112 800 t.

Despite the fact that the intensity of annual carbon accumulation in forest ecosystems is higher than in peatlands, in the long-term perspective, peatlands conserve more atmospheric carbon than forests. According to the results of radiocarbon analysis of the upper layers of peat, long-term accumulation in the bog ecosystems of the study area is 59 600 t CO₂ per year, and long-term carbon accumulation in the soil of forest ecosystems is estimated at 22 000 t CO₂ per year.

Оценка эмиссии и поглощения парниковых газов болотными экосистемами Нефтеюганского района Ханты-Мансийского Автономного Округа

^{1,2}Дюкарев Е.А., ^{2,3}Сабреков А.З., ^{2,3,4,5}Глаголев М.В., ¹Киселев М.В., ²Филиппов И.В.,
²Лапшина Е.Д.

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

³Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

⁴Факультет почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵Институт лесоведения РАН, пос. Успенское, Россия

E-mail: dekot@mail.ru

Торфяные болота являются наиболее значимым на суше долговременным накопителем атмосферного углерода. Важная климатообразующая роль больших болотных систем связана с их влиянием на региональный баланс углекислого газа, метана, тепла и влаги. Поэтому необходимо сохранять углерод депонирующую функцию болот, минимизировав антропогенное вмешательство в наиболее продуктивные болотные экосистемы, предотвращая нарушение естественного поверхностного покрова и нарушение гидрологического режима. Подтопление участков болот вследствие строительства линейных объектов, перегораживающих естественный сток болотных вод, а также дополнительный внос минерального питания на поверхность болот (песка и пыли от дорог, кустовых площадок и карьеров) приводит к эвтрофикации (обогащению) естественных болотных экосистем, что снижает поглощение CO₂ из атмосферы и увеличивает выделение метана.

В данной работе обобщены результаты экспедиционных исследований по изучению потоков углекислого газа и метана в болотных экосистемах на территории лицензионных участков Салымской группы месторождений, рассчитаны суммарные потоки парниковых газов за вегетационный сезон 2019 г. На территории лицензионных участков Салымской группы месторождений ведется комплекс работ по освоению нефтяных месторождений, включая доразведку и разработку, что создает повышенную антропогенную нагрузку на окружающую среду. Основные антропогенные воздействия включают вырубку леса и расчистку площадок под места бурения, прокладку дорог и путепроводов, возможное загрязнение окружающей среды нефтью и нефтепродуктами в результате аварий на трубопроводах, прямые и косвенные выбросы в атмосферу парниковых газов.

Растительный покров бассейна р. Салым в пределах исследуемой территории площадью 1484 км² представлен в основном лесными (712 км²) и болотными (770 км²) экосистемами [Инвентаризация биоразнообразия..., 2015]. По типу водно-минерального питания болотные сообщества относятся к трем типам олиготрофной, мезотрофной и эвтрофной растительности, соответствующей верховым (409 км²), переходным (130 км²) и низинным (231 км²) болотам. В зависимости от степени обводненности болотных местообитаний и степени выраженности древесного яруса, болотные сообщества относят к древесной, древесно-моховой, древесно-травяной или моховой группе. Нарушенная растительность (вырубки, просеки) занимает незначительные площади (2 км²).

Измерения потоков парниковых газов проводились в июле 2019 г. в восьми пунктах исследований, расположенных на территории типичных болотных экосистем эвтрофного, мезотрофного и олиготрофного типов с учетом разнообразия микроландшафтов, а также на антропогенно нарушенном участке (П-4). На территории грядово-мочажинного комплекса с сосново-кустарничково-пушицево-сфагновыми и кустарничково-пушицево-сфагновыми грядами в сочетании с осоково-пушицево-сфагновыми мочажинами были организованы три пункта исследований расположенных на олиготрофной мочажине (П-1), олиготрофной гряде необлесенной (П-2), и олиготрофной гряде с невысокой сосной (П-3). Пункты исследований П-4 и П-5 были организованы на сосново-кустарничково-сфагновом болоте. Один пункт наблюдений располагался на эвтрофном березово-вахтово-осоково-гипновом болоте (П-7) и два пункта – на мезотрофных болотах: березово-сосновом осоково-вахтово-сфагновом (П-6) и вахтово-сфагновой топи (П-8).

Потоки CO₂ зарегистрированные на мочажине грядово-мочажинного комплекса (П-1) в течение полных суток варьировали в диапазоне от -428.1 до +166.7 мг CO₂ м⁻² ч⁻¹, причем максимальное поглощение наблюдалось в полдень, а наибольшее выделение CO₂ – через 20 минут после полуночи. Средний за сутки поток CO₂, зарегистрированный в П-1, вполне адекватно отражает характерную величину суммарного экосистемного обмена в мочажинах ГМК [Dyukarev et al., 2019]. Измерения на гряде ГМК проводились только в дневное время, поэтому нами фактически оценено только максимальное поглощение CO₂ на свету, составившее -606.2 мг CO₂ м⁻² ч⁻¹ в 12:40 (местного времени).

В пункте наблюдений на антропогенно-нарушенном участке под просекой ЛЭП (П-4) отрицательные потоки CO_2 не были зарегистрированы, поскольку измерения проводились на площадке лишенной растительности с древесными остатками после переработки деревьев, вырубленных на месте прокладки ЛЭП. Слой древесных стружек и обломков стволов деревьев перекрывает мох, и траву, а кустарнички, обильно растущие в ряме, вероятно были притоптаны или выкорчеваны при вырубке деревьев. Поскольку зеленых растений на поверхности нет, а моховой покров перекрыт слоем древесных остатков, поглощения CO_2 в данном пункте не происходило и поток CO_2 менялся от 182.8 до 480.3 $\text{мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$.

Самая длительная серия измерений проведена на микроповышении на сосново-кустарничково-сфагновом болоте (П-5), где в течение 33 часов наблюдались как значительное выделение (841.5 $\text{мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$) в 2 ч ночи, так и поглощение (-599.3 $\text{мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$) в полдень, углекислого газа. Средний за календарные сутки (11 июля) поток CO_2 принимает положительное значение 25.5 $\text{мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, что свидетельствует о суммарном выделении углерода в середине лета. Однако, такая оценка является не полной, поскольку не включает учет поглощения CO_2 древесным ярусом, но содержит в себе поток от дыхания корней деревьев.

Измерение суммарного экосистемного обмена на березово-вахтово-осоково-гипновом эвтрофном болоте (П-7) показало, что скорость поглощения CO_2 меняется в диапазоне 223,7 – 708.5 $\text{мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$. Измерения проводились в дневное время в очень жаркую погоду, вероятно в условиях угнетения фотосинтеза. При этом, удельный поток CO_2 в условиях искусственного затенения составил $1610.4 \pm 241.3 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$.

Максимальные вариации потоков CO_2 зарегистрированы на вахтово-сфагновой мезотрофной открытой топи (П-8), где максимальное поглощение в 13:00 было 1161.6 $\text{мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, а выделение CO_2 со скоростью до 687.3 $\text{мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ получено в полночь.

Корректная интерпретация результатов измерений возможна только при использовании балансовых математических моделей, описывающих основные стоки и источники углекислого газа в экосистеме, учитывающих изменения управляющих параметров [Dyukarev et al., 2019].

Измерения эмиссии метана были проведены в шести болотных массивах. В некоторых из них было выделено несколько микроландшафтов, которые имеет смысл рассматривать по отдельности. Эмиссия метана значительно различалась для более (то есть с меньшим уровнем болотных вод) и менее обводнённых участков во всех исследованных экосистемах. А именно эмиссия из более обводнённых участков – мочажин была значительно выше (в два и более раз), чем из локальных повышений – гряд и кочек. Это традиционно объясняется тем, что в более обводнённых участках большая часть торфа оказывается под водой, то есть в анаэробных (бескислородных) условиях, в которых и только в которых возможна продукция метана. Одновременно, меньшая часть профиля болота оказывается в аэробных (богатых кислородом условиях), то есть снижается окисление метана бактериями-метанотрофами, живущими в аэрируемой части толщи болота. Оба этих обстоятельства – рост продукции и снижение окисления – способствуют увеличению эмиссии метана с поверхности болота.

Другой важной для эмиссии метана характеристикой болотных экосистем является трофность, то есть богатство болота элементами минерального питания растений. При прочих равных условиях (уровне болотных вод и температуре торфяной толщи), эмиссия метана из мезотрофных и эвтрофных болот значимо ($p = 0.0091$, $N = 12$ и $p = 0.0091$, $N = 12$ соответственно) выше (в два и более раза), чем из исследованных олиготрофных болот. При этом эмиссия метана из мезотрофной и эвтрофной болотных экосистем значимо между собой не отличается ($p = 1$, $N = 6$). Эти выводы справедливы и при сравнении обводнённых участков разной трофности, и повышенных ($p = 0.0028$, $N = 15$ и $p = 0.0120$, $N = 15$ для сравнения повышения на олиготрофном болоте (П-2) с кочками на мезотрофном (П-7) и эвтрофном болоте (П-6) соответственно). Таким образом, с увеличением трофности (в частности с увеличением pH от 3.8–4.0 до 6.5 и удельной электропроводности от 40 до 180 мкСм/см) в исследованных болотных экосистемах существенно возрастает эмиссия метана.

Результаты экспедиционных измерений потоков парниковых газов были экстраполированы на весь вегетационный период с помощью математических моделей и на другие типы болотных экосистем. Суммарный экосистемный обмен формируется как разность фотосинтетической ассимиляции углекислого газа растениями и эмиссии CO_2 в процессе дыхания растений и микроорганизмов. Болотные экосистемы с большими запасами биомассы, в том числе и в древесном ярусе, имеют значительные потоки (более 1500 $\text{г CO}_2/\text{м}^2$) связанные с фотосинтезом, однако в них же велика и расходная составляющая углеродного обмена (750 – 2200 $\text{г CO}_2/\text{м}^2$). В результате получено, что наибольшее итоговое поглощение углекислого газа наблюдается на мезотрофной осоково-вахтовой топи (1062 $\text{г CO}_2/\text{м}^2$) и в низком ряме, с учетом древесного яруса (603 $\text{г CO}_2/\text{м}^2$). Остальные болота накапливают 244 – 466 $\text{г CO}_2/\text{м}^2$ из атмосферы в течение вегетационного сезона.

Рассчитанная суммарная эмиссия метана из исследованных болот имеет наибольшие значения (32,6 $\text{г CH}_4/\text{м}^2/\text{год}$) на повышении в вахтово-сфагновой топи. Остальные болотные экосистемы разделяются на переувлажненные (поток 7 – 11 $\text{г CH}_4/\text{м}^2/\text{год}$) и с уровнем болотных вод на 20–30 см ниже поверхности (поток 4 – 6 $\text{г CH}_4/\text{м}^2/\text{год}$).

Большие потоки углекислого газа и метана зарегистрированы с поверхности нарушенных болот - просек по низкому рямю, где в зависимости от наземного покрова выделение CO_2 может составлять 339 – 1267 г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{год}$, а эмиссия CH_4 – 12,5 г $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{год}$.

Оценка регионального баланса парниковых газов для территории площадью 1497 км², показала, что суммарно наземные экосистемы поглощают около 666 тыс. тонн в экв. CO_2 в год. Леса ежегодно аккумулируют 558.5 тыс. т в экв. CO_2 . Болотные экосистемы поглощают суммарно 112.8 тыс. т в экв. CO_2 . Среди болотных экосистем наибольшей поглотительной способностью обладают облесенные олиготрофные болота.

Несмотря на то, что интенсивность годовой аккумуляции углерода в лесных экосистемах выше, чем в болотах, в долговременной перспективе болота консервируют больше атмосферного углерода. По результатам радиоуглеродного анализа верхних слоев торфа долговременная аккумуляция в болотных экосистемах исследуемой территории составляет 59,6 тыс. т CO_2 в год, а долговременная аккумуляция углерода в почве лесных экосистем оценивается в 22 тыс. т CO_2 в год.

Работа выполнена при поддержке компании Салым-Петролеум Девелопемент Н.В. (договор № MOS/19/0053 SAP PO 4513402701), Югорского государственного университета (грант No. 17-02-07/58), и РФФИ (грант № 18-44-860017).

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Инвентаризация биоразнообразия и создание природоохранной карты на территорию Салымской группы месторождений. Отчет о научно-исследовательской работе в рамках договора № MOS/13/0035. Ханты-Мансийск. ЮГУ. 2015. – 141 с.*
2. Dyukarev E., Godovnikov E., Karpov D., Kurakov S., Lapshina E., Filippov I., Filippova N., Zarov E. Net ecosystem exchange, gross primary production and ecosystem respiration in ridge-hollow complex at Mukhrino bog // *Geography, Environment, Sustainability* 2019 Vol.12, No 2, p. 227-244.

Features of NDVI changes in the West Siberian Plain in the context of climate change;

Korotkova E.M., Zuev V.V.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia
E-mail: katia_sova@mail.ru

The impact of climate change on ecosystems increases with latitude, and the landscapes of the northern territories - taiga and tundra - are most subject to climatic effects. The vegetation cover of these areas is most sensitive to air temperature changes and responds to them with changes in its productivity. Forest and swamp landscapes of Western Siberia take an important part in the carbon cycle, however, information on their changes due to the observed climate change is practically absent. To assess the impact of climate change on the vegetation of Western Siberia, an analysis of the relationship between the vegetation index NDVI and air temperature was made. NDVI GIMMS data set (data are available for the period 1982-2015) and the air temperature at weather stations of the Roshydromet network were used in this work. Weather stations with long series of observations of air temperature were selected for the territory of the West Siberian Plain taiga and tundra.

Seasonal NDVI and air temperatures for each station and their linear trends were calculated for the warm period. Significant positive trends in seasonal NDVI are observed for the most stations in the region. The exceptions are heavily swamped areas of the forest-tundra and northern taiga – the areas of the stations Salekhard, Yanov Stan, Nadya, Tarko-Sale, Tolka, Berezovo, Halasavey, as well as the middle taiga station Aleksandrovs-koe. The trends in warm period air temperatures at the most of stations in the region are positive, but not significant.

The seasonal NDVI value is mostly defined by the spring and autumn months when air temperature is a limiting factor of photosynthesis. At tundra stations, the maximum correlation coefficients of the monthly and seasonal NDVI values are observed in the first month of the warm period (June) with mainly strong correlation ($r > 0.7$). At forest-tundra stations, the maximum correlation coefficients are also observed in the spring (in May-June), the correlation is strong, however, the autumn peak in September is also observed, but its values vary at the significance level. At the stations of the northern taiga, the autumn peak is more clear; high correlation coefficients are typical for seasonal and monthly NDVI values in May, June, and September. In the middle taiga, correlation coefficients during the warm period have different behavior. Peaks are also observed in May and September, but the

results for different stations vary greatly. For stations of the southern taiga and sub-taiga the correlation coefficients are also less consistent as compared with the stations of the tundra, forest-tundra and northern taiga; the maximum correlation coefficients are observed on average in April-May and October. Thus, it is clear that the autumn and spring months, when air temperature is the main factor limiting photosynthesis and therefore affecting the vegetation, have the greatest contribution to the change in the seasonal NDVI value.

An analysis of sliding 20-year correlation coefficients of monthly NDVI values and air temperature showed that high correlation between NDVI and air temperature is observed in months that determine the seasonal dynamics of NDVI for most of the stations. Higher trend values of a series of moving 20-year correlation coefficients show that the vegetation of a given territory is more sensitive to the observed increase in air temperature. Further definition of the vegetation types corresponding to the territories of the selected weather stations will make it possible to determine which of them are more and less sensitive to the effects of a changing climate.

Особенности изменений NDVI на территории Западно-Сибирской равнины в условиях изменения климата

Короткова Е.М., Зуев В.В.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
E-mail: katia_sova@mail.ru

Трансформации природных экосистем, обусловленные наблюдающимися климатическими изменениями, отмечаются во многих регионах мира [1]. С увеличением широты влияние климатических изменений на экосистемы возрастает, и наиболее подверженными климатическому воздействию становятся ландшафты северных территорий – тайги и тундры [2]. Растительный покров этих природных зон наиболее чувствителен к изменениям температуры воздуха и отвечает на ее изменения изменениями в продуктивности [3]. Лесные и болотные ландшафты, распространенные в Западной Сибири, являются важным звеном углеродного цикла, однако, информация об их изменениях в свете наблюдающего изменения климата практически отсутствует. Таким образом, возникает необходимость исследования влияния климатических изменений на растительность Западной Сибири.

Различия в отклике растительности на климатические изменения обусловлены ее типом, природной зоной и условиями произрастания. Для оценки влияния климатических изменений на растительность Западной Сибири был проведен анализ связи вегетационного индекса NDVI и температуры воздуха. NDVI определяется по разности спектральной яркости между красным и ближним инфракрасным диапазонами на космоснимках поверхности Земли и выступает показателем, характеризующим количество фотосинтетически активной биомассы. В работе использовался набор данных NDVI GIMMS, представляющий собой среднемесячные значения индекса NDVI за период 1982-2015 гг. с разрешением $1/12 \times 1/12^\circ$ [4]. Для получения информации о температуре воздуха использовались ряды, станций Росгидромета, доступные на сайте ВНИИГМИ-МЦД [5]. На территории тайги и тундры Западно-Сибирской равнины были отобраны метеостанции, имеющие длинные ряды наблюдений за температурой воздуха. Для расчета NDVI в окрестностях каждой метеостанции выбиралась область размером $0,5 \times 0,5^\circ$ с наиболее однородным ландшафтом и минимальным количеством объектов инфраструктуры, данные в которой осреднялись. В работе использовались среднемесячные значения NDVI и температуры воздуха, все расчеты выполнены для уровня значимости 0,05.

Список метеостанций, отобранных для анализа, с указанием природной зоны приведен в табл. 1. Исходя из данных о температуре воздуха для территории каждой станции был определен теплый период, характеризующийся положительными среднемесячными температурами за 1982-2015 гг. (табл. 1).

Таблица 1. Метеостанции, отобранные для анализа.

Природная зона	Станция	Теплый период
Тундра	Антипаюта, Новый Порт, Тазовский, Ныда	июнь-сентябрь
Лесотундра	Салехард, Янов Стан, Надым, Тарко-Сале	май-сентябрь
Северная тайга	Саранпауль, Толька, Березово, Халясавэй	май-сентябрь
Средняя тайга	Октябрьское, Няксимволь, Ларьяк, Ханты-Мансийск, Угут, Александровское, Ванжиль-Кынак, Напас, Леуши, Средний Васюган	май-сентябрь
Южная тайга	Усть-Озерное, Колпашево, Тобольск, Туринск, Бакчар, Пудино	апрель-октябрь
Подтайга	Тюмень, Первомайское, Тара, Томск, Северное	апрель-октябрь

За теплый период, определенный в табл. 1, были рассчитаны сезонные значения NDVI и температуры воздуха для каждой станции и их линейные тренды за 1982-2015 гг. Как видно из рис. 1а значимые положительные тренды сезонного значения NDVI наблюдаются в районах практически всех станций региона. Исключения составляют сильно заболоченные территории лесотундры и северной тайги – районы станций Салехард, Янов Стан, Надым, Тарко-Сале, Толька, Березово, Халысавэй, а также среднетаежной станции Александровское. Тренды температуры воздуха теплого периода на большинстве станций региона положительны, однако не значимы (рис. 1б).

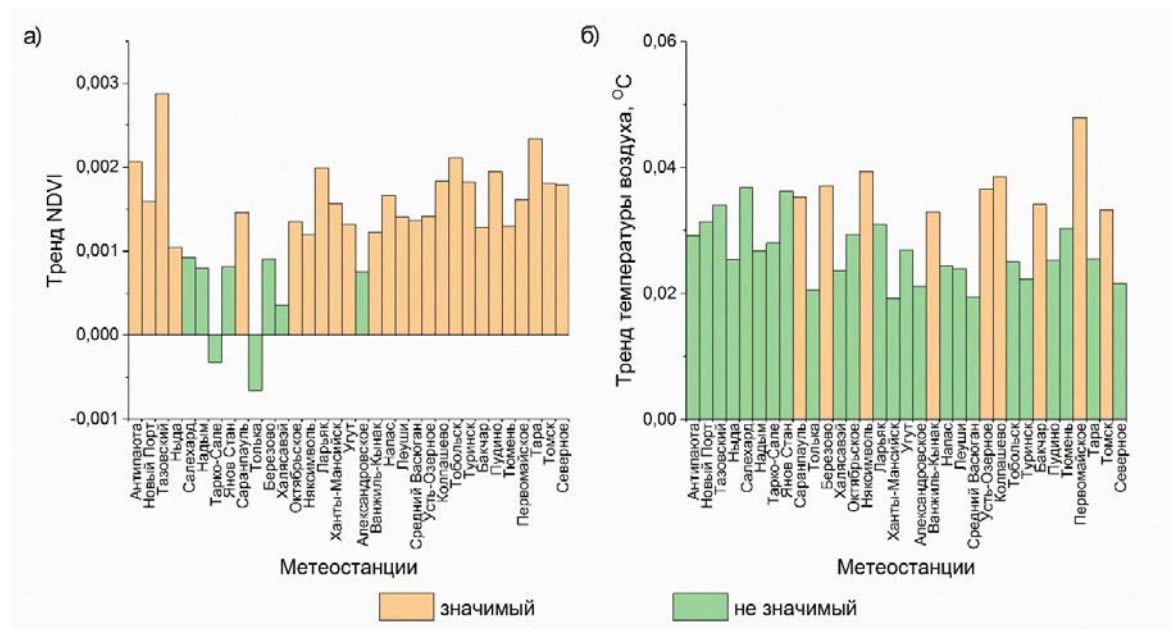


Рис. 1. Линейные тренды сезонного значения а) NDVI, б) температуры воздуха на метеостанциях региона за 1982-2015 гг.

По результатам ранее проведенных исследований [6] установлено, что сезонное значение NDVI на территории тайги и тундры Западной Сибири в значительной степени определяется его значением в первый месяц теплого периода. Для детализации этого вывода рассмотрим коэффициенты корреляции сезонного и месячного значений NDVI для всех отобранных станций (рис. 2). Видно, что наибольший вклад в формирование сезонного значения NDVI вносят весенние и осенние месяцы – месяцы, когда температура воздуха является лимитирующим фактором фотосинтеза. На станциях тундры максимальные коэффициенты наблюдаются в первом месяце теплого периода – июне – и в основном показывают сильную корреляцию с сезонным значением NDVI ($r > 0,7$). На станциях лесотундры максимальные коэффициенты корреляции так же наблюдаются весной в мае-июне, связь так же является сильной, однако, проявляется и осенний пик, приходящийся на сентябрь, значения которого варьируются на уровне значимости. На станциях зоны северной тайги осенний пик более выражен, коэффициенты корреляции, свидетельствующие о сильной и средней связи сезонного и месячного значений NDVI, характерны для мая, июня и сентября. В зоне средней тайги коэффициенты корреляции в течение теплого периода ведут себя неоднозначно. Среднерегиональное значение указывает на наличие майского и сентябрьского пиков, однако данные по станциям сильно разнятся. Так, например, для станций Ханты-Мансийск, Александровское и Леуши максимальные значения коэффициентов корреляции отмечаются в июле, для станции Няксимволь характерен только осенний пик в сентябре. На станциях южной тайги и подтайги ход коэффициентов корреляции так же в меньшей степени согласован по сравнению со станциями тундры, лесотундры и северной тайги, максимальные коэффициенты в среднем наблюдаются в апреле-мае и октябре. Таким образом, понятно, что наибольший вклад в изменение сезонного значения NDVI вносят осенние и весенние месяцы, когда основным фактором, лимитирующим фотосинтез, и, следовательно, влияющим на развитие растительности, является температура воздуха.

Определение степени климатического воздействия на растительность отдельных территорий производилось с помощью корреляционного и трендового анализа. За период наблюдений 1982-2015 гг. для каждой станции по 20-летиям рассчитывались скользящие коэффициенты корреляции между NDVI апреля, мая, июня, сентября и октября и температурой воздуха того же и предыдущего месяца. Из полученных скользящих коэффициентов корреляции были сформированы ряды, для каждого ряда рассчитывался линейный тренд. Из всех рядов, полученных для одной станции, выбирался ряд с максимальным значением линейного тренда. Максимальные значения линейных трендов полученных рядов для каждой станции приведены в табл. 2.

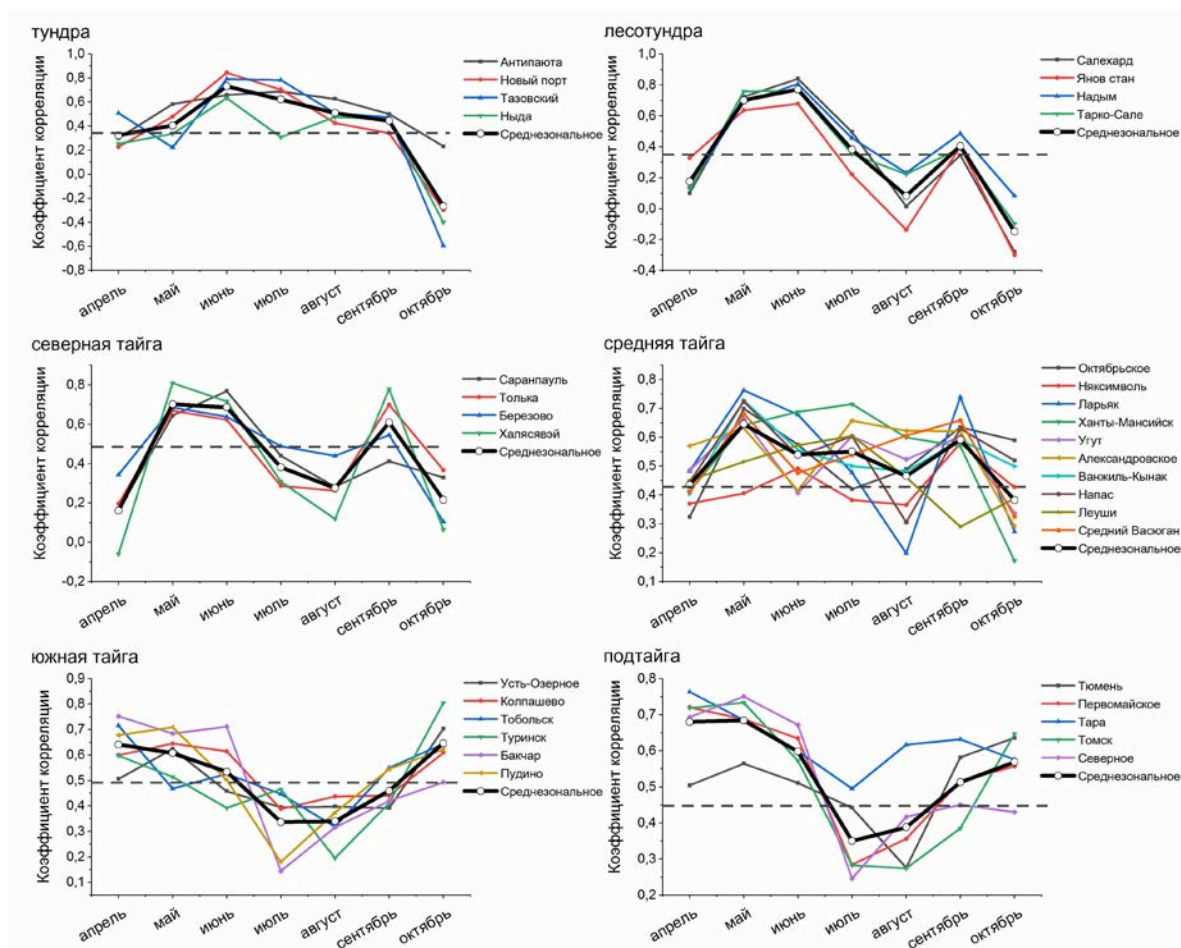


Рис. 2. Коэффициенты корреляции сезонного и месячного значений NDVI для рассматриваемых станций за период 1982–2015, пунктиром обозначено критическое значение коэффициента корреляции при уровне значимости 0,05 ($r = 0,34$).

Таблица 2. Максимальные тренды рядов скользящих 20-летних коэффициентов корреляции NDVI и температуры воздуха (значимые – жирным шрифтом; серым цветом обозначены соответствия максимальных трендов месяцам, определяющим сезонную динамику NDVI).

Пр. зона	Станция	Месяц, определяющий сезонную динамику NDVI	Тренды коэффициентов корреляции (месяц NDVI / месяц Т)					
			VI / V	V / IV	IV / III	IX / VIII	X / IX	X / X
Тундра	Антипаюта	VII	0,030					
	Новый Порт	VI	0,021					
	Тазовский	VI	0,035					
	Ныда	VI	0,031					
Лесотундра	Салехард	VI	0,013			0,011		
	Янов Стан	VI	0,050			0,050		
	Надым	VI	0,016			0,025		
	Тарко-Сале	VI	0,023			0,024		
Сев. тайга	Саранпауль	VI, IX		0,016		0,026		
	Толька	V, IX	0,038			0,039		
	Березово	V, IX		0,021		0,030		
	Халясавэй	V, IX	0,013			0,034		

Пр. зона	Станция	Месяц, определяющий сезонную динамику NDVI	Тренды коэффициентов корреляции (месяц NDVI / месяц T)					
			VI / V	V / IV	IV / III	IX / VIII	X / IX	X / X
Ср. тайга	Октябрьское	V, IX		0,036		0,035		
	Няксимволь	V, IX		0,034		0,045		
	Ларьяк	V, IX		0,021			0,030	
	Ханты-Мансийск	VII		0,012		0,055		
	Угут	V, IX		0,026				0,022
	Александровское	V, IX	0,024					0,028
	Ванжиль-Кынак	V, IX	0,012					0,030
	Напас	V, IX		0,009			0,049	
	Леуши	VII		0,036		0,050		
	Средний Васюган	VI	0,017				0,046	
Юж. тайга	Усть-Озерное	V, X	0,012				0,028	
	Колпашево	V, X			0,029		0,034	
	Тобольск	IV, X			0,028	0,036		
	Туринск	IV, X			0,041	0,044		
	Бакчар	IV, X			0,018	0,035		
	Пудино	V, X			0,031		0,046	
Подтайга	Тюмень	IV, X			0,019	0,034		
	Первомайское	IV, X			0,018	0,029		
	Тара	IV, IX			0,042	0,013		
	Томск	V, X			0,010	0,022	0,021	
	Северное	V, X			0,029		0,025	

Видно, что приведенные значения трендов в основном значимы, и на большей части станций в весенний период соответствуют месяцам, определяющим сезонную динамику NDVI. Так, повышение температуры воздуха в отмеченные месяцы приводит к увеличению NDVI, как правило, в следующий месяц, который определяет развитие растительности в течение сезона. Чем выше значение тренда, тем более чувствительна растительность заданной территории к наблюдаемому росту температуры воздуха. Уточнение типов растительности, соответствующих территориям отобранных метеостанций, позволит определить, какие из них более и менее чувствительны к воздействию изменяющегося климата.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тишков А.А. Биогеографические последствия природных и антропогенных изменений климата // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 4. С. 356-366.
2. Seidl R. et. al. Forest disturbances under climate change // Nat. Clim. Change. 2017. V. 7. № 6. P. 395-402.
3. Seddon A.W.R., Macias-Fauria M., Long P.R., Benz D., Willis K.J. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability // Nature. 2016. V. 531. № 7593. P. 229-232.
4. Pinzon J.E., Tucker C.J. A Non-Stationary 1981-2012 AVHRR NDVI3g Time Series // Remote Sens. 2014. V. 6. № 8. P. 6929-6960.
5. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швеи Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2014621485. <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных>.
6. Зуев В.В., Короткова Е.М., Павлинский А.В. Климатически обусловленные изменения растительного покрова тайги и тундры Западной Сибири в 1982-2015 гг. по данным спутниковых наблюдений // Исследование Земли из космоса. 2019. № 6. С. 66-76.

Analysis of the surface wetness changes in mire Maly Labysh in the south of West Siberia during the last two millennia

Kurina I.V., Blyakharchuk T.A.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: irina.kuryina@yandex.ru; blyakharchuk@mail.ru

In this study we investigated the peat deposits of transitional sedge-*Sphagnum* mire using testate amoeba analysis to reconstruct the paleohydrology of the mire for the last two millennia. The goal of our research is to evaluate the inferred water table depth changes in the mire in the context of regional and continental climate changes in the late Holocene.

As an object of our study, we have chosen transitional mire Maly Labysh located in the floodplain of the River Kondoma, in the lowlands of the western macro-slope of the Kuznetsk Alatau mountains (52.6306° N, 88.0829° E, 490 m a.s.l.). This territory belongs to the Shor National Park in the south of the Kemerovo region. The surrounding macro-slope is covered with mountain taiga forests. The five radiocarbon dates for the investigated mire were calibrated in the BACON program and were presented in the number system – Before Present (from 1950 back). The thickness of peat in the coring place is 240 cm. The age of peat from the depth 200 cm is 2200 cal. years.

We analyzed testate amoeba shells in the 43 samples from the peat core. Based on testate amoebae data, a quantitative reconstruction of the depth to water table has been calculated using the previously published model of transfer function. This model was developed using the training set of testate amoeba data from minerotrophic mires in the southern taiga of West Siberia.

As a result the inferred water table depth values indicate generally wet conditions on mire surface throughout the history of its development, testate amoeba assemblages reflect transitional trophic state of the mire, most likely owing to regular feeding of mire by river waters. Against this background, two short-term drying of the surface of the mire 2100–1900 and 1600–1400 yr BP stand out. These dry events are consistent with drier conditions revealed from other lake and bog sediments in the south of West Siberia.

Afterwards an unusual shift to oligotrophic conditions on mire surface was documented between 1400–1100 yr BP, where hydrophilic testate amoeba taxa (*Hyalosphenia papilio* and *Archerella flavum*) typical for ombrotrophic bogs dominated in fossil assemblages. Despite these taxa indicate wet conditions on mire surface, we consider, that their dominating was caused by the weakening of the influence of the nearby river on the development of the mire (lack of regular flooding of its surface) and the resulting stagnant water on the mire surface and its acidification. We believe that the decrease in water level in the river was caused by drier climatic conditions. This coincides with the period of Medieval Climate Anomaly (1250–800 yr BP), which was accompanied by a drier and warmer climate conditions. The response to this well documented event was also reflected in the other lake and bog sediments in the south of West Siberia.

However, then, starting at ca. 900 yr BP Maly Labysh mire gradually came back to transitional conditions again and its surface moisture remained at an average level (likely water table depth 15 cm below the mire surface) without notable fluctuations. Transitional conditions indirectly indicate the resumption of regular mire flooding by river waters, which is probably caused by increased humidity of climatic conditions.

Thus, centennial-scale climate fluctuations have a clear impact on the dynamics of moisture in the Maly Labysh mire over the past two millennia. The high level of correspondence of the revealed periods of short drying with similar events in the development of other lake and bog sediments in the south of West Siberia indicates the predominant influence of the intensity of westerly winds carrying moist air masses from the North Atlantic on the formation of the regional climate.

Анализ уровня обводненности болота Малый Лабыш на юге Западной Сибири в течение двух последних тысячелетий

Курьина И.В., Бляхарчук Т.А.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: irina.kuryina@yandex.ru; blyakharchuk@mail.ru

Анализ климатических изменений в прошлом является фундаментальной основой для моделирования и прогноза климатических изменений в будущем. Наряду с глобальными трендами климатических колебаний в континентальном масштабе, существуют различные аспекты регионального климата, в котором глобальные тренды преломляются через взаимодействие с локальными особенностями водного баланса территории, рельефа, растительного покрова и движения воздушных масс, определяя специфику климатических колебаний в каждом конкретном регионе.

Память о климатических изменениях, происходивших в прошлом, сохраняется в разных природных объектах, в том числе в торфяных отложениях болот. Анализ остатков биоиндикаторов в торфе позволяет получить информацию об условиях природной среды, существовавших во время исторического развития болота, включая и изменения климата. Одним из таких биоиндикационных методов является анализ раковинных амёб, с помощью которого можно получить количественную реконструкцию уровня болотных вод и поверхностной влажности болота.

Целью нашего исследования является реконструкция уровня болотных вод на болоте в слабо изученном регионе низкоротной Шории на юге Западной Сибири в контексте региональных и глобальных климатических колебаний позднего голоцена.

Объектом для исследования выбрано высоко обводненное сфагново-осоковое переходное болото Малый Лабыш, расположенное в пойме р. Кондома (52,6306° с.ш. 88,0829° в.д., 490 м над у.м.) в низкоротье западного макросклона Кузнецкого Алатау, покрытого таежными лесами, на территории Шорского Национального парка в Кемеровской области. На болоте была отобрана торфяная колонка на всю глубину торфяных отложений мощностью 240 см. Шаг отбора проб в колонке 5 см. Для определения возраста отложений проведено радиоуглеродное датирование 5 проб торфа. Возраст отложений на глубине 200 см составил 2200 кал. лет. Далее по тексту приведены данные калиброванного возраста (лет назад от 1950 г.). Калибровка полученных дат проведена при помощи калибровочной кривой IntCal13 [1] в программном приложении Bacon 2.2 [2].

В 43 образцах торфа проведен анализ комплексов раковинных амёб. Подготовка проб к анализу проведена по стандартной методике с небольшими модификациями [3]. Пробы сырого торфа (объем 1-2 см³) промыты через сито (размер ячейки 0,355 мм), чтобы отделить крупные растительные частицы. Из полученных водных суспензий после отстаивания удален излишек влаги, объем суспензии доведен до 10 мл. Затем капля данной суспензии анализировалась под микроскопом при 200-400-кратном увеличении, определены процентные соотношения встреченных таксонов раковинных амёб. Для количественной реконструкции уровня болотных вод (УБВ) в торфяной колонке использована разработанная ранее [3] модель трансферной функции взвешенного среднего (WA-inv-tol, weighed averaging with downweighting tolerance and inverse deshrinking) на основе калибровочной выборки проб современных комплексов раковинных амёб, обитающих на низинных и переходных болотах в южно-таежной подзоне Западной Сибири. Эффективность данной модели оценивается среднеквадратичной погрешностью предсказания УБВ (RMSEP = 6,6 см) и корреляцией между измеренными и предсказанными значениями УБВ ($R^2 = 0,82$), рассчитанными методом перекрестной проверки (bootstrapping, количество циклов = 1000). Расчеты УБВ выполнены в среде R [4] с использованием пакета rioja [5].

В результате выявлена высокая концентрация раковин амёб в торфе болота на всей глубине отложений (проанализировано от 26 до 992 раковин амёб в каждой пробе), достаточная для проведения количественной реконструкции УБВ. Основными доминирующими видами в торфяной колонке являются гидрофильные *Hyalosphenia papilio*, *Archerella flavum*, *Centropyxis constricta* v. *minima* и два таксона из рода *Diffflugia* (*Diffflugia* sp.1, *Diffflugia* sp.2); и ксерофильные *Trinema lineare*, *Euglypha rotunda*, *Corythion pulchellum*. Кластерный анализ палеокомплексов раковинных амёб позволил выделить 3 основные стадии в формировании торфяных отложений болота (рис. 1).

1. 240-135 см – В придонных слоях торфяной залежи (240-220 см) сформировались специфические сообщества раковинных амёб с доминированием видов из родов *Centropyxis* (*C. constricta* v. *minima*, *C. elongata*, *C. minuta*, *C. sylvatica* v. *minor*), *Diffflugia*, *Plagiopyxis*. Это индицирует условия высокой минерализованности торфяного субстрата, в котором развивались данные сообщества. С увеличением мощности торфяных отложений доминантами в сообществах раковинных амёб становятся виды *Trinema*

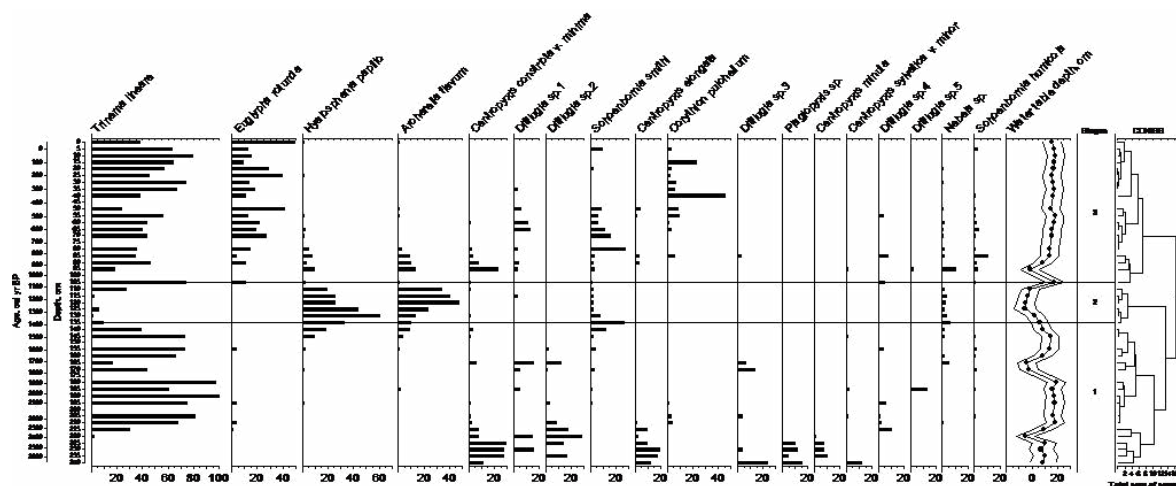


Рис. 1. Распределение относительных обилий таксонов раковинных амёб по глубине торфяной колонки болота Малый Лабыш и динамика уровня обводненности болота (Water table depth, cm) (погрешность предсказания значений УБВ определена методом бутстрепа (1000 циклов) и показана тонкими линиями слева и справа от кривой).

lineare и *Diffugia sp.* Реконструированный УБВ (УБВ_{ср.} = 10 см) индицирует постепенное повышение уровня обводненности поверхности болота с ростом залежи.

2. 135-105 см – на этой стадии среди раковинных амёб преобладают олиготрофные гидрофильные виды *Archerella flavum* и *Hyalosphenia papilio*. Реконструкция УБВ (УБВ_{ср.} = -1 см) индицирует очень высокий уровень обводненности болота. Однако в данном случае важно отметить, что резкое возрастание относительного обилия олиготрофных видов раковинных амёб диагностирует скорее олиготрофизацию среды на поверхности болота, чем повышение его обводненности.

3. 105-0 см – в сообществах раковинных амёб доминируют виды *Trinema lineare*, *Euglypha rotunda* и *Corythion pulchellum*. Повторное преобладание *Trinema lineare* отражает возвращение мезотрофных условий на поверхности болота. Реконструированный УБВ (УБВ_{ср.} = 15 см) индицирует средний уровень обводненности.

Результаты реконструкции УБВ по данным раковинных амёб индицируют, в целом, высокий уровень обводненности болота в течение всей истории его развития, а комплексы раковинных амёб указывают на мезотрофные условия среды. На этом фоне в течение первой стадии выделяются два кратковременных обсыхания поверхности болота 2100-1900 и 1600-1400 л.н. (рис. 2). Синхронно выявлены

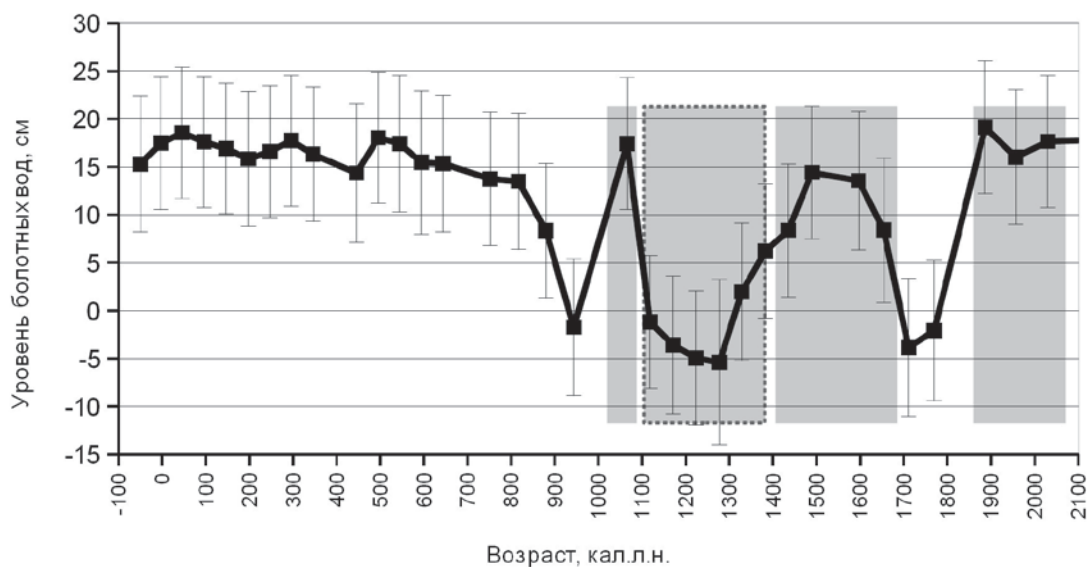


Рис. 2. Динамика уровня обводненности болота Малый Лабыш в течение последних двух тысячелетий. Отрицательные значения УБВ индицируют уровень воды выше поверхности болота. Погрешность предсказания значений УБВ определена методом бутстрепа (1000 циклов) и показана вертикальными отрезками. Реконструированные периоды более сухих климатических условий отмечены серыми полосами. Период олиготрофизации поверхности болота выделен пунктирной рамкой.

краткие обсыхания поверхности 2200, 2000, 1600 и 1500 л.н. верхового болота в подтаежной зоне, находящегося в 750 км на северо-западе [6], а также снижение уровня озера Ши́ра 2150-1950, 1800-1750 и 1550-1500 л.н., расположенного в 250 км на северо-востоке [7] от болота Малый Лабыш.

Затем в период (2 стадия, 105-135 см, 1400-1100 л.н.) выявлено доминирование типичных олиготрофных видов: *Hyalosphenia papilio*, *Archerella flavum* (рис. 1). Вероятно, преобладание олиготрофных видов в данный период отражает ослабление влияния близлежащей реки на развитие болота (отсутствие регулярных затоплений его поверхности) и последовавший в связи с этим застойный водный режим на поверхности болота и его закисление. Мы полагаем, что снижение уровня воды в реке было вызвано более сухими климатическими условиями. По времени это совпадает с периодом Средневекового Потепления (1250-800 л.н., [6]), который сопровождался более сухим климатом 1250-1200 и 1100-1050 л.н. [6] и 1350-1100 л.н. [7].

Однако затем, начиная с 900 л.н. болото Малый Лабыш вновь постепенно стало мезотрофным и его поверхностная увлажненность сохранялась на среднем уровне (УБВ на 15 см ниже поверхности болота) без значительных колебаний. Мезотрофные условия косвенно свидетельствуют о возобновлении регулярных подтоплений болота речными водами, что вероятно вызвано повышением увлажненности климатических условий.

Таким образом, вековые колебания климата оказали явное влияние на динамику увлажненности болота Малый Лабыш в течение последних двух тысяч лет. Высокий уровень соответствия выявленных периодов кратких обсыханий с подобными событиями в развитии других озерных и болотных отложений на юге Западной Сибири свидетельствуют о преимущественном влиянии интенсивности западного переноса влажных воздушных масс из Северной Атлантики на формирование регионального климата.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-55-53015/ГФЕН_a).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Reimer P. J., Bard E., Bayliss A., Beck J. W., Blackwell P. G., Bronk Ramsey C., Grootes P. M., Guilderson T. P., Hafflidason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T. J., Hoffman D. L., Hogg A. G., Hughen K. A., Kaiser F., Kromer B., Manning S. W., Niu M., Reimer R. W., Richards D. A., Scott E. M., Southon J. R., Staff R. A., Turney C. S. M., van der Plicht J. *IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP* // *Radiocarbon*. 2013. 55. P. 1869–1887.
2. Blaauw M., Christen J.A. *Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process* // *Bayesian Analysis*. 2011. 6. P. 457–474.
3. Kurina I. V., Li H. *Why do testate amoeba optima related to water table depth vary?* // *Microbial Ecology*. 2019. 77. P. 37–55.
4. R Core Team: *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2012. URL: <https://www.r-project.org/>
5. Juggins S. *rioja: Analysis of quaternary science data, R package version 0.9-21*. 2017. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=rioja>
6. Willis K.S., Beilman D., Booth R.K., Amesbury M., Holmquist J., MacDonald G. *Peatland paleohydrology in the southern West Siberian Lowlands: Comparison of multiple testate amoeba transfer functions, sites, and Sphagnum $\delta^{13}C$ values* // *The Holocene*. 2015. Vol. 25(9). P. 1425–1436.
7. Hildebrandt S., Müller S., Kalugin I.A., Dar'ın A.V., Wagner M., Rogozin D.Y., Tarasov P.E. *Tracing the North Atlantic decadal-scale climate variability in a late Holocene pollen record from southern Siberia* // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2015. 426. P. 75–84.

Energy, H₂O and CO₂ fluxes at a recently clear-cut and an undisturbed spruce forest in the southern taiga of European Russia

Mamkin V.V., Varlagin A.V., Kurbatova J.A.

A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS, Moscow, Russia.

Clear-cutting impacts the climate through the changes in energy, water vapor and greenhouse gas exchange between forest ecosystems and the atmosphere. This study is focused on the consequences of the clear-cutting for the ecosystem energy, H₂O and CO₂ fluxes. The flux data was obtained using paired eddy covariance measurements in an undisturbed mature spruce forest (RuFyo2 FLUXNET station) and adja-

cent recently clear-cut site (CC) in the southern taiga of European Russia during 3 growing seasons following harvest (2016-2018).

The study sites are located on the territory of Central Forest Biosphere Reserve (CFBR) (56°25' - 56°37'N, 32°43' - 33°01' E). The vegetation of the reserve is represented by the typical communities of southern taiga with domination of spruce and admixture of different deciduous species. The forest at CC site was harvested in March-April 2016 and was regenerated by young small-leaved trees and herbaceous vegetation. Eddy covariance flux measurements were carried out using standard instrumentation for FLUXNET stations. Instruments were mounted at the flux towers (42 m at RuFyo2 and 3 m at the CC sites). All steps of data processing were performed using standard software with implementing of all required corrections and statistical tests according to the well-established recommendations for data analysis (Aubinet et al., 2012; Burba, 2013).

Weather conditions in the growing seasons of 2016 and 2018 were relatively warm and dry whereas the growing season in 2017 was relatively cold and moist in comparing with the long-term means (1981-2010). Albedo-driven changes in net radiation at the CC site was observed. Lower net radiation (in comparing with RuFyo2) at CC site caused lower values of sensible (H) and latent (LE) heat fluxes (fig.1). Mean seasonal Bowen ratio ($\beta=H/LE$) showed changes between 0.41 and 0.50 at RuFyo2 and between 0.31 and 0.52 at CC site. Evapotranspiration sums at CC site were lower than at the RuFyo2 (by 30% in 2016, by 13% in 2017 and by 17% in 2018). CC site was a consistent source of the CO₂ to the atmosphere in 2016 and a carbon dioxide sink in the period from the second half of May to the first half of July in 2017 and 2018. Mean daily sums of the net ecosystem exchange (NEE) at CC site were positive (fig.2). Mature spruce forest was a CO₂ source in 2016 and a sink in 2017 and 2018. Carbon dioxide uptake prevailed over emission in RuFyo2 during the growing seasons. The difference in the NEE between the sites was related with the differences in gross primary production (GPP) of the sites in 2016 and 2017 and with ecosystem respiration in 2018. Present study showed that clear-cut harvesting in the southern taiga leads to the decreasing in ecosystem evapotranspiration, energy exchange with the atmosphere and switches forest ecosystem from a CO₂ sink to a CO₂ source for several years after the disturbance.

The study was funded by the RFBR according to the research project № 19-04-01234 A. It was also partially supported by the Presidium of the Russian Academy of Sciences (programs № 51 «Climate change: causes, risks, consequences, problems of adaptation and regulation» and № 41 «Biodiversity of natural systems and biological resources of Russia»).

Потоки тепла, H₂O и CO₂ на свежей сплошной вырубке и в ненарушенном неморальном ельнике в условиях южной тайги Европейской территории России

Мамкин В.В., Варлагин А.В., Курбатова Ю.А.

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

Сплошная вырубка леса приводит к изменению свойств лесной экосистемы и как следствие, к трансформации процессов энерго- и массообмена (ЭМО) экосистемы с атмосферой, оказывая воздействие на климат. В настоящий момент, исследование влияния сплошной рубки на климат осуществляется с использованием численного моделирования (Lejeune et al., 2018; Olchev et al., 2018) и экспериментальных наблюдений (Aguilos et al., 2014; Williams et al., 2014). Данные экспериментальных наблюдений необходимы для верификации результатов численного моделирования, а также позволяют исследовать ответ лесной экосистемы на нарушение в широком спектре изменения условий внешней среды. К сожалению, экспериментальных данных об экосистемных потоках энергии, влаги и CO₂ между нарушенными лесными экосистемами и атмосферой, как для подзоны южной тайги (Knohl et al., 2002; Mamkin et al., 2019), так и для территории России в целом (Фёдоров и др., 2008; Machimura et al., 2005), крайне недостаточно.

Целью настоящего исследования являлся анализ влияния сплошной рубки леса на энерго- и массообмен лесных экосистем с атмосферой в условиях южной тайги Европейской части России на основе результатов непрерывных экспериментальных наблюдений методом турбулентных пульсаций на свежей сплошной вырубке и в ненарушенном неморальном ельнике в течении первых 3-х лет после удаления лесного полога.

В качестве объектов настоящего исследования были выбраны: сплошная рубка (СВ) и ненарушенный неморальный ельник (НЕ) на территории охранной зоны Центрально-Лесного государственно-

го природного биосферного заповедника (ЦЛГПБЗ) на Юго-Западе Валдайской возвышенности (Нелидовский р-н., Тверской обл., координаты: 56°25' - 56°37' с.ш. и 32°43' - 33°01' в. д.). Флора заповедника представлена типичными растительными сообществами южной тайги, в основном ельниками. Расстояние между объектами не превышает 8 км, что позволило провести сравнительный анализ потоков тепла, влаги и диоксида углерода в одинаковых погодных условиях.

Эколого-климатическая станция в ненарушенном (кислично-щитовниковом) ельнике (НЕ) начала свою работу в 1999 г. и входит в международную сеть эколого-климатических станций FLUXNET под названием RuFyo2. Преобладающими древесными породами являются: ель европейская (*Picea abies*), клён остролистный (*Acer platanoides*), вяз шершавый (*Ulmus glabra*), осина (*Populus tremula*) и берёза пушистая (*Betula pubescens*). В травянистом ярусе преобладают: щитовник мужской (*Dryopteris filix-mas*) и кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella*) (Kurbatova et al., 2008). Листовой индекс (LAI) составляет 6.5 м²·м⁻².

Эколого-климатическая станция на СВ была установлена сразу по окончании лесозаготовительных работ (6 апреля 2016 г.). Площадь СВ составляет 4.5 га. В первые недели после вырубki (начало апреля), в силу раннего начала эксперимента, наблюдалось отсутствие какой-либо растительности. Зарастание вырубki осуществлялось за счёт подроста осины, ольхи чёрной (*Alnus glutinosa*), рябины обыкновенной, клёна остролистного и различных видов травянистой растительности. LAI достигал 2.5 м²·м⁻² в 2016 г., 4.5 м²·м⁻² в 2017 г. и 3.7 м²·м⁻² в 2018 г.

Экспериментальные оценки потоков тепла, H₂O и CO₂ были получены с использованием метода турбулентных пульсаций. Датчики для пульсационных и метеорологических наблюдений были установлены на мачтах высотой 42 м в НЕ и 3 м на СВ. Измерения проводились с помощью стандартного, для станций сети FLUXNET, оборудования. На каждой из станций приборная база была разделена на две независимые системы: пульсационных и метеорологических измерений. Система пульсационных наблюдений использовалась для получения данных о пульсациях скорости ветра, акустической температуры и концентрации H₂O и CO₂, на основе которых производился расчёт потоков тепла, влаги и диоксида углерода. Пульсационные наблюдения осуществлялись с помощью акустических 3-х компонентных анемометров Gill WindMaster Pro (Gill instruments Ltd., Великобритания), и газоанализаторов: с коротким воздухозабором LI-7200 (LI-COR Inc., США) в НЕ и открытого типа LI-7500A (LI-COR Inc., США) на СВ.

Система метеорологических измерений использовалась для получения информации о компонентах радиационного баланса, температурно-влажностном режиме воздуха и почвы, а также потока тепла в почве. Измерения в НЕ проводились круглый год, а на СВ прерывались зимой. Для расчёта средних величин и кумулятивных сумм был использован период с 6 мая по 18 октября. Для характеристики погодных условий периода наблюдений были использованы данные метеостанций «Лесной заповедник», расположенной непосредственно между объектами исследования и метеостанции «Торопец», расположенной в 80 км к западу от ЦЛГПБЗ.

Обработка данных проводилась в полном соответствии с признанными в международном сообществе методическими рекомендациями (Aubinet et al., 2012; Burba, 2013). Расчёт чистого экосистемного обмена CO₂ (NEE), явного потока тепла (H), скрытого потока тепла (LE) и суммарного испарения (ET) осуществлялась с помощью специализированного программного обеспечения Eddy Pro (Li-Cor Inc., США). При расчётах применялись все необходимые коррекции и статистические тесты. Для фильтрации данных по критерию динамической скорости (*u**-filtering), заполнения пропусков и расчёта экосистемного дыхания (TER) и валовой первичной продукции (GPP), на основе данных о NEE, применялся онлайн-инструмент REddy Proc (Wutzler et al., 2018).

Анализ результатов наблюдений показал, что во все три года альбедо растительного покрова СВ (15-30%) было выше чем у НЕ (8%). В результате, средние суточные суммы радиационного баланса были достоверно выше в НЕ (в НЕ: 10.1±5.5 МДж·м⁻²·м⁻² в 2016 г., 9.6±5.4 МДж·м⁻²·м⁻² в 2017 г., 10.1±5.5 МДж·м⁻²·м⁻² в 2018 г.; на СВ: 6.2±3.4 МДж·м⁻²·м⁻² в 2016 г., 6.4±3.4 МДж·м⁻²·м⁻² в 2017 г. и 7.1±3.6 МДж·м⁻²·м⁻² в 2018 г. Снижение радиационного баланса экосистемы СВ привело к снижению её энергообмена с атмосферой: средние суточные суммы H и LE были выше в НЕ во все три года наблюдений (рис.1). Средняя за период, величина отношения Боуэна ($\beta=H/LE$) в НЕ составила 0.50 в 2016 г., 0.41 в 2017 г. и 0.43 в 2018 г., а на СВ 0.52 в 2016 г., 0.31 в 2017 г. и 0.35 в 2018 г. Таким образом, восстановление структуры расходной части теплового баланса произошло уже в течении в течении первого вегетационного периода после нарушения. Величина суммарного испарения на СВ в первый год после нарушения была ниже чем в НЕ на 28% в первый год, на 13% во второй и на 17 % в третий.

Во все три года наблюдений СВ была источником диоксида углерода для атмосферы, в то же время НЕ был источником CO₂ в 2016 г. и стоком в 2017 и 2018 гг. (рис.2). В первый и второй годы различия NEE экосистем определялись различиями GPP, а к третьему году различиями TER. На уровне суточных сумм NEE НЕ был стоком диоксида углерода в течении всего вегетационного периода (апрель-сентябрь). На СВ эмиссия CO₂ преобладала над поглощением на уровне суточных сумм в течении всего периода измерений 2016 года. В 2017 и 2018 гг. вырубка была стоком CO₂ для атмосферы со второй половины мая по первую половину июля.

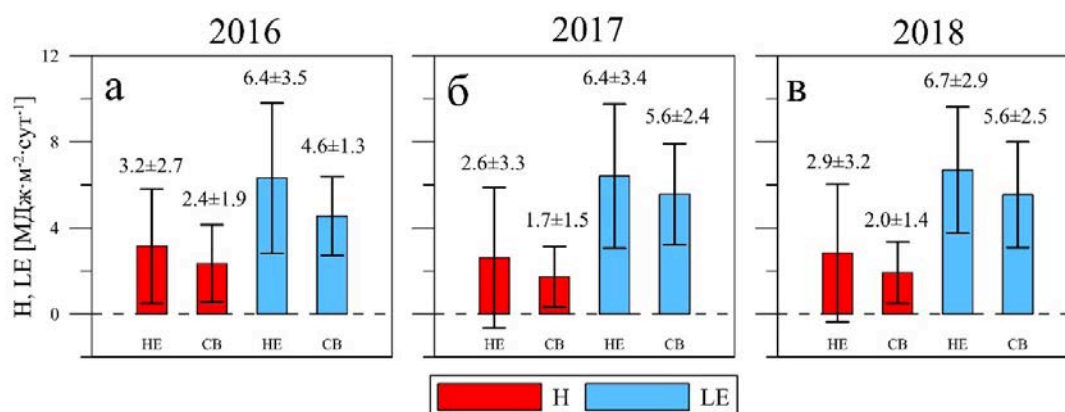


Рис. 1. Средние за период 06.05 – 18.10 суточные суммы явного (H) и скрытого (LE) потоков тепла в неморальном ельнике (HE) и на сплошной вырубке (CB) в 2016 (а), 2017 (б) и в 2018 (в) гг. со стандартными отклонениями ($\pm \text{SD}$).

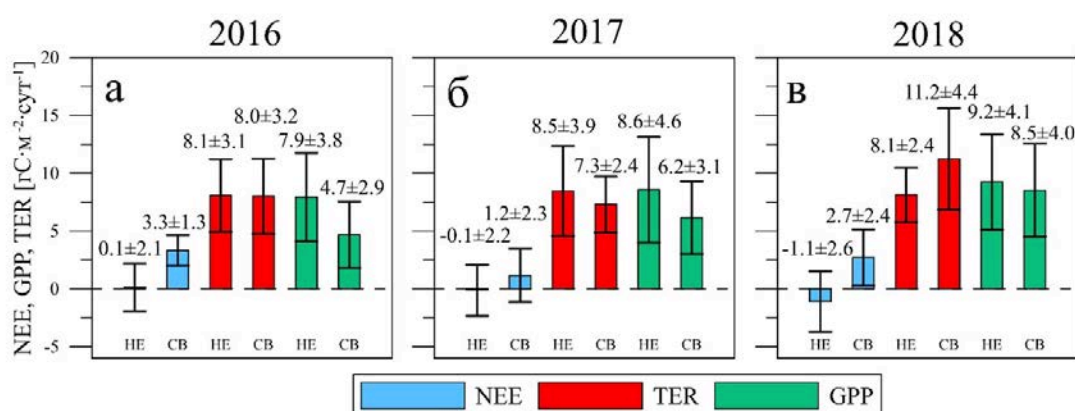


Рис. 2. Средние за период 06.05–18.10 2016 (а), 2017 (б) и 2018 (в) гг суточные суммы чистого экосистемного обмена CO_2 (NEE), экосистемного дыхания (TER) и валовой первичной продукции (GPP) со стандартными отклонениями ($\pm \text{SD}$) в неморальном ельнике (HE) и на сплошной вырубке (CB).

Результаты наблюдений показали, что сплошная вырубка в условиях южной тайги Европейской территории России приводит к снижению энергообеспеченности нарушенной лесной экосистемы, снижению её энергообмена с атмосферой и снижению суммарного испарения, а также преобладанию эмиссии над поглощением в структуре баланса CO_2 .

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-04-01234 А, а также при поддержке программ Президиума РАН № 41 «Биоразнообразие природных систем и биологические ресурсы России» и № 51 «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования».

ЛИТЕРАТУРА:

1. Фёдоров А. Н., Мачимура Т., Герасимов Е. Ю., Петров М. И., Константинов П. Я., Ивахана Г., Хаясака Х., Кушида К., Такакай Ф., Десяткин А., Сайто Х. Влияние пожаров на мерзлотные ландшафты в Центральной Якутии // Наука и образование. – 2008. – №. 4. – С. 64-72.
2. Aguilos, M., Takagi, K., Liang, N., Ueyama, M., Fukuzawa, K., Nomura, M., Kishida, O., Fukazawa, T., Takahashi, H., Kotsuka, C., Sakai, R., Ito, K., Watanabe, Y., Fujinuma, Y., Takahashi, Y., Muragama, T., Saigusa, N., Sakai, R.,. Dynamics of ecosystem carbon balance recovering from a clear-cutting in a cool-temperate forest // Agricultural and forest meteorology. – 2014. – Vol. 197. – P. 26-39.
3. Aubinet M., Vesala T., Papale D. (ed.). Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis. – Springer Science & Business Media, 2012. – P.449
4. Burba G. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. – LI-Cor Biosciences, 2013. – P.345

5. Knohl A., Kolle O., Minayeva T. Y., Milyukova I. M., Vygodskaya N. N., Foken T., Schulze E. D. Carbon dioxide exchange of a Russian boreal forest after disturbance by wind throw // *Global Change Biology*. – 2002. – Vol. 8. – №. 3. – P. 231-246.
6. Kurbatova J., Li C., Varlagin A., Xiao X., Vygodskaya N. Modeling carbon dynamics in two adjacent spruce forests with different soil conditions in Russia // *Biogeosciences*. – 2008. – Vol. 5. – №. 4. – P. 969-980.
7. Lejeune Q., Davin E. L., Gudmundsson L., Winckler J., Seneviratne S. I. Historical deforestation locally increased the intensity of hot days in northern mid-latitudes // *Nature Climate Change*. – 2018. – Vol. 8. – №. 5. – P. 386.
8. Machimura T., Kobayashi Y., Hirano T., Lopez L., Fukuda M., Fedorov A. N. Change of carbon dioxide budget during three years after deforestation in eastern Siberian larch forest // *Journal of Agricultural Meteorology*. – 2005. – Vol. 60. – №. 5. – P. 653-656.
9. Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Ivanov D., Kuricheva O., Varlagin A., Yaseneva I., Olchev A. Energy and CO₂ exchange in an undisturbed spruce forest and clear-cut in the Southern Taiga // *Agricultural and forest meteorology*. – 2019. – Vol. 265. – P. 252-268.
10. Olchev A. V., Rozinkina I. A., Kuzmina E. V., Nikitin M. A., Rivin G. S. Influence of forest cover changes on regional weather conditions: estimations using the mesoscale model COSMO // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2018. – Vol. 107. – №. 1. – P. 012105.
11. Williams C. A., Vanderhoof M. K., Khomik M., Ghimire B., Post-clearcut dynamics of carbon, water and energy exchanges in a midlatitude temperate, deciduous broadleaf forest environment // *Global Change Biology*. – 2014. – Vol. 20. – №. 3. – P. 992-1007.
12. Wutzler T., Lucas-Moffat A., Migliavacca M., Knauer J., Sickel K., Šigut L., Menzer O., Reichstein M. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc // *Biogeosciences*. – 2018. – T. 15. – №. 16. – C. 5015-5030.

Dendroindication of hazardous natural events in the Severo-Chuisky Range (the Altai Mountains) for 300 years before the present

Nikolaeva S.A., Savchuk D.A.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: sanikol1@rambler.ru, savchuk@imces.ru

The high and middle geomorphological (debris flows, avalanches, rockfalls, landslides, and other mass movements) and fire activity disturbs forests of the Severo-Chuisky Range (the Altai Mountains, Russia). No the long regular monitoring of the hazardous events here and the literature on these events is extremely sparse. The indirect dendrogeomorphological methods of identification of the events become important.

The aim is to date the hazardous natural events (debris flows, snow avalanches, rockfalls, and fires) of the Severo-Chuisky Range (the Altai Mountains, Russia) for 300 years before the present by the dendrogeomorphological methods. Other scientists and we used injury (markers are injuries, wounds, and scars of tree trunks and branches), radial increment (markers are changes of tree ring width), age (markers are age generations), and eccentric (markers are changes of trunk eccentricity) dendroindications. The first two dendroindications are the most exact. The most reliable dating of the events was obtained using various methods simultaneously and several trees had the markers.

Materials (literature and own as well as the eyewitnesses) include data from the river basins of the Severo-Chuisky Range: the Aktru, Maashei, Shavla, Karagem, Kyzyl-Chin, Arydjan rivers, and the Chuaia tributaries (the Tetye, Angulak and Cibitka rivers).

The fire activity were reconstructed for 300 years before the present. In the Aktru headwater the multiple local fires occurred in the early 21st century (2004, 2008, 2011, and 2015) and in 1971–1980 (1970 and 1974). Reasons of them were the increased temperature and the decreased precipitation during the growing seasons. The multiple fire in the late 19th century (1871–1890) and in the second half of 18th century (1751–1770 and 1791–1800) coincided with the warming periods by reconstructed air temperature chronology. The fires of the late 18th century (1791–1800) confirmed additionally by the wood coals in the corresponding level of the soil profile in the Siberian stone pine forests. In general, the fire chronology have the cycles with the maximums in the second half of 18th, the late 19th and at the turn of 20th and 21st centuries.

The debris flow activity were reconstructed for 120 years before the present. The debris flows of the high magnitude occurred in 1912 (they covered vast territories of the Altai Mountains), 1998, ~1994, 1984, ~1973–74, 1976, ~1967–69, 1966, 1930s and 1900s. In general, the years with the debris flows of the high magnitude were little but the most debris flows occurs in the several river valleys. The increased debris flow activity on the Severo-Chuisky Range in 1901–1910, 1931–1940, 1961–1970, 1971–1980, 1991–2000 and 2011–2010 was caused by cyclones with heavy rainfalls in June and July.

The avalanche activity (the snow avalanches of the high magnitude) were reconstructed for 130 years before the present. The increased activity was in the follow decades: 1890–1920 (1913, 1912 and 1911), 1951–1970 (1966, 1964 and 1961) and 1981–2010 (2010, 2009, 2008, and 2004). The some years with the avalanches dated by the dendrogeomorphological methods confirmed by the eyewitnesses. There are very low synchronism of the avalanche decades between the Aktru headwater and the valleys of the Chuia tributaries that agree with the known conclusion on such asynchronous avalanche activity in various territories of the Altai Mountains.

The rockfall activity were reconstructed in the Aktru headwater for 70 years before the present. 23 rockfalls were reconstructed. The one was only the rockfall of the high magnitude caused by the earthquake of 2003 and the others were the random rockfalls. The same rockfalls recorded by the dendrogeomorphological methods and caused by this earthquake occurred in Chagan-Uzun massif adjacent to the Severo-Chuisky Range; the other rockfalls like previous did not recorded for 300 years before the present (Agatova et al., 2014).

Дендроиндикация опасных природных событий на Северо-Чуйском хребте (Горный Алтай) за последние 300 лет

Николаева С.А., Савчук Д.А.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
E-mail: sanikol1@rambler.ru, savchuk@imces.ru

Юго-восток Горного Алтая – высокогорная территория, сочетающая долинные ледники, формы микро- и мезорельефа и массивы лесов на склонах. Она характеризуется средней и высокой геоморфологической (обвалы, камнепады, оползни, сели, лавины и другие массовые перемещения обломочного материала вниз по склону) и пожарной активностью, которая нарушает природные комплексы и инфраструктуру. Например, Северо-Чуйский хребет относится к районам со средней степенью селевой и высокой лавинной опасностью [5, 10, 11]. В частности, в верховьях р. Актру (в пределах горно-ледникового бассейна, северный макросклон Северо-Чуйского хребта) выделено 37 осыпей, 51 лавинных и 17 селевых очагов [7, 12 и др.], а в нижней части горно-ледникового бассейна находятся массивы леса из лиственницы сибирской и кедра сибирского, которые пройдены пожарами [15].

Длительные регулярные наблюдения за всеми этими процессами на территории отсутствуют, литература по этой теме крайне скудна [2, 7, 8, 10, 11 и др.], поэтому определенное значение приобретают косвенные методы идентификации этих событий. Наиболее надежным и точным методом является дендроиндикация [9].

Цель – датирование дендроиндикационными методами таких опасных природных явлений, как сели, лавины, обвалы/камнепады и пожары, на Северо-Чуйском хребте (Горный Алтай) за последние 300 лет.

Представленные материалы неоднородны по их объему, по использованным методам дендроиндикации и по охваченным исследованиями отрезкам времени. Они включают данные из бассейнов рек северного макросклона Северо-Чуйского хребта: (1) Актру – два лавинных комплекса, три преимущественно селевых бассейна, один обвально-осыпной участок и пять пожарных массивов леса (наши данные); (2) Актру [11]; (3) Маашей, Шавла [3, 4], (4) среднее течение Чуи (Тете, Ангулак Чибитка) [3]; а также Арыджан из Чаган-Узунского массива [1]. Дополнительно привлекались сведения, полученные от очевидцев, и литературные данные [2, 7, 8 и др.] по бассейнам этих же рек, а также Карагем, Кызыл-Чин с южного макросклона Северо-Чуйского хребта, которые не имеют регулярного характера.

При датировании опасных природных событий исследователи используют разные дендроиндикационные методы, виды которых описаны ранее [6, 9]. Так, при датировании пожаров, селей, лавин и обвалов/камнепадов (на рисунке представлены только крупные и средние по размерам события) нами использовались травматическая (маркеры – травмы ствола дерева и др.), дендрометрическая (изменения радиального прироста) и возрастная (возрастные генерации) дендроиндикации. Другие исследова-

тели датировали лавины/сели травматическим без уточнения размера события [3, 4] и деформационным (изменения в эксцентриситете ствола) [11] методами. Наибольшая точность датирования у травматического и дендрометрического методов, наименьшая – у возрастного. Наиболее надежное датирование событий было получено при использовании нескольких методов одновременно и при наличии маркеров у нескольких деревьев одновременно.

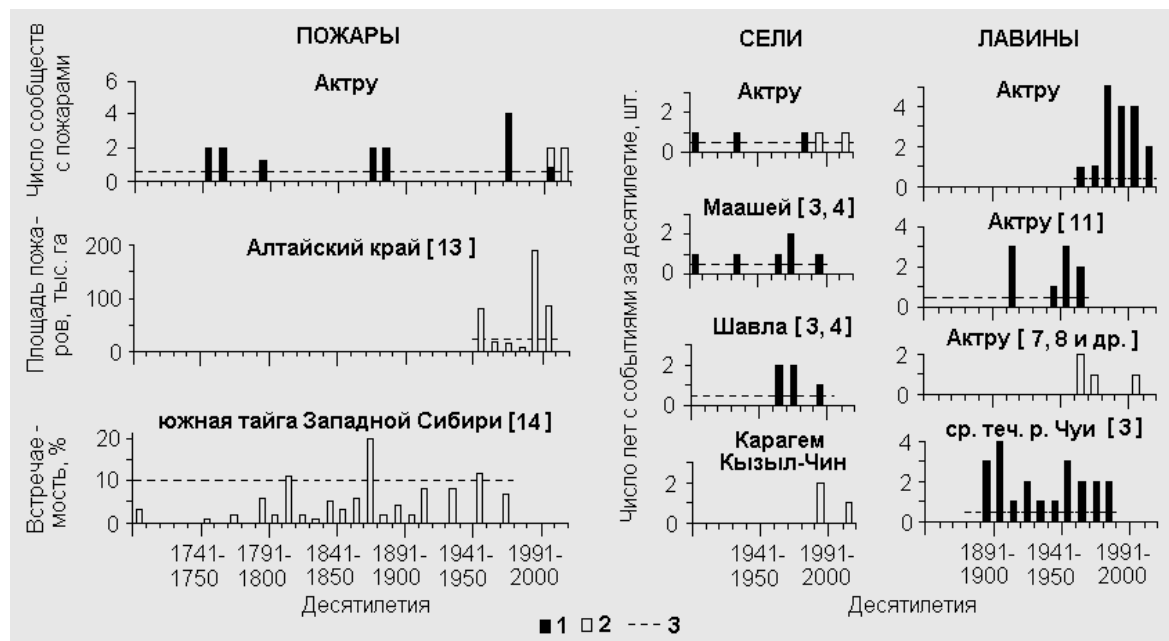


Рис. Датирование опасных природных событий (пожары, сели и лавины) по десятилетиям в долинах рек Северо-Чуйского хребта (Горный Алтай) по собственным и литературным (в квадратных скобках) данным. Дополнительно приведена информация по площади пожаров в Алтайском крае и встречаемости послепожарных стадий лесов южной тайги Западной Сибири. Данные: 1 – дендроиндикационные, 2 – недендроиндикационные (свидетельства очевидцев, материалы лесохозяйственных и иных архивов), 3 – длина рядов наблюдений.

Датирование разных событий в верховьях р. Актру (рис.) показало, что на временной шкале они располагаются неравномерно.

Неоднократные локальных пожары в верховьях р. Актру отмечались очевидцами в начале XXI в. (2004, 2011, 2015 гг.) на левом склоне долины (рис.). В результате выгорали либо довольно большие по площади участки с молодыми 70–90-летними деревьями кедра у верхней границы леса, либо нижние яруса леса в 210–240-летних лиственничниках. Один из таких пожаров (2008 г.) был датирован по сохранившемуся сухому подросту кедра в одном из лиственничников. Причиной возникновения пожаров в эти годы, скорее всего, было неосторожное обращение с огнем на фоне более засушливых по сравнению со среднемноголетними погодных условий (по данным соседней ГМС Кош-Агач). Пожары 1970-х годов зафиксированы травматическим и дендрометрическим методом: в 1970 г. в одном, в 1974 г. в трех изученных лиственничниках. Пожар 1970 г. был катастрофичным для массива леса – погиб не только весь подрост кедра под пологом леса, но и большая часть деревьев лиственницы из древостоя. Пожары в 1974 г. были менее разрушительным – уничтожены в основном нижние яруса леса, в том числе и подрост кедра. Им способствовали повышенные температуры и пониженная влажность вегетационного сезона. Особенно жарким и засушливым, по данным ГМС Актру, был 1974 г. Сравнение данных по пожарам в верховьях р. Актру и Алтайского края [13] показало, что их совпадение по конкретным десятилетиям слабое, но общим является факт повышенной пожарной активности на рубеже XX и XXI вв.

Более ранние события установлены с помощью возрастной и дендрометрической дендроиндикаций. Это – пожары в конце XIX в. (1871–1890 гг.), зафиксированные в четырех лиственничниках, и во второй половине XVIII в. (1751–1770 и 1791–1800 гг.) – в четырех лиственничниках и одном кедровнике (рис.). Последствия пожаров конца XIX в. отмечены проф. Томского университета В.В. Сапожниковым во время экспедиций по Алтаю, в т.ч. в 1898 г. при посещении верховьев р. Актру. Кроме того, начало формирования новых генераций деревьев здесь близко по времени (1871–1880 гг.) к массовому формированию послепожарных лесов в южной тайге Западной Сибири (рис.). Пожары в конце XIX в. в верховьях р. Актру совпадают с периодами потеплений, выявленных по динамике хода реконструированной температуры [15], которые, скорее всего, сопровождались длительными периодами без дождей. Они,

по-видимому, были вызваны изменениями климата (повышенная температура и пониженное количество осадков), охватившими большую территорию – кроме гор Южной Сибири, также юг Западной и Средней Сибири [14]. Пожары конца XVIII в. (1791–1800 гг.) дополнительно подтверждаются наличием обугленной древесины в соответствующем почвенном слое разреза в 200-летнем кедровнике. В целом, в пожарной активности выделяются циклы с максимумами во второй половине XVIII в., конце XIX в. и на рубеже XX и XXI вв.

Крупные сели (рис.) на Северо-Чуйском хребте восстановлены за последние 120 лет. Это – в 2012 г. (они охватили большие территории Горного Алтая, из обследованных верховьев рек – Актру, Маашей, Кызыл-Чин), 1998 (Актру, Маашей, Шавла, Карагем), ~1994 (Карагем, отчасти Актру), 1984 (Актру), 1973–74, 1976 (Маашей, Шавла), 1967–69, 1966 (Маашей, Шавла), 1930-е и 1900-е гг. (Актру, Маашей). В целом количество лет с крупными селями относительно мало, но большинство установленных селей наблюдались не в одном, а в нескольких долинах рек. Поскольку сели на Алтае имеют дождевой генезис, то повышенная селевая активность на Северо-Чуйском хребте в 1901–1910, 1931–1940, 1961–1970, 1971–1980, 1991–2000 и 2011–2010 гг. вызвана, в первую очередь, приходом циклонов с обильными осадками в июне-июле.

Периоды лавинной активности восстановить оказалось сложнее по сравнению с селевой из-за меньшего количества обследованных бассейнов рек и малого временного перекрытия данных у разных исследователей. Так, наши данные и данные В.И. Кравцовой по лавинам [11] в верховьях р. Актру перекрываются только в одном десятилетии – 1960-е годы. Крупные и средние лавины (рис.) на Северо-Чуйском хребте восстановлены за последние 130 лет. При датировании можно выделить несколько десятилетий повышенной лавинной активности: 1890–1920 (1913, 1912, 1911), 1951–1970 (1966, 1964, 1961), 1981–2010 (2010, 2009, 2008, 2004) гг., а в среднем течении р. Чуи – 1891–1910, 1921–1930, 1951–1960 гг. Часть дат с крупными лавинами (2010, 1978, 1966, 1961 гг.), полученными дендроиндикационными методами, подтверждаются очевидцами. Отмечается крайне слабое совпадение дат лавин в верховьях р. Актру с датами лавин в среднем течении р. Чуи. Это согласуется с установленным ранее выводом [11] о низкой синхронности схода лавин в разных районах Горного Алтая. В целом количество лет с крупными лавинами по сравнению с селями высокое. Одной из причин этого является многоснежность зим в средне- и высокогорье Северо-Чуйского хребта [11]. Дополнительным фактором схода лавин, возможно, являются землетрясения.

Обвалы/камнепады в верховьях р. Актру восстановлены за последние 70 лет на обвально-осыпном участке. Всего зафиксировано 23 случая. Только один из них был крупным обвалом, вызванным землетрясением 2003 г., а остальные – это камнепады, имевшие случайный характер. Аналогичные обвалы, вызванные землетрясением 2003 г., зафиксированы дендроиндикационными методами в Чаган-Узунском массиве [1], непосредственно примыкающем к Северо-Чуйскому хребту. Событий, аналогичных 2003 г., за последние 300 лет эти авторы не зафиксировали.

Датирование опасных природных явлений (пожары, сели, лавины, камнепады/обвалы) имеет свои особенности, которые связаны с различиями в их генезисе, сроках осуществления во внутригодовом цикле, последствиях для экосистем и деревьев, а также с различиями в наиболее предпочтительных дендроиндикационных методах их изучения.

Повышенная пожарная активность на Северо-Чуйском хребте отмечена 1751–1770 и 1791–1800, 1871–1890, 1971–1980, 2001–2020 гг., селевая – в 1901–1910, 1931–1940, 1961–1980, 1991–2020 гг., лавинная – 1891–1920, 1951–1970, 1981–2010 гг. Следует подчеркнуть, что активность этих природных процессов, в первую очередь, зависит от количества осадков тех сезонов года, на которые приходится эти события, т.е. пониженного их количества летом, повышенного – весной-летом, повышенного – осенью-зимой-весной соответственно. Обнаружено, что периоды повышенной пожарной и лавинной активности разнесены по времени. Вероятно, большое количество накопленного в зимне-весенний период снега препятствует пересыханию верхних почвенных горизонтов и подстилки в начале лета и, как следствие, снижает вероятность возникновения пожаров летом.

Перспективы дендроиндикационных исследований опасных природных явлений связаны с охватом этими исследованиями новых территорий Горного Алтая, с внедрением в них комплекса таких методов, и получение в итоге пространственно-временных реконструкций этих событий как для отдельных бассейнов рек, так и более крупных регионов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Агатова А.Р., Непон Р.К., Баринов В.В., Назаров А.Н., Мыглан В.С. Первый опыт датирования сильных голоценовых землетрясений Горного Алтая с использованием длительных древесно-кольцевых хронологий // *Геология и геофизика*. 2014. Т. 55. № 9. С. 1344–1355.
2. Барашкова Н.К., Королева Т.В., Шмыглева Г.М. Условия схода селя в долине р. Актру в Горном Алтае 24 июня 1984 г. // *Материалы гляциологических исследований*. М., 1986. Вып. 56. С. 121–124.

3. Быков Н.И. Дендрогеоморфология Алтая // *Геоморфология гор и предгорий: Матер. Всеросс. школы-семинара. Барнаул: Изд-во АГУ, 2002. С. 41–48.*
4. Быков Н.И., Назаров А.Н. Фитоиндикационное изучение селевых бассейнов Алтая // *Природно-ресурсный и экологический потенциал Сибири: Матер. Всеросс. науч.-практ. конф. Барнаул: Изд-во АГУ, 2010. С. 31–34.*
5. *География лавин / Мягков С.М., Канаев Л.А. (ред.) М.: Изд-во МГУ, 1992. 249 с.*
6. Горчаковский П.Л., Шиятов С.Г. Фитоиндикация условий среды и природных процессов в высокогорьях. М.: Наука, 1985. 209 с.
7. Душкин М.А. Лавины в верховьях долины Актру // *Гляциология Алтая. Томск: Изд-во ТГУ, 1974. Вып. 8. С. 39–59.*
8. Королева Т.В. Лавины бассейна р. Чуя (Горный Алтай) // *Гляциология Сибири. Томск: Изд-во ТГУ, 1985. Вып. 2 (17). С. 93–105.*
9. Николаева С.А., Савчук Д.А. Методы дендроиндикации экзогенных гравитационных процессов: обзор // *Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. Т. 84. № 3. С. 441–450.*
10. Перов В.Ф. Селеведение. М.: Геогр. фак-т МГУ, 2012. 272 с.
11. Ревякин В.С., Кравцова В.И. Снежный покров и лавины Алтая. Томск: Изд-во ТГУ. 1977. 216 с.
12. Титова З.А., Петкевич М.В. Наблюдения над конусами аккумуляции в долине реки Актру // *Гляциология Алтая. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1964. Вып. 3. С. 115–141.*
13. Фроленков И.М., Фроленков О.М. Динамика распространения лесных пожаров в Алтайском крае // *Мир науки, культуры, образования. 2014. № 1. С. 394–397.*
14. Фуряев В.В. Периоды высокой горимости и их роль в лесообразовательном процессе // *Сиб. экол. журн. 1996. № 1. С. 67–71.*
15. Timoshok E.E., Timoshok E.N., Nikolaeva S.A., Savchuk D.A., Filimonova E.O., Skorokhodov S.N., Bocharov A.Yu. Monitoring of high altitudinal terrestrial ecosystems in the Altai Mountains // *IOP conf. series: Earth and environmental science. 2016. V. 48. P. 1–9.*

Consistency of Iksinsky bog dynamics with extreme the Holocene climate events

Preis Yu.I., Krutikov V.A., Polishchuk V.Yu.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia
E-mail: preisuyi@rambler.ru, krutikov@imces.ru, liquid_metal@mail.ru

In the forest zone of Western Siberia, the climatogenic type bog-forming process is widespread. The influence of extreme the Holocene climate events on the dynamics of bog massifs of this type has not been studied enough.

The purpose of the study is to create a spatio-temporal model of paludification and vegetation succession of the climatogenic bog massif to identify the consistency of these processes with extreme the Holocene climate events.

The object of study is the oligotrophic Iksinsky bog. This complex bog system is located on the watershed of the Shegarka and Ikse rivers in southern taiga of Western Siberia.

The space-time model is based on data from a preliminary geological exploration report of this bog. The reconstruction of paleophytocenoses for 441 points of peat sampling of this report was performed. The data on the total and layered organic matter (OM) cumulative masses of peat (CM) were calculated. A comparative analysis of the stratigraphy, the properties of peat, and the CM of OM of the sampling points with data on 29 14C-dated peat cuts – analogues was performed. This made it possible to reasonably determine the layered ages of the peat deposit at each sampling point. In the geographic information system ArcGIS 10 data processing was carried out. 3-D models of the bog surface and chronosections of space-time model with information about 12 groups of modern and paleophytocenoses for 11 time periods reflecting the maximum climate influence have been created.

A comparative analysis of the obtained chronosections of the Iksinsky bog with data of the global and regional the Holocene climates reconstructions the peculiarities of its response to extreme climate events revealed. The first foci of short-term eutrophic and mesotrophic paludification in warming 8200 cal yr BP appeared. Degradation of permafrost, which formed in global cooling (Bond event 5), contributed. In a warm humid climate 7400 and 6400 cal yr BP, focal paludification of forests and terrestrialization of small lakes through eutrophic grass communities took place. The first wave of active, but focal, mainly mesotrophic paludification in global cooling 5900 cal yr BP (Bond event 4) took place. Long-thawing seasonal frozen ground transgres-

sion of sphagnum mosses into sedge communities could contribute. The second wave of focal mesotrophic paludification throughout the bog in dry cooling 4850–4700 cal yr BP took place. The formation of permafrost caused it. Cotton grass-sphagnum communities appeared. The third wave of active paludification and the appearance of oligotrophic swamp and forested pine communities in warming 3950 cal yr BP took place. Permafrost degradation caused this process. The area of oligotrophic and mesotrophic communities with cotton grass, high and low ryams in dry cooling 3200–2800 cal yr BP (Bond event 2) increased. Surface drying, palsa formation of and peat accumulation stopping over a significant the bog area took place. Permanent permafrost degradation in subsequent mainly warm periods 2750–2450 and 1900 cal yr BP occurred. The area of the bog and oligotrophic communities increased. Mosaic and Sheuchzeria-sphagnum swamps began to dominate. The secondary big and small pools actively were formed. 1950 cal yr BP the surface hydrological system of runoff hollows is almost completely formed. Swamps and complexes with ridges, hollows, pools and lakes began to prevail. As result, the extreme events of the Holocene climate, especially dry cooling 4700 and 2800 cal yr BP, had the maximum impact on the dynamics of Iksinskoye bog.

Согласованность динамики болота Иксинское с экстремальными событиями климата голоцена

Прейс Ю.И., Крутиков В.А., Полищук В.Ю.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
E-mail: preisui@rambler.ru, krutikov@imces.ru, liquid_metal@mail.ru

Оценка согласованности изменений функционального состояния болот и климата, необходимая для разработки прогнозов на ближайшие столетия, особенно актуальна для Западно-Сибирского торфо-болотного региона. Здесь нами выявлено широкое распространение климатогенного типа болотообразовательного процесса, отличающегося от аутогенного прежде всего мезо- и олиготрофным заболачиванием карбонатных грунтов и неоднократными криогенными прекращениями торфонакопления [1]. Датированы основные палеостратиграфические рубежи (ПСР) в торфяных залежах, индицирующие координатные изменения их функционального состояния под влиянием экстремальных событий климата голоцена [2]. Однако степень и масштабы влияния этих событий на возникновение и развитие болотных массивов климатогенного типа недостаточно изучены.

Цель работы – создание пространственно-временной модели заболачивания и сукцессий растительного покрова болотного массива климатогенного типа для выявления влияния на эти процессы экстремальных событий климата голоцена.

Объект исследования – олиготрофное Иксинское болото (56°54' – 56°59' с.ш., 82°21' – 83°22' в.д.) является северо-восточным отрогом Большого Васюганского болота, занимает участок асимметричного водораздела рек Шегарка и Икса со сложной и значительной дифференциацией мезо- и микрорельефа поверхности. Оно является сложной болотной системой из многочисленных выпуклых верховиков и сильно обводненных топей и ложбин стока с грядами и озерами.

В основу модели положены данные предварительной геологической разведки торфяного месторождения [3], авторские и из [4, 5] данные по 29 датированным торфяным разрезам Иксинского и Бакчарского болот. План этого месторождения М: 1:100000 был привязан к космоснимку. Определены географические координаты его 14 профилей и 441 пункта отбора проб торфа. Используются данные отметок поверхности и глубин торфяной залежи на пунктах отбора, послойные (через 25 см) показатели ботанического состава и общетехнических свойств торфов. По ботаническому составу торфа проведена реконструкция палеофитоценозов.

Обработка данных по динамике болота Иксинское проведена в геоинформационной системе ArcGIS 10. Применены инструменты для трехмерного моделирования поверхности болота для разных периодов его развития, а также интерполяция для создания хроносрезов – разновозрастных поверхностей болота пространственно-временной модели. Выбор возраста хроносрезов был предопределен возрастами ПСР торфяных разрезов-аналогов. Поиск ПСР на пунктах отбора проводился на основании анализа послойных показателей ботанического состава, степени разложения (R), зольности (A) и естественной влажности (West.) торфа. Для определения их возраста использован метод аналогии с датированными торфяными разрезами. При подборе аналога мы учитывали местоположение ПО в пределах болотной системы, тип элементов мезо- и микрорельефа минерального дна. Согласно выполненным расчетам, кумулятивная масса торфа каждого разреза в значительной степени зависит от количества ПСР и продолжительности соответствующих им перерывов торфонакопления. Было установлено, что разновозрастные слои разных разрезов, сходные по стратиграфии и количеству ПСР, даже при значительном различии их толщины, имеют

близкие значения кумулятивной массы (КМ) органического вещества (ОВ) торфа. Показатели КМ слоев разных видов торфа между ПСР разного возраста, полученные для разрезов-аналогов, были использованы для наиболее обоснованного определения возраста торфяных залежей пунктов отбора геологической разведки и глубин залегания хроносрезов палеоповерхностей болота. Для расчета КМ ОВ торфа каждого из 10560 образцов пунктов отбора были использованы таблицы [6]. Сначала по ним с учетом типа, R и West. были определены коэффициенты выхода (плотности) торфа при 40 % West. и рассчитаны послойные КМ, затем был проведен пересчет на ОВ абсолютно сухого торфа.

Модель состоит из 11 хроносрезов, которые содержат информацию о 12 группах современных и палеофитоценозов. Выполнен сравнительный анализ полученных данных

На основании анализа полученных хроносрезов, с учетом данных по разрезам-аналогам и реконструкций палеоклимата лесной зоны Западной Сибири [7, 8], установлено, что первые единичные очаги заболачивания появились около 8000 кал. л. н., то есть в начале потепления после глобального похолодания около 8200 кал. л. н. (Бонд-событие 5) [2]. Заболачиванию вероятнее всего благоприятствовала деградация многолетней мерзлоты (ММ), сформировавшейся в грунтах в период похолодания. Талые воды скапливались в замкнутых понижениях склонов водораздельного плато и тальвегов древних водотоков. На месте разреженных лесов в зависимости от физического (талое/мерзлое) состояния грунтов формировались эвтрофные или мезотрофные травяные сообщества из осок, хвоща, вахты, тростника. Иногда происходило заторфовывание мелких озерков травяно-моховыми сообществами со *Sphagnum teres*. Торфонакопление было кратковременным и после полной деградации мерзлоты прекратилось на длительный срок, до 7400 и даже до 5900 кал. л. н. Около 7400-7200 кал. л. н., в один из наиболее влажных периодов атлантического оптимума голоцена появились новые немногочисленные очаги эвтрофного заболачивания лесов. В наиболее глубоких понижениях тальвегов древних водотоков, а также водораздельного плато и его северного склона возникли мелководные озера, которые начали зарастать розгой, хвощом и вахтой, иногда с примесью тростника. К 6400 кал. л. н. в теплом влажном климате возросло количество новых очагов заболачивания лесов в глубоких замкнутых понижениях практически на всей площади будущего болота. В некоторых меридионально ориентированных тальвегах древних водотоков произошло слияние изолированных очагов. Преобладали эвтрофные слабооблесенные и открытые травяные сообщества с доминированием осок. На некоторых очагах возобновилось торфонакопление. К 5900 кал. л. н. значительно увеличилось количество очагов мезотрофных, в основном облесенных, травяных сообществ, в том числе за счет существующих эвтрофных. Основное количество очагов появилось в понижениях наиболее возвышенных участков водораздела. Этому вероятнее всего способствовало формирование здесь длительнооттаивающей сезонной мерзлоты в условиях начавшегося глобального похолодания около 5900 кал. л. н. (Бонд-событие 4). К этому времени очаги во многих тальвегах древних водотоков слились в меридионально ориентированные массивы. Суммарная площадь заболачивания составила около 10 % от современной площади торфяного месторождения в границах промышленной глубины залежи. К 4850-4700 кал. л. н. в условиях нового похолодания в 2 раза возросла площадь болота за счет мезотрофного заболачивания лесов в понижениях субширотных минеральных грив и их склонов, а также на периферии будущего болота. В целом преобладали мезотрофные сообщества. На многих очагах эвтрофные сообщества сменились мезотрофными, в которых появилась, а иногда стала доминировать пушица, что свидетельствует о локальном обсыхании поверхности. Трансгрессии сфагновых мхов вероятнее всего способствовало формирование водоупоров из длительно оттаивающей сезонной и многолетней мерзлоты. На некоторых участках происходило разболачивание, на других - формирование ММ бугров пучения и прекращение торфонакопления. Об этом свидетельствуют данные датирования и катастрофическая олиготрофизация растительности на пунктах отбора в последующие теплые периоды. В понижениях подножия водораздельного плато около 4300 кал. л. н. происходило заболачивание очагов через олиготрофные пушицево-сфагновые сообщества. На некоторых из них торфонакопление было кратковременным. На основной площади болота отложение торфов продолжалось, и в последующий период некоторого смягчения климата активизировалось заболачивание. К 3950 кал. л. н. в условиях суббореального оптимума площадь болота значительно возросла. Преобладали мезотрофные осоково- и пушицево-сфагновые среднеобводненные сообщества и шейхцериево-сфагновые топи. Появились очаги олиготрофных пушицево-сфагновых сообществ и шейхцериево-сфагновых топей, рослых и низких рямов. При этом новые очаги заболачивания появились в основном на наиболее высоких элементах мезорельефа. У подножия и на склонах водораздельного плато начали формироваться новые ложбины стока. Прогрессивному характеру заболачивания вероятнее всего способствовало не только повышение уровня болотных вод по мере отложения торфа в условиях относительно влажного климата, но и наличие дополнительных источников влаги из очагов деградирующей мерзлоты, в том числе в минеральных грунтах. Олиготрофное заболачивание происходило при формировании верховодки над этими очагами.

К 3200-2800 кал. л. н. площадь болота увеличилась незначительно. В условиях аридизации сначала теплого, а затем холодного климата широкое распространение получили мезотрофные и олиготрофные пушицево-сфагновые сообщества, возросло число очагов рослых рямов, а на периферии некоторые эв-

трофные травяные сообщества сменились облесенными мезотрофными. Произошло значительное обсыхание поверхности болота. Это создало благоприятные условия для глубокого промерзания торфяных отложений и формирования ММ бугров пучения в условиях глобального сухого похолодания около 2800 кал. л. н. (Бонд событие 3). На значительной площади болота аккумуляция торфа прекратилась до 2450 кал. л. н., а иногда до 1900 кал. л. н. Наиболее активно эти криогенные процессы происходили на более мелкозалежных участках периферии болота. Однако они имели место и на высоких элементах мезорельефа, в том числе в понижениях центрального плато. Это подтверждают данные датирования разрезов-аналогов, а на недатированных пунктах отбора – более низкие показатели кумулятивной массы ОВ слоя торфа, залегающего выше ПСР, по сравнению с соседними пунктами, на которых эти процессы отсутствовали. На остальной площади болота продолжалось торфонакопление. Особенно активный рост болота происходил у подножий центрального плато и других повышенных элементов мезорельефа минерального дна, где сформировался сплошной моховой покров из *S. fuscum*.

В начале потепления, около 2700 л. н. площадь болота несколько возросла за счет олиготрофного и мезотрофного заболачивания окраин и минеральных островов внутри болотного массива, в том числе центрального плато. В центральной части болота возросла обводненность. Начали формироваться новые ложбины стока с олиготрофными мозаичными со *Sphagnum magellanicum* и шейхцерицево-сфагновыми топиями. По нашему мнению, это было обусловлено началом деградации очагов многолетней мерзлоты. Однако значительная площадь болота еще оставалась в многолетнемерзлом состоянии.

К 2450 кал. л. н. олиготрофными сообществами было занято уже больше половины площади болота. В условиях теплого климата продолжался процесс деградации ММ. Обводненность поверхности возросла. Это был период максимального распространения топяных сообществ. Основная часть болота была занята мозаичными топиями с отдельными островками низких рямов, а ложбины стока – шейхцерицево-сфагновыми топиями. Подтопление субширотных минеральных грив обусловило формирование на них ложбин стока, а затопление минеральных островов и понижений центрального плато – озер. Однако, на периферии болота еще сохранялись некоторые очаги ММ. В последующий период 2400-2100 л.н., сначала аридный, а затем холодный сухой, на некоторых участках обводненность поверхности понизилась. Произошло зарастание небольших озерков топяными сообществами, а более дренированных участков протаявшей мерзлоты – пушицево-сфагновыми и фускум-сообществами.

К 1900 кал. л. н. олиготрофные сообщества занимали уже практически всю площадь болота. Этому способствовало активное накопление торфа. На хроносрезе этого периода площадь топяных сообществ значительно сократилась за счет увеличения площади очагов низких рямов. Это был период активного формирования поверхностной гидрологической системы стока с болота, в том числе радиальной структуры склонов центрального плато из чередующихся полос рямов и сильнообводненных топей, и грядово-топяно-озерных комплексов ложбин стока на месте тальвегов древних водотоков и подтопленных минеральных грив.

На хроносрезе современной поверхности хорошо отражены шейхцерицево-сфагновые ложбины стока и мозаичные топи. Однако, площади очагов низких рямов значительно завышены по сравнению с данными дешифрирования космоснимков и наших полевых исследований. Это обусловлено тем, что при геологической разведке в летние периоды на наиболее обводненных участках отбор проб торфа был возможен лишь на высоких кочках и грядах со *S. fuscum*.

Таким образом, установлено, что Иксинское болото сформировалось в основном в суббореальный период, в условиях направленного похолодания климата голоцена. Широкое распространение многолетней мерзлоты при похолоданиях, вызывавшей автохтонное мезотрофное и олиготрофное заболачивание карбонатных грунтов повышений рельефа, и высокая обводненность всей территории при деградации ММ в периоды последующих потеплений, благоприятствовали активному развитию болотообразовательного процесса на разных элементах мезо- и микрорельефа. В условиях часто происходивших смен климата это привело к формированию обширной болотной системы, занимающей практически весь рассматриваемый участок водораздела. На динамику заболачивания и сукцессии растительных сообществ максимальное влияние оказывали экстремальные события климата голоцена, особенно сухие похолодания около 4100 и 3000 л. н.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Преис Ю.И. Региональные особенности болотообразовательного процесса в лесной зоне Западной Сибири // Материалы III Всероссийской школы-конференции «Актуальные проблемы геоботаники» Петрозаводск, 24–29 сентября 2007 года. Т 2. С. 132-136.
2. Преис Ю.И. Палеостратиграфические рубежи в торфяных отложениях Западной Сибири // Материалы Десятого Сибирского совещания по климатно-экологическому мониторингу. Томск, 2013. С. 251-253.
3. Геологический отчет о предварительной разведке месторождения «Васюганское» (участок № 6 у села Плотниково) Шегарского, Кривошеинского и Бакчарского района Томской области. Горький, 1989-1991. Т. 3, 4, 5.

4. Хотинский Н.А. Голоцен Северной Евразии. М.: Наука. 1977. 200 с.
5. Лапина Е.Д., Пологова Н.Н., Мильдияров Е.Я. Болота водораздельных равнин юга лесной зоны Западной Сибири // *Krylovia*. 2000. Т. 2. № 1. С. 38-43.
6. Таблицы для определения выходов воздушно-сухого торфа в тоннах при 40 % условной влажности из 1000 куб. м торфа-сырца. 1969. 9 с.
7. Bond G. et al. Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate during the Holocene // *Science*. 2001. № 294. P. 2130–2136.
8. Волкова В. С., Гнибиденко З. Н., Горячева А. А. Климатическая ритмика голоцена центральной части Западно-Сибирской равнины (палинология, магнетизм) // *Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири*. Новосибирск: Изд-во ИАиЭ СО РАН, 2002. С. 48–57.
9. Бляхарчук Т.А. Новые палеопалинологические данные о динамике растительного покрова и климата Западной Сибири и прилегающих территорий в голоцене. Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2012. 139 с.

Ecological peculiarities of *Cypripedium calceolus* L in the Southern Evenkia ('Tungusky' reserve)

Raiskaya Yu.G.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia
 State nature reserve 'Tunguskiy', Krasnoyarskiy Kray, Vanavara, Russia
 E-mail: raiskaya.julia@mail.ru

Eurasian orchid *Cypripedium calceolus* L. is a rare and endangered species of vascular plants. The populations of this species are reducing across its range in our time (Vahrameeva, Denisova, 2003; Gorchakovskiy, Igosheva, 2003). The species is included to the red lists of USSR (1984), RSFSR (1988), Russian Federation (2008), Krasnoyarskiy kray (2005, 2012) with status 2 (V) – vulnerable species, which world population are reducing. 20 local populations of the species were studied in the State natural reserve “Tunguskiy” (Evenkia, Krasnoyarskiy kray, Central Siberia), where the modern northern boundary of *Cypripedium calceolus* is situated. The Evenkia climate is severely continental one; the long and cold winter and short hot and dry summer is typical for the region.

Investigations of rare and endangered species at the boundaries of their range are especially interesting as the species on the boundaries are existing on the limit of their biological tolerance (Serebryakov, 1962). It is possible that the species populations on the range boundaries will reduce faster because of most severe influence of limiting factors (Tolmachev, 1941, 1962; Yurcev, 1974, 1991).

All studied populations of *Cypripedium calceolus* were found in larch forests with grass-dwarf shrub-green moss or dwarf shrub-green moss-lichen ground cover; all these forest are located on the south, east and south-east slopes of hills. The forest had a low tree density (only 10–20% of tree crowns are contacting each other); the cover of ground grass-dwarf shrub storey was 20–65%, usually about 50–60% and cover of moss-lichen storey was 10–90%, usually about 50%. The species diversity of plant communities where the species was found is 21–44 species.

The density of *Cypripedium calceolus* populations was rather low in all populations: it amount 0.02–5.1 partial scions per 1 sq.m. (mean 1.06 scions per 1 sq.m.). Ecological peculiarities of the *C. calceolus* habitats was estimated by phytosociological method made by I.A. Tsatsenkin (1978) improved by E.P. Prokop'ev (1993). The studied species has narrow tolerance diapason by damp scale (7 steps, 60 to 67) and very narrow (3 steps, 7 to 10) by active soil richness scale. All studied sites where the *C. calceolus* was found had dampness from 63 to 67 steps and active soil richness of 8 or 9 steps. Maximal abundance of the species (up to 3%) may be occurred in habitats with any dampness and active soil richness conditions found, but largest number of habitats had dampness of 69 step and active soil richness of 9 step.

Экологические особенности *Cypripedium calceolus* L. в Южной Эвенкии (Заповедник Тунгусский)

Райская Ю.Г.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

Государственный природный заповедник «Тунгусский», Красноярский край, с. Ванавара, Россия

E-mail: raiskaya.julia@mail.ru

Cypripedium calceolus L. – венерин башмачок настоящий (Сем. *Orchidaceae*) является редким и исчезающим видом сосудистых растений. Из-за интенсивного антропогенного воздействия на местообитания этого вида во многих регионах России, его численность быстро сокращается; иногда целые популяции этого вида оказываются под угрозой исчезновения (Вахрамеева, Денисова 1983; Горчаковский, Игошева, 2003; и др.). *Cypripedium calceolus* включен в Красные книги СССР (1984), РСФСР (1988), РФ (2008), Красноярского края (2005, 2012) со статусом 2 (V), уязвимый вид, сокращающийся в численности. *Cypripedium calceolus* – евроазиатский вид, его ареал охватывает Европу (за исключением ее крайних севера и юга) и большую часть Азии.

Исследования проводились с 2006 по 2014 гг. на территории заповедника «Тунгусский». Государственный природный заповедник «Тунгусский» основан в октябре 1995 г. Его территория расположена в юго-восточной части одной из самых малонаселённых частей Российской Федерации – Эвенкийском муниципальном районе Красноярского края, в междуречье наиболее крупных рек юга Эвенкии – Подкаменной Тунгуски и Чуни. Международным Союзом Охраны Природы и Природных Ресурсов (МСОП) территория заповедника включена в категорию Ia (строгий природный резерват), как участок земной поверхности с нетронутой природой, нуждающейся в полной охране. В заповеднике осуществляется абсолютно заповедный режим, при котором исключается любая хозяйственная и рекреационная деятельность и любые другие вмешательства в ход природных процессов (Тимошок и др., 2016).

Для данной территории характерен резко континентальный климат с длинной холодной (около 225 дней с отрицательной температурой) зимой и коротким жарким летом с периодом засухи. Среднегодовая температура воздуха на территории заповедника составляет $-5,09^{\circ}\text{C}$. Вегетационный период длится 110–120 дней. В течение года на территории заповедника выпадает в среднем 422 мм осадков, 40% от количества которых приходится на летние месяцы. Наименьшее количество осадков приходится на февраль и март (Васильев и др., 2003; Сопин, 2008).

Исследования сосудистых растений, в особенности редких и исчезающих видов на границах их ареалов представляют особый интерес. И.Г. Серебряков (1962) указывал, что пограничные популяции растений существуют на пределе своих биологических возможностей, и, как следствие, их исчезновение может привести к сокращению ареала вида, что, в свою очередь, может стать опасным, в случае если популяции в центральной части ареала будут угнетены или подавлены, например, в результате действия антропогенных факторов. А.И. Толмачев (1941, 1962) и Б.А. Юрцев (1974, 1991) отмечали, что сокращение популяций видов на границах ареалов может идти с большей скоростью, потому что на границах ареалов в наибольшей степени проявляется влияние лимитирующих факторов.

Было изучено 20 ценопопуляций (ЦП) *Cypripedium calceolus* на пяти ключевых участках (Таб. 1), где были заложены 5 постоянных пробных площадей (10×10 м). Изучение структуры ценопопуляций *Cypripedium calceolus* проводилась с учетом требований изложенных в действующем руководстве «Программа и методика наблюдений за ценопопуляциями видов растений Красной книги СССР» (1986). При выявлении онтогенетической структуры ценопопуляций в качестве счетной единицы принимался парциальный побег.

Таблица 1.

Местонахождение ключевого участка	Ключевые участки	Координаты
Южная часть заповедника	«Устье Чамбы»	60°23' с. ш., 101°58' в. д.
	«Белая Гора»	60°21' с. ш., 101°50' в. д.
	«Малин кордон»	60°23' с. ш., 101°50' в. д.
Центральная часть заповедника	«Сильгами»	60°54' с. ш., 101°55' в. д.
Западная часть заповедника	«Пеюнга»	60°37' с. ш., 101°39' в. д.

На территории заповедника изучаемый вид встречается в таких растительных сообществах как: сосновые, лиственнично-сосновые реже лиственничные леса с разнотравно-кустарничково-зеленомошным, кустарничково-зеленомошно-лишайниковым напочвенным покровом, приуроченных к юж-

ным и восточным склонам сопок. Для этих лесов характерны невысокая сомкнутость крон (0,1–0,2, реже 0,3); проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса варьирует от 25 до 65%, но чаще составляет 50–60%, проективное покрытие мохово-лишайникового яруса варьирует от 10 до 90%, обычно – около 50%. Видовое богатство в исследованных ЦП составляет от 21 до 44 вида.

Изучение плотности популяций *C. calceolus* показало, что она невелика на всех пробных площадях была невысокой: в среднем она составляла 1,06 побегов/м² и изменялась в интервале 0,02–5,1 парциальных побега/1м².

Исследование экологических особенностей местообитаний *Cypripedium calceolus* было проведено методом фитоиндикации с использованием стандартных экологических шкал И.А. Цаценкина (1978). Анализ шкал для изучаемого вида, проведенный по методу Е.П. Прокопьева (1993) показал, что он имеет низкую экологическую пластичность относительно таких факторов как увлажнение и активное богатство почвы: диапазон толерантности, где увлажнение составляет 7 ступеней (с 60 по 67-ю), а по активному богатству почвы – 3 ступени (с 7 по 10-ю). Изучение увлажнения и активного богатства почв местообитаний этого вида показало, что увлажнение местообитаний *Cypripedium calceolus* на территории заповедника «Тунгусский» варьирует в пределах 5 ступеней (с 63 по 67-ю), а активное богатство почвы – 2 ступеней (с 8 по 9-ю). При этом максимальное обилие (1-3%) встречается независимо от напряженности увлажнения или активного богатства, однако максимальная встречаемость достигается при значении 66 ступени шкалы увлажнения и 9 ступени шкалы активного богатства почвы (рис.1).

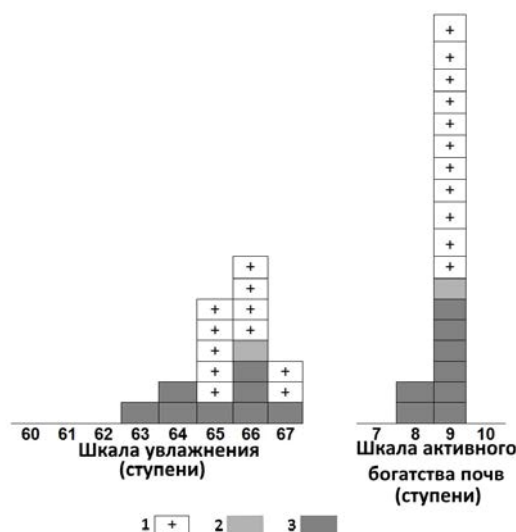


Рис. 1. Экологические кривые обилия для *Cypripedium calceolus* на территории заповедника «Тунгусский».

На рисунке цифрами обозначено:
1.– вид представлен единичными особями;
2.– обилие вида менее 1%;
3.– обилие 1-3%

ЛИТЕРАТУРА:

1. Васильев Н.В., Львов Ю.А., Плеханов Г.Ф. и др. Государственный природный заповедник «Тунгусский» (очерк основных данных) // Тунгусский заповедник. Биоценозы северной тайги и влияние на них экстремальных природных факторов. Труды ГПЗ «Тунгусский». Вып. 1. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. С. 33–89.
2. Вахрамеева М.Г., Денисова Л.В. Оценка критического состояния популяций редких и исчезающих видов растений (на примере сем. Орхидных) // Охрана генофонда природной флоры. Новосибирск, 1983. С. 24–28.
3. Горчаковский П.Л., Игошева Н.И. Мониторинг популяций орхидных в уникальном месте их скопления на среднем Урале // Экология, 2003. №6. С. 403–409.
4. Красная книга Красноярского края. Растения и грибы. Красноярск. 2005. 358 с.
5. Красная книга Красноярского края. Растения и грибы. Красноярск. 2012. 597 с.
6. Красная Книга Российской Федерации. Растения и грибы. М.: Товарищество научных изданий КМК. 2008. 855 с.
7. Красная книга РСФСР. Растения. М.: Росагропромиздат. 1988. 591 с.
8. Красная книга СССР Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных и растений. М.: Изд-во «Лесная промышленность». 1984. 632 с.
9. Программа и методика наблюдений за ценопопуляциями видов растений Красной книги СССР. М.: Типография ВАСХНИЛ, 1986. 35 с.
10. Прокопьев Е.П. Использование метода стандартных экологических шкал в ландшафтной экологии. Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1993. 29 с.
11. Серебряков И.Г. Экологическая морфология растений. Жизненные формы покрытосеменных и хвойных. М.: Высш. шк., 1962. 378 с.

12. Сопин В.Ю. К метеорологической характеристике территории заповедника «Тунгусский» // Труды ГПЗ «Тунгусский». Томск: Изд-во НТЛ, 2008. Вып. 2. Томск. С. 7–18.
13. Тимошок Е.Е., Райская Ю.Г., Скороходов С.Н., Сопин В.Ю. Редкие и исчезающие виды орхидных в лесных сообществах государственного природного заповедника «Тунгусский» (Южная Эвенкия) — Сибирский лесной журнал, 2016. №1. С. 13–26.
14. Толмачёв А.И. О количественной характеристике флор и флористических областей. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1941. 37 с.
15. Толмачёв А.И. Автохтонное ядро арктической флоры и её связи с высокогорными флорами Северной и Центральной Азии // Проблемы ботаники. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. Вып. 6. С. 55–65.
16. Юрцев Б.А. Проблемы ботанической географии Северо-Восточной Азии. Л., 1974. 158 с.
17. Юрцев Б.А., Камелин Р. В. Основные понятия и термины флористики. Пермь, 1991. 80 с.

Инструментальные измерения радиального роста и стволового сокодвижения у трех видов хвойных деревьев в Сибири

¹Рубцов А.В., ¹Арсак А., ²Кнорре А.А., ³Шашкин А.В., ³Бенькова В.Е., ¹Ваганов Е.А.

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²Национальный парк «Красноярские «Столбы», Красноярск, Россия

³Институт леса им. В.Н. Сукачёва ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

E-mail: alexeyruss@gmail.com

Средительное изменение климата влияет на стабильность лесных экосистем во всем мире, в том числе и на бореальные леса Сибири по причине увеличения числа региональных климатических аномалий в последние десятилетия. Поэтому актуальным является изучение физиологической реакции древостоев, в масштабе от индивидуумов до экосистем, на значительные отклонения сезонных погодных условий от климатических норм, выраженные в возникновении длительных периодов засухи, затяжных дождей, температурных экстремумов и т.д., которые влияют на водный баланс, продуктивность и фенологию лесов.

Цель работы заключалась в получении и анализе многолетних инструментальных данных на основе приборного комплекса мониторинга процессов водопроведения и роста деревьев и локальных метеорологических различных участках широтного градиента. Измерения проводились на трех участках (пробных площадях) в Красноярском крае РФ: 1) международная научная обсерватория «станция высотной мачты» ИЛ СО РАН (ZOTTO, возле с. Зотино), 2) научно-экспериментальный стационар ИЛ СО РАН «Погорельский бор» (PogBor, возле д. Погорелка) и 3) научный стационар «NARIM» в национальном парке «Красноярские «Столбы». В качестве объектов мониторинга мы выбрали три главных в Сибири лесобразующих вида хвойных деревьев: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) на всех трех участках, лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) в PogBor и NARIM, лиственница Гмелина (*Larix gmelinii* Rupr.) в PogBor.

Базовым материалом в работе являются инструментальные данные, полученные автоматическими измерительными комплексами оборудования, в которых большая часть приборов произведена компанией Environmental Measuring Systems (EMS Brno, Чехия). Ленточные дендрометры (EMS DRL-26A, DR-26) были использованы для измерения динамики размера окружности ствола (dR_c , мм) с разрешением 1 μ m у деревьев сосны обыкновенной (PogBor: 05/2015–н.вр., ZOTTO: 05/2013–10/2018, NARIM: 11/2018–н.вр.), лиственницы сибирской и Гмелина (PogBor: 2015–н.вр.). Ход изменений радиального размера ствола (dR , мм) у деревьев лиственницы сибирской в NARIM (05/2015–н.вр.) мы регистрировали точечными дендрометрами с линейным потенциометром LM10 (RS PRO, UK). Динамику стволового сокодвижения (Q , кг/см/ч) на высоте ≈ 1.3 м измеряли в течение нескольких вегетационных сезонов у деревьев лиственницы сибирской (PogBor: 2015–2017 гг.; NARIM: 2018 г.), лиственницы Гмелина (PogBor: 2016–2019 гг.) и сосны обыкновенной (PogBor: 2015–2019 гг.; ZOTTO в 2015 г., NARIM в 2019 г.) методом нагрева водопроводящих тканей сегмента ствола (THB, Čermák et al., 2004) двумя моделями автоматических приборов пр-ва EMS: SF-51 (+TC-120) и Microset 8x (+SF-81). Указанные измерения проводились в сочетании с записью базовых метеорологических показателей и динамики температуры и влажности почвы на нескольких глубинах.

Накопленный архив многолетних данных $dR_c/dR/Q$ был сформирован в виде базы данных “Kras_DendroSap” и опубликован в открытом доступе (на условиях лицензии CC-BY-SA-NC 3.0) на портале

Elsevier Mendeley Data [1]. БД состоит из трех частей с разделением по пробным площадям, каждый набор данных разнесен в отдельные файлы по породам деревьев (*Larix/Pinus*) и дополнен описанием участка, исследуемых деревьев, оборудования, первичных данных, этапов их обработки, графиками, и пр. в файлах спецификации. По дендрометрическим данным мы рассчитали и сравнили значения суточного абсолютного и сезонного аккумулированного прироста стволов у трех видов деревьев, выявили и охарактеризовали периоды активного роста и рецессии в зависимости от изменения условий окружающей среды в разных вегетационных сезонах. Данные Q мы использовали для оценки и сравнения видовой специфики транспирации деревьев, определения характеристик их водного режима по сокодвижению в различных метеоусловиях и взаимосвязи Q и dRc .

Создание и развитие сети мониторинга в 2014-2018 гг. реализованы в рамках задач грантов РФФИ №14-04-01005, №14-04-00443 и №17-04-01186. Продолжение работы осуществляется в "Лаборатории комплексных исследований динамики лесов Евразии" Сибирского федерального университета (проект FSRZ-2020-0014) при финансовой поддержке гранта РНФ №18-74-10048 (рук. А. Арсак).

Instrumental measurements of stem growth and stem sap flow rates of three conifer tree species in Siberia

¹Rubtsov A.V., ¹Arzac A., ²Knorre A.A., ³Shashkin A.V., ³Benkova V.E., ¹Vaganov E.A.

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²National park "Krasnoyarsk Stolby", Krasnoyarsk, Russia

³Sukachev Institute of forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

E-mail: alexeyruss@gmail.com

INTRODUCTION

Rapid climate change affects the sustainability of forest ecosystems worldwide. Siberian boreal forests are particularly vulnerable due to the increase in frequency and influence impact of regional anomalies of seasonal weather conditions during the last decades. Such negative factors as droughts, heavy rains and temperature extremes affect water balance, gross/net productivity and phenology of forests. Therefore, it is crucial to evaluate boreal forest's physiological response against periodic and punctual environmental stress events from individual trees to ecosystems.

A process-based knowledge of weather and climate impacts on ecosystem components is possible through the analysis of relevant quantitative data acquired by complex environmental monitoring systems. Thus, the establishment of a network of long-term instrumental measurements of tree growth and water transport processes related to main forest-forming tree genera in Siberia in geographically and climatically distinct areas was the scope of our work. The primary material in this study consists of in-situ data obtained by the sets of equipment (devices and sensors) for automatic measurements of vertical water transport in the stem xylem (sap flow rate as a dynamic characteristic of tree water regime) and fluctuations of tree stem circumferential or radial size (as a dynamic characteristic of tree growth rate) with adjacent records of local meteorological variables. This work aimed to get quantitative and qualitative estimations of the links between tree water regime and tree stem radial growth depending on variations of local weather and soil hydrothermal conditions on different time scales (diurnal, inter- and intra-seasonal, annual). In particular, we aimed to define, characterize and compare seasonal growth patterns, transpiration, water use and drought stress reaction of the trees under monitoring.

RESEARCH SITES

In-situ measurements of stem circumferential/radial size changes (dRc/dR) and stem sap flow rates (Q) were performed for three conifer tree species at three research sites within the territory of Krasnoyarsk Krai in Russia: 1) the "NARIM" research station in the National park "Krasnoyarsk Stolby", 2) the "Pogorelsky bor" (PogBor) research station (both nearby the city of Krasnoyarsk) and 3) the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) International research station (nearby the village of Zotino). Climate conditions at all the sites belong to the cold continental climate zone but differ in seasonal weather characteristics and forest composition. NARIM is located in the mountain area at 538 m a.s.l. within the south taiga zone and represents a mixed boreal forest, where we selected ≈ 116 year old Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and ≈ 140 year old Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) trees which co-occur with silver birch (*Betula pendula* Roth) and Siberian fir (*Abies si-*

birica Ledeb.) trees. The PogBor site belongs to the forest-steppe zone at 243 m a.s.l., where perennial dRc and seasonal Q data were obtained for 50-year old Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) and Gmelin larch (*Larix gmelinii* Rupr.) trees in addition to native Scots pines. Selected larch trees at PogBor are part of a study on provenance experiment. ZOTTO is the most northern site at 114 m a.s.l., where monitoring was performed on ≈ 100 -year old Scots pines in a monoculture forest type. Long-term mean annual air temperature and mean annual precipitation were about 0.1 °C and 668 mm in NARIM, 1.3 °C and 537 mm in PogBor, -3.5 °C and 590 mm in ZOTTO, respectively.

EQUIPMENT AND DATA

Most of the devices in the equipment complexes applied in our study were manufactured by Environmental Measuring Systems (EMS Brno, CZ, www.emsbrno.cz). The automated self-logging band dendrometers EMS DRL-26A were used to measure and record temporal changes of stem circumferential size (dRc , [mm], 1 μ m resolution) of Scots pine trees in ZOTTO (05/2013–10/2018) and NARIM (11/2018–present). Similar dendrometers (DR-26, wire output) were used to measure dRc of Scots pine and Siberian/Gmelin larch trees in PogBor (05/2015–present). Variations of stem radial size (dR , [mm]) of Siberian larch trees in NARIM (05/2015–present) were measured using self-made analog point dendrometers based on the LM10 linear conductive 5k Ω potentiometer (RS PRO, UK).

Sap flow rates (Q , [kg/cm/h]) in tree stems were measured at ≈ 1.3 m height above ground during several vegetation seasons in Siberian larch (in PogBor, 2015–2017; in NARIM, 2018), Gmelin larch (in PogBor, 2016–2019) and Scots pine (in PogBor, 2015–2019; in ZOTTO, 2015) the trunk segment heat balance (THB) method [1], with the use of two models of EMS' sap flow meters: analog SF-51 control units (+TC-120 thermocouples) and self-logging Microset 8x units (+SF-81 thermocouples).

Air temperature (T_{air} , [°C]), air humidity (Rh , [%]) and PAR (μ mol/m²) in PogBor were recorded by a self-logging EMS Minikin QTHi sensor. Precipitations [mm] in PogBor was measured with Pronamic Rain-O-Matic Professional rain gauge (orifice 200 cm²) from April to mid-October each year. The weather station Vantage Pro 2 (Davis Instruments, USA) was used to record the main meteorological variables in NARIM. Volumetric soil water content (Ws , [m³/m³]) was measured at several depths (10/20/45 cm in PogBor and 10/20/30 cm in NARIM) by using the WaterScout ST100 sensors (Spectrum Technologies, USA). Soil temperature (T_s , [°C]) at few depths (10/20 cm in NARIM and 10/20/40/60 cm in PogBor) was measured using the EMS PT100 sensors. Soil water potential at 10/20/45 cm in depth was measured in PogBor with GB-2 gypsum sensors (Delmhorst Instrument, USA). Analog signals from wire output devices in PogBor and ZOTTO were recorded to EMS RailBox E1532V4P data loggers; dR and T_s in NARIM to EMS EdgeBox V8 logger, Ws in NARIM to EMS MicroLog SP3 logger.

In-situ raw data were acquired with different temporal resolution (10 to 60 minutes) in hardware-specific file formats (.hex, .dcv) and pre-processed in the EMS Mini32 Software including data verification, removal of incorrect values, adjustment of timing, compilation of successive data parts into the entire time-series, correction of Q values considering heat losses (sap flow baseline [2]), noise reduction by averaging $dR/dRc/Q$ to hourly mean values and data output to common file formats. In the post-processing stage, we calculated and analyzed several derivative variables from prepared data. Thus, time series from dendrometers were processed in terms of a) calculation of daily absolute tree stem radial size variations ($dRabs$, [mm], fig. 2) and accumulated stem growth rates ($dRaccu$, [mm], fig. 2) from diurnal dRc values; b) determination of the main phenological phases: start, end and duration of tree growth seasons (SoGS, EoGS, DoGS in annual dates) and their inter-annual shifts, c) defining normal patterns of seasonal stem growth curves (without the influence of drought) and calculation of daily stem shrinkage values ($dRshr$, [mm]) induced by drought.

RESULTS AND CONCLUSION

The collected data archive of the perennial dRc/dR and seasonal Q was prepared and published as a “Kras_DendroSap” database [3] with free data access (under the terms of the CC-BY-SA-NC 3.0 international license) on the Elsevier Mendeley Data scientific data portal (www.data.mendeley.com/datasets/266c9tzg2c). The database consists of three parts (datasets) arranged by research plots, in which datasets were arranged by tree genera (*Larix/Pinus*) in separate MS Excel files. Descriptive information of sites (research plots in detail, parameters of trees, equipment, data pre-processing stages, data gaps, references, figures, tables) is available in the specification files for each dataset in the corresponding data folders.

Analysis of the obtained $dRc/dR/Q$ datasets in addition to weather condition records allowed us to get the following results. Time series of dR/dRc values for all tree species demonstrate specific physiologically reasonable patterns on the hourly, daily and seasonal temporal scales, mainly related to tree stem water transport and growth dynamics within one season. Daily absolute $dRabs$ and accumulated $dRaccu$ values differed in magnitude but showed high synchronicity among the trees and high variability in temporal distribution within 5 vegetation seasons (2015–2019), one example for Scots pine in PogBor is shown in figure 2. Inter-seasonal tree growth curves also show annual similarities with intra-seasonal patterns. Typically, the main period of continuous tree

growth lasts from mid-May to mid-July. Physiological drought in trees mainly occurs from mid-June to September, where negligible or negative $dRabs$ values occur, corresponding to declines of daily Q in these periods.

Daily transpiration and soil moisture dynamics simulated using the process-based eco-physiological Benkova-Shashkin model were compared with in-situ data that allowed us to verify the model efficiency and define its drawbacks and advantages [4]. This research suggested that continuous measurements of Q allow the study of phenological cycles (phases) of trees with various growth rates, particularly determining the timing (dates) of start/end of vegetation seasons. Similar work was done to validate tree ring growth start timing simulated using the Vaganov-Shashkin stochastic tree grow model (VS-oscilloscope). The analysis comparing simulated daily tree growth rates from the VS-model output versus dendrometer-derived $dRabs$ and $dRaccu$ values for pine at PogBor (2015–2019), suggested discrepancies between the model output and stem growth rates also caused by not sensitive parameters of tree growth limitation by soil moisture. However, the VS-model produces sufficiently realistic $dRaccu$ output.

Obtained Q data from PogBor and NARIM show significant differences in stem water transport seasonal timing, related to the start/end dates and duration of the vegetation season among sites and tree species. Particularly in PogBor, two stands of Scots pine and Siberian larch with similar age and taxonomic properties, exhibited very different transpiration rates and response mechanisms to environmental signals [5]. Stand water use was higher for larch than for pine, despite of transpiration for deciduous larch trees occurred over shorter time periods [5]. The cumulative annual transpiration of the Siberian larch stand was 284 ± 4 mm in the growing seasons of 2015–2016, while for pine this was 20% lower [5]. Seasonal transpiration accounted for 50% and 40% of the reference evapotranspiration and 91% and 67% of growing season precipitation for larch and pine, respectively [5]. We also compared Q , growth and water use efficiency of stem growth (WUE) in three equal age stands of Siberian/Gmelin larch and Scots pine in PogBor concluding that the pine stand maintained higher WUE than both larch stands [6]. WUE of stem biomass production was lowest in Siberian larch trees and highest in Scots pines [6].

Finally, dendrometer and sap flow measuring systems can be used in independent studies and enrich the potential of complex environmental monitoring systems.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to all participants of the field-works in the period of 2013–2019. Especial acknowledgments we address to Anatoly Prokushkin, Alexey Panov, Alexander Zukanov, Sergey Titov (regarding to ZOTTO), Alexey Barchenkov, Viktor Ivanov, Vitaly Shishkin (regarding to PogBor) from the Sukachev Institute of forest SB RAS, Elena Tropina and Andrey Rogovsky (regarding to NARIM) from the National park “Krasnoyarsk Stolby”, prof. Oleg Nepomnyashchiy, Josef Urban and graduated students Lisa Lyachenko and Alexey Vdovichenko from Siberian Federal University.

Establishment and development of this work since 2014 was supported by the research grants №14-04-01005, №14-04-00443 and №17-04-01186 from the Russian Foundation for Basic Research. Continuation and current performance of the research is done in the “Laboratory for integral studies of forest dynamics of Eurasia” of the Siberian Federal University (project FSRZ-2020-0014) with financial support of the grant №18-74-10048 from the Russian Science Foundation.

REFERENCES:

1. Čermák J., Kučera J., Nadezhkina N. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees - Struct. Funct.* 2004, Vol. 18. p. 529–546. <https://doi.org/10.1007/s00468-004-0339-6>
2. Trcala M., Čermák J. Improvement of the trunk heat balance method including measurement of zero and reverse sap flows. *Agric. For. Meteorol.* 2012, vol. 166–167. p. 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.07.009>
3. Rubtsov A., Arzac A., Knorre A., Shashkin A., Benkova V., Vaganov E. (2020), “Kras_DendroSap. Instrumental data of stem growth and stem sap flow rates of three conifer tree species in the Krasnoyarsk region of Russia”, *Mendeley Data*, v1. <http://dx.doi.org/10.17632/266c9tzg2c.1> (in review).
4. Benkova A.V., Rubtsov A.V., Benkova V.E., Shashkin A.V. Seasonal sap flow dynamics in *Larix sibirica* trees growing in the Krasnoyarsk forest-steppe. *J. Sib. Fed. Univ. Biol.*, 2019, vol. 12(1), p. 32–47. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0071>.
5. Urban J., Rubtsov A.V., Urban A.V., Shashkin A.V., Benkova V.E. Canopy transpiration of a *Larix sibirica* and *Pinus sylvestris* forest in Central Siberia. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 271, 2019. p. 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.038>.
6. Urban J., Rubtsov A.V., Shashkin A.V., Benkova V.E. Growth, transpiration and water use efficiency of *Larix sibirica*, *Larix gmelinii* and *Pinus sylvestris* forest in Siberia. *Acta Horti*, vol. 1222, 2018. p. 124–132. <https://doi.org/10.17660/ActaHorti.2018.1222.17>.

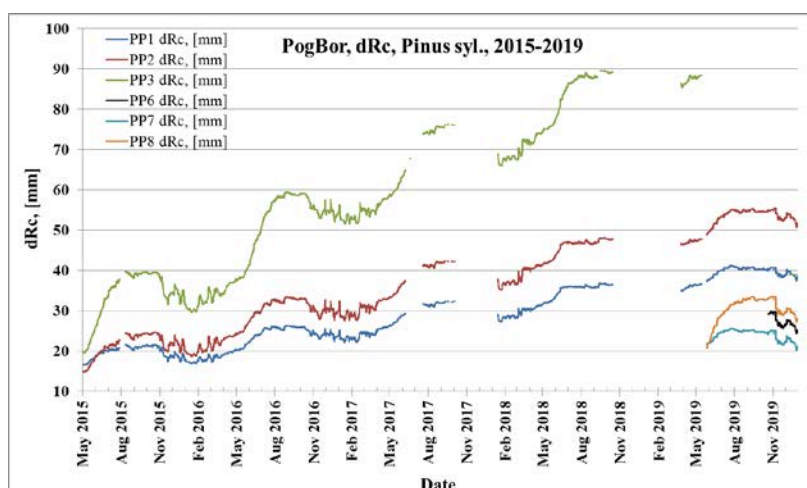


Fig. 1. Band dendrometer data time series (dR_c , [mm]) of the Scots pine trees at PogBor. Colors of the lines show data from different trees.

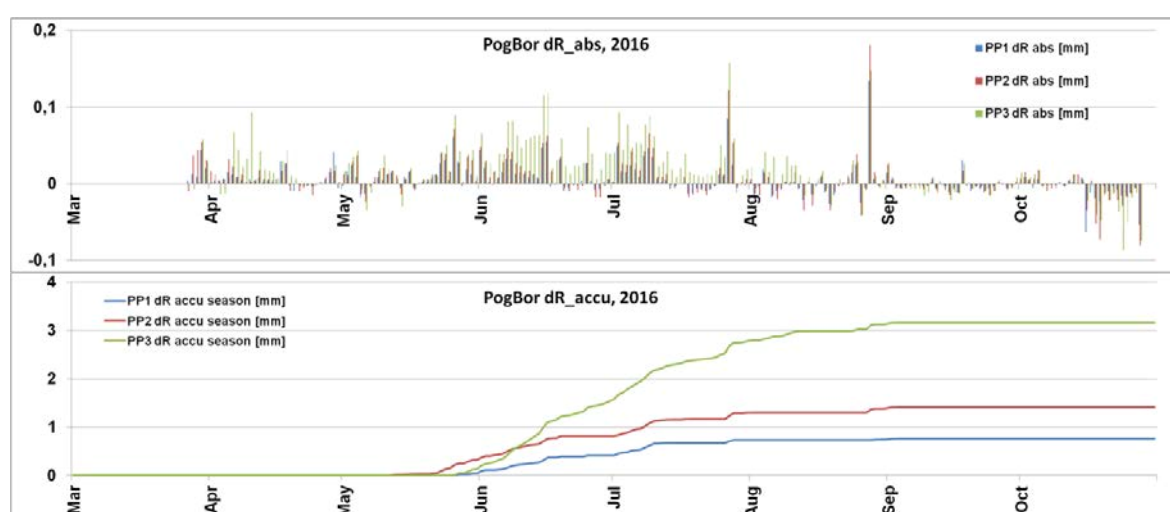


Fig. 2. Daily absolute (dR_{abs} , [mm], upper panel) and accumulated (dR_{accu} , [mm], bottom panel) stem radial growth rates of three Scots pine trees in 2016 at PogBor. Colors of the lines show data from different trees.

Plant colonization of the young glaciofluvial deposits of the Severo-Chuiskiy glaciation center (Russian Altai) during the modern climate warming

Timoshok E.N., Timoshok E.E., Raiskaya Yu.G.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

The importance of biodiversity monitoring is increasing during the modern global climate changes, especially monitoring of forming landscapes biodiversity and control of invasions. The climate of the Altai high-mountain areas is changed significantly: mean annual temperature is increased by 1.5°C and precipitation is decreased by about 10% for the last 40 years. We choose plant communities of young glaciofluvial deposits of Aktru river valley as a typical for Altai type of forming communities. These plant communities are forming on the deposits cleaned from previous vegetation by glaciofluvial flushes of early years of modern warming in the mid XIX century. The deposits include 3 distinctive landscape zones: upper zone with young larch forests, middle zone with forming vegetation and lower zone where disturbance level prevents forming of vegetation. We assumed the ecosystems of the middle zone of the deposits are more suitable for climatic response studies as they lack edificators with strong environment-changing influence.

Primary disturbances of the study area are lateral riverbed shifts and thick icings. They prevented settlement of any plants in the middle area until the latest period of warming (started in 1980s) just like prevent any plant colonization in the lower part of the deposits now. This area still influenced by this disturbances but riverbed shifts are slow, rare and not as significant as in lower area and icing are occur not annually but once per several years.

Long-term monitoring of middle part of the deposits fetched out that vegetation of this area includes 100 species of vascular plants and belonging to 31 family and 64 genera. The most represented families are *Poaceae* (14 species), *Asteraceae* (13 species) and *Salicaceae* (12 species). The largest genera are *Salix* (11 species) and *Poa* (8 species). The most common species with highest occurrence (about 90% from all plots) have a low shrub *Myricaria dahurica*, tall shrubs *Salix coesia*, *S. saposhnikovii* and tree *Larix sibirica* which occur only in shrub form.

Ecological diversity include species from 5 ecological groups, but species of the high-mountain cold habitats (psychrophites) is most common as 45% of species are belong to this ground; the next two groups are forest-meadow species (mesophytes) and stony habitats species (petrophites); 22% and 17% of all species are belonging to them respectively. The growth forms diversity is high (14 forms); the most common growth forms are perennial (mostly rhizome) herbs, high and low shrubs. The most common way of propagule migration to the deposits is wind; more than 50% of species has adaptations for wind dispersing or very light seeds.

The influence of icings in the middle area still prevents development of trees; successfully colonized *Larix* trees are dying or lose their apical parts turning to shrubs.

Thus modern climate changes (including increasing of the temperature by 1.5°C) have created a group of new habitats in the middle part of glaciofluvial deposits. The communities here is rather primitive because of the disturbance regime; they consist mostly from species with stress-tolerator or stress-tolerator-ruderal life strategies. All involved species is the part of normal flora of the high-mountain parts Severo-Chuiskiy range; we still not detected any species from lower steppe areas so we can assume the modern climate changes is not strong enough to affect forming communities of the Aktru river valley.

Заселение растений на молодых водно-ледниковых отложениях в период современного потепления климата в Северо-Чуйском центре оледенения (Русский Алтай)

Тимошок Е.Н., Тимошок Е.Е., Райская Ю.Г.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

В современных условиях глобального потепления климата, отмеченного по всему земному шару [1], большое значение приобретает мониторинг биоразнообразия растений, в одном из направлений которого является мониторинг заселения растений. С нашей точки зрения особую ценность имеет мониторинг биоразнообразия экотопов развивающихся ландшафтов и контроль появления инвазивных видов. В условиях современного потепления среднегодовые температуры в межгорных котловинах Алтая увеличились на 3.8° С, тогда как в высокогорьях увеличение температуры менее значимо – на 1,5°C, количество осадков сократилось приблизительно на 10% [2].

В рамках мониторинга биоразнообразия особый интерес представляет изучение процесса заселения растений при формировании экосистем в периодически нарушаемых ландшафтах, которые, в силу отсутствия выраженного доминирования и эдификации, обладают низкой резистентной устойчивостью и, в силу этого, более чувствительны к инвазиям. Мониторинг этого процесса имеет значительную научную ценность, так как позволяет оценить естественную динамику экосистем в условиях изменяющегося климата, изучить их адаптацию и экстраполировать результаты исследований на прошлые периоды глобального потепления, неоднократно повторявшиеся в циклах потеплений-похолоданий в Русском Алтае [3], а так же на процессы протекавшие на обширных водно-ледниковых отложениях, сформировавшихся при таянии ледников во время значительных четвертичных оледенений. Кроме того, подобные исследования безусловно полезны в плане изучения климатически обусловленных изменений возможностей экосистем, связанных с выполнением их биосферных функций и созданием ими необходимых человеку благ.

Наши многолетние исследования в горно-ледниковых бассейнах Центрального Алтая [4] показали, что среди обследованных бассейнов Северо-Чуйского, Южно-Чуйского и Катунского хребтов, наибольшей изученностью геоморфологических процессов и протяженностью молодых водно-ледниковых отложений выделяется горно-ледниковый бассейн Актру (50°05' с.ш., 87°45' в.д.), расположенный в наи-

более возвышенной части Северо-Чуйского хребта – горно-ледниковом узле Биш-Иирду. Этот бассейн репрезентативен для Алтая по многим критериям [5]. Водно-ледниковые отложения большой мощности (до 6 м) с относительно ровной поверхностью покрывают дно бассейна [6], по ним протекает р. Актру. Эти отложения сформировались в верхней части долины на месте обширного ледника аккемской стадии, а так же, в результате таяния ледников Актру, проходившего в циклах потеплений-похолоданий климата последних тысячелетий. Эти отложения представляют собой наносы ледниковых потоков, сложенные слоистыми осадками – песками, гравием, галькой, валунами. В период потепления, начавшегося во второй половине XIX в. наступившего после максимального за последнее тысячелетие похолодания первой половины XIX в., растительность, существовавшая на водно-ледниковых отложениях в то время, была уничтожена мощными водными потоками, стекавшими с тающих ледников бассейна Актру (Малый Актру, Большой Актру). Это подтверждается наблюдениями профессора М.В. Тронова [7], который в 1936 г. отметил практически полное отсутствие растительности на этих отложениях. Молодые водно-ледниковые отложения имеют длину около 5 км, ширину 40-500 м и представляют собой обширное задровое поле, на большей части (две трети) не занятое растительностью, покрытое гравием, галькой, и валунами с небольшими участками песка и ледникового ила.

Современное потепление отмечено на Алтае в последние 40 лет, и началось в 1980-х годах [8] В предшествующий потеплению период для бассейна была характерна низкая среднегодовая температура ($-5,2^{\circ}\text{C}$) и сравнительно небольшое количество осадков (563 мм/год), в современный период среднегодовая температура повысилась приблизительно до -4°C , а осадки сократились примерно на 10% [2,9].

Исследования проводились в средней части молодых водно-ледниковых отторжений, на обширном задровом поле, так как их верхняя часть отложений покрыта молодым лиственничным лесом, сформировавшимся около 50-60 лет назад, а нижняя часть имеет слишком жесткий режим нарушений, связанный с активным формированием глубоких наледей и миграциями русла р. Актру [10], и исключающий устойчивое заселение растительности. Средняя часть так же подвержена этим нарушениям, но их влияние здесь менее значимо, за счет меньшей подвижности русла р. Актру и меньшей мощности и частоты формирования наледей, что приводит к тому, что наледи нарушают в основном наземные части кустарников, но не наносят вреда банку семян и подземным частям растений. Для средней части

За годы исследований в этой зоне задрового поля отмечено заселение 100 видов сосудистых растений из 31 семейства и 64 родов. Наибольшее число заселившихся видов относятся к семействам Злаковых-*Poaceae* (14 видов), Сложноцветных-*Asteraceae* (13) и Ивовых-*Salicaceae* (12 видов) [11]. По числу видов выделяются два крупных рода: ива – *Salix*, включающий 11 видов и мятлик – *Poa* – 7 видов. В экологическом пространстве заселяющихся галечниково-гравийных отложений преобладают высокогорные виды холодных местообитаний (психрофиты) – 45 %, в то время как участие видов других экологических групп значительно ниже: лесно-луговых растений (мезофитов) – 22 %, растений каменистых местообитаний (петрофитов) – 17 %, растений избыточно увлажненных местообитаний (гигрофитов) – 14 %, наименее представлены степные виды (ксерофиты) – 6 %.

Большая доля высокогорных видов (по экологическим требованиям – растений холодных местообитаний) среди первопоселенцев свидетельствует о том, что по экологическим условиям местообитания водно-ледниковых отложений являются жесткими по термическому фактору.

Обнаруженные в этой зоне виды растений относятся к 16 жизненным формам. Среди первопоселенцев абсолютно преобладают травянистые многолетники (72 %), а среди них корневищные травы; древесных растений (деревья, кустарники, кустарнички, полукустарники) – 28 %.

Как показывают наши данные, значительную активность в заселении этой части задрового поля с встречаемостью более 20 % проявляют 35 видов, высокую – только 14 пионерных видов. Десять из них имеют встречаемость более 50 %: в числе которых 9 – многолетние травы: *Aster alpinus*, *Campanula rotundifolia*, *Castilleja pallida*, *Chamerion latifolium*, *Crepis karelinii*, *Elymus transbaicalensis*, *Gypsophilla cephalotes*, *Hedysarum neglectum*, *Leontopodium ochroleucum*, один – кустарник *Pentaphylloides fruticosa*. Наибольшая активность отмечена для четырех видов, в их числе кустарники *Myricaria dahurica*, *Salix coesia*, *S. saposhnikovii* и дерево *Larix sibirica*, встречаемость достигает 90 %. Среди заселившихся видов в целом преобладают (55 %) виды с низкой встречаемостью. Наиболее значимыми пионерными видами являются кустарники *Myricaria dahurica*, *Salix coesia*, *S. saposhnikovii*, молодые особи которых формируют небольшие по площади мало- и многовидовые микрогруппировки. Из пионерных трав особенно значимы *Chamerion latifolium*, *Crepis karelinii*, *Castilleja pallida* и *Gypsophilla cephalotes*, которые образуют, в основном простые одновидовые скопления или маловидовые группировки.

Для процесса заселения открытых гравийно-галечниковых участков важнейшее значение имеют поступление зачатков растений и их приживание в условиях этого беспокойного ландшафта. Как показывают проведенные исследования, наибольшая роль в этом процессе принадлежит растениям, семена которых разносятся ветром. Разнообразие направления ветров в долине р. Актру [9] обуславливает занос зачатков из всех окружающих растительных сообществ: послепожарных и коренных лесов, лесотундрового экотона, горных тундр. Ветром сюда заносятся семена растений, имеющих различные при-

способления для увеличения парусности семян, в том числе деревьев *Larix sibirica*, тополя лавролистного (*Populus laurifolia*), *Betula alba*; кустарников: *Betula rotundifolia*, *Myricaria dahurica*, 11 видов рода *Salix*, кустарничка *Dryas oxyodonta*; многолетних трав: всех видов семейства Сложноцветных (13 видов), *Chamenerion latifolium*, *Ch. angustifolium*, а также – 15 видов, имеющих очень легкие семена, в основном многолетних трав (*Castilleja pallida*, *Gypsophilla cephalotes*, и др.). Таким образом, ветром заносятся около 50 % заселившихся видов. Виды, занесенные животными менее многочисленны. В их числе 14 видов семейства Злаковых, в том числе 7 видов рода *Poa*, *Elymus transbaicalensis*, *E. sajnensis* и др.), по 2 вида рода *Juniperus* и *Lonicera* – около 20 %.

Формирование растительности проходит на выровненных участках и в межрядовых понижениях. Однако, проективное покрытие всех заселившихся видов, в том числе и активных - низкое. Большая часть первопоселенцев (около 80 % видов) встречаются единично, отдельными особями на значительном расстоянии друг от друга. Только у 14 активных видов в наиболее благоприятных местообитаниях, на выровненных участках и в межрядовых понижениях, проективное покрытие составляет от 1–2 до 3–5 %. Из всех обнаруженных видов мятликов (7 видов) скопления - одновидовые группировки образуют только 2 вида мятликов *Poa alpina* и *P. altaica*. Общее проективное покрытие растительности очень низкое и на разных участках изменяется от 1–2 до 5–7%.

С точки зрения прогноза дальнейшего развития растительности в средней части водно-ледниковых отложений, и, прежде всего, формирования молодых лиственничников особенно важное значение имеет мониторинг заселения и онтогенетического развития *Larix sibirica* - важнейшего в Горном Алтае лесообразующего вида. Как показали наши многолетние наблюдения, массовое заселение лиственницы в местообитаниях средней части водно-ледниковых отложений было отмечено в 2004–2006 гг. Дальнейший мониторинг (2011, 2014, 2017 гг.) показал, что около 80 % растений погибло, а оставшиеся молодые особи имеют возраст 9–12 лет, находятся в имматурном онтогенетическом состоянии, угнетены и развиваются не как молодые деревья, а как кустарники – многократно ветвятся и перевершиниваются вследствие многократного отмирания верхушечных почек.

В целом сама возможность заселения средней части водно-ледниковых отложений, во многом, определена наличием современных климатических изменений. Обусловленное потеплением таяние ледников в значительной степени изменило режим нарушений с предельно жесткого до допускающего формирование растительных сообществ, состоящих из видов с патиентной или эксплерентно-патиентной жизненной стратегией. Вместе с тем все виды, участвующие в заселении, распространены так же и в других сообществах верхней части лесного пояса Северо-Чуйского хребта. Заноса видов типичных для его остепненной нижней части не выявлено, что позволяет предположить, что существующие изменения недостаточны даже для изменения этих уязвимых растительных сообществ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report.*– Geneva: IPCC. 2014.– 151 с.
2. Kharlamova N., Sukhova M. and Chalchula J. *Present climate development in Southern Siberia: a 55-year weather observation record.* //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.– 2019.– Vol. 48.– P. 12–27
3. Окишев П.А. *Рельеф и оледенение Русского Алтая.* – Томск: Изд-во Том. ун-та.– 2011.– 380 с.
4. Тимошок Е.Е., Нарожный Ю.К., Диркс М.Н., Скороходов С.Н., Березов А.А. *Динамика ледников и формирование растительности на молодых моренах Центрального Алтая.* – Томск. Издательство научно-технической литературы. – 2008. – 206 с.
5. Тронов М.В. *Ледники и климат.* – Л.: Гидрометиздат. – 1966. – 408 с.
6. *Ледники Актру.* – Л.: Гидрометиздат. – 1987. – 117 с.
7. Тронов М.В. *Ледники горного узла Биш-Иирду.* // Труды Томского гос. ун-та.– 1939. – Т. 95. – С. 10-
8. Харламова Н.Ф., Останин, О.В. *Характеристика современного термического режима российской части Алтае-Саянского экорегиона.* // Известия Алтайского государственного университета. – 2013. – №3-1. – С. 117–122
9. Севастьянов В.В. *Климат высокогорных районов Алтая и Саян.* – Томск: Изд-во ТГУ. – 1998. – 201 с.
10. Нарожный Ю.К. *Формирование и режим наледей в горно-ледниковых долинах Центрального Алтая.* // Вопросы географии Сибири Томск. – 1997. – Вып. 22. – С 129-137.
11. Timoshok E.E., Timoshok E. N., Skorokhodov S. N., Raikaya Yu. G., Gureyeva I.I. *Biodiversity of the vascular plants in the young fluvioglacial landscapes in the Severo-Chuiskiy center of present-day glaciation (the Central Altai).*// International Journal of Enviromental Studies. –2017. – Vol. 74. – № 5. – P. 664-673. DOI:1080/00207233.2016.1269587

Meteorological factors of Caucasus and Altai mountains's deglaciation

¹Toropov P.A., ²Aleshina M.A., ²Nosenko G.A., ¹Popovnin V.V.

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of geography, Moscow, Russia

²Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

E-mail: tormet@inbox.ru, aleshina_maria@mail.ru, gnosenko@gmail.com, begemotina@hotmail.com

In the recent decades, there has been a rapid glaciation reduction in the main mountain-glacier regions of the world, its trend is 0.5–1%/year [Hock et al., 2019]. According to the projections based on the IPCC scenarios, glaciers will completely melt in some mountain systems by the early 22nd century [Huss M., Hock R., 2015]. This may result in the catastrophic freshwater shortage for the countries whose climate characterized by lacks moisture (Kyrgyzstan, Tajikistan, Kazakhstan, Peru, Chili, etc.). The area and volume glaciers reduction drive interannual runoff redistribution, as well region-dependent changes of the mountain landscapes and frequency of mudflows. In addition, mountain glaciers melting makes a significant contribution to global sea level change [Huss M., Hock R., 2015]. The above problems initiate the studies whose final goal is to simulate mountain glacier dynamics and to reveal the physical mechanisms of the modern deglaciation, which depend much on the specific of mountain-glacier region. First data on the Altai mountain's deglaciation and their reasons were published in [Shahgedanova et al., 2010]. In this study we estimated the trends of the Caucasus and Altai mountain glaciation based on the analysis of satellite images and meteorological datasets. During 50 years, Altai glaciers have diminished in size by 20–25 percent, deglaciation rate has increased twice last 10 years [Tielidze, Wheate, 2018; Shahgedanova et al., 2010]. Most of the Caucasus glaciers are characterized by a negative mass budget since the beginning of the XXI century [Toropov, 2019]. Analysis of changes in meteorological values based on station data and the results of the ERA-Interim reanalysis showed that statistically significant warming in the region occurs only warm half year and doesn't exceed 0.5 - 1° C/10 years. No statistically significant changes were detected in the precipitation regime, despite the increase in the integral moisture content of the atmosphere and in the potential convective energy. Therefore, during last 40 years, the sensible heat flux to the ice surface has increased by 8–10 W/m², which has led to an increase in the melting layer by 170–200 mm.w.e. per year. But the main cause Altai deglaciation is growth of incoming short-wave radiation which is 5 W/m² per 10 years, it increased melting layer by 320 mm. w.e. per year. The positive trend of the radiation budget is in good agreement with a decrease in the total cloud cover, which is associated with an increase in moisture divergence, geopotential, and a weakening of zonal circulation in the middle troposphere [Semenov, Latif, 2017].

This work was supported by Russian Foundation for Basic Research (RFBR, №17-05-41037, №20-05-00176)

REFERENCES:

1. Hock R., Rasul G., Adler C., Cáceres B., Gruber S., Hirabayashi Y., Jackson M., Kääb A. Kang S., Kutuzov S., Milner A., Molau U., Morin S., Orlove B., Steltzer H. *High Mountain Areas. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2019.*
2. Huss M., Hock R. *A new model for global glacier change and sea-level rise //Frontiers in Earth Science. – 2015. – T. 3. – C. 54.*
3. Semenov V. A., Latif M. *Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966–2012 //Environmental Research Letters. – 2015. – T. 10. – №. 5. – C. 054020.*
4. Shahgedanova M., Nosenko G., Khromova T., Muraveyev A. *Glacier shrinkage and climatic change in the Russian Altai from the mid-20th century: An assessment using remote sensing and PRECIS regional climate model //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2010. – T. 115. – №. D16.*
5. Tielidze, L.G. and Wheate, R.D. *The Greater Caucasus glacier inventory. // The Cryosphere. – 2018 – Vol. 12 – P. 81–94. <https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018>.*
6. Toropov P. A., Aleshina M. A., Grachev A. M. *Large-scale climatic factors driving glacier recession in the greater caucasus, 20th–21st century // International Journal of Climatology. – 2019. – Vol. 39. – P. 4703–4720.*

Метеорологические факторы деградации горного оледенения Кавказа и Алтая.

¹Торопов П.А., ²Алешина М.А., ²Носенко Г.А., ¹Поповнин В.В.

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

E-mail: tormet@inbox.ru, aleshina_maria@mail.ru, gnosenko@gmail.com, begemotina@hotmail.com

В последние десятилетия наблюдается стремительное сокращение горного оледенения, средний тренд составляет 0,5 -1 %/год [Hock et al., 2019]. Для регионов с аридным климатом это может обернуться катастрофической нехваткой пресной воды. Сокращение площади и объема горного оледенения приводит к изменениям параметров речного стока, повторяемости опасных гляциальных явлений [Milner et al., 2017], ухудшению рекреационного потенциала горных провинций. Таяние горных ледников вносит вклад в изменение уровня Мирового океана [Huss M., Hock R, 2015], и может влиять на региональную атмосферную циркуляцию (через альбедный эффект, изменение энергообмена атмосферы с поверхностью, и т.д.). Эти проблемы инициируют развитие моделей горных ледников, а также подробное изучение физических механизмов современной деградации оледенения в различных горных регионах.

В данной работе на примере двух основных горно-ледниковых районов России (Северного Кавказа и Горного Алтая) выполнены количественные оценки динамики оледенения, и прежде всего метеорологические факторы происходящих изменений. Согласно оценкам, выполненным в [Tielidze, Wheate, 2018], площадь оледенения Кавказа сократилась за последние 20 лет на 10% (рис. 1б), причем ежегодно баланс массы на большей части ледников отрицательный (рис. 1а). Еще быстрее сокращаются ледники Алтая: анализ спутниковых снимков показал, что за последние 50 лет площадь оледенения горного уменьшилась на 25 % [Торопов и др., 2020], при этом в 2008 – 2017 гг. скорость деградации ледников увеличилась в 2 раза, достигая -1,2 % в год (рис. 1в).

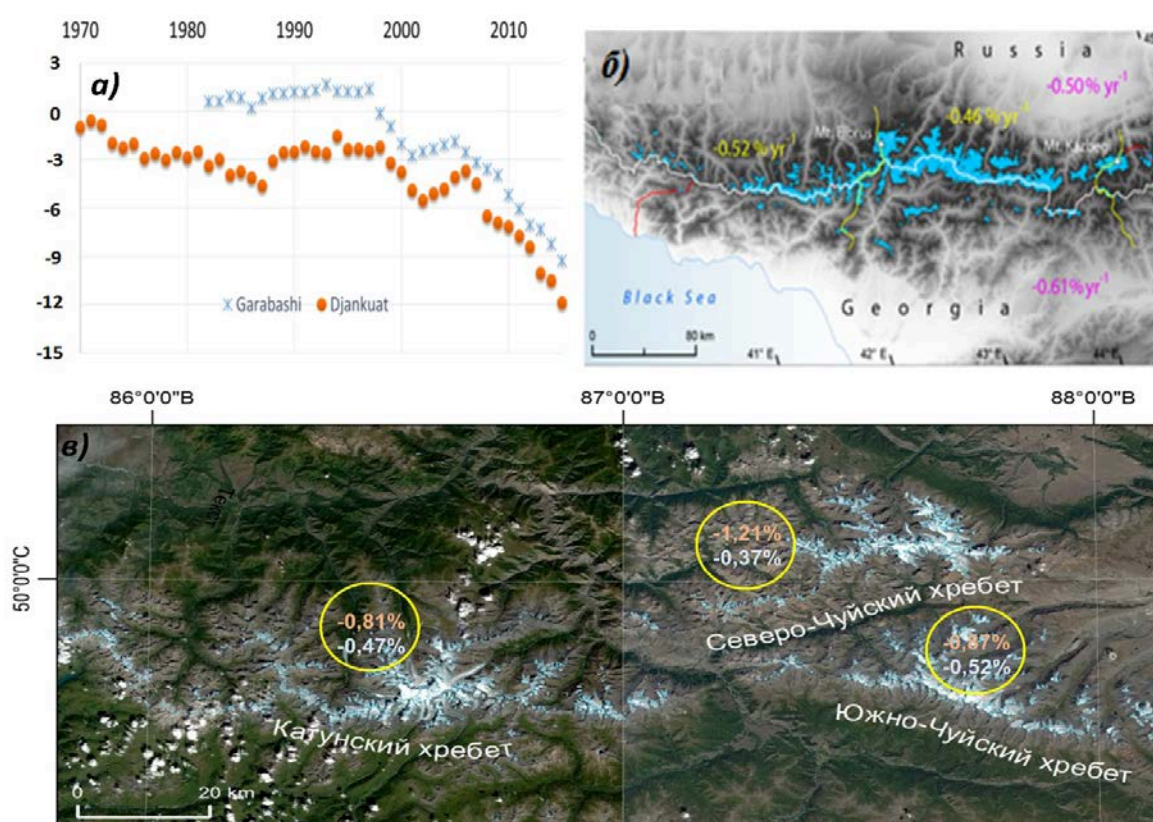


Рис. 1. Деградация горного оледенения Кавказа и Алтая на основе данных наблюдений: а) баланс массы ледников Центрального Кавказа Гарабаши и Джанкуат [Torgorov et al., 2019], б) Тренды площадей оледенения по результатам анализа спутниковых данных на Кавказе [Tielidze, Wheate, 2018] и на Алтае [Торопов и др., 2020].

Причину стремительной деградации горных ледников Кавказа и Алтая логично искать в изменениях климатического режима [Shahgedanova et al., 2010; Плюснин и др., 2017; Toropov et al., 2019; Торопов и др., 2020], опираясь как на данные инструментальных наблюдений, так и на результаты сеточных архивов метеорологических данных. Относительно успешный опыт применения данных реанализов (на примере ERA Interim и архива осадков CRU TS 4.02) в горных районах Кавказа обсуждается, в частности, в [Toropov et al., 2019]. В данной работе анализировались среднемесячные значения приземной температуры воздуха за период 1979 – 2018 гг. с горизонтальным разрешением $0,75 \times 0,75^\circ$ из архива реанализа ERA-Interim, а также значения месячных сумм осадков из архива CRU TS 4.02 с разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$. В качестве меры климатических изменений использовался коэффициент линейного тренда. Проверка значимости регрессии проводится с использованием F-критерия Фишера, а коэффициентов корреляции – Стьюдента с уровнями значимости 0,05. Также были проанализированы тренды температуры и осадков за период 1979 – 2017 гг. по данным метеорологических станций, расположенных в горных районах Кавказа и Алтая.

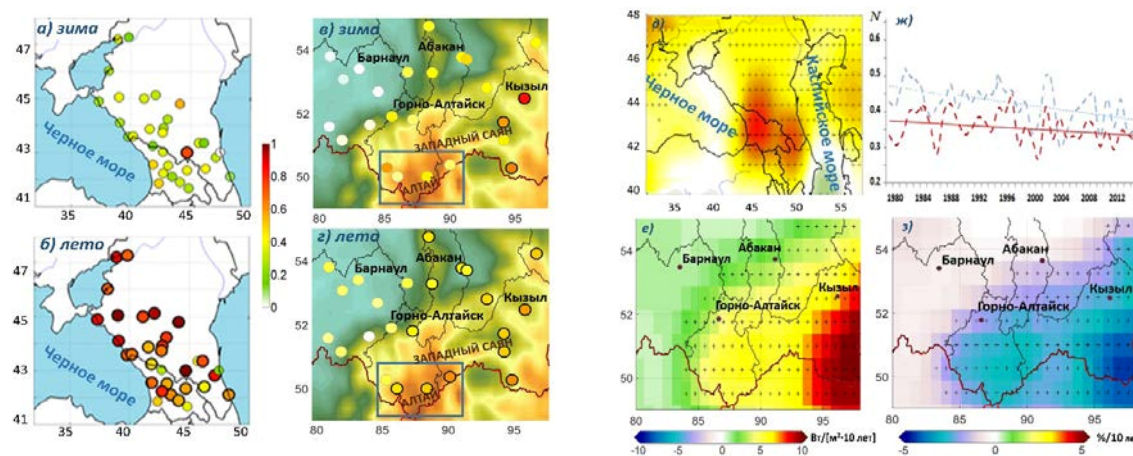


Рис. 2. Основные проявления изменений климата в XXI веке на Кавказе и на Алтае: а – г тренды температуры по данным метеорологических станций, $^\circ\text{C}/10$ лет, (жирным кружочками обозначен статистически значимый тренд преимущественно летом), д, е – тренды радиационного баланса на Кавказе (д) и на Алтае (е) летом ($\text{Вт}/\text{м}^2$ за 10 лет) и связанные с ними отрицательные тренды балла общей облачности: Кавказе (ж), синяя линия в западной части региона, красная – в восточной) и на Алтае (з) (в % за 10 лет).

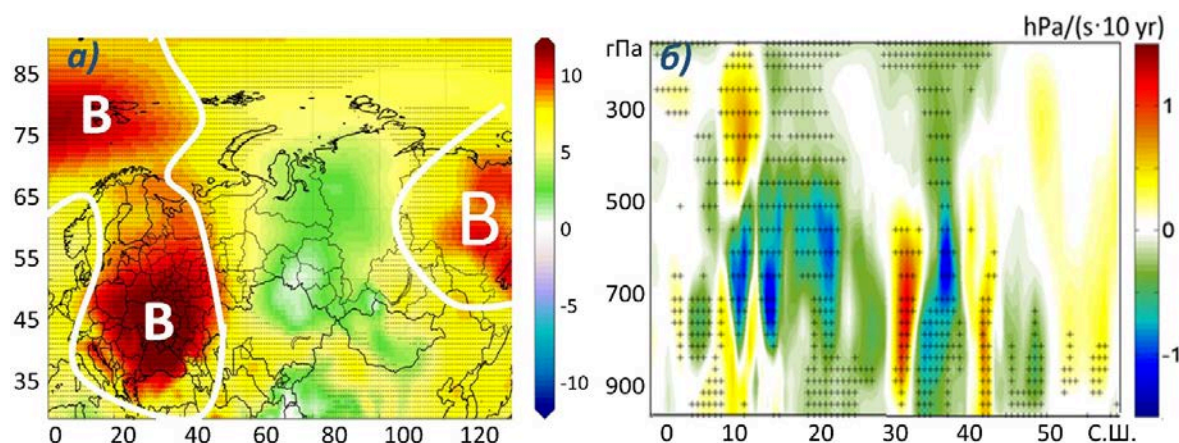


Рис. 3. Некоторые характеристики изменения режима циркуляции: а) тренды геопотенциала (г.п.д.м./10 лет) над Северной Евразией летом; белой линией околонуены области со статистически значимым ростом геопотенциала и повторяемости антициклонов, б) меридиональный разрез тренда аналога вертикальной скорости ($\text{гПа}/\text{с}$ за 10 лет) летом через Северный Кавказ, штриховкой отмечены области значимого тренда.

Показано, что статистически значимый рост температуры воздуха как на Кавказе, так и на Алтае отмечался только летом и составил $0,5 - 1^\circ\text{C}/10$ лет на Кавказе и $0,3 - 0,6^\circ\text{C}/10$ лет на Алтае. Практически неизменным на территории обеих горных систем остался и режим осадков. Увеличение летней приземной температуры воздуха привело к положительной аномалии турбулентного притока тепла к по-

верхности льда достигающей $8 - 10 \text{ Вт/м}^2$ в 2007 – 2018 гг. по сравнению с 1979-1990. Это эквивалентно увеличению слоя стаивания на 170 – 200 мм. водного эквивалента, что составляет 15-20 % от среднего многолетнего значения, и является существенной величиной. Более важным фактором деградации оледенения на Алтае и на Кавказе стала положительная аномалия радиационного баланса, величина которой в 2008 – 2018 гг. составила 25 Вт/м^2 по сравнению с периодом 1980 – 1990. Это эквивалентно увеличению слоя стаивания еще на 490 - 500 мм. в. э.

Положительный тренд радиационного баланса определяется статистически значимым уменьшением облачности, которое в свою очередь тесно связано с рост интегральной дивергенции влаги и интенсификацией нисходящих движений. Этим тенденциям соответствует статистически значимый положительный тренд геопотенциала в средней тропосфере и ослабление зональной циркуляции над Средней Азией, Монголией и Северным Китаем. Все эти факторы в совокупности указывают на увеличение повторяемости антициклональных условий над значительной частью Северной Евразии летом, что влечет за собой положительный тренд радиационного баланса, следствием которого становится рост темпов деградации оледенения Кавказа и Алтая. Одна из наиболее обоснованных гипотез, объясняющих эту тенденцию – уменьшение межширотного градиента температуры в свободной атмосфере из-за потепления Арктики, которое привело к ослаблению западного переноса, увеличению повторяемости стационарных волн и, следовательно, блокирующих антициклонов [Semenov, Latif, 2017]

Оценка изменений площади оледенений по спутниковым данным выполнена за счет финансирования РФФИ (проект РГО_а №17-05-41037), анализ метеорологических факторов деградации оледенения и их вклад в таяние ледников за счет финансирования РФФИ (проект №20-05-00176)

ЛИТЕРАТУРА:

1. Hock R., Rasul G., Adler C., Cáceres B., Gruber S., Hirabayashi Y., Jackson M., Kääb A. Kang S., Kutuzov S., Milner A., Molau U., Morin S., Orlove B., Steltzer H. High Mountain Areas. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2019.
2. Huss M., Hock R. A new model for global glacier change and sea-level rise //Frontiers in Earth Science. – 2015. – Т. 3. – С. 54.
3. Milner A.M., Khamis K., Battin T.J., Brittain J.E., Barrand N.E., Füreder L., Cauvy-Fraunié S., Gislason G., Jacobsen D., Hannah D., Hodson A., Hood E., Lencioni V., Ólafsson J., Robinson C., Tranter M. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2017. – Т. 114. – №. 37. – С. 9770-9778.
4. Semenov V. A., Latif M. Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966–2012 //Environmental Research Letters. – 2015. – Т. 10. – №. 5. – С. 054020.
5. Shahgedanova M., Nosenko G., Khromova T., Muraveyev A. Glacier shrinkage and climatic change in the Russian Altai from the mid-20th century: An assessment using remote sensing and PRECIS regional climate model //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2010. – Т. 115. – №. D16.
6. Tielidze, L.G. and Wheate, R.D. The Greater Caucasus glacier inventory. // The Cryosphere. – 2018 – Vol. 12 – P. 81–94. <https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018>.
7. Toropov P. A., Aleshina M. A., Grachev A. M. Large-scale climatic factors driving glacier recession in the greater caucasus, 20th–21st century // International Journal of Climatology. — 2019. — Vol. 39. — P. 4703–4720.
8. Плюснин В.М., Иванов Е.Н., Китов А.Д., Шейнкман В.С. Динамика современных ледников в горах юга Восточной Сибири //География и природные ресурсы. – 2017. – №. 3. – С. 118-126.
9. Торопов П.А., Алешина М.А., Носенко Г.А., Хромова Т.Е., Никитин С.А. Современная деградация горного оледенения Алтая, ее последствия и возможные причины /. // Метеорология и гидрология. — 2020. — № 5. — С. 118–130.

Study of deciduous needle-leaved forests phenology changes in Siberia

Varlamova E.V., Solovyev V.S.

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia
E-mail: varlamova@ikfia.ysn.ru, solovyev@ikfia.ysn.ru

Phenological characteristics is potential indicators of climate changes effect on the vegetation cover condition and other ecosystem components. The vegetation dynamics are influence on climate through changes of energy and water balance, as well as biogeochemical cycles. The observed climate change is especially noticeable in the high northern latitudes and, in particular, in Siberia. Aim of this work is study of deciduous needle-leaved forests phenology changes in Siberia on satellite data.

The study of deciduous needle-leaved forests phenology changes in Siberia (for subarctic and temperate zone) was carried out using the 15-day of NDVI time series from GIMMS3g data (1982-2015). As reported in one paper the GIMMS data is the best dataset available for long-term NDVI trend analysis. The NDVI, derived from red and near-infrared band reflectance is close relation to vegetation productivity and highly sensitive to ecosystem conditions.

An analysis of vegetation parameters changes showed the positive trend of $\Sigma NDVI_{ratio}$ values and increase ($\sim 28 \pm 6$ days) of the length of season of deciduous needle-leaved forests in subarctic zone. The increase of the length of season is due to the start of season comes for $\sim 16 \pm 5$ days earlier and the end of season comes for $\sim 12 \pm 4$ days later. The similar results the deciduous needle-leaved forests in temperate zone are observed. However, growth rate of $\Sigma NDVI_{ratio}$ values and phenology trends is 2-3 times lower as compared with subarctic zone.

An analysis of monthly mean variations between $NDVI_{ratio}$ and air temperature values in areas of deciduous needle-leaved forests growth in Siberia showed the high correlation ($R > 0.8$) in the start of growing season: for subarctic zone in May-June and temperate zone in May. The variations of $NDVI_{ratio}$ and air temperature values in this months showed the positive trends, however, the trend values in temperate zone is lower than in subarctic zone. Similarly, the increase of average annual air temperature for subarctic ($\sim 1.7^\circ\text{C}$) and temperate ($\sim 1^\circ\text{C}$) zones are observed. The precipitation also increasing, but the correlation with $\Sigma NDVI_{ratio}$ variations is low ($R = 0.33$; $R = 0.36$) for study areas.

Исследование изменений фенологических характеристик хвойных листопадных лесов Сибири

Варламова Е.В., Соловьев В.С.

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия
E-mail: varlamova@ikfia.ysn.ru, solovyev@ikfia.ysn.ru

Введение. Характеристики фенологических ритмов могут служить индикаторами влияния происходящих климатических изменений на состояние растительного покрова [1-4] и других компонентов экосистем. Динамика растительного покрова в свою очередь оказывает воздействие на климат посредством изменения энерго- и водообмена, а также биогеохимических циклов. Наблюдаемое изменение климата особенно заметно происходит в высоких северных широтах и, в частности, в Сибири. Целью данной работы является исследование изменений фенологических характеристик хвойных листопадных лесов Сибири по спутниковым данным (1982-2015 гг.).

Данные и методика. Для выбора зоны произрастания хвойных листопадных лесов Сибири была использована цифровая карта наземных экосистем Северной Евразии [5]. Выбор местности с учетом равнинного рельефа и плоскогорья был осуществлен с использованием цифровой модели рельефа [6], на основе которой была создана маска высот в диапазоне 0-600 м. Карта наземных экосистем на рис. 1 (а) с применением созданной маски высот представлена на территорию Западной и Восточной Сибири и классифицируется на пять основных типов растительности, указанных в легенде рисунка. Как следует из рис. 1 (а), суровые климатические условия Сибири, где амплитуда колебаний летних и зимних температур местами достигает до 1000°C , обусловили широкое распространение хвойных листопадных лесов, характеризующихся высокой морозостойкостью. Преобладающей породой хвойных листопадных лесов является лиственница даурская и сибирская, ареалы распространения которых довольно ши-

роки и территориально охватывают два климатических пояса – субарктическую и умеренную. В связи с этим, исследуемая территория была условно разделена на субарктическую и умеренную зоны произрастания хвойных листопадных лесов, отмеченных на рис. 1 (б) и рис. 1 (в), соответственно.

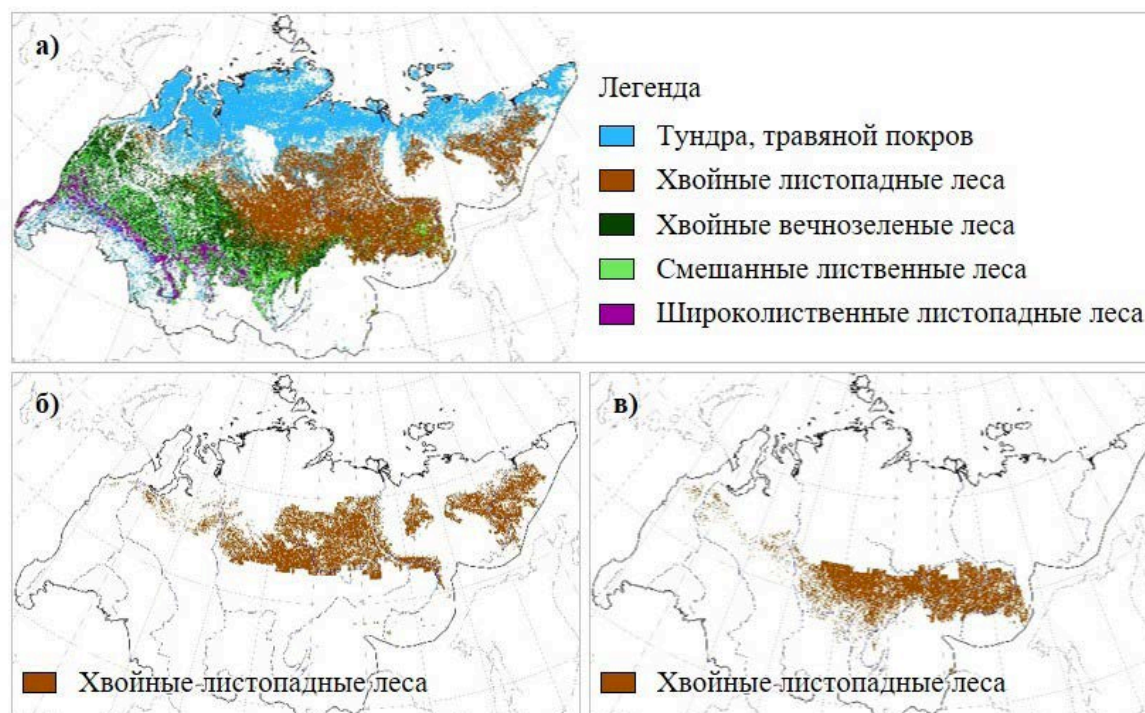


Рис. 1. Зоны произрастания хвойных листопадных лесов в Сибири: а) карта растительности; б) субарктическая зона; в) умеренная зона.

Большинство долгосрочных продуктов NDVI [7] основаны на множестве спутников, и неудачные исправления, связанные со сдвигами сенсоров и т.д., потенциально вносят существенные неопределенности и артефакты для анализа длительных трендов. Авторы работы [8] делают вывод, что наиболее подходящим для анализа длительных трендов NDVI, в особенности для северных широт являются данные продукта GIMMS. В данной работе оценка фенологических характеристик хвойных листопадных лесов, таких как SOS (Start of the season) и EOS (End of the season) проводилась на основе композитов 15-дневных максимальных значений NDVI продукта GIMMS3g (Global Inventory Modeling and Mapping Studies, 3rd generation) [9] за период 1982-2015 гг. Расчет SOS и EOS проводился по методу “Midpointpixel”, описанному в работе [10], согласно которому даты SOS и EOS определялись в момент достижения значения вегетационного индекса $NDVI_{ratio}$ [10] (1) равного 0,5.

$$NDVI_{ratio} = \frac{NDVI_{daily} - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (1),$$

где $NDVI_{daily}$ – ежедневные значения NDVI, рассчитанные путем линейной интерполяции 15-дневных композитов NDVI. $NDVI_{min}$ и $NDVI_{max}$ – это минимальные и максимальные за год значения NDVI, полученные из ряда ежедневных NDVI.

Для каждого года (1982-2015 гг.) была рассчитана сумма значений $NDVI_{ratio}$ ($\Sigma NDVI_{ratio}$) за вегетационный сезон (длительность которого равна сумме дней между датами SOS и EOS), которая также является одним из показателей фенологических характеристик [11]. Также для каждого года за исследуемый период были рассчитаны среднемесячные значения $NDVI_{ratio}$. Для анализа связи вариаций $\Sigma NDVI_{ratio}$ и среднемесячных вариаций $NDVI_{ratio}$ с температурой воздуха за исследуемый период использованы данные реанализа ERA-Interim по среднесуточной приземной температуре воздуха [12]. Среднегодовая сумма осадков была рассчитана на основе данных продукта CRU TS (Climatic Research Unit Time-series) v.4.01 [13].

Обсуждение результатов. Для каждой исследуемой зоны были рассчитаны ежегодные (1982-2015) SOS, EOS и $\Sigma NDVI_{ratio}$ хвойных листопадных лесов Сибири. На рис. 2 (а, б) показан сезонный ход $NDVI_{ratio}$, усредненный за первое (1982-1991) и последнее (2006-2015) десятилетие исследуемого периода для субарктической (а) и умеренной (б) зон. На рис. 2 (а) черными точками показаны даты достижения SOS/EOS и SOS*/EOS*, соответствующие периодам 1982-1991 и 2006-2015*, соответственно. Заштрихованной областью для периода 1982-1991 показано нахождение $\Sigma NDVI_{ratio}$, равное сумме всех значений $NDVI_{ratio}$ за вегетационный сезон в этой области.

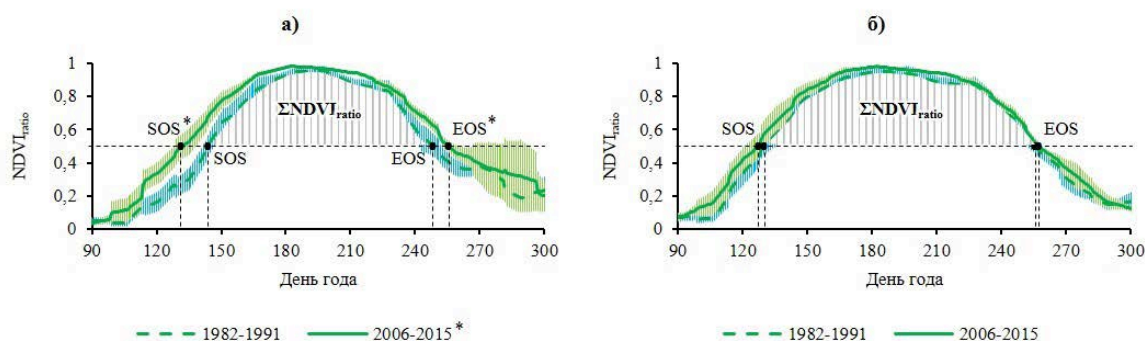


Рис. 2. Сезонный ход $NDVI_{ratio}$ хвойных листопадных лесов Сибири, усредненный за периоды 1982-1991 гг. и 2006-2015 гг.: а) субарктическая зона; б) умеренная зона. Стандартное отклонение (σ) на графиках обозначены вертикальными линиями.

Как видно из рис. 2 (а), сезонный ход $NDVI_{ratio}$ хвойных листопадных лесов субарктической зоны в последнем десятилетии намного шире, чем в первом. Наблюдается смещение достижения SOS в более ранние (на $12/\pm 4$ дней) даты и смещение EOS в более поздние (на $7/\pm 5$ дней) даты. Кроме того, наблюдаются более высокие абсолютные значения $NDVI_{ratio}$ в сезон роста и спада вегетационного сезона. Аналогичные, но менее заметные изменения абсолютных значений $NDVI_{ratio}$ наблюдаются для умеренной зоны (рис. 2 (б)) произрастания хвойных листопадных лесов. Даты SOS и EOS достигаются на $2/\pm 5$ дня раньше и на $2/\pm 2$ дня позже.

Таблица. Значения трендов фенологических характеристик хвойных листопадных лесов Сибири за 1982-2015 гг. Стандартная ошибка оценки по регрессии указана в скобке.

	SOS (кол-во дней)	EOS (кол-во дней)	LOS (кол-во дней)
Субарктическая зона	-16 (± 5)	12 (± 4)	28 (± 7)
Умеренная зона	-6 (± 4)	4 (± 3)	10 (± 5)

Значения трендов фенологических характеристик хвойных листопадных лесов за весь исследуемый период (1982-2015) для субарктической и умеренной зон показаны в таблице. Как видно из таблицы, значения трендов для обеих зон указывают на увеличение длительности (LOS) вегетационного сезона за счет тенденции к более раннему началу SOS и более позднему окончанию EOS. Однако, тренды фенологических характеристик умеренной зоны ниже в $\sim 2-3$ раза по сравнению с показателями субарктической зоны.

Ежегодные вариации $\Sigma NDVI_{ratio}$ и среднегодовой температуры воздуха для субарктической и умеренной зон произрастания хвойных листопадных лесов показаны на рис. 3 (а) и рис. 3 (б), соответственно. Из рис. 3 (а) видно, что вариации $\Sigma NDVI_{ratio}$ для субарктической зоны за исследуемый период показывают положительную тенденцию. Можно отметить, что существенный рост $\Sigma NDVI_{ratio}$ наблюдается с 2000 г.: в период 1982-1999 гг. $\Sigma NDVI_{ratio}$ варьировало преимущественно в диапазоне 80-90, а в период 2000-2015 гг. средний показатель $\Sigma NDVI_{ratio}$ был равен ~ 100 . Среднегодовая температура воздуха для этой зоны за исследуемый период увеличилась на $\sim 1,70^\circ\text{C}$. Тренд $\Sigma NDVI_{ratio}$ для умеренной зоны (рис. 3 (б)) ниже чем для субарктической зоны. Аналогично ниже и показатель тренда температуры, который составил $\sim 10^\circ\text{C}$. Также за исследуемый период наблюдается положительная тенденция суммы атмосферных осадков (рисунки не приведены): увеличение на 40 мм для субарктической зоны; на 54 мм – для умеренной зоны. Однако корреляция между вариациями $\Sigma NDVI_{ratio}$ и осадками для субарктической ($R=0,33$) и умеренной ($R=0,36$) зон слабая.

Для анализа связи $NDVI_{ratio}$ с приземной температурой воздуха были рассчитаны и построены их среднемесячные вариации за период 1982-2015 гг. для исследуемых зон. Коэффициенты корреляции между указанными параметрами в каждом месяце представлены на рис. 4 (а) для субарктической зоны и рис. 4 (б) для умеренной зоны. Можно отметить, что высокая корреляция на обеих зонах наблюдается только в начале вегетационного сезона. Как видно из рис. 4 (а), для субарктической зоны наблюдается высокий ($R>0,8$) коэффициент корреляции в мае и июне. Для умеренной зоны (рис. 4. (б)) высокая корреляция ($R>0,8$) наблюдается в мае месяце. Оба параметра для каждой из зон в течение 1982-2015 гг. имеют положительную тенденцию: наблюдается прирост значений $NDVI_{ratio}$ и температуры воздуха. Для субарктической зоны: прирост $NDVI_{ratio}$ в мае и июне составил 26% и 13%, соответственно; а температура увеличилась на $2,80^\circ\text{C}$ и $2,40^\circ\text{C}$, соответственно. Для умеренной зоны прирост $NDVI_{ratio}$ в мае месяце составил 10%, а температура мая месяца увеличилась на $1,90^\circ\text{C}$.

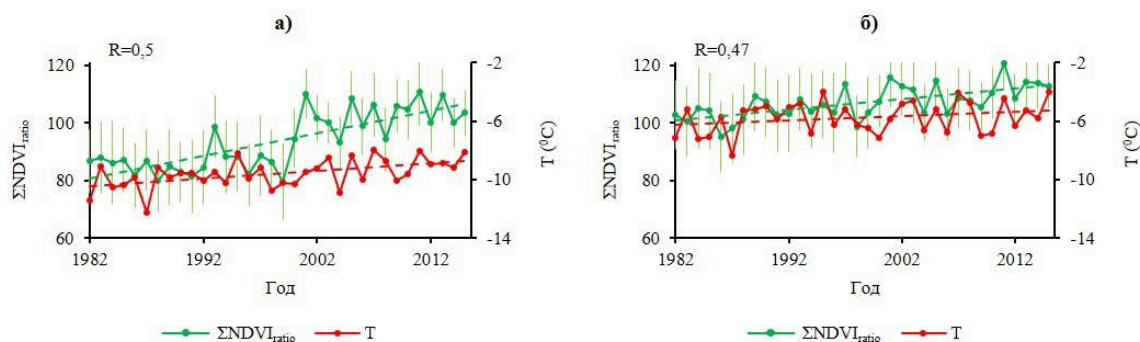


Рис. 3. Вариации $\Sigma NDVI_{ratio}$ и среднегодовой приземной температуры воздуха (Т) за 1982-2015 гг. в зонах произрастания хвойных листопадных лесов: а) субарктическая зона; б) умеренная зона. На графиках указан коэффициент корреляции (R) между $\Sigma NDVI_{ratio}$ и Т.

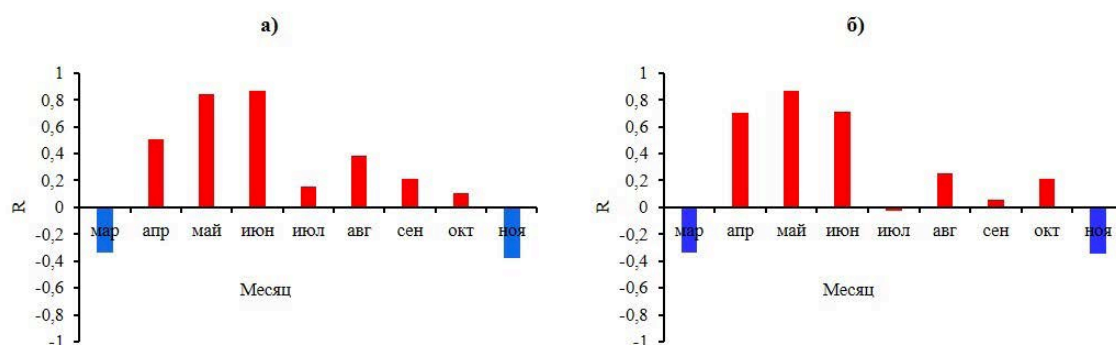


Рис. 4. Диаграмма значений коэффициентов корреляции между среднемесячными вариациями $NDVI_{ratio}$ и приземной температурой воздуха за 1982-2015 гг.: а) субарктическая зона; б) умеренная зона.

Закключение. Анализ вариаций параметров вегетации хвойных листопадных лесов за исследуемый период показал, что в субарктической зоне наблюдается положительная динамика $\Sigma NDVI_{ratio}$ и увеличение длительности сезона вегетации на $\sim 28 \pm 7$ дней. Увеличение длительности сезона вегетации обусловлено более ранним его началом на $\sim 16 \pm 5$ дней и поздним окончанием на $\sim 12 \pm 4$ дней. Аналогичные тенденции параметров вегетации наблюдаются и в умеренной зоне, однако темпы роста $\Sigma NDVI_{ratio}$ и тренды фенологических характеристик по сравнению с показателями в субарктической зоне ниже в $\sim 2-3$ раза.

Анализ среднемесячных вариаций $NDVI_{ratio}$ и приземной температуры воздуха показал на наличие высокой корреляции ($R > 0,8$) в начале вегетационного сезона: в мае-июне для субарктической зоны и в мае для умеренной зоны. Оба параметра в указанные месяцы имеют положительную тенденцию, однако в умеренной зоне величина трендов ниже чем в субарктической. Аналогично наблюдается положительная тенденция среднегодовой температуры воздуха для субарктической (на $\sim 1,70^\circ\text{C}$) и умеренной (на $\sim 1,0^\circ\text{C}$) зоны. Осадки также имеют положительный тренд, однако корреляция с вариациями $\Sigma NDVI_{ratio}$ для обеих зон ($R = 0,33$; $R = 0,36$) слабая.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Zhao, J., Zhang, H., Zhang, Z., Guo, X., Li, X., Chen, C. *Spatial and Temporal Changes in Vegetation Phenology at Middle and High Latitudes of the Northern Hemisphere over the Past Three Decades* // *Remote Sensing*. 2015. Vol.7. P.10973-10995.
2. Haibo, Li, Cuizhen Wang, Lijuan Zhang, Xiaxiang Li & Shuying Zang. *Satellite monitoring of boreal forest phenology and its climatic responses in Eurasia* // *International Journal of Remote Sensing*. 2017. Vol.38. No19. P.5446-5463.
3. Varlamova, E.V., Solovyev, V.S. *Study of NDVI Variations in Tundra and Taiga Areas of Eastern Siberia (Yakutia)* // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2015. Vol.28. No1. P.64-67.
4. Varlamova E.V., Solovyev V.S. *Study of the features of vegetation index trends of forest tundra in Yakutia* // *Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, Vol.11208. P.112087L (18 December 2019), <https://doi.org/10.1117/12.2540710>.

5. Bartalev S.A., Belward A.S., Erchov D.V., Isaev A.S. A new Spot4-vegetation derived land cover map of northern Eurasia // *International Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol. 24. No.9. P.1977–1982.
6. Amante, C. and B.W. Eakins, 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5C8276M
7. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS / 3rd ERTS Symposium. 1973. NASA SP-351 I, P.309-317.
8. Tian, Feng, et al. Evaluating temporal consistency of long-term global NDVI datasets for trend analysis // *Remote Sensing of Environment*, 163, 326-340 (2015).
9. Pinzon, J.E., Tucker, C.J. A Non-Stationary 1981-2012 AVHRR NDVI3g Time Series // *Remote Sensing*. 2014. Vol.6. P.6929-6960.
10. White, M. A., De Beurs, K. M., Didan K., Inouye, D. W., Richardson, A. D., Jensen, O. P., O'Keefe, J., Zhang, G., Nemani, R. R., van Leeuwen, W. J. D., Brown, J. F., de Wit, A., Schaepman, M., Lin, X., Dettinger, M., Bailey, A. S., Kimball, J., Schwartz, M. D., Baldocchi, D. D., Lee, J. T., and Lauenroth, W. K., Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006 // *Global Change Biology*. 2009. Vol.15. P.2335–2359.
11. Meier, G. A.; Brown, J. F. Remote sensing of land surface phenology // *Fact Sheet*, U.S. Geological Survey. 2014. Series number 2014-3052. (DOI: 10.3133/fs20143052).
12. Dee, D.P., with 35 co-authors. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* 2011. Vol.137. P.553-597 (DOI: 10.1002/qj.828).
13. Harris I.C., Jones P.D. University of East Anglia Climatic Research Unit, CRU TS4.01: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.01 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901- Dec. 2016). Centre for Environmental Data Analysis, 04 December 2017. doi: 10.5285/58a8802721c94c66ae45c3baa4d814d0.

Methane flux dynamics in a valley reservoir according to the results of the field observations

^{1,2}Lomov V., ^{1,2}Stepanenko V., ^{1,3}Grechushnikova M., ^{4,2}Repina I.

¹Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

²Research Computing Center, Moscow, Russia

³Institute of Water Problems RAS, Moscow, Russia

⁴A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

E-mail: lomson620@mail.ru, stepanen@srcc.msu.ru, allavis@mail.ru, repina@ifaran.ru

A large number of studies related to Global Warming are actual nowadays. One of the main greenhouse gases in the atmosphere is methane. The sources of methane are both natural and anthropogenic. One of the most important anthropogenic source of methane is artificial reservoirs. This article presents experimental study of methane fluxes at the Mozhaik reservoir (Moscow region) from 2015 to 2019.

Methane in water ecosystem of a reservoir is a result of anaerobic decomposition of the organic material in bottom sediments. There are two main parts of the methane flux in water – diffusive and bubble flux. Some amount of methane can be oxidized in water body by methanotrophs microorganisms. Non-oxidized methane reaches the water surface and emits to the atmosphere. Other fluxes of methane is horizontal fluxes (inflow of methane with river stream and degazation of methane into downstream through dam's turbines), but they have much lower significance than the vertical ones.

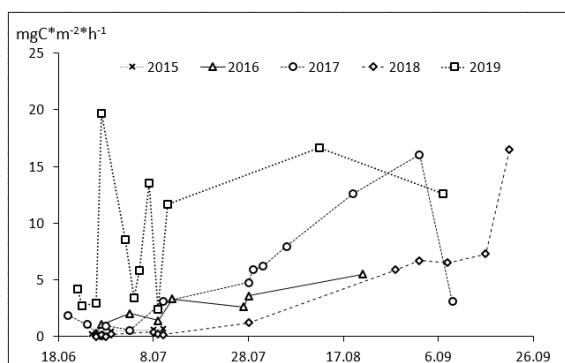


Fig. 1. Fluxes of methane into the atmosphere during the summer period of 2015 – 2019.

The most detailed measurements were carried out in the summer, when the greatest variability of methane fluxes was observed. Studies have shown that the highest values of methane fluxes into the atmosphere (up to $20 \text{ mgC-CH}_4/(\text{m}^2 \cdot \text{hour})$) are observed in June 2019 during significant wind-wave mixing of the reservoir, as well as in 2017, 2018 in the autumn before the beginning of the seasonal convective mixing stage (Fig.1).

The total amount of methane emission into the atmosphere during the 2017 – 2019 years was calculated. The results showed, that the methane emission during this period is 292, 494, 617 tons of C-CH₄ per year in 2017, 2018 and 2019 respectively. The comparison of this results with the classification of reservoirs by climate region showed, that Mozhaisk reservoir relate to the upper part of temperate climate region.

The work was partially supported by the President 's grant MD-1850.2020.5

Динамика потоков метана в долинном водохранилище по результатам натурных наблюдений

^{1,2}Ломов В.А., ^{1,2}Степаненко В.М., ^{1,3}Гречушникова М.Г., ^{4,2}Репина И.А.

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

³Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

⁴Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия

E-mail: lomson620@mail.ru, stepanen@srcc.msu.ru, allavis@mail.ru, repina@ifaran.ru

ВВЕДЕНИЕ

Метан – один из важнейших парниковых газов в атмосфере Земли. Несмотря на то, что его концентрация в атмосфере не велика (около 1,774 ppb), потенциал глобального потепления метана в 72 раза превышает потенциал диоксида углерода (для 20-летнего периода) [1]. Разделяют природные и антропогенные источники метана. К крупным природным источникам метана относятся болота, тропические лесные экосистемы, континентальный шельф Мирового океана и др. Антропогенные источники – свалки твёрдых бытовых отходов, рисовые поля, пастбища крупного рогатого скота, а также искусственные водоемы [2]. По различным оценкам [2 – 6] на водохранилища приходится от 0,5 до 10 % от общей эмиссии метана в атмосферу (2,4 – 122 Тг в год).

Метан образуется в водохранилищах как один из основных продуктов анаэробного разложения органического вещества в донных отложениях [7]. К поверхности воды он поднимается в виде диффузионного и пузырькового потока. Первый поток, как правило, является относительно небольшим, кроме того, растворенные молекулы метана подвержены окислению [8]. Пузырьковый поток практически не подвержен окислению метанотрофами (за исключением растворившихся в воде пузырьков). Достигнув поверхности воды, метан поступает в атмосферу.

Кроме вертикальных потоков метана, возможен также приток метана с впадающими в водоем речными водами, и сброс его в нижний бьеф, при котором наблюдается активная дегазация [9]. Значительный поток метана в атмосферу может наблюдаться с части акватории водохранилища, занятой макрофитами [2].

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования процессов, обуславливающих перенос метана в искусственном водном объекте, было выбрано Можайское водохранилище. Это слабопроточное водохранилище долинного типа (коэффициент водообмена = 1,78 [10]), расположенное в верховьях реки Москвы. Плотины были введены в эксплуатацию в 1962 году.

Изучение этого водоема проводится уже в течение более 50 лет, в том числе, проведено множество исследований функционирования разных экосистем. Наблюдения за потоками метана на границах раздела сред «донные отложения – вода» и «вода – атмосфера» ведутся здесь последние 5 лет. Основные измерения проводятся в летний период, когда характерна наибольшая пространственно-временная изменчивость потоков.

Для изучения пространственно-временной динамики потоков метана на водохранилище было выбрано 5 опорных станций наблюдений на его продольном профиле в характерных участках – от верховьев водоема с небольшими глубинами, где прослеживается влияние впадающих рек Москвы и Лусьянки, к нижней его части с более спокойным режимом течений и большими глубинами (Рис.1).

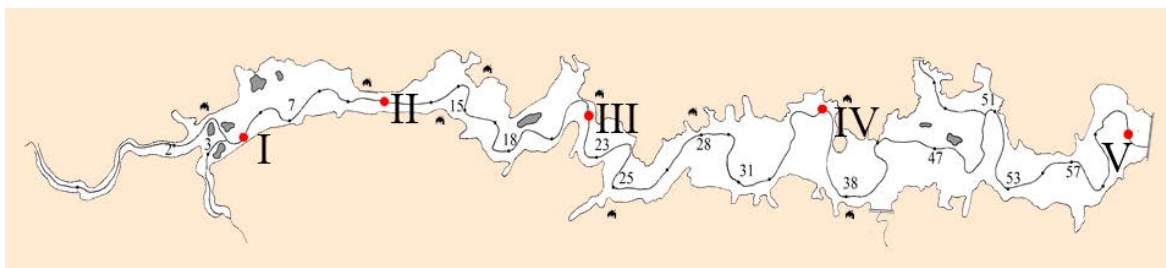


Рис. 1. Схема Можайского водохранилища с опорными станциями наблюдений.

Во время гидролого-гидрохимических синхронных съемок на каждой станции производится отбор проб для последующего определения концентрации метана в воде по методу «headspace», и определение потоков на границах раздела сред методом камер [11]. Каждая серия измерений сопровождается зондированием водной толщи для получения информации о распределении температуры, содержания растворенного кислорода и электропроводности по глубине. На станции IV производятся более частые рейдовые наблюдения схожего состава полевых работ.

Все полученные пробы обрабатывались на газовом хроматографе для получения значений концентрации метана в воде и в воздухе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

По результатам полевых измерений, проводимых в течение 5 лет, прослеживается закономерность внутригодовой изменчивости потока метана в атмосферу. Зимой из-за ледяного покрова выброс метана в атмосферу практически не происходит, однако, метан, поступающий к нижней кромке льда, может попадать в его молекулярную структуру и таким образом накапливаться в нем, не окисляясь. Из-за этого весной при таянии льда поток метана в атмосферу может быть весьма значительным. Однако, измерений в то время не проводилось из-за сложной ледовой обстановки на водоеме, которая как правило наблюдается в этот период.

Весной в водохранилище наблюдается гомотермия, поэтому водная толща хорошо перемешана и насыщена кислородом. Поток метана в это время не велик из-за высокого содержания O_2 , а также из-за низких значений температуры воды, при которых не наблюдается интенсивной продукции органического вещества и его разложения. По результатам измерений в это время года поток метана в атмосферу в среднем по водоему не превышает $2,5 - 3 \text{ мгС-CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$.

Постепенно из-за повышения температуры воздуха и более интенсивного прогрева поверхностных горизонтов водохранилища возникает плотностная стратификация, которая усиливается при безветренной и теплой летней погоде, и может просуществовать, не разрушаясь, в течение всего летнего периода. Именно в летний период наблюдается наибольшая пространственно-временная изменчивость потоков метана на границах «донные отложения – вода» и «вода – атмосфера».

Наибольшие значения эмиссии метана в атмосферу в летний период наблюдаются в средней части водоема – где достаточная глубина для установления температурной стратификации и образования бескислородных условий в придонных горизонтах (Рис.2). При этом станция не должна быть слишком глубокой для стабильной седиментации свежего доступного для анаэробной деструкции органического вещества. В 2018 году, когда весь летний период наблюдалась устойчивая стратификация, наибольшие значения потока метана в атмосферу, наблюдались на станции глубиной 8,5 м в средней части водоема (значение потока – $149 \text{ мгС-CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$). Если в результате ветро-волнового воздействия водная толща была неоднократно перемешана за лето, то устойчивость стратификации не становится значимым фактором изменчивости потока метана, так как большая часть водоема уже хорошо перемешана. В этом случае наибольший поток может наблюдаться на станции с небольшими глубинами, где окисляется

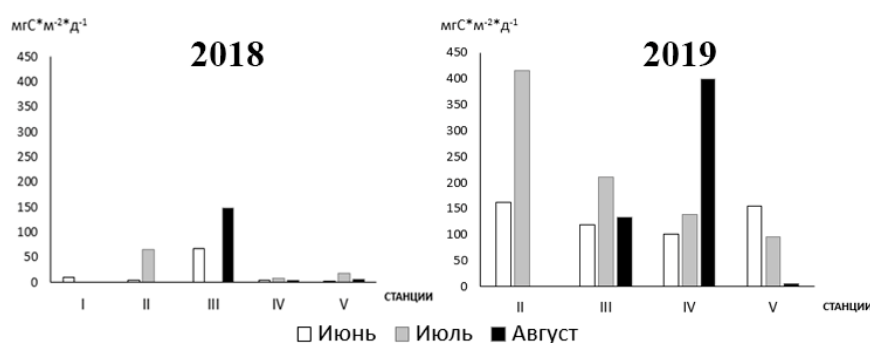


Рис. 2. Пространственно-временная изменчивость потока метана в атмосферу за летний период 2018 и 2019 гг.

меньше метана в воде. Поэтому летом 2019 г., когда в конце июня – начале июля несколько раз была разрушена стратификация, наибольший поток метана в атмосферу наблюдался на станции глубиной 5,5 м и составлял $415 \text{ мгС-CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$. Такие большие значения потока достигаются из-за высокой доли пузырьковой составляющей, которая может достигать 97 – 99% от общего потока.

Изменчивость потоков метана в течение летнего периода значительно различается между годами из-за конкретных синоптических условий. Общая тенденция заключается в следующем: поток метана постепенно возрастает в течение летнего периода, из-за разложения органического вещества в гипolimнионе, а также, при наличии бескислородных условий, его накопления в придонных горизонтах. Максимум приходится на период начала осеннего перемешивания (2017, 2018 гг.) или на периоды прохождения холодных атмосферных фронтов, сопровождающихся штормовым ветром (конец июня 2019 г) (Рис.3).

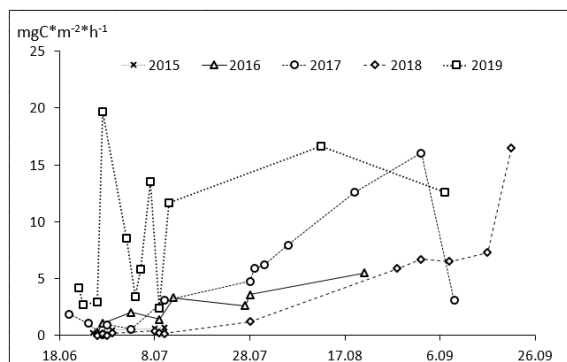


Рис. 3. Изменчивость потока метана в атмосферу за лето 2015 – 2019 гг на станции IV.

По результатам наиболее подробных измерений за 2017 – 2019 гг. была проведена оценка годового выброса метана в атмосферу с поверхности Можайского водохранилища. Наибольшее значение было получено за 2019 год (617 тС-CH_4 за год), из-за разрушения температурной стратификации летом в июне. Поток метана в атмосферу был очень значительным на протяжении всего летнего периода. В 2018 году суммарный поток за год составил 292 тС-CH_4 , так как большие значения эмиссии наблюдались только в непродолжительный период в начале осени, в течение всего лета сохранялась устойчивая стратификация. В 2017 году рост значений эмиссии наблюдался весь август, годовой поток метана в атмосферу с поверхности водоема составил 494 тС-CH_4 . Сопоставляя Можайское водохранилище с уже существующей классификацией водохранилищ по климатической зоне [3], было получено, что оно находится в верхней части водоемов умеренного пояса по значениям эмиссии метана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, структура потоков метана в атмосферу в долинном водохранилище имеет сложную пространственно-временную изменчивость. Наибольшие изменения эмиссии наблюдаются в летний период – значения потока возрастают в течение лета и достигают максимума перед началом стадии осеннего перемешивания водоема. Кроме того, значительные выбросы метана могут происходить при сильном ветро-волновом воздействии. Данные полевых наблюдений за 2017 – 2019 год позволили оценить общую эмиссию метана в атмосферу, которая варьируется от 300 до 600 тС в год в зависимости от синоптических условий разных лет.

Работы выполнены при частичной поддержке гранта Президента России МД-1850.2020.5

ЛИТЕРАТУРА:

1. Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, et. al., *Changes in atmospheric constituents and in Radiative Forcing*. In: *Asses. Report of the IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge, 2007. p. 129 – 217
2. UNESCO/IHA research project on the GHG status of freshwater reservoirs//IHA, 2013, 41 p
3. Tortajada C., Altinbilek D., Biswas K. *Impact of large dams: A Global Assessment* // Berlin: Water Resources Development and Management, 2012, 410 p
4. Gash J., Goldenfum J., Richard M. Taylor et.al. *Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs* // *The World Bank Contract 7150219*, 2010, 166 p
5. Deemer B., Harrison A., Li S., Beaulieu J., Delsontro T. *Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis* // Springer. BioScience, 2016, Vol. 66, № 11, 949 – 964 pp
6. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. *Метан в водных экосистемах* // Ростов-на-Дону: изд. Копицентр, 2005, 329с
7. Gruca-Rokosz R., Tomaszek J. *Methane and Carbon Dioxide in the Sediment of a Eutrophic Reservoir: Production Pathways and Diffusion Fluxes at the Sediment–Water Interface* // *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. 226, 2015, 16 – 32 pp

8. Guerin F., Abril G. Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir // *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, 2007, 3006 – 3020 pp
9. Kemenes A., Melack J., Forsberg B. Downstream emissions of CH₄ and CO₂ from hydroelectric reservoirs (Tucuruí, Samuel, and Curuá-Una) in the Amazon basin // *Columbia: Inland Waters*, Vol. 6, 2016, 1 – 8 pp
10. Эдельштейн К. К., Немальцева И. Т., Немальцев А. С. и др. Водохранилища Москворецкой водной системы // ред. В. Д. Быков и др. — Москва: МГУ, 1985, 266 с
11. Bastviken D., Cole J., Pace M., Van de Bogert M. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH₄ emissions // *New York: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 113, 2008, 13p

Particular features of long-term variations of $\delta^{13}\text{C}$ in cellulose of tree rings in closed canopy stands of the Ob-Tom interfluvium

Markelova A.N., Simonova G.V., Kalashnikova D.A., Volkov Yu.V.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

The object of this study is the long-term variations in $\delta^{13}\text{C}$ tree-ring cellulose records from the closed canopy stands in the southern taiga of the Ob-Tom interfluvium. Relationship of carbon isotope compositions with local environmental conditions were reviewed.

Within the study area, two forest sites covered by pine stands were selected: TMCH-51 and TMV-53. Wood samples of *Larix sibirica* and *Pinus sylvestris* were collected within these sites. The values $\delta^{13}\text{C}$ of tree ring cellulose were measured using a complex based on DELTA V Advantage mass spectrometer (Tomsk Regional Core Facilities of Tomsk Scientific Center SB RAS). The $\delta^{13}\text{C}_{\text{or}}$ tree-ring records ($\delta^{13}\text{C}_{\text{or}}$ -TMV-53 and $\delta^{13}\text{C}_{\text{or}}$ -TMCH-51) were obtained. The signals related to global variations of $\delta^{13}\text{CCO}_2$ and to the physiological response of trees to increased CO₂ concentration in the atmosphere were eliminated from both $\delta^{13}\text{C}_{\text{or}}$ records. New records $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -TMCH-51 and $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -TMV-53 were obtained as a result of two corrective procedures. Long-term variations in $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ records are well described by trends computed using LOESS regression with the span of 0.7

A study of the forest stand development history and variations in the temperature, the relative humidity and the amount of precipitations during the growing seasons for the entire observations period allowed to conclude that the variations in $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ record trends are determined by local changes in $\delta^{13}\text{CCO}_2$. A gradual decrease in $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -TMCH-51 trend values by 0.8 ‰ in the periods from 1867 to 1938 and by 0.39 ‰ from 1977 to 2010 was revealed. A sharp increase in the $\delta^{13}\text{C}$ values of cellulose after felling in 1955-1956 determined the trend values increase in the period 1938-1977. Since in the area of the forest where the wood samples were collected, the forest stand was closed, forest litter and soil could become an additional source of the lighter carbon isotopic composition of CO₂ consumed by trees.

The $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -TMV-53 trend is significantly different from the usual pattern. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -TMV-53 trend increased by 3.04 ‰ in the period from 1867 to 1977, then it decreased by 0.71 ‰ in the period from 1977 to 2010 and decreased by 0.88 ‰ from 1977 to 2016. The decrease in the $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -TMV-53 trend occurred almost two times faster than it occurred in the $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -TMCH-51 trend. The influence of a local CO₂ source is clearly seen in the $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -TMV-53 trend variability. Probably, this source is the peatland located near the TMV-53 site. A change in the dominant pathway of CO₂ production could have an impact on variations in $\delta^{13}\text{CCO}_2$. The increased $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -TMV-53 values during the period 1867-1977 can be explained by the increased emission of ¹³C-depleted CO₂ produced as a result of anaerobic decomposition of organic material. The decreased $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -TMV-53 values since 1977 was due to an increased emissions of ¹³C-enriched carbon dioxide, produced during respiration of the plants root system, and aerobic decomposition of organic material.

Особенности многолетних вариаций $\delta^{13}\text{C}$ в целлюлозе годовичных колец в сомкнутых древостоях Обь-Томского междуречья

Маркелова А.Н., Симонова Г.В., Калашникова Д.А., Волков Ю.В.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

Вместе с увеличением концентрации CO_2 в атмосфере изменяется и его $\delta^{13}\text{C}$ значения. Эти изменения фиксируются в тканях растений, в том числе и в годовичных кольцах деревьев. Древесно-кольцевые $\delta^{13}\text{C}$ -хронологии - уникальный источник информации о пространственно-временной динамике источников эмиссий CO_2 в атмосферу разного масштаба. Поэтому изучение особенностей многолетних вариаций в $\delta^{13}\text{C}$ в целлюлозе годовичных колец деревьев в разных экологических условиях является актуальным.

В данной работе объектом исследования являются многолетние изменения значений $\delta^{13}\text{C}$ в целлюлозе годовичных колец деревьев в условиях сомкнутых древостоев южной тайги Обь-Томского междуречья и их связь с локальными условиями окружающей среды.

Обь-Томское междуречье расположено в юге Западно-Сибирской равнины. Сочетание тепла и влаги здесь оптимально для роста хвойных видов деревьев. Согласно данным метеостанции Томск (29430) [1], среднегодовая температура воздуха составляет 1°C . Самый холодный месяц года январь, средняя температура $-17,7^\circ\text{C}$; самый теплый – июль со средней температурой $18,9^\circ\text{C}$. Среднегодовая сумма осадков составляет 606 мм. На период с мая по сентябрь приходится примерно половина от годовой суммы осадков.

Для сбора растительного материала и построения древесно-кольцевых $\delta^{13}\text{C}$ -хронологий были выбраны два участка леса. ТМСН-51 – сосняк зеленомошно-разнотравный, древостой образован двумя поколениями сосны обыкновенной возрастом 210 и 90 лет. ТМВ-53 – одновозрастный сосняк – зеленомошник, средний возраст деревьев сосны обыкновенной 140 лет, участок леса расположен на относительно плоской вершине гривы. В 20 метрах от него начинается межгрядное понижение, на котором расположено болото. На выбранных участках с 10-15 деревьев сосны обыкновенной на высоте 120-130 см были взяты по 2-5 кернов. На участке ТМСН-51 также был взят спил с единственного дерева лиственницы сибирской. Керны были высушены на воздухе при комнатной температуре, зачищены скальпелем, вдоль каждого керна была измерена ширина годовичных колец (ШГК). Таким образом, были получены два набора индивидуальных древесно-кольцевых ШГК-хронологий для участков леса ТМСН-51 и ТМВ-53. Эти хронологии были использованы для изучения истории развития древостоев.

История развития древостоя ТМСН-51 была опубликована нами ранее [3]. На этом участке было выявлено четыре рубки: 1842-43, 1936-37, 1955-56, 1985-86 гг., а в приросте лиственницы сибирской отразилась одна только, поэтому ее древесина была использована для изотопного анализа. На участке ТМВ-53 не было обнаружено событий, нарушающих естественное развитие древостоя. Для изотопного анализа были выбраны 6 максимально близких по высоте и диаметру деревьев, доминирующих в древостое. Возрастное развитие выбранных деревьев происходило синхронно. Из набора кернов, отобранных с этих деревьев, были взяты для пробоподготовки только те керны, погодичные изменения прироста ширины колец на которых были максимально синхронны между собой и относительно других деревьев древостоя. Спил и керны были разделены на годовичные слои прироста. Из древесины кернов, сформированной в одни и те же годы, были сформированы смешанные пробы. Из каждой пробы в аппарате Сокслета были удалены смолы, затем азотно-кислым способом получена целлюлоза. Определение соотношений стабильных изотопов углерода в пробах целлюлозы осуществлялось с помощью масс-спектрометрического комплекса на базе изотопного масс-спектрометра DELTA V Advantage (ТомЦКП СО РАН). Измеренные изотопные отношения, расположенные в хронологическом порядке, представляют собой $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ -хронологии: $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ -ТМВ-53 и $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ -ТМСН-51 (Рис.1а). Многолетние изменения $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ -хронологии хорошо описываются трендами, построенными с помощью LOESS-регрессии с коэффициентом жесткости 0,7.

На изотопный состав древесных растений влияют несколько групп факторов: изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$) и концентрация CO_2 в атмосфере, гидротермические условия местообитания, особенности развития отдельных деревьев и древостоя в целом, случайные непродолжительные явления, нарушающие последовательное развитие древостоя. Влияние последних двух групп факторов было минимизировано или учтено при сборе растительного материала и пробоподготовке. Прямого влияния гидрометеорологических факторов на многолетние изменения изотопного отношения стабильных изотопов углерода в целлюлозе сосны обыкновенной и лиственницы сибирской в пределах исследуемой территории обнаружено не было. Во временных рядах данных среднемесячных и средних за вегетационных период значений тем-

пературы, влажности воздуха, а также сумм осадков похожих тенденций, объясняющих поведение трендов $\delta^{13}\text{C}_{\text{or-TMV-53}}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{or-TMCH-51}}$, обнаружено не было. Исходя из вышесказанного, многолетние изменения $\delta^{13}\text{C}_{\text{or-TMV-53}}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{or-TMCH-51}}$ хронологий определяются изменениями $\delta^{13}\text{CCO}_2$ и, возможно, физиологической реакцией деревьев на увеличение CO_2 в атмосфере.

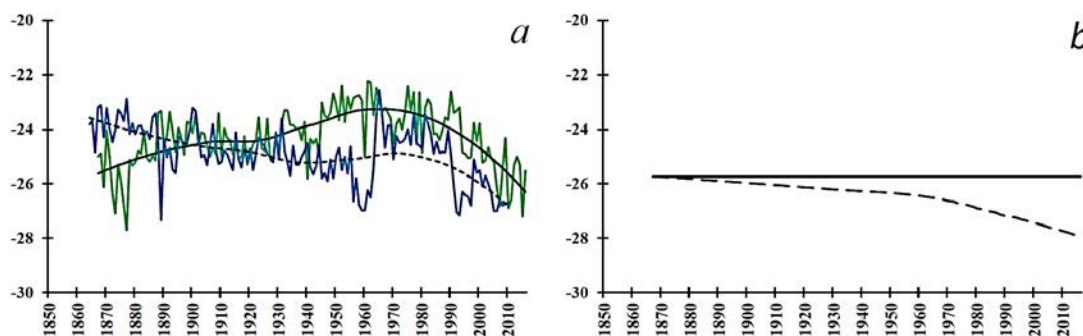


Рис. 1. (а) – хронология $\delta^{13}\text{C}_{\text{or-TMV-53}}$ (зеленый) и ее тренд (сплошной черный), хронология $\delta^{13}\text{C}_{\text{or-TMCH-51}}$ (синий) и ее тренд (черный пунктир); (б) – теоретически рассчитанные тренды при активном (сплошной черный) и пассивном (черный пунктир) отклике на увеличение концентрации CO_2 в атмосфере.

Для того, чтобы в многолетних вариациях $\delta^{13}\text{C}_{\text{or}}$ -хронологий выявить влияние локальных факторов, определяющих $\delta^{13}\text{CCO}_2$ потребляемого деревьями CO_2 , необходимо преобразовать $\delta^{13}\text{C}_{\text{or}}$ -хронологий таким образом, чтобы удалить из них ту часть изменений, которая связана с глобальными тенденциями в изменениях $\delta^{13}\text{CCO}_2$ и с физиологической реакцией деревьев на увеличение CO_2 в атмосфере. Последовательно применив к данным $\delta^{13}\text{C}_{\text{or}}$ соответствующие корректирующие алгоритмы [6,7], были получены сначала $\delta^{13}\text{C}_{\text{or-TMV-53}}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{or-TMCH-51}}$, а затем $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin-TMV-53}}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin-TMCH-51}}$ хронологии (рис. 2).

На рисунке 1б представлены теоретически рассчитанные с помощью модели изотопного фракционирования углерода в листьях [5] тренды $\delta^{13}\text{C}_{\text{or}}$ -хронологий для двух пограничных случаев активного и пассивного отклика деревьев на изменение концентрации CO_2 в атмосфере. При полностью активном отклике концентрация CO_2 в листьях остается постоянной. Соответственно, при полностью пассивном концентрация CO_2 в листьях и в атмосфере изменяются вместе, причем в соответствии с линейной зависимостью. В основном встречаются смешанные варианты [7]. Поскольку прямого влияния гидротермических факторов на поведение трендов $\delta^{13}\text{C}_{\text{cor}}$ -хронологий не обнаружено, то при отсутствии значимого влияния локальных факторов и физиологического отклика, тренды $\delta^{13}\text{C}_{\text{cor-TMV-53}}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{cor-TMCH-51}}$ были бы близки по форме к теоретическому тренду, соответствующему активной реакции. Тренды $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -хронологий также существенно отличаются от теоретического тренда активной реакции, поэтому влияние на формирование изотопного состава углерода целлюлозы годовых колец локальных факторов можно считать доказанным.

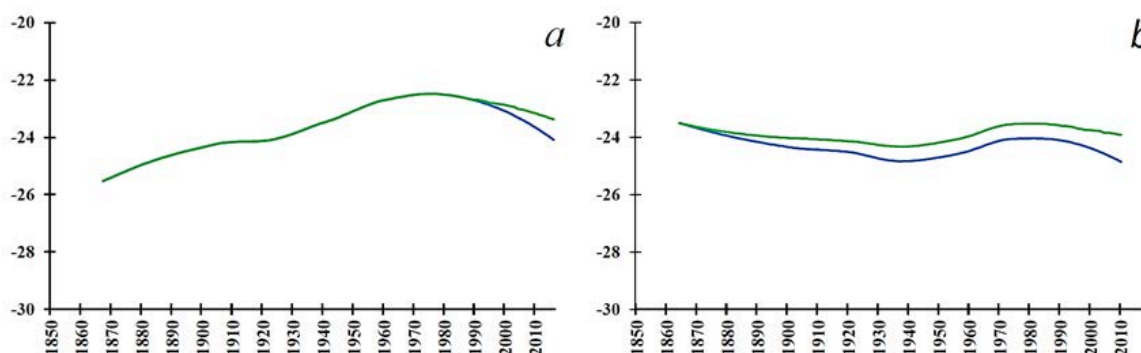


Рис. 2. Тренды $\delta^{13}\text{C}_{\text{cor}}$ -хронологий (синий), $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -хронологий (зеленый), (а) – TMV-53, (б) – TMCH-51.

Многолетние изменения $\delta^{13}\text{C}_{\text{cor-TMCH-51}}$ хронологии близки к тем, которые наблюдаются во временном ряде значений $\delta^{13}\text{CCO}_2$, описывающем глобальные изменения. Период 1938-1977 гг., в течение которого значения тренда увеличиваются, связан с резким увеличением значений $\delta^{13}\text{C}$ целлюлозы после рубок 1955-56 гг., на этом участке значения тренда оказались завышенными. После обеих процедур

коррекции убывающие участки тренда $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -ТМСН-51 сохранились, хотя углы наклона существенно уменьшились (рис.2б). Поскольку на участке леса, где были взяты образцы древесины, древостой сомкнутый, лесная подстилка и почва могли стать дополнительным источником более легкого по изотопному составу углерода CO_2 , потребляемого деревьями. Этим можно объяснить постепенное уменьшение значений тренда $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -ТМСН-51 в периоды с 1867 по 1938 на 0,8 ‰ и с 1977 по 2010 на 0,39 ‰.

Поведение тренда хронологии $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -ТМВ-53 значительно отличается от привычной картины. В период с 1867 по 1977 гг. тренд возрастает на 3,04 ‰, а затем убывает в период с 1977 по 2010 гг. на 0,71 ‰, с 1977 по 2016 на 0,88 ‰. Уменьшение значений тренда $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -ТМВ-53 происходит почти в два раза быстрее, чем в случае с трендом $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -ТМСН-51. В изменчивости тренда $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -ТМВ-53 отчетливо проявляется влияние локального источника CO_2 . Этим источником, вероятнее всего, является расположенное рядом с участком ТМВ-53 болото. Изменения значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ потребляемого деревьями CO_2 , источником которого является болото отразилось на изотопном составе углерода целлюлозы этих деревьев. Наиболее вероятным сценарием, в результате выполнения которого произошли изменения в $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$, является смена доминирующего способа образования CO_2 . Продуцирование CO_2 болотными экосистемами происходит в результате разложения растительных остатков микроорганизмами и при дыхании корней растений. Обычно доминирующим является процесс бескислородного разложения растительных остатков. При таком разложении образуется CH_4 и CO_2 , по некоторым данным [4] в эквимолярных количествах. Изотопное фракционирование в процессе такого разложения приводит к тому, что метан оказывается обеднен ^{13}C по сравнению с CO_2 в несколько раз. Например, согласно данным [4] при разложении растительных остатков с $\delta^{13}\text{C} = -26$ ‰ образуются CH_4 с $\delta^{13}\text{C} = -60$ ‰ и CO_2 с $\delta^{13}\text{C} = +8$ ‰. По всей видимости, рост значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -ТМВ-53 в период 1867-1977 можно объяснить ростом эмиссии изотопно тяжелого CO_2 . При аэробном разложении растительных остатков и дыхании корней значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ близки к значениям $\delta^{13}\text{C}$ исходного органического вещества, т.е. органических остатков и углеводов, расходуемых на дыхание [4].

Исследуемая территория входит в зону воздействия Томского водозабора, скважины которого были введены в эксплуатацию в начале 1970-х гг. Работа водозабора стала причиной осушения болотных экосистем, в числе которых находится и болото, вблизи которого расположен участок ТМВ-53. При осушении болот часто происходит повышение продуктивности фитоценозов [2] и, как следствие, увеличение объемов более легкого по изотопному составу углерода CO_2 , образующегося при дыхании корневой системы растений, также должна увеличиваться доля аэробного разложения. Именно этими процессами обусловлено уменьшение значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -ТМВ-53 начиная с 1977 года.

Таким образом, в многолетние изменения значений $\delta^{13}\text{C}$ целлюлозы годовичных колец деревьев в условиях сомкнутых древостоев южной тайги Обь-Томского междуречья в значительный вклад вносят локальные источники эмиссии CO_2 в атмосферу. При этом на участке ТМСН-51 дополнительный значимый вклад в многолетние вариации $\delta^{13}\text{C}$ значений целлюлозы годовичных колец *Larix sibirica* вносит эмиссия изотопно более легкого, по сравнению с атмосферным, CO_2 лесной подстилкой и почвой. На участке ТМВ-53 многолетние вариации $\delta^{13}\text{C}$ значений целлюлозы годовичных колец *Pinus sylvestris* в значительной степени определяются эмиссией CO_2 с расположенного рядом болота, значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ которого изменяются в зависимости от соотношения вкладов различных способов продуцирования CO_2 в болотных экосистемах. Хронология $\delta^{13}\text{C}_{\text{pin}}$ -ТМВ-53 может быть использована для изучения и восстановления временной динамики процессов, связанных с образованием и эмиссией CO_2 болотом, расположенным рядом с местом отбора проб древесины.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. «Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России»
2. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485 <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных> (дата обращения 20.01.2020)
3. Икконен Е.Н. Интенсивность продуцирования CO_2 в торфах неосушенного и осушенного мезоолиготрофного болота // Труды Карельского научного центра РАН, 2010, №2, С. 22-26.
4. Маркелова А.Н., Симонова Г.В., Калашикова Д.А., Волков Ю.В., Мелков В.Н. Изотопная дендроиндикация антропогенных процессов в южно-таежной подзоне Западно-Сибирской равнины // XIII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: Тезисы докладов российской конференции. Томск: Аграф-Пресс, 2019, С.206-207.
5. Corbett J.E., Tjallie M.M., Burige D.J., Cooper W.T., Glaser P.H., Chanton J.P. Partitioning pathways of CO_2 production in peatlands with stable carbon isotopes // Biogeochemistry. 2013, V.114, P. 327-340.
6. Farquar G.D., O'Leary M.H., Berry J.A. On the relationship between carbon isotope discrimination and intercellular carbon dioxide concentration in leaves // Aust. J. Plant Physiol. 1982, V.9, P. 121-137.
7. McCarroll D. Stable isotopes in tree rings / D. McCarroll, N. J. Loader // Quaternary Science Reviews, 2004, V. 23, P. 771–801.

8. McCarroll D. Correction of tree ring stable carbon isotope chronologies for changes in the carbon dioxide content of the atmosphere / D. McCarroll, M. H. Gagen, N. J. Loader, I. Robertson, K. J. Anchukaitis, S. Los, G. H.F. Young, R. Jalkanen, A. Kirchhefer, J. S. Waterhouse // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, V. 73, P. 1539–1547.

Estimate of the decomposition rate of peat-forming plants in drained and pyrogenic peatlands

Nikonova L.G., Golovatskaya E.A.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: lili112358@mail.ru, golovatskayaea@gmail.com

Russia takes first place in the area occupied by peatland ecosystems. Peatlands are characterized by a low rate of decomposition of organic matter, thereby is constant increase in peat deposits. Climate change and human impact can lead to increase the rate decomposition of organic matter. Drained bogs, often exposed to fire, which can also affect the rate of decomposition of organic matter in peat deposits during the pyrogenic succession peatlands. The aim of the study was to estimate the rate of decomposition of the organic matter of peat-forming plants in the drained and pyrogenic peatlands.

The studies were conducted on the two drained peatlands - "Vasyuganskoe" and "Iksinskoe" (Bakcharsky district Tomsk region). Observation points are located in "Vasyuganskoe" peatlands on the undisturbed pine-shrub-sphagnum phytocenosis – ryam ("Native" - 56°52'31.7" N 82°48'27.3" E) and on the Drained ryam ("Dry" - 56°53'33.3" N 82°51'08.0" E).

Two sites with different degrees of pyrogenic succession in the "Iksinskoe" peatland were selected for the study: restored pine-shrub-sphagnum phytocenosis ("Fire-site 1" – 56°51'42.1" N 83°17'53.0" E), and pine-birch- cotton grass -sphagnum phytocenosis with a less pronounced degree of pyrogenic succession ("Fire-site 2" - 56°52'03.4" N 83°11'52.1" E). The selected study points differ both in vegetation cover and are characterized by different hydrothermal conditions.

The next species of peat-forming plants were investigated: *Sphagnum fuscum*, *Chamaedaphne calyculata*, and *Eriophorum vaginatum*. Also was investigated a Mixed sample composed of *Sphagnum fuscum* (60%) and *Chamaedaphne calyculata* (40%). Determination of the rate of decomposition of plant residues was carried litter-bag method.

Research showed that the slowest decomposition rate has *Sphagnum fuscum* (13 % loss mass). The smallest role in the formation of peat plays *Eriophorum vaginatum* (32% loss mass). According to preliminary estimates, the decomposition rate depends on hydrothermal conditions, but different plants react differently to the same conditions. For one, the decomposition process of *Chamaedaphne calyculata* and *Eriophorum vaginatum* more actively proceeds in drier and cooler conditions. An inverse relationship is observed for *Sphagnum fuscum*, for which wetter and warmer conditions are more favorable for the decomposition process.

In general, the impact of human activities (drainage) and post-pyrogenic recovery of peatlands leads to an acceleration of the process of decomposition of plant remains *Chamaedaphne calyculata* by 22-58%, *Eriophorum vaginatum* - 15-49%. And at the same time, it has a negative effect on the decomposition rate of *Sphagnum fuscum* and the Mixed sample, reducing it by 2-24%.

Оценка скорости разложения растений-торфообразователей в осушенных и пирогенных торфяниках

Никонова Л.Г., Головацкая Е.А.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: lili112358@mail.ru, golovatskayaea@gmail.com

Россия занимает первое место в мире по площади, занимаемой болотными экосистемами. Особенность болотных биогеоценозов заключается в медленной скорости разложения растительных остатков, вследствие чего углерод на долгое время исключается из круговорота веществ [1,2]. Наиболее активному разложению органического вещества растений способствует снижение уровня бо-

лотных вод (УБВ) и повышение температуры торфяной залежи [3-6]. Современные климатические изменения могут привести к усилению разложения органического вещества и, как следствие, к уменьшению мировых запасов торфа [7]. Человек также может косвенно способствовать ускорению разложения торфяной залежи. Осушение болотных массивов, зачастую приводит к возникновению пожаров, которые помимо широко известных негативных последствий, могут повлиять на скорость трансформации органического вещества в торфяной залежи. Таким образом, в связи с изменениями климата и возрастанием антропогенного воздействия на природные экосистемы, изучение процессов трансформации органического вещества приобретает важное значение.

Целью работы являлась оценка скорости разложения органического вещества растений-торфообразователей в условиях торфяных залежей осушенных и пирогенных торфяников.

Исследования проводились в Бакчарском районе Томской области на территории стационара «Васюганье» (ИМКЭС СО РАН) на осушенных в 1970-х гг. олиготрофных болотах: на участке № 5 торфяного месторождения "Васюганское" и на «Иксинском» торфяном месторождении. Торфяное месторождение Васюганское расположено на водораздельном плато в междуречье рек Бакчар и Икса. Для исследования на Участке №5 выбрано два пункта наблюдений – ненарушенный сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз (Естественный рям (Ест.) - 56°52'31.7" N 82°48'27.3" E) и сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз, расположенный около осушительного канала (Осушенный рям (Осуш.) – 56°53'33.3" N 82°51'08.0" E). Иксинское болото расположено в междуречье рек Икса и Шегарка. В 1998 году на осушенном участке Иксинского болота произошло выгорание значительной территории, в результате чего были полностью уничтожены растительный покров с приповерхностной толщи торфа на болотах, а также почвенный покров в заболоченных и автоморфных лесах [8]. Для исследования выбраны два участка с разной степенью пирогенной сукцессии: сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз с хорошо выраженным подростом сосны (Восстановленный рям (Гарь1) – 56°51'42.1" N 83°17'53.0" E) и сосново-березово-пушицево-сфагновый фитоценоз с менее выраженной степенью пирогенной сукцессии (Гарь2 - 56°52'03.4"N 83°11'52.1"E).

Выбранные пункты исследования имеют ряд отличительных особенностей, которые с большой вероятностью могут повлиять на трансформацию органического вещества в торфяной залежи. Естественный рям (Ест.) расположен вне зоны действия осушительной системы и может считаться неподверженным антропогенному воздействию. Древесный ярус образован *Pinus sylvestris* L., высота деревьев достигает 2-3 метров (проективное покрытие около 50 %), кустарничковый ярус хорошо развит и состоит преимущественно из *Ledum palustre* L. и *Chamaedaphne calyculata* Moench, среди мхов абсолютным доминантом является *Sphagnum fuscum* Klinggr. Глубина торфяной залежи достигает 320 см. Осушенный рям (Осуш.) расположен на окраине Участка №5, в непосредственной близости к осушительному каналу, что предопределило более развитый древесный ярус, высота деревьев достигает 10-15 метров, в остальном растительный покров схож с Естественным рямом. Глубина торфяной залежи составляет 120 см.

Восстановленный рям (Гарь1) Иксинского болота представляет из себя относительно хорошо восстановившийся низкий рям. Основная масса древесного яруса складывается из подроста и среднерослых *Pinus sylvestris*, редко встречаются высокие деревья. Кустарничковый ярус развит обильно, сложен по большей части *Ledum palustre* и *Chamaedaphne calyculata*. Травяной ярус менее выражен, представлен в основном *Carex rostrata* L. и *Eriophorum vaginatum* L. В моховом покрове доминирует *Sphagnum fuscum* Klinggr. Мощность торфяной залежи около 110 см. Несколько иным фитоценотическим разнообразием характеризуется Гарь2, которая является зарастающим сосново-березово-пушицево-сфагновым сообществом. Древесный ярус сильно разрежен и образован главным образом подростом *Pinus sylvestris*, однако встречаются отдельные редкостоящие березы *Betula pubescens* высотой до 15 м. Кустарнички встречаются крайне редко. Хорошо выражен травянистый ярус образованный многочисленными кочками осоки *Carex limosa* и пушицы *Eriophorum vaginatum*. Моховой ярус представлен многообразием сфагновых мхов, изредка встречаются бриевые мхи, в частности *Polytrichum commune*. Глубина торфяной залежи от 70 до 90 см. На территории изучаемого участка повсюду встречаются следы от пожара: поваленные деревья, обгорелая кора уцелевших деревьев. Судя по всему, данный участок был подвержен в большей степени пожару, чем вышеописанный.

На каждом пункте наблюдений установлены автономные измерители профиля температуры – АИПТ, ИМКЭС СО РАН [9] оснащенные датчиками уровня болотных вод, для выявления влияния гидротермических условий на скорость процесса трансформации.

Исследовали скорость разложения растительного опада основных растений-торфообразователей типичных для олиготрофных болот: листья кустарничка *Chamaedaphne calyculata* Moench. – кассандра обыкновенная, ветошь травянистого растения *Eriophorum vaginatum* L. – пушица влагалищная и очес мха *Sphagnum fuscum* Klinggr. – сфагнум бурый. Кроме отдельных видов растений, подготавливался смешанный образец представляющий смесь исследуемых растений в соответствии с долей каждого вида в растительном опаде наиболее типичного естественного фитоценоза, состоящий из *Sphagnum fuscum* (60%) и *Chamaedaphne calyculata* (40%).

Для определения скорости разложения применялся метод закладки растительных остатков в торф [3]. Для этого в лабораторных условиях собранные растения высушивали до воздушно-сухого веса, и раскладывали в нейлоновые мешочки по 15 г. Приготовленный растительный материал закладывали в торфяную залежь в октябре 2018 года, на глубину 10 см от поверхности в трехкратной повторности. Образцы с растительным материалом извлекали через 12 месяцев после начала эксперимента. В образцах определяли убыль массы растительного вещества весовым методом. В исходных образцах также определяли содержание углерода, азота и зольных элементов [10, 11].

Выбранные пункты исследования кроме отличий в растительном покрове также характеризуются разными гидротермическими условиями. Во время вегетационного периода Осушенный рям отличается самым низким уровнем болотных вод (УБВ) – 41 см и самой низкой средней температурой на глубине 15 см (11,2°C). Гарь2 является наиболее обводненным участком (УБВ 24 см). Уровни болотных вод на Естественном и Восстановленном (Гарь1) рьях имеют близкие значения 30 и 29 см соответственно. Температура торфяной залежи Естественного рья и Гари 2 практически одинаковая (13,4 °C), для участка Гарь1 характерны более прохладные условия (12,0) °C.

Согласно модельным исследованиям разложения органического вещества растительных остатков [12], влияние факторов на скорость разложения органического вещества неравноценно, наиболее сильное влияние оказывает химический состав самих растительных остатков. Исследуемые растения по химическому составу (табл. 1) можно разделить на 2 группы – самым высоким содержанием углерода, азота, зольных элементов и наименьшим соотношением C/N характеризуются листья *Chamaedaphne calyculata*. Вторую группу образуют *Eriophorum vaginatum* и *Sphagnum fuscum*, которые обладают менее благоприятным для деятельности микроорганизмов химическим составом. При этом содержание азота и зольных веществ в образцах пушицы несколько выше, чем в образцах сфагнового мха. Смешанный образец по химическому составу занимает промежуточное положение между его отдельными компонентами, но обладает достаточно высоким соотношением C/N, что также может замедлять активность микроорганизмов-деструкторов.

Таблица 1. Исходный химический состав растений-торфообразователей.

Растение [Plant]	Содержание [Content]	Зольность, % [Ash, %]	C, %	N, %	C/N
<i>Chamaedaphne calyculata</i>		2,49	48,89	1,38	35
<i>Eriophorum vaginatum</i>		2,17	43,30	0,78	56
<i>Sphagnum fuscum</i>		1,77	43,77	0,75	58
Смешанный образец [Mixed sample]		1,89	45,83	0,81	56

В результате проведенных исследований по разложению опада основных растений-торфообразователей, выявлено, что потери массы в течение года в среднем для *Eriophorum vaginatum*, *Chamaedaphne calyculata*, Смешанного образца и *Sphagnum fuscum* составляют 32, 25, 16 и 13% соответственно, что соответствует проведенным ранее экспериментам – наиболее устойчивым к разложению является *Sphagnum fuscum*, наименее – *Eriophorum vaginatum* [6, 13]. В зависимости от условий (места закладки) эксперимента наблюдается разная скорость потери массы у разных растений. Максимальные потери массы получены для *Sphagnum fuscum* и Смешанного образца в условиях Естественного рья, по-видимому, это наиболее оптимальные условия для трансформации этих образцов. В тоже время для *Chamaedaphne calyculata* и *Eriophorum vaginatum* условия Естественного рья наименее благоприятны (рис. 1). Наиболее активно трансформация пушицы протекает в условиях Гари1, *Chamaedaphne calyculata* в условиях Осушенного рья. Минимальная потеря массы *Sphagnum fuscum* получена в условиях Осушенного рья, при этом Смешанный образец на 60 % состоящий из *Sphagnum fuscum* наименее активно разлагается в условиях Гари2.

По предварительным оценкам существует зависимость скорости разложения от гидротермических условий: на разложение *Chamaedaphne calyculata* и *Eriophorum vaginatum* оказывает влияние уровень болотных вод и температура, чем суше и прохладнее условия, тем интенсивнее процесс трансформации. Обратная зависимость наблюдается для *Sphagnum fuscum* более влажные и теплые условия способствуют интенсификации процесса трансформации.

В целом влияние антропогенной деятельности (осушение) и постпирогенного восстановления фитоценозов приводит к ускорению процесса трансформации растительных остатков *Chamaedaphne calyculata* на 22-58%, *Eriophorum vaginatum* – 15-49%. И в тоже время оказывает негативное влияние на скорость трансформации *Sphagnum fuscum* и Смешанного образца, снижая ее на 2-24%.

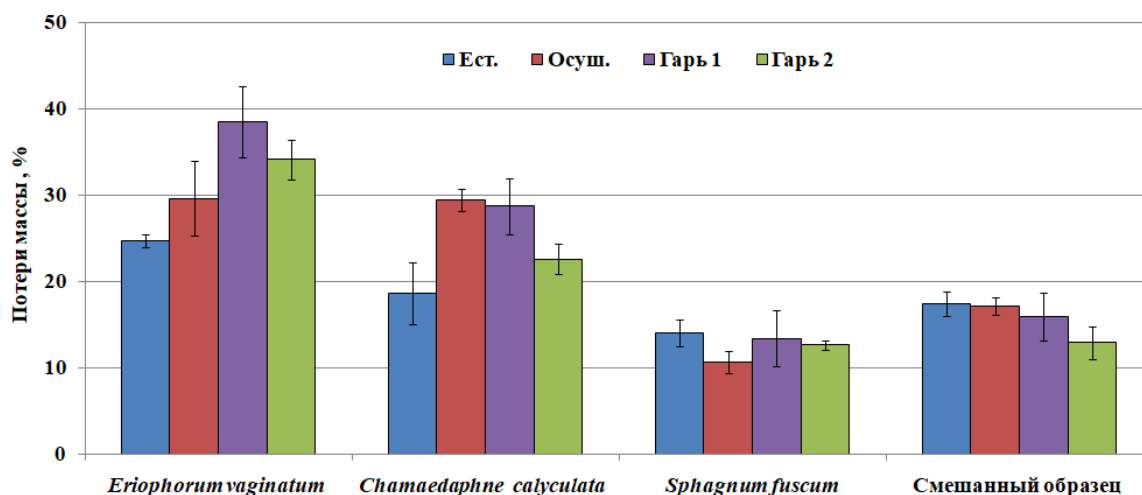


Рис. 1. Потери массы органического вещества растений-торфообразователей в торфяной залежи исследуемых болот: Естественный рям (Ест.), Осушенный рям (Осуш.), Гарь 1, Гарь 2 за 12 месяцев разложения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тюрменов С.Н. Торфяные месторождения. М.: Недра. 1976. 487 с.
2. Inisheva L.I., Szajdak L., Sergeeva M.A. Dynamics of Biochemical Processes and Redox Conditions in Geochemically Linked Landscapes of Oligotrophic Bogs // Eurasian Soil Science. 2016. V. 49. №. 4. P. 466–474.
3. Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Л.: Наука ЛО, 1978. 172 с.
4. Миронычева-Токарева Н.П., Косых Н.П., Вишнякова Е.К. Продукционно-деструкционные процессы в болотных экосистемах Васюганья // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2013. Т. 4. №. 1. С. 1–9.
5. Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Влияние уровня болотных вод на процессы трансформации сфагновых мхов в торфяной почве олиготрофных болот // Почвоведение. 2017. № 5. С. 606–613. doi: 10.7868/80032180X17030030
6. Никонова Л.Г., Головацкая Е.А., Курьина И.В., Курганова И.Н. Скорость разложения растений-торфообразователей в олиготрофных болотах южно-таежной подзоны Западной Сибири: оценка влияния уровня болотных вод и температуры торфяной залежи. Почвоведение. 2019. №9 С. 1092-1103. DOI: 10.1134/S0032180X19090065
7. Hogg E. H., Lieffers V. J., Wein R. W. Potential Carbon losses from peat profiles: effects of temperature, drought cycles, and fire: Ecological Applications, 1992, Vol. 2, no 3, pp. 298-306
8. Базанов В.А., Егоров Б.А., Лыготин В.А., Скугарев А.А. Современная пространственная динамика Большого Васюганского болота (на примере междуречья Икса-Шегарка) // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития. /под ред. Чл-корр. РАН М.В. Кабанова. – Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН. – Томск, 2002, С. 190-195.
9. Кураков С.А., Крутиков В.А., Ушаков В.Г. Автономный измеритель профиля температуры АИПТ // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 166-167.
10. Дурынина Е.П., Егоров В.С. Агрохимический анализ почв, растений, удобрений. М.: МГУ. 1998. 113 с.
11. Воробьева Л.А., Ладонин Д.В., Лопухина, О.В., Рудакова, Т.А., Кирюшин А.В. Химический анализ почв. Вопросы и ответы. М.: МГУ. 2012. 186 с.
12. Никонова Л.Г., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О. Жмури В.А., Головацкая Е.А. Влияние абиотических факторов на разложение опада растений-торфообразователей в инкубационном эксперименте // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2019. № 46. С. 148-170. DOI: 10.17223/19988591/46/8
13. Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Разложение растительных остатков в торфяных почвах олиготрофных болот // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. №3(23). С. 137-151.

Features of carbon photoassimilation by dominant species of mosses and lichens in pine forests of Central Siberia

¹Polosukhina D.A., ^{1,2}Prokushkin A.S., ²Masyagina O.V.

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

E-mail: dana_polo@mail.ru, prokushkin@ksc.krasn.ru, oxanamas@ksc.krasn.ru

Due to climate change, the ecosystems of the boreal biome from a sink of carbon of the atmosphere in the future they can go to the source of additional carbon input. A negative balance of ecosystem C flows in the boreal zone is predicted due to excess of ecosystem respiration, i.e. an increase in mineralization C flux from soils, over its photoassimilation. The moss-lichen layer of vegetation can play a key role in carbon accumulation, since it makes up 30-94% of the total biomass of ecosystems. Thus, the assessment of reserves and "vulnerability" of the considered vegetation layer of boreal biogeocenoses to temperature increase, which is largely determined by the composition of the ground cover, remains one of the main tasks in modern studies of the carbon cycle.

In boreal forests, bryophytes and lichens usually dominate the ground floor layer and contribute up to 50% of ecosystem gross CO₂ exchange. Sphagnum spp. are the most important contributors in wetland C uptake, and feathermosses and lichens play a significant role in well-drained sites. Given their important ecological roles in such a widespread biome, it is surprising that still a few studies have attempted to understand the intrinsic factors that control moss-lichen cover carbon dynamics specifically under ongoing climate change in high latitudes.

The aim of this work was to determine the stocks of moss-lichen stratum and photoassimilation activity of its dominant species during the growing season. The study has been conducted in Central Siberia near Zotino tall tower observatory (ZOTTO, 60 ° N, 89 ° E) in lichen- and feathermoss-dominated pine forests. First, to assess the phyto (bio) mass stocks the grass-shrub and moss-lichen layers were sampled in 100 replicates in each type of forest from 20x25 cm subplots (S = 50 cm²). The intensity of CO₂ photoassimilation was determined in situ by Walz GFS-3000 (Heinz Walz GmbH, Effeltrich, Germany) infrared gas analyzer. Photosynthetic activity of lichens and feathermosses was measured during the growing season of 2018 in June, July, August and September around the mid-day time. For every time point we also analyzed CO₂ exchange dependence from temperature, photosynthetically active radiation (PAR) and CO₂ concentration.

The dominants of ground vegetation for the moss-lichen layer were *Cladonia stellaris* (Opiz.) Brodo, *Cladonia rangiferina* (L.) Nyl., *Cetraria islandica* (L.) Ach., *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt., *Hylacomium splendens* (Hedw.) Schimp., *Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schimp. The moss-lichen layer accounted for 78-96% of the total phytomass of ground floor in studied pine forests and comparable (486 g/m²) to the photosynthetic phytomass of the tree canopy (pine needles). During the growing season, carbon assimilation by the moss-lichen layer varied in a relatively narrow range: from 38 ± 4 to 42 ± 5 mgCO₂ / m² / hour for lichen *C. stellaris* and from 93 ± 11 to 99 ± 13 mgCO₂ / m² / hour for moss *P. schreberi*. Thus, moss-lichen layer dominants maintained high photoassimilation activity throughout the growing season. Temperature increased the intensity of CO₂ assimilation and no inhibition was observed at maximum T used in our study (+40 ° C). There were no differences in the temperature dependence of CO₂ photoassimilation between feathermosses and lichens. However, they differed in dependence from PAR. Mosses showed 2-fold larger response of CO₂ assimilation intensity to increase of PAR comparatively to lichens. The rate of photosynthesis of both moss and lichen showed log growth with increasing CO₂ levels up to 2000 ppm. Compensation point was varying from 170 to 284 ppm.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-05-60203 "Landscape and hydrobiological controls on the transport of terrigenous carbon to the Arctic Ocean".

Особенности фотоассимиляции углерода доминантными видами мхов и лишайников в сосновых лесах Средней Сибири

¹Полосухина Д.А., ^{1,2}Прокушкин А.С., ²Масягина О.В.

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

E-mail: dana_polo@mail.ru, prokushkin@ksc.krasn.ru, oxanamas@ksc.krasn.ru

ВВЕДЕНИЕ

Важную роль в регулировании баланса атмосферы играют бореальные леса. Покрывая около 11% земной поверхности суши они выступают в качестве крупнейшего наземного биома. Таяжные экосистемы северных регионов играют значительную роль в глобальном углеродном цикле и особенно чувствительны к будущему изменению климата (Lindroth et al., 1998). Так, согласно существующим оценкам (IPCC, 2013-2014; Schulze et al., 2002; Pan et al., 2004) экосистемы бореальных лесов, из стока углерода атмосферы (Ваганов и др., 2005), в дальнейшем могут перейти в источник дополнительного его поступления (Schulze et al., 2002). Отрицательный баланс экосистемных потоков углерода прогнозируется вследствие превышения экосистемного дыхания, т.е. увеличения минерализационного потока С из почв, над его фотоассимиляцией (Масягина и др., 2005; Mori et al., 2010).

В бореальных лесах мхи и лишайники выступают доминантами растительного покрова и обеспечивают до 50% валового обмена CO_2 в экосистеме (Bisbee et al., 2001; Goulden et al., 1997). Мохово-лишайниковый ярус растительности может играть ключевую роль в аккумуляции углерода, поскольку составляет 30-94 % от общего запаса биомассы экосистем (Нагимов и др., 2009; Bryant D et al., 1997). *Sphagnum spp.* являются наиболее важными факторами, влияющими на поглощение С водно-болотными угодьями, а наземные бриофиты и лишайники играют значительную роль на хорошо дренированных участках (Прокушкин и др., 2006; Bjerke et al., 2013; Wang et al., 2017).

Оценка запасов и «уязвимости» мохово-лишайникового покрова бореальных биогеоценозов к повышению температур, определяющаяся во многом составом напочвенного покрова, остается одной из главных задач в современных исследованиях круговорота углерода (Барри и др., 1987).

Таким образом, целью данной работы являлось определение запасов и интенсивности фотоассимиляционных потоков углерода у доминантных видов живого напочвенного покрова сосновых лесов Средней Сибири.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Районом исследования выбрана территория Средней Сибири, а именно южная часть Туруханского района Красноярского края. Сбор материала и измерения фотосинтеза осуществлялись в сосняках беломошном и зеленомошном, близ мачты ZOTTO, расположенной в районе поселка Зотино (60° с.ш., 89° в.д.). Климат района резко континентальный (ZOTTO project, 2006).

Для оценки запасов фито (био) массы были отобраны травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковые ярусы растительности в 100 повторностях в каждом типе леса методом укосов ($S = 50 \text{ см}^2$). Интенсивность фотоассимиляции CO_2 определяли *in situ* на инфракрасном газоанализаторе Walz GFS-3000 (Heinz Walz GmbH, Effeltrich, Германия) (Portable Gas Exchange Fluorescence System GFS-3000, 2013). Фотосинтетическая активность лишайников и мхов была измерена в течение вегетационного периода. Для каждого момента времени проводился анализ зависимости обмена CO_2 от температуры, фотосинтетически активной радиации (ФАР) и концентрации CO_2 . Измерения проводились ежемесячно с июня по сентябрь 2018 г.

Для определения зависимости скорости фотосинтеза от ФАР (в диапазоне от 0 до 2000 $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$) фиксировались следующие абиотические условия – относительная влажность воздуха ($\text{RH} = 60\%$), $T_{\text{возд}} = 20^\circ \text{C}$, $[\text{CO}_2] = 400 \text{ ppm}$.

Оценка влияния концентрации CO_2 (от 0 до 2000 ppm): ФАР = 1000 $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$, $\text{RH} = 60\%$, $T_{\text{возд}} = 20^\circ \text{C}$.

Влияние температуры воздуха (от 0 до 40°C): $[\text{CO}_2] = 400 \text{ ppm}$, $\text{RH} = 60\%$, ФАР = 1000 $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$.

Шаг в диапазонах измерений интенсивности фотоассимиляции (A , $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$) при изменении концентрации CO_2 , ФАР, температуры воздуха одинаковый для всех исследуемых видов и фиксировался при значениях указанных ниже (Табл. 1).

Такие условия выбраны исходя из измерений проводимых в естественных условиях, работы О. Skre (Skre et al., 1981), а так же рекомендаций сотрудников лаборатории биогеохимических циклов в лесных экосистемах ФГБНУ ФИЦ КНЦ СО РАН - обособленного подразделения ИЛ СО РАН.

Таблица 1. Шаг в диапазонах измерений при определении зависимости А от абиотических факторов среды.

Фактор	Шаг измерений								
CO ₂ , ppm	0	50	100	200	400	600	1000	1500	2000
ФАР, мкмоль/м ² /с	0	100	250	500	750	1000	1250	1500	2000
Температура, °С	0	10	20	30	40				

РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно полученным данным доминантами мохово-лишайникового яруса выступают: *Cladonia stellaris* (Opiz.) Brodo, *Cladonia rangiferina* (L.) Nyl., *Cetraria islandica* (L.) Ach., *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt., *Hylocomium splendens* (Hedw.) Schimp., *Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schimp. Запасы фитомассы в живом напочвенном покрове варьируют от 355 г/м² в сосняках лишайниковых до 830 г/м² в сосняках зеленомошных. На мохово-лишайниковый покров приходится 78-96% от общей фитомассы живого напочвенного покрова в изученных сосновых лесах, что сопоставимо (486 г/м²) с фотосинтетической фитомассой древесного полога (хвоя сосны). Сходная закономерность приведена В.З. Нагимовым с соавт. для сосновых насаждений лишайникового типа среднетаежной подзоны Урала (Нагимов и др., 2009).

В течение вегетационного периода ассимиляция углерода мохово-лишайниковым ярусом варьировала в относительно узком диапазоне: от 38 ± 4 мг CO₂ / м² / час до 42 ± 5 мг CO₂ / м² / час для лишайника *Cladonia stellaris* и от 93 ± 11 мг CO₂ / м² / час до 99 ± 13 мг CO₂ / м² / час для мха *Pleurozium schreberi*. Таким образом, доминанты мохово-лишайникового покрова сохраняли высокую фотоассимиляционную активность в течение всего вегетационного периода.

При температуре 0° С у исследуемых видов мохово-лишайникового покрова преобладает выделение CO₂ над его поглощением. Температура повышала интенсивность ассимиляции CO₂, и никакого торможения не наблюдалось при максимуме *t*, использованном в исследовании (+40 °С). Различий в температурной зависимости фотоассимиляции между зелеными мхами и лишайниками не обнаружено. Максимальная интенсивность ассимиляции при 40° С для *Cladonia stellaris* составила 0,35 мг CO₂/г*час, а для *Pleurozium schreberi* 0,37 мг CO₂/г*час (рис. 1а,г).

Мхи показали в 2 раза большую интенсивность ассимиляции CO₂ при увеличении ФАР по сравнению с лишайниками. Для *Pleurozium schreberi* наибольшая величина при ФАР=2000 мкмоль/м²/с составила

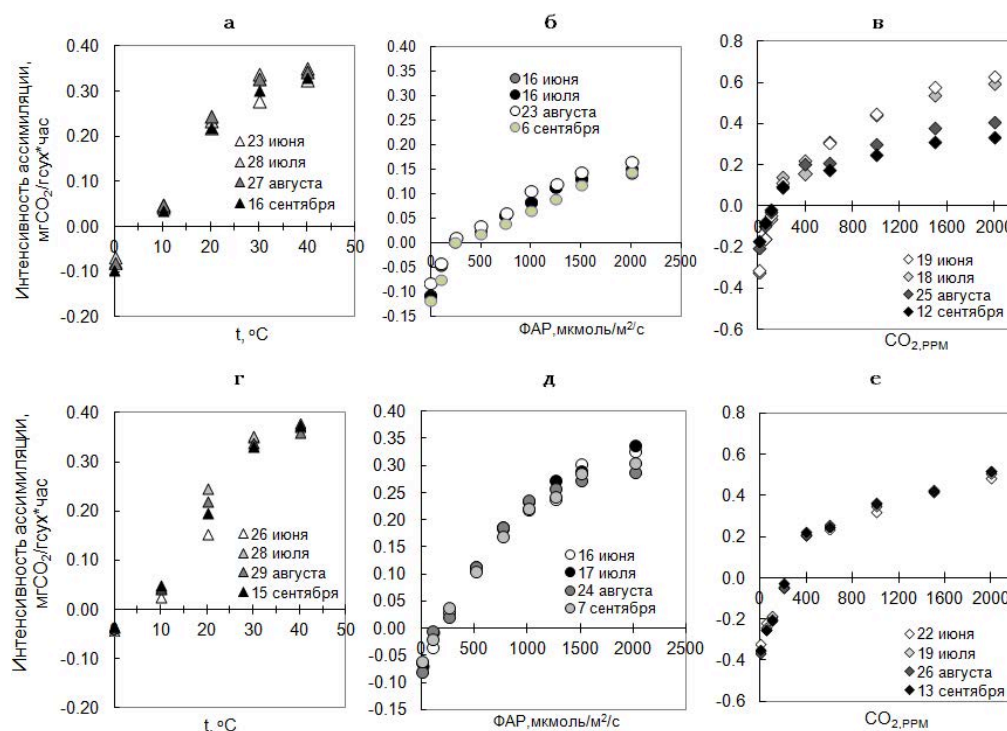


Рис. 1. Интенсивность фотоассимиляции *Cladonia stellaris* и *Pleurozium schreberi* в зависимости от изменения факторов среды: а и г – ФАР, б и д – температура воздуха, в и е – концентрация CO₂ соответственно.

вила 0,33 мг CO₂/г*час, а у *Cladonia stellaris* – 0,16 мг CO₂/г*час (рис. 16,1д). Точка компенсации у *Cladonia stellaris* варьировала в течении сезона: в июне она наблюдалась при ФАР=249 мкмоль/м²/с, а в сентябре снижалась до 199 мкмоль/м²/с (рис. 16). У *Pleurozium schreberi* в июне точка компенсации наблюдалась при ФАР=161 мкмоль/м²/с, а в сентябре при ФАР=147 мкмоль/м²/с (рис. 16).

Скорость фотосинтеза как мхов, так и лишайников показала рост значений с увеличением концентрации CO₂ до 2000 ppm. Компенсационный пункт расположен от 170 до 284 ppm. Для *Cladonia stellaris* отмечен рост фотоассимиляции, которая в июне и июле при CO₂=2000 ppm составила около 0.6 мг CO₂/г*час, но снижалась в конце сезона (рис.1в). У *Pleurozium schreberi* сезонных изменений выхода фотосинтеза на плато от концентрации CO₂ не наблюдалось, составляя около 0.5 мг CO₂/г*час при CO₂=2000 ppm (рис. 1е).

ВЫВОДЫ

Запасы фито(био)массы мохово-лишайникового яруса в сосновых лесах района исследований сопоставимы с фотосинтезирующей фитомассой древесного яруса. При этом доминанты мохово-лишайникового яруса сохраняли высокую фотоассимиляционную активность в течение всего вегетационного сезона, когда проводились исследования (июнь-сентябрь 2018 г.). Вклад мохообразных в общую фотоассимиляцию диоксида углерода мохово-лишайниковым ярусом сосновых биогеоценозов выше, чем лишайников. Это обусловлено большими величинами фотосинтеза мхов и их значительными запасами. Получены зависимости интенсивностей фотоассимиляции CO₂ от абиотических факторов среды. Показаны видовые различия в компенсационных точках для концентрации CO₂ (пределы варьирования: 170 до 260 ppm), освещенности (147-247 мкмоль/м²/с) и температуры (5 - 6 °C).

Выявленные особенности фотосинтеза у доминантов мохово-лишайникового покрова таежных биомов характеризуют их адаптивность к происходящим изменениям климата: росту температуры и концентрации CO₂.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №1 8-05-60203 «Почвенные и гидробиологические процессы в регулировании стока терригенного углерода в Северный Ледовитый океан»;

ЛИТЕРАТУРА:

1. Барри Д. А., Даунтон У. Д. С. Зависимость фотосинтеза от факторов окружающей среды // Фотосинтез, 1987, 2. С. 273-364.
2. Ваганов Е. А., Ведрова Э. Ф., Верховец С. В., Ефремов С. П., Ефремова Т. Т., Круглов В. Б., Онучин А. А., Сухинин А. И., Шибистова О. Б. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сибирский экологический журнал, 2005, 4. С. 631 - 649.
3. Масягина О.В., Прокушкин С.Г., Абаимов А.П. Мори Ш., Койке Т. Эмиссия CO₂ с поверхности напочвенного покрова в лиственничниках Центральной Эвенкии // Лесоведение, 2005, 6. С. 19-29
4. Нагимов В.З., Артемьева И.Н., Луганский Н.А., Нагимов З.Я. Особенности формирования надземной фитомассы сосновых насаждений лишайникового типа леса // Леса России и хозяйство в них, 2009, 2(32). С. 3-9.
5. Прокушкин А.С., Кнорре А.А., Кирдянов А.В., Шульце Е.Д. Продуктивность мхов и накопление органического вещества в подстилке лиственничника сфагнового в криолитозоне // Экология. 2006. № 4. С. 252–260.
6. Bisbee, K.E. Environmental controls on ground cover species composition and productivity in a boreal black spruce forest/ K.E. Bisbee, S.T. Gower, J.M. Norman, et al. // Oecologia. –2001. –№2, 129. – P.261–270.
7. Bjerke, J.W. Rapid photosynthetic recovery of a snow-covered feather moss and Peltigera lichen during sub-Arctic midwinter warming/ J.W. Bjerke, S. Bokhorst, T.V. Callaghan, M. Zielke, G.K. Phoenix// Plant Ecology & Diversity. –2013). – № 6. – P. 383–392.
8. Bryant D., Nielsen D., Tangley L. et al. The last frontier forests // World Resources Institute [WRI], Forest Frontiers Initiative, 1997. p 39.
9. Goulden, M. L. Automated measurements of CO₂ exchange at the moss surface of a black spruce forest/ M. L. Goulden, P. M. Crill// Tree Physiology. – 1997. – № 17 (8). – P. 537–542.
10. IPCC, 2013–2014. Fifth Assessment Report, Climate Change 2013–2014, vol. 1–3. www.ipcc.ch
11. Lindroth, A., Grelle, A., More'n, A.-S., 1998. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity. Global Change Biol. 4, 443–450.
12. Mori S., Yamaji K., Ishida A. et al. Mixed-power scaling of whole-plant respiration from seedlings to giant trees// PNAS, 2010, 107(4): 1447-1451.
13. Pan, Y. A. large and Persistent carbon sink in the World's forest / Y. Pan, R.A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P.E. Kauppi, W.A. Kurz, O. L. Phillips, A. Shvidenko, S.I. Lewis, J.G. Canadell, P. Ciais,

- R.B. Jackson, S.W. Pacala, A.D. McGuire, S. Poao, A. Rautiainen, S. Sitch, D. Hayes // *Science*. — 2011. — Vol. 333. — P. 988-993
14. *Portable Gas Exchange Fluorescence System GFS-3000: Handbook of Operation. Manual* / Heinz Walz GmbH, Germany. — 2013. — № 8a. — P.248.
15. Schulze E.-D., Prokushkin A. S., Arneth A. et al. Net ecosystem productivity and peat accumulation in a Siberian Aapa mire // *Tellus, serie B.*, 2002: 531–536.
16. Skre, O. Moss functioning in different taiga ecosystems in interior Alaska/ O. Skre, W. C. Oechel. // *Oecologia*. — 1981. — № 48.1. — P. 50-59.
17. ZOTTO project [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.zottoproject.org/> — Заглавие с экрана. — (Дата обращения: 10.05.2020).
18. Zhe Wang et al. Comparisons of photosynthesis-related traits of 27 abundant or subordinate bryophyte species in a subalpine old-growth fir forest/ Zhe Wang, Maaiké Y. Bader, Xin Liu, Zhangming Zhu, Weikai Bao // *Ecology and Evolution*. — 2017. — vol. 7(18). — PP. 7454-7461.

Influence of vegetation cover on temperature dynamics of sandy soil

¹Shuklina E.S., ^{2,3}Voropay N.N.

¹Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

³V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

E-mail: ekaterinakot99@gmail.com, voropay_nn@mail.ru

The soil temperature is one of the most important characteristic of climatic, soil-forming, permafrost and engineering-geological conditions. It determines the functioning of terrestrial ecosystems, allowing us to determine the sensitivity of landscapes to anthropogenic impact, changes in the natural environment and climate fluctuations. Particular interest is dictated by the growing attention of the scientific community to the problem of global warming. To study the temperature regime of soils, an Autonomous atmospheric-soil temperature complex was used. The complex was installed at three sites with sandy soil and various vegetation cover: burnt areas, pine forest and open sand. Observations were made from October 13, 2011 to August 16, 2019 in the soil profile from the surface to 320 cm depth. The analysis of the temperature regime of sandy soil revealed the main similarities and differences between the three sites with different types of vegetation cover.

Vegetation cover has a significant influence on the temperature regime of soils. Its influence can be clearly seen in warm and cold periods individually. At site with high and dense vegetation, the influence of solar radiation, and the heat flux on the soil surface is lower. In the summer sites with pine forest and burnt areas of the pine forest warm up less intensively than a site with open sand. Due to the great openness, this site is the warmest during the summer.

In winter, the open area is subject to greater freezing. Any vegetation cover prevents rapid cooling of the soil surface and reduces temperature fluctuations. The soil surface is warmer in winter when there is snow cover on it. Based on the analysis, the pine forest, due to its high vegetation, is a barrier to wind, reducing snow blowing, and prevents radiation cooling of the surface. To a slightly lesser extent, these functions are performed by loose vegetation in the burnt areas.

The influence of vegetation under different weather conditions (clear sky\overcast) is considered. Cloud cover, as well as abundant vegetation, helps to reduce the variability of soil temperature, since it prevents daytime warming and night cooling, which makes the daily course of soil temperature values smoother.

Our research show how temperature regime transforms after changes in vegetation cover. It is known that during forest fires, vegetation cover is destroyed and the properties of the underlying surface are changed. It leads to an increase in insolation and a decrease in the reflectivity of the surface, which changes the temperature regime of the soil. The territory where the site is located with burning, for a long time occupied a pine forest (vegetation cover-cranberry pine). In 2011, a forest fire occurred on this territory, after which this type of cover was destroyed.

The results of the study showed that the restoration of vegetation cover naturally contributes to the partial restoration of the soil temperature regime.

Влияние растительного покрова на динамику температуры песчаной почвы

¹Шуклина Е.С., ^{2,3}Воропай Н.Н.

¹Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

³Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

E-mail: ekaterinakot99@gmail.com, voropay_nn@mail.ru

Для многих прикладных, а также фундаментальных задач, связанных с оценкой отклика земной поверхности на изменения климата, первостепенное значение имеет температура почв – важнейшая характеристика климатических, почвообразовательных, мерзлотных и инженерно-геологических условий. Она определяет функционирование наземных биогеоценозов, позволяя судить о чувствительности ландшафтов к антропогенному воздействию, изменению природной среды и климатическим флуктуациям. Особый интерес диктуется растущим вниманием научной общественности к проблеме глобального потепления [Быховец и др., 2007]. Тепловой режим почв зависит от атмосферных климатических характеристик, особенностей рельефа, растительного и снежного покрова, тепловых свойств почвы, а также хозяйственной деятельности человека. Он обусловлен, преимущественно, радиационным балансом, который зависит от соотношения энергии солнечной радиации, поглощенной почвой, и теплового излучения. Рубки леса, пожары, распашка оказывают значительное влияние на теплофизическое состояние почвы.

Для оценки влияния растительности на динамику песчаной почвы в работе использовались срочные данные температуры почвы на стандартных глубинах [Наставления..., 1985] от поверхности до глубины 320 см по трем площадкам с песчаной почвой и разным типом растительности: гарь по сосняку брусничному (А26); сосновый лес с подлеском из рододендрона даурского брусничный (А27); песчаные барханы, растительность не сформирована (А35). Для измерения температуры почвы был использован атмосферно-почвенный измерительный комплекс, сокращенно – АПИК. В базовой комплектации АПИК позволяет проводить непрерывные долговременные автоматические измерения основных метеорологических параметров атмосферы и почвы с глубины 3,2 м до высоты 10 м [Система..., 2014]. Корректность исследования температурного режима почв с помощью АПИК показана в работе [Kiselev et al., 2018]. Наблюдения за температурой песчаных почв проводились на базе Тункинского котловинного стационара Института географии имени В.Б. Сочавы СО РАН с интервалом в 1 час в период с 13 октября 2011 г. по 16 августа 2019 г. Во время наблюдений в работе АПИК в разное время, преимущественно весной, наблюдались сбои, которые приводили к пропускам в полученных данных. Короткие пропуски (не более недели) были заменены восстановленными данными [Воропай и др., 2019].

Для сравнения площадок, нами были выбраны 4 временных отрезка с синхронными наблюдениями, в которых отсутствуют длительные пропуски данных:

- 1) 15.10.11–25.10.12 (только по двум площадкам: гарь (А26) и лес (А27))
- 2) 14.08.13–21.09.14
- 3) 18.06.16–07.08.17
- 4) 22.07.18–14.07.19

В данной работе приоритет был отдан расчету средних, максимальных и минимальных месячных температур на разных глубинах. Согласно полученным данным на площадке с открытым песком (А35) наибольшая амплитуда колебаний средней месячной температуры поверхности почвы. Эта площадка является самой холодной в зимний период (-15°C) и самой теплой в летний период ($24,1^{\circ}\text{C}$). С глубиной годовая амплитуда уменьшается, но также остается максимальной по сравнению с другими площадками. Площадка с сосновым лесом (А27) имеет наиболее сглаженный годовой ход температуры почвы. Значения средних месячных температур на поверхности изменяются от $18,3^{\circ}\text{C}$ (июль) до $-12,1^{\circ}\text{C}$ (январь). Растительность на гари (А26), хоть и незначительная, также способствует уменьшению изменчивости температуры почвы, но в меньшей мере, чем лес. Например, значения в январе 2017 года на данной площадке варьировались от -13°C на глубине 5 см до $1,7^{\circ}\text{C}$ на глубине 320 см, диапазон температур в почвенном профиле составляет $14,7^{\circ}\text{C}$; на площадке с сосновым лесом от $-10,8^{\circ}\text{C}$ до $1,2^{\circ}\text{C}$, соответственно; диапазон составляет 12°C .

Площадка А27 находится под наименьшим, из рассматриваемых площадок, влиянием солнечной радиации, что способствует минимальному прогреву почвы, что подтверждается профилем средней месячной температуры почвы в слое 0–320 см в летнее время года, в самый теплый месяц (август 2017). При сравнении площадок в зимнее время года, данная площадка оказалась теплее двух остальных, за счет того, что кроны препятствуют радиационному выхолаживанию поверхности.

Максимальная температура почвы на площадке с открытым песком более изменчива по сравнению с максимальной температурой почвы, находящейся под развитым растительным покровом.

Минимальные температуры (на поверхности) на площадках с гарью и сосновым лесом наблюдаются в январе ($-15,7^{\circ}\text{C}$ и $-14,0^{\circ}\text{C}$), а на открытом песке в ноябре ($-18,6^{\circ}\text{C}$). Различия связаны с тем, что растительный покров обладает малой теплопроводностью, следовательно, это ведет к уменьшению потери тепла почвой. Анализ минимальных значений температур почвы показал, что на площадке с лесом в зимний период времени охлаждение почвы меньше по всей толще. На площадках с открытым песком и гарью минимальные значения температур на поверхности почвы отрицательны в период с сентября по май. На площадке с сосновым лесом – с октября по апрель.

Рассмотрено различие в температурном режиме почвы с разным растительным покровом в пасмурные и ясные дни. По данным Росгидрометцентра [Булыгина и др.] по станции Тунка за период с 01.01.2016 по 31.12.2017 года были выбраны периоды с ясными и пасмурными днями.

В период с 8 по 9 февраля 2017 года наблюдалась ясная погода с облачностью 0 баллов. При сравнении площадок, было выявлено следующее: на поверхности почвы на всех площадках имеется выраженный суточный ход температуры почвы с одним минимумом и максимумом, на глубине 20 см колебания затухают. В пасмурные дни с облачностью 10 баллов (18 - 20 декабря 2016 года) колебания прослеживаются до уровня 30 см, на глубине 40 см они отсутствуют.

В летний период с 20 по 22 июня 2017 года (безоблачно) наиболее существенные колебания суточного хода температуры поверхности почвы прослеживаются на площадке с открытым песком (A35) и гарью (A26). Прогревание почвы под сосновым лесом происходит медленно. С глубины 40 см и более колебания отсутствуют на всех трех площадках. В пасмурные дни с 10 по 11 августа 2016 года более сглаженный суточный ход имеют значения температуры почвы, измеренные на площадке с сосновым лесом. Колебания на всех трех площадках прослеживаются до глубины 20 см.

Различия значений температуры почвы между площадками в ясные и пасмурные дни больше в летний период, т.к. прогреванию и выхолаживанию почвы не препятствует снежный покров. Из анализа также следует вывод, что амплитуда суточного хода температуры поверхности почвы уменьшается при наличии облачности, максимум и минимум менее выражены и смещаются на другое время. Так, в зимний период, на площадке A26, A27 максимальное значение температуры в ясный день наблюдается на 2 часа позже, чем в пасмурный день, на площадке A35 – на 4 часа. Минимум наступает на 2 часа позже на всех площадках. В летний период, когда облачность составляет 10 баллов, суточный максимум и минимум температур наступал раньше, чем в безоблачную погоду, на 1 ч на всех трех площадках.

Во время лесных пожаров происходит уничтожение растительного покрова и изменение свойств подстилающей поверхности, это ведет к увеличению инсоляции и снижению отражательной способности поверхности, вследствие чего изменяется температурный режим почв.

Территорию, где расположена площадка A26, длительное время занимал сосновый лес (растительный покров – сосняк брусничный). В 2011 году на этой территории произошел лесной пожар, после которого был уничтожен данный тип покрова. При сравнении средних месячных и экстремальных значений температуры почвы на площадке A26 (гарь) с другими площадками – A27 (сосновый лес) и A35 (открытый песок), можно выявить изменения температурного режима, происходящие в процессе восстановления растительного покрова на данной площадке в течение 10 лет (многолетний ход). После пожара площадка с гарью имела схожие значения температуры почвы с площадкой с открытым песком. Если растительный покров увеличивается, то и разность значений температуры почвы между данными площадками должна увеличиваться, что мы и наблюдаем. Если же сравнить площадки с гарью и с сосновым лесом, то при восстановлении растительного покрова их разность с годами должна уменьшаться, либо отсутствовать вовсе. В начале исследуемого периода различия были максимальные. В 2018 г различия стремятся к 0°C . Можно проследить тенденцию к уменьшению разности значений температуры почвы по всем глубинам между двумя площадками. Можно сделать вывод, что постепенное возобновление растительного покрова на поверхности почвы за 10 лет на площадке с гарью способствует восстановлению температурного режима почв.

Таким образом, проведенный анализ температурного режима песчаной почвы позволил выявить основные сходства и различия между тремя площадками с различным типом растительного покрова. Растительный покров оказывает значительное влияние на температурный режим почв. Его влияние хорошо прослеживается в теплый и холодный период. При высокой и густой растительности в летний период влияние солнечной радиации, следовательно, и поступление тепла на поверхность почвы минимально. Площадки с сосновым лесом и гарью по сосновому лесу прогреваются менее интенсивно, чем площадка с открытым песком. Из-за большой открытости, в теплый период данная площадка является самой теплой. В зимний период открытая местность подвергается большему промерзанию. Любой растительный покров препятствует быстрому охлаждению поверхности почвы и уменьшает колебания температур. Поверхность почвы зимой теплее тогда, когда на ней присутствует снежный покров. Исходя из анализа, сосновый лес, благодаря высокой растительности, является барьером для ветра, умень-

шая выдувание снега, и препятствует радиационному выхолаживанию поверхности. В чуть меньшей мере данные функции выполняет растительность на гари по сосновому лесу.

Облачность, как и обильная растительность, способствует уменьшению изменчивости температуры почвы, т.к. препятствует дневному прогреванию и ночному выхолаживанию, вследствие чего суточный ход значений температуры почвы становится более сглаженным.

Известно, что во время лесных пожаров происходит уничтожение растительного покрова и изменение свойств подстилающей поверхности, это ведет к увеличению инсоляции и снижению отражательной способности поверхности, вследствие чего изменяется температурный режим почв. Результаты исследования показали, что восстановление растительного покрова естественным образом, способствует частичному восстановлению температурного режима почв.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 20-04-00142

ЛИТЕРАТУРА

1. Быховец С.С., Сороковиков В.А., Мартуганов Р.А., Мамыкин В.Г., Гиличинский Д.А. История наблюдений за температурой почвы на сети метеорологических станций России // Криосфера Земли. 2007. Т. XI. № 1. С. 7-20.
2. Воропай Н.Н., Василенко О.В., Киселев М.В. Температурный режим ландшафтов в котловинах байкальского типа // Материалы международной научно-практической конференции «Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы» (г. Воронеж, 3-5 октября 2019 г.) / Под общ. редакцией С.А. Куролана, Л.М. Акимова, В.А. Дмитриевой. – Воронеж: Издательство «Цифровая полиграфия», 2019. – Том 1. – С.152-154
3. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Часть I. Метеорологические наблюдения на станциях. // Л. Гидрометеоиздат. – 1985 г. – 302 с.
4. Kiselev M V, Voropay N N, Dyukarev E A, Kurakov S A, Kurakova P S, Makeev E A Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 190 (2018) 012031 doi :10.1088/1755-1315/190/1/012031 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/190/1/012031/pdf>
5. Булыгина О.Н. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России (Электронный ресурс) / О.Н. Булыгина, В.М. Веселов, В.Н. Разуваев, Т.М. Александрова // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549 – Режим доступа: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters>
6. Система автоматического мониторинга «САМ». введ. 16.03.2014. – ИнФлай.–18 с.

СЕКЦИЯ 4

Состав атмосферы,
перенос загрязнений
и изменения климата

SESSION 4

Air composition,
Pollution Transport
and Climate Change

Algorithms based on sensitivity operators for analyzing and solving inverse modeling problems of transport and transformation of atmospheric pollutants

^{1,2}Penenko A., ³Gochakov A., ^{1,2}Penenko V.

¹Institute of Computational Mathematics and
Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk National Research State University,
Novosibirsk, Russia

³Siberian Regional Hydrometeorological Research
Institute, Novosibirsk, Russia

E-mail: a.penenko@yandex.ru, gochakov@sibnigmi.ru,
penenko@sscc.ru

When studying the processes of transport and transformation of pollutants in the atmosphere, there are problems that are difficult to solve by standard means. In particular, these problems include inverse modeling problems, when you need to consider the existing representations of processes in the form of mathematical models and the available data sets about these processes. The configuration of such a problem depends on the object of research, the volume and quality of available data, and the available a priori information.

The research aims to develop a general approach to the numerical solution of inverse modeling problems arising in the air quality study. To achieve this, we develop an approach based on sensitivity operators and ensembles of adjoint equations solutions [1-3]. In this approach, the variety of inverse modeling problem statements can be reduced to the analysis and solution of nonlinear ill-posed operator equations of a particular type. The classes of inverse modeling problems considered by us, in addition to classical inverse problems [1,2], also include sensitivity estimation problems [1,2] and data assimilation problems [3].

Acknowledgments: The construction of the scenario for modeling, the adaptation of the algorithm's adaptation to the conditions of Novosibirsk city, and numerical experiments were carried out with the financial support of the RFBR and the Novosibirsk Region Government within the framework of the scientific project No. 19-47-540011. 2GIS Company provided the information about the road traffic intensity. The development of the coefficient identification algorithms is supported by RFBR grant No. 19-07-01135 and continuation problem analysis is supported by Russian Foundation for Basic Research project No. 20-01-00560.

REFERENCES:

1. Penenko, V. V.; Penenko, A. V.; Tsvetova, E. A. & Gochakov, A. V. *Methods for Studying the Sensitivity of Air Quality Models and Inverse Problems of Geophysical Hydrothermodynamics* // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, Pleiades Publishing Ltd, 2019, 60, 392-399
2. Penenko A. *Convergence analysis of the adjoint ensemble method in inverse source problems for advection-diffusion-reaction models with image-type measurements* // *Inverse Problems and Imaging*, Vol. 14, Oct 2020. (in press)
3. Penenko A.V. *Algorithms for the inverse modelling of transport and transformation of atmospheric pollutants* // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 211, Dec 2018. P. 012052.

Алгоритмы на основе операторов чувствительности для анализа и решения задач обратного моделирования переноса и трансформации примесей в атмосфере

^{1,2}Пененко А.В., ³Гочаков А.В., ^{1,2}Пененко В.В.

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Новосибирск, Россия

E-mail: a.penenko@yandex.ru, gochakov@sibnigmi.ru, penenko@sscc.ru

При исследовании процессов переносов и трансформации примесей в атмосфере возникают задачи, которые сложно решать стандартными средствами. В частности, к ним можно отнести задачи обратного моделирования, когда требуется учесть не только имеющиеся представления о протекающих процессах в виде математических моделей, но и доступные массивы данных об этих процессах. Конфигурация такой задачи зависит от объекта исследования, от объема и качества имеющихся данных, а также от имеющейся априорной информации. Рассматриваемые нами классы задач обратного моделирования кроме классических обратных задач включают также задачи оценки чувствительности и задачи усвоения данных. Обзор современных алгоритмов усвоения данных можно найти в [1] и алгоритмов идентификации источников в [2]. Целью исследования является разработка общего подхода к численному решению задач обратного моделирования, возникающих при исследовании качества атмосферы.

Рассмотрим прямоугольную пространственно-временную область: $(x, t) \in \Omega_T := \Omega \times [0, T]$, $\Omega = [0, X] \times [0, Y] \times [0, Z]$, ограниченную $\partial\Omega_T = \partial\Omega \times [0, T]$. В этой области решается задача о переносе и трансформации набора из N_c химических веществ:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} \varphi_l - \mu \nabla \varphi_l) + P_l(t, \vec{\varphi}, \vec{y}) \varphi_l &= \Pi_l(t, \vec{\varphi}, \vec{y}) + f_l + r_l, \quad (x, t) \in \Omega_T, \\ \mu(x, t) \frac{\partial \varphi_l(x, t)}{\partial n} &= \alpha_l(x, t), \quad (x, t) \in \Gamma^{(out)}, \quad \varphi_l(x, t) = \alpha_l(x, t), \quad (x, t) \in \Gamma^{(in)}, \\ \varphi_l(x, t) &= \varphi_l^0(x), \quad x \in D, \quad t = 0, \end{aligned}$$

где $\vec{\varphi} \in \mathbb{R}^{N_c}$ – вектор-функция состояния, различные элементы которой φ_l , $l = 1, \dots, N_c$ представляют концентрации рассматриваемых примесей, $P_l(t, \vec{\varphi}, \vec{y})$ – коэффициенты деструкции рассматриваемых веществ, $\Pi_l(t, \vec{\varphi}, \vec{y}) > 0$ – скорости продукции, $\vec{y}$ – параметры операторов продукции-деструкции, $\vec{u}(x, t) \in \mathbb{R}^3$ – вектор скорости ветра, $\mu(z, t)$ – коэффициент диффузии, f_l , φ_l^0 – априорные значения источников и начальных данных, α_l – функции, определяющие краевые условия, r_l – функция неопределенности, которая добавляется в жесткую структуру модели для усвоения данных, $\Gamma^{(out)}$ – часть границы области, на которой скорость ветра направлена наружу из области, $\Gamma^{(in)}$ – часть границы, на которой скорость ветра направлена внутрь. Операторы продукции и деструкции задаются системой кинетических уравнений. Скорости фотохимических реакций зависят от времени суток.

В нашем подходе к обратному моделированию параметры модели делятся на «заданные параметры» и «функции неопределенности». За счет модификации последних и осуществляется решение задач обратного моделирования. Чаще всего функциями неопределенности в задачах исследования качества атмосферы являются неизвестные источники загрязнений, как в приведенной выше системе. Задачи оценки функции неопределенности могут быть вспомогательными для продолжения полей концентрации с наблюдаемых на ненаблюдаемые подобласти (в физическом пространстве и времени, а также в пространстве химических веществ).

Подход на основе ансамблей решений сопряженных уравнений и операторов чувствительности состоит в построении на основе обратной задачи семейств операторов чувствительности различной

размерности, связывающих наблюдаемые характеристики с функциями неопределённости. Подход основан на идее, предложенной Г.И. Марчуком в [3], и методах теории чувствительности [4]. Операторы чувствительности позволяют сформулировать для обратной задачи семейство квазилинейных операторных уравнений, множества решений которых содержат множества решений исходной задачи. Это позволяет использовать операторы чувствительности для анализа обратной задачи. В частности, используя проекцию на ортогональное дополнение к ядру оператора чувствительности, можно оценить, что можно найти по имеющимся данным, не решая обратную задачу [5]. Еще один полезный агрегат – это диагональ указанного выше проектора, которая позволяет оценить «наблюдаемость» («освещённость» в терминологии [6]) той или иной территории имеющейся системой мониторинга.

Другим важным достоинством подхода на основе ансамблей решения сопряжённых уравнений, является то, что разнообразные задачи приводятся к унифицированной форме семейства квазилинейных операторных уравнений, благодаря свойствам сопряжённых уравнений и соотношений чувствительности. При этом состав функции неопределённости определяет используемые функции чувствительности, которые вычисляются на основе решений сопряжённого уравнения. Структура сопряжённого уравнения определяется линеаризацией прямой задачи, то есть моделью процессов. В свою очередь, данные измерений определяют источники для сопряжённого уравнения.

Объединение в один оператор чувствительности ансамблей решений сопряжённых уравнений, соответствующих различным типам данным измерений, позволяет рассматривать гибридные постановки. Это важно в свете того, что современные системы мониторинга поставляют информацию различного типа: это могут быть точечные измерения в пространстве и времени значений концентраций загрязняющих примесей [7], временные ряды концентраций на постах мониторинга [8], [5], а также снимки полей концентрации (аналогично [9], [10]). В обратных задачах требуется по имеющейся информации найти функции неопределённости в источниках [5], [8], или коэффициентах модели [11]. В работе [10] был представлен алгоритм усвоения данных на основе операторов чувствительности и сравнение постановок задачи усвоения данных и обратной задачи поиска источников.

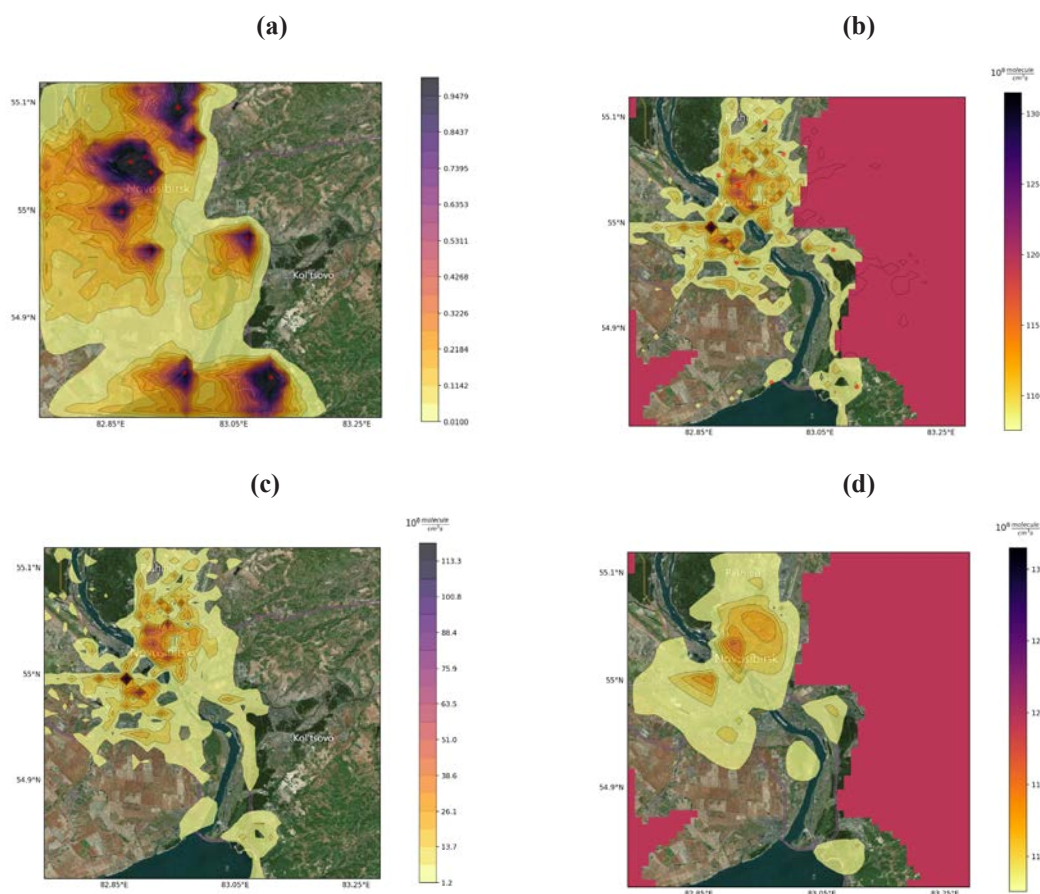


Рис. 1. Функция наблюдаемости («освещённости» в терминах [6]) для системы мониторинга города в рассмотренном сценарии (а). Контурами показаны значения функции наблюдаемости больше 0.01. «Точное» распределение источников (б). Красным отмечены области, где функция наблюдаемости меньше 0.01. Проекция точного решения на ортогональное дополнение к ядру оператора чувствительности (с). Результат решения обратной задачи (д).

Продemonстрируем некоторые возможности разрабатываемой системы на примере городского сценария для Новосибирска. На рис. 1а показана функция наблюдаемости для системы мониторинга; посты мониторинга отмечены красными точками. В данном сценарии они измеряют временные ряды концентраций NO₂. На рис. 1б представлено «точное» распределение источников NO. Таким образом, требуется оценить источники по косвенным наблюдениям за веществом, связанным с выбрасываемым веществом. Красным на рис. 1б отмечена область, где функция наблюдаемости меньше 1%. На рис. 1с показана проекция точного решения на ортогональное дополнение к ядру оператора чувствительности. Этот рисунок позволяет оценить эффективность решения обратной задачи идентификации функции неопределенности до ее непосредственного решения. На рис. 1д показан результат решения обратной задачи. Можно заметить, что функция освещенности предсказывает области, в которых система мониторинга позволяет оценить действующие источники. При этом полученная на рис. 1с оценка ожидаемо превосходит фактически полученное решение 1д.

Разработка алгоритмов для решения коэффициентных обратных задач с данными контактных измерений разрабатываются и исследуются при поддержке РФФИ № 19-07-01135, задачи и алгоритмы продолжения 20-01-00560, построение городских сценариев для обратного моделирования поддержано проектом РФФИ и Правительства Новосибирской Области № 19-47-540011. Информация об интенсивности дорожного движения предоставлена компанией 2ГИС.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Carrassi A., Bocquet M., Bertino L., Evensen G. *Data assimilation in the geosciences: An overview of methods, issues, and perspectives* // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, Vol. 9, Jul 2018. P. e535.
2. Bieringer P.E., Young G.S., Rodriguez L.M., Annunzio A.J., Vandenberghe F., Haupt S.E. *Paradigms and commonalities in atmospheric source term estimation methods* // *Atmospheric Environment*, Vol. 156, May 2017. pp. 102-112.
3. Марчук Г. О постановке некоторых обратных задач // *Доклады Академии Наук СССР / Изд. Наука*, Vol. 156, 1964. pp. 503–506.
4. Пененко В.В. *Методы численного моделирования атмосферных процессов*. Ленинград: Гидрометеоздат, 1981.
5. Пененко В.В., Пененко А.В., Цветова Е.А., Гочаков А.В. *Методы исследования чувствительности модели качества атмосферы и обратные задачи геофизической гидротермодинамики* // *Прикладная механика и техническая физика*, 2019.
6. Issartel J.P. *Emergence of a tracer source from air concentration measurements, a new strategy for linear assimilation* // *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 5, Feb 2005. pp. 249-273.
7. Penenko A.V. *Consistent Numerical Schemes for Solving Nonlinear Inverse Source Problems with Gradient-Type Algorithms and Newton-Kantorovich Methods* // *Numerical Analysis and Applications*, Vol. 11, Jan 2018. pp. 73-88.
8. Пененко А.В. *Метод Ньютона–Канторовича для решения обратных задач идентификации источников в моделях продукции–деструкции с данными типа временных рядов* // *Сибирский журнал вычислительной математики*, Vol. 22, 2019.
9. Penenko A. *Convergence analysis of the adjoint ensemble method in inverse source problems for advection-diffusion-reaction models with image-type measurements* // *Inverse Problems and Imaging*, Vol. 14, Oct 2020. (in press)
10. Penenko A.V. *Algorithms for the inverse modelling of transport and transformation of atmospheric pollutants* // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 211, Dec 2018. P. 012052.
11. Penenko A., Mukatova Z., Salimova A. *Numerical study of the coefficient identification algorithm based on ensembles of adjoint problem solutions for a production-destruction model* // *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*. (accepted)

Inverse modeling for forecasting and environmental quality control

Penenko V., Penenko A.

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia
E-mail: penenko@sscc.ru, a.penenko@yandex.ru

Predicting the quality of the atmosphere against the backdrop of ongoing climate change is an important area of scientific activity that has both theoretical significance and an applied component that affects the social interests of modern society. Currently, various aspects of this topic are being studied largely by methods of mathematical modeling using super computations due to the huge amount of processed information and attracted observational data.

In this direction, we are developing an original approach, the purpose of which is to create models and algorithms for a consistent description of climatic and ecological processes of a wide range of possibilities, from short-term forecasting of the urban atmosphere to the study of regional changes in environmental design [1,2].

In this paper, we briefly describe a mathematical modeling system for solving direct, inverse, and data assimilation problems for environmental forecasting and design, and pay attention to the role of target functionals in such studies. The choice of target forecasting functions is of fundamental importance from the point of view of environmental quality control and environmental safety. In the case of violations of safety conditions, it is necessary to solve the inverse problems of identifying their causes and managing the quality of the atmosphere. The sources of emissions, initial and boundary conditions, possible transboundary impacts, etc. are subject to analysis with the assimilation of observational data; that is, it is necessary to solve the problems of management and continuation based on a set of models. Instead of working with distributed constraints, we suggest working with integral constraints.

The developed technology provides the organization of direct and feedback links between the main objects of the modeling system by continuation methods. This results in constructive algorithms for identifying situations with violations of environmental safety conditions and, most importantly, building safe strategies in environmental forecasting and design modes.

Acknowledgments. This work is carried out within the framework of the state assignment of the ICM&MG SB RAS 00315-2019-004 with the support of the RFBR 20-01-00560 regarding the continuation tasks.

REFERENCES:

1. Penenko V., Tsvetova E. A., and Penenko A. V. Development of variational approach for direct and inverse problems of atmospheric hydrothermal dynamics and chemistry, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, Vol. 51, No. 3, pp. 311–319. doi: 10.1134/S0001433815030093
1. Penenko, V.V., Penenko, A.V., Tsvetova, E.A., and Gochakov, A.V., Methods for studying the sensitivity of air quality models and inverse problems of geophysical hydrothermodynamics, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics* 60: 392-399 (2019).

Обратное моделирование для прогнозирования и контроля качества окружающей среды

Пененко В.В., Пененко А.В.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: penenko@sscc.ru, a.penenko@yandex.ru

Прогнозирование качества атмосферы на фоне происходящих изменений климата составляет важное направление научной деятельности, имеющей как теоретическое значение, так и прикладную составляющую, затрагивающую сферу социальных интересов современного общества. В настоящее время различные аспекты этой тематики в значительной степени исследуются методами математического моделирования [1-2] с применением супервычислений из-за большого объема обрабатываемой информации и привлекаемых данных наблюдений.

В этом направлении мы разрабатываем оригинальный подход, цель которого состоит в создании моделей и алгоритмов для согласованного описания климато-экологических процессов широкого диа-

пазона, начиная от краткосрочного прогнозирования городской атмосферы до изучения региональных изменений при природоохранном проектировании [3,4]. В настоящей работе мы кратко описываем систему математического моделирования для решения прямых, обратных задач и задач усвоения данных для природоохранного прогнозирования и проектирования и обращаем внимание на роль целевых функционалов в подобных исследованиях.

В нашем подходе совместно используются модели исследуемых процессов, априорная информация и доступные результаты наблюдений. Объединение всех этих объектов осуществляется на основе вариационного принципа со слабыми ограничениями и с применением концепции сопряженных интегрирующих множителей Лагранжа. Формулировка объединенного функционала выбирается с учетом характерных масштабов исследуемых процессов и доступной фактической информации о системе в целом.

Теоретическую основу для решения задач охраны окружающей среды составляют математические модели гидротермодинамики процессов в атмосфере, водных объектах и в верхних слоях поверхности Земли. Во взаимодействии с этими процессами исследуется эволюция процессов переноса и трансформации различных субстанций в газовом и аэрозольном состояниях. Основные положения и структура моделей представлены в [3]. Основные объекты в этой системе математического моделирования – суть операторы процессов адвекции-диффузии-реакции для решения прямых и обратных задач по заданным целевым функционалам. Формулировка объединенного вариационного принципа организуется с учетом характерных масштабов исследуемых процессов.

Определим основной функционал системы моделирования в виде [3]:

$$\Phi^h(\mathbf{X}) = \int_{D_t} \left(\left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + G(\Phi, \mathbf{Y}) - \mathbf{f} - \mathbf{r} \right), \Phi^* \right) dDdt + 0,5 \left\{ \alpha_1 (W_1 \mathbf{r}, \mathbf{r})_{D_t} + \alpha_2 (W_2 \xi, \xi)_{D_t} + \alpha_3 (W_3 \eta, \eta)_{D_t^m} + \alpha_4 Z(\Phi)_{D_t} \right\}. \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{X} = (\Phi, \Phi^*, \mathbf{Y}, \mathbf{f}, \mathbf{r}, \xi, \eta)$ – вектор функциональных аргументов системы моделирования, $G(\Phi, \mathbf{Y})$ – оператор моделей процессов, $\mathbf{Y}$ – вектор его внутренних параметров, $\Phi^* \in Q^*(D_t) \subset H(D_t)$ – сопряженные функции такой же структуры, как и функции состояния $\Phi \in Q(D_t) \subset H(D_t)$, с достаточно гладкими компонентами, определенными в D_t ; $\mathbf{r}, \xi, \eta$ – подлежащие определению функции, представляющие в обобщенном виде неопределенности и ошибки соответствующих объектов. Первое слагаемое в правой части – это функционал интегрального тождества в моделях процессов; следующие три выражают меру неопределенностей в моделях процессов, в начальных данных, в результатах Ψ_k и в моделях наблюдений H_k :

$$\Psi_k = H_k(\Phi) + \eta_k, \quad k = \overline{1, K}; \quad \Psi_k \subset Q(D_t^m), \quad (2)$$

$Z(\Phi)$ – целевой функционал прогнозирования и меры экологической безопасности;

$\alpha_k, W_k, k = \overline{1, 4}$ – весовые коэффициенты и матрицы. Заметим, что в интегральном тождестве учитываются все краевые и начальные условия моделей. Структура функционала $\Phi^h(\mathbf{X})$ определяется так, чтобы сбалансировать характерные масштабы объектов исследуемой системы.

Выбор целевых функционалов прогнозирования $Z(\Phi)$ имеет фундаментальное значение с позиций управления качеством окружающей среды и экологической безопасности. Нам понадобятся следующие определения:

$$q_i(\varphi_i) = (\varphi_i(\mathbf{x}, t) - \bar{\varphi}_i), \quad i = \overline{1, n_\varphi}, \quad (\mathbf{x}, t) \in D_t, \quad (3)$$

$$[q_i(\varphi_i)] = \begin{cases} q_i(\varphi_i), & q_i(\varphi_i) \geq 0; \\ 0, & q_i(\varphi_i) < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $\varphi_i(\mathbf{x}, t)$ – значения функций состояния, рассчитанных на основе моделей (1)-(2), а $\bar{\varphi}_i$ – их предельно допустимые значения с позиций экологической безопасности в области D_t . В случае нарушений условий безопасности, то есть, $q_i(\varphi_i(\mathbf{x}, t)) > 0$, необходимо для их выполнения решать обратные задачи по выявлению причин и управления качеством атмосферы. Анализ подлежат источники выбросов, начальные и граничные условия, возможные трансграничные воздействия и др., с усвоением данных наблюдений, то есть нужно решать задачу управления и продолжения на основе комплекса моделей (1).

Поскольку в рамках вариационного принципа (1) работать с распределенными ограничениями типа $q_i(\varphi_i(\mathbf{x}, t)) > 0$ проблематично, то для определения целевого функционала $Z(\Phi)$ используем вариант, эквивалентный по оценке области нарушения условий безопасности, в виде интегральных ограничений:

$$Z(\Phi) = \sum_{i=1}^{n_\varphi} \left\{ \int_{D_t} [q_i(\varphi_i(\mathbf{x}, t))]^2 \chi_i(\mathbf{x}, t) dDdt \right\} = 0. \quad (5)$$

Здесь $\chi_i(\mathbf{x}, t) > 0$ – весовые функции. Заметим, что метод замены распределенных ограничений эквивалентными им интегральными ограничениями успешно используется в задачах прикладного оптимального проектирования [5].

По содержанию в функционале (5) учитываются все элементы функции φ_i , в которых не выполняются условия экологической безопасности (3,4). Условиями (4) выявляются подобласти в D_i , в которых превышаются предельно допустимые уровни нагрузок на окружающую среду. Мы их учитываем в определении слагаемых функционала (5). Посредством этого функционала и решений сопряженных задач в составе уравнений и алгоритмов расчета функций состояния и функций чувствительности требования (3)-(5) передаются на все объекты и условия формирования качества окружающей среды в общей системе моделирования на основе функционала (1).

Численные модели мы строим с помощью аппроксимаций всех объектов объединенного функционала (1) с учетом специфики операторов в системе уравнений исследуемых процессов. Для этой цели используем методы расщепления и декомпозиции по координатным направлениям и по масштабам процессов; методы решения сопряженных уравнений и сопряженных интегрирующих множителей; методы расчета функций чувствительности функционалов и операторов моделей к вариациям всех функциональных аргументов $\mathbf{X}$ в системе моделирования. На их основе формируются методы прямого и обратного моделирования с использованием методов продолжения для прогнозирования исследуемых процессов по целевым функционалам $\mathbf{Z}(\Phi)$ (5) в составе (1).

При этом функционал (1) в целом – эффективный инструмент для построения согласованных численных моделей разномасштабных процессов так называемых «бесшовных» технологий [3] их объединения для решения рассматриваемого класса задач. Дискретные аналоги функционала (1) и его частей будем отмечать верхним индексом.

Возникает вопрос, как сформировать стратегию прогнозирования с учетом безопасности (3)-(5) на основе (1). Для организации такой согласованной технологии моделирования мы используем определения вариаций Гато применительно к функционалам (1):

$$\delta^p \Phi^h(\mathbf{X}) = \left\{ \frac{\partial^p}{\partial \lambda^p} \Phi^h(\mathbf{X} + \lambda \delta \mathbf{X}) \right\}_{\lambda=0}, \quad p \geq 1, \quad (6)$$

где $p \geq 1$ – порядок производных, λ – вещественный параметр, $\delta \mathbf{X}$ – вектор вариаций аргументов $\mathbf{X}$. Например, при $p = 1$ получаем системы основных уравнений технологии моделирования с усвоением данных и с методами теории чувствительности моделей:

$$\frac{\partial \Phi_k^h}{\partial \Phi^*} = 0, \quad \frac{\partial \Phi_k^h}{\partial \Phi} = 0, \quad \frac{\partial \Phi_k^h}{\partial \mathbf{r}} = 0, \quad \frac{\partial \Phi_k^h}{\partial \xi} = 0, \quad \delta \Phi_k^h = \left(\frac{\partial \Phi_k^h}{\partial \mathbf{Y}}, \delta \mathbf{Y} \right). \quad (7)$$

Все эти объекты согласованы между собой в смысле определения (1). Первые четыре из них представляют численные схемы для решения основных задач. Конкретно, это системы уравнений для определения функций состояния, сопряженных функций с усвоением данных наблюдений, учитываемых в системе (2) и слагаемых в целевом функционале (5); функций неопределенности $\mathbf{r}$ и ξ . Пятое уравнение в (7) – это алгоритмы расчета функций чувствительности к вариациям внутренних параметров модели $\mathbf{Y}$. В структуре алгоритмов определения вариаций (6) и уравнений (7) на основе функционала (1) общего вариационного принципа представлены операторы чувствительности общего функционала к вариациям соответствующих функций $\delta \Phi$, $\delta \Phi^*$, $\delta \mathbf{r}$, $\delta \xi$, $\delta \mathbf{Y}$. Подчеркнем, что вариации целевого функционала $\mathbf{Z}(\Phi)$ в (5) и вариации моделей систем наблюдений (2) относительно вариаций $\delta \Phi$ учитываются при построении системы сопряженных уравнений.

Таким образом, совокупность задач (1)-(7) обеспечивает организацию прямых и обратных связей между основными объектами системы моделирования методами продолжения. При этом получают конструктивные алгоритмы выявления ситуаций с нарушением условий экологической безопасности и, что самое главное, построения безопасных стратегий в режимах природоохранного прогнозирования и проектирования.

Работа выполняется в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН 00315-2019-004 при частичной поддержке проекта РФФИ No. 20-01-00560 в части рассмотрения задач продолжения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Seamless prediction of the Earth system: from minutes to months*// WMO-No.1156, 2015.
2. Carrassi A., Bocquet M., Bertino L., Evensen G. *Data assimilation in the geosciences: An overview of methods, issues, and perspectives* // Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, Vol. 9, Jul 2018. P. e535.
3. V. V. Penenko, E. A. Tsvetova, and A. V. Penenko *Development of variational approach for direct and inverse problems of atmospheric hydrothermal dynamics and chemistry, Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, Vol. 51, No. 3, pp. 311–319. doi: 10.1134/S0001433815030093
4. Penenko, V.V., Penenko, A.V., Tsvetova, E.A., and Gochakov, A.V., *Methods for studying the sensitivity of air quality models and inverse problems of geophysical hydrothermodynamics, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics* 60: 392-399 (2019).
5. Haug E.J., Arora J.S *Applies optimal design*. New York: John Wiley & sons, 1979

Numerical study of the gases and aerosol composition in the background and urban location of Western Siberia: a case study for the record-breaking hot April 2020

Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Kozlov A.V., Savkin D.E., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia
E-mail: apn@iao.ru

The study of changes in gases and aerosols composition during the period of observed climatic changes is necessary. There are many feedbacks associated with the chemical composition of the atmosphere and climate system. One of the exciting aspects of this matter is the study of the influence of the extreme episodes related to atmospheric circulation and changes in surface temperature. April 2020 was the second abnormally hot (the first in 2016) for our planet. The global temperature anomaly was 1.06°C [<https://www.climate.gov/news-features/featured-images/april-2020-another-month-%E2%80%99s-second-warmest-record>]. The most pronounced temperature anomalies were characteristic of Western Siberia, where the average monthly temperature exceeded the norm by an average of 5°C, and in the northern regions of Western Siberia by 10-12°C. According to the Russian weather services departments for western Siberia, April 2020 was the first hottest April [<https://ria.ru/20200420/1570277368.html>]. In the present work, we compare the modeled data with observed changes in the gas (CO, NO, NO₂, SO₂, O₃) and aerosol composition during an abnormally warm April. We conducted a simulation to study the sources of pollution during two episodes of increase of concentration with a maximum of 14 and 24 April.

The model reproduces the increase in the concentration of CO and aerosol for the TOR-station during the first episode (April 13-15). For the second episode (April 17-24), the model has reproduced the increase in concentration aerosol and for all gases, but for NO, it was not recorded in the measurements. The increase in concentration for ozone was weakly expressed compared with the measurement data. Emissions from fires caused the main variability of the calculated concentrations of aerosol, CO, and SO₂ (for the background region). In other cases, the total contribution of the remaining emissions prevailed.

Численное исследование газового и аэрозольного состава атмосферы в фоновых и городских условиях Западной Сибири для аномально теплого апреля 2020

Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
E-mail: apn@iao.ru

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных факторов влияющим на газовый и аэрозольный состав атмосферы являются лесные пожары. Они являются следствием продолжительных аномалий температуры в весенне-летний период. По данным инструментальных наблюдений на сети Росгидромета для Западной Сибири апрель 2020 является самым теплым [<https://ria.ru/20200420/1570277368.html>]. С этой точки зрения представляет интерес провести исследование формирования газового и аэрозольного состава для юга Западной Сибири.

Для проведения исследования были выбраны два эпизода, во время которых циркуляционные условия способствовали накоплению загрязнений. Первое событие отмечено с 13 по 15 апреля с максимумом 14 апреля. Второе событие с 17 по 24 апреля с максимумом 23 апреля. В течение этих периодов наблюдалась повышенная эмиссия выбросов от лесных пожаров. Станции мониторинга газового состава атмосферы ИОА СО РАН обсерватория «Фоновая» (расположенная в фоновом районе) и TOR-станция (расположенная вблизи города Томска) фиксировали рост концентрации ряда загрязняющих веществ. Однако определить вклад, от лесных пожаров используя только данные измерений довольно сложно, поэтому используют химико-транспортные модели. В нашем исследовании была использована модель WRF-Chem v.4.1.

Модель позволяет проводить расчеты, используя различный набор источников эмиссий (антропогенные, биогенные, пожары, болота). Кроме этого модель позволяет проводить расчеты с различными схемами параметризации приземного и пограничного слоя атмосферы, что позволит оценить не только влияние самих источников, но влияние самих параметризаций на результат моделирования. Главным достоинством модели является возможность получения площадных распределений концентрации аэрозольных и газовых веществ. Это позволяет определить, не только район поступления примеси, но и проследить траекторию движения воздушной массы, в которой накапливаются загрязнители. Однако все модельные расчеты требуют верификации с данными натурных измерений для оценки качества моделирования. Поэтому проведение расчетов для апреля 2020 года позволит исследовать качество воспроизведения моделью концентрации газовых и аэрозольных и оценить вклад эмиссий от лесных пожаров в их динамику.

МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Для проведения численного эксперимента была использована модель WRF-Chem v.4.1. [1]. При моделировании был использован один прямоугольный домен в проекции Ламберта, ограниченный по горизонтали координатами 45-74° с.ш. и 40-105° в.д. и по высоте уровнем 50 гПа. Число узлов расчетной области составляет 99x104x21 по долготе, широте и высоте, соответственно. Шаг сетки по составу составил 27 км, использовался переменный шаг по времени в диапазоне 30 до 300 с для метеорологических параметров и химических реакций, шаг сетки по высоте задан ETA-координатой, учитывающей топографическую поверхность, и возрастает с увеличением высоты. Высота нижнего уровня составила 50 м, данные рельефа задавались с разрешением 30".

В качестве исходных полей метеорологических величин использовались данные модели FNL (NCEP) [2] с 6-часовым разрешением по времени. Поля исходных метеорологических данных FNL получены на основе данных GFS с использованием увеличенного объема данных наблюдений. Для задания источников выбросов использовалась база антропогенных выбросов HTAP-2 [3], эмиссии метана были дополнены из базы EDGAR V. 4.3.2 с пространственным разрешением 0,1°x0,1° и разрешением по времени 1 месяц. Мощность источников задавалась постоянной без учета внутри суточной и недельной динамики выбросов. Источники эмиссии задавались в приземном слое.

Эмиссии от пожаров – FINN v1.5 [4]. Эмиссии от болот задавались постоянными значениями, с использованием результатов обратного моделирования МАСС II для 2013. Начальные и граничные условия для химических веществ задавались с использованием результатов расчетов глобальной модели WACCM [<https://www.acom.ucar.edu/waccm/download.shtml>]. Параметризации используемые в модели Wrf-Chem: микрофизика — Morrison; длинноволновая радиация – RRTM; коротковолновая радиация — Dudhia; приземный слой – Rev. MM5; модель поверхности — Noah; пограничный планетарный слой – Yonsei Univ.; параметризация облачности – Grell 3D. Код модуля считывания эмиссий WRF-Chem был модернизирован, что позволило считывать эмиссии метана от пожаров и биоэмиссий. При проведении расчетов использовался химический механизм MOZART 4 совместно с аэрозольным механизмом MOZAIC. Химический блок модели использует 85 веществ, 157 реакций, и 39 – фотохимических. Аэрозольный блок позволяет проводить расчеты для 4 диапазонов размеров.

Для верификации полученных результатов моделирования использовались данные измерений выполненные на TOR-станции и Обсерватории “Фоновая” ИОА СО РАН. TOR-станция расположена в фоновом районе города Томска на территории Томского научного центра (56°28'41" с.ш., 85°03'15" в.д., 133 м. над уровнем моря). Обсерватория “Фоновая” ИОА СО РАН, расположена в фоновом районе Томской области (56°25' с.ш., 84°04' в.д., 80 м. над уровнем моря, <http://lop.iao.ru>). Для измерения концентрации малых газовых и аэрозольных составляющих атмосферы использовались следующие приборы: “ОПТЭК” 3.01-П - для измерения озона (O3); “ОПТЭК” К-100 - угарного газа (CO); “ОПТЭК” С-310 - сернистый ангидрид (SO2), Thermo Scientific Model 42i (NO, NO2), Teledyne 200e (NO, NO2).

Для оценки вклада эмиссий от пожаров в концентрацию малых газовых и аэрозольных составляющих атмосферы было выполнено два прогона модели. Первый прогон модели был выполнен с использованием всех эмиссий (на рисунке он обозначается «all»). Для второго прогона эмиссии от пожаров были отключены (на рисунке он обозначается «abw»).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис.1 представлен временной ход концентрации SO₂ для TOR-станции (tor) и обсерватории “Фоновая” (fon). Модельные данные качественно воспроизводят ход концентрации. Однако наблюдается систематическая ошибка в 1.5 ppb (модель демонстрирует заниженные значения). Однако для первого события модель воспроизводит концентрацию SO₂ только для 14 числа. Для второго события модель воспроизводит тренд концентрации. Отметим, что модель воспроизводит пик концентрации 23 числа, а в данных он наблюдается 22.

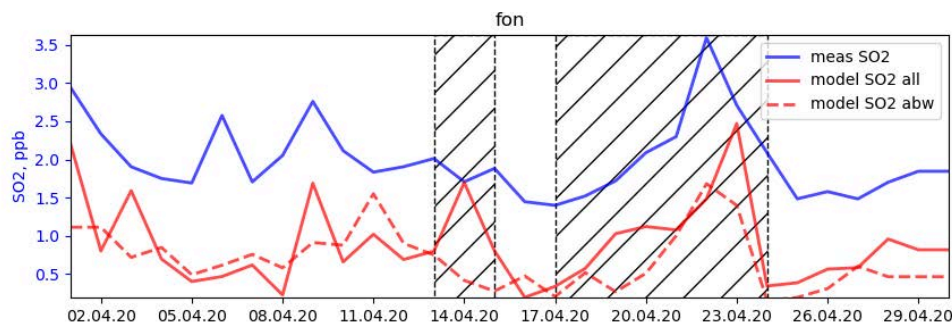


Рис. 1. Временной ход концентрации SO_2 для обсерватории «Фоновая». Штриховой линией выделены рассматриваемые события. Данные измерений - синяя линия, результаты моделирования - красная.

Для TOR-станции модель воспроизвела среднее значение концентрации NO (рисунок не представлен): модельные данные показали максимум 14 числа, который наблюдался, однако, амплитуда его была занижена. Также модель воспроизвела наличие максимума 23 числа, но в данных измерений он не был зафиксирован. Отметим, что данный максимум проявился при включении эмиссий от пожаров.

Сравнение результатов моделирования NO_2 с данными измерений демонстрирует иную картину. Для фоновой станции (рис.2) показано, что модель в целом восстанавливает ход концентрации, но демонстрирует ложный пик 14 числа. Во втором эпизоде модель восстанавливает рост среднесуточной концентрации, однако дает завышенные значения.

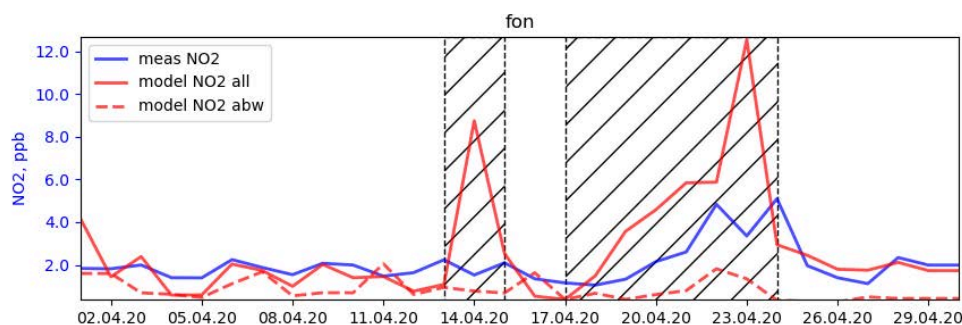


Рис. 2. Временной ход концентрации NO_2 для обсерватории «Фоновая» (а).

Для TOR-станции (рис.3) модель отразила рост концентрации во время первого эпизода, однако он был сдвинут по времени относительно данных измерений. Результаты расчетов хорошо согласуются с ростом концентрации зафиксированном для второго эпизода, однако модель дала резкий выброс который отсутствовал в результатах измерений.

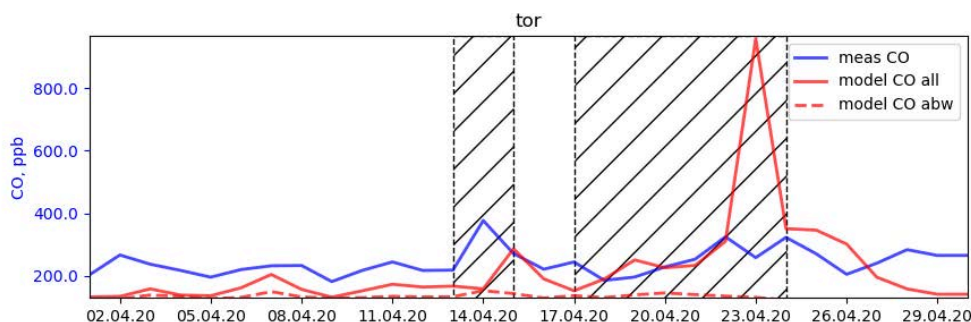


Рис. 3. Временной ход концентрации CO для обсерватории «Фоновая» (а) и TOR-станции (б).

Анализ результатов расчетов для озона отразил рост концентрации во время второго эпизода (рисунок не представлен). Причем при использовании эмиссий от пожаров модельная динамика концентрации качественно воспроизвела результаты наблюдений. Однако максимум концентрации был сдвинут на сутки. Для городских условий восстановление хода концентрации озона было менее выражено для второго эпизода.

Модельная счетная концентрация аэрозоля демонстрирует рост во время второго эпизода для фоновой станции (рис. Не приводится). Воспроизводится один максимум 23 числа, тогда как в данных измерений наблюдалась два максимума 22 и 24 числа. Также модель зафиксировала максимум в конце первого эпизода, однако в данных наблюдений он не был зарегистрирован. Для городской станции (рис.4) модель отразила максимум во время первого эпизода, однако он был сдвинут по времени. Для второго эпизода модель, как и для фоновой станции, продемонстрировала два максимума вместо наблюдавшегося одного максимума.

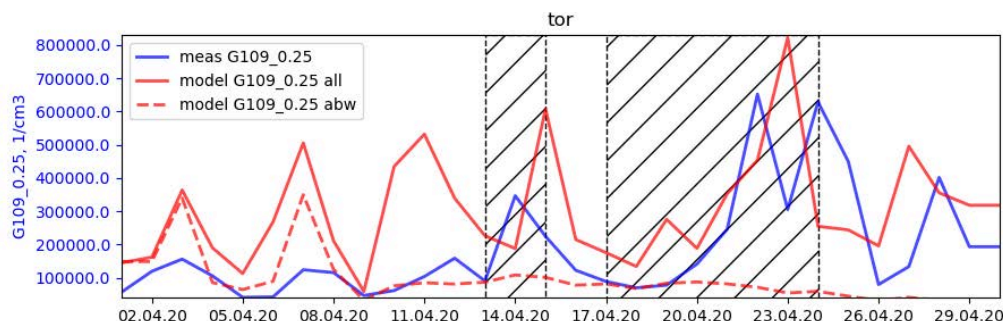


Рис. 4. Временной ход счетной концентрации аэрозоля для TOR-станции (б) $d > 0.25$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модель воспроизводит рост концентрации CO и аэрозоля для TOR-станции для первого эпизода. Для второго эпизода модель воспроизводила рост концентрации для всех рассматриваемых составляющих, однако для NO он отсутствует в измерениях. Рост концентрации для озона был слабо выражен, по сравнению с данными измерений. Эмиссиями от пожаров была обусловлена основная изменчивость счетной концентрации аэрозоля, CO, для обеих станций и SO₂ для фоновой станции. В остальных случаях превалировал суммарный вклад остальных эмиссий. Для более детального исследования необходимо определить районы, которые оказывали наибольшее влияние на посты измерений, например можно использовать методику [5].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 19-05-50024, № 18-45-700020 p_a.
Поддержка используемого оборудования для измерения газового состава осуществляется в рамках государственного задания (номер госрегистрации AAAA-A17-117021310142-5).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Grell G.A. Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations // *Monthly Weather Review*. 1993. № 3 (121). С. 764–787.
2. Commerce S.D. of, National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U. NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999 [Electronic resource] // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. The Royal Society, 2000. URL: <https://doi.org/10.5065/D6M043C6>.
3. Janssens-Maenhout G. et al. HTAP_v2.2: a mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015. № 19 (15). С. 11411–11432.
4. Wiedinmyer C. et al. The Fire INventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning // *Geoscientific Model Development*. 2011. № 3 (4). С. 625–641.
5. Alexey Penenko Convergence analysis of the adjoint ensemble method in inverse source problems for advection-diffusion-reaction models with image-type measurements // *Inverse Problems and Imaging*. 2020. V. 14(5). (in press).

Pollen in winter precipitation in the south of Western Siberia

¹Kuryatnikova N.A., ²Malygina N.S., ²Mitrofanova E.Yu.

¹Altai State University, Barnaul, Russia

²Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia

E-mail: ryabchinnatalia@gmail.com, natmgn@gmail.com, emit@iwep.ru

Pollen grains are actively used as an additional tool in paleoclimatic and paleoecological reconstructions of environmental conditions [1, 2, 3, 4]. This use of pollen grains can be explained by the seasonal distribution, good preservation (pollen has a sporopropylene shell), and a direct relationship with meteorological parameters, which makes it possible to distinguish between seasonal changes in the pollen spectrum (Fang et al., 2018). The morphological features of pollen grains (large sizes up to 100 microns and the presence of air sacs) allow them to be transported over considerable distances, which must be taken into account during paleoclimatic and paleoecological reconstructions. However, the study of the transfer and deposition of pollen grains with precipitation (especially in the cold period) in view of their seasonal distribution, unfortunately, is still not given due attention.

Samples of solid precipitation (snow) were taken during the cold period at a key area located in the steppe zone of the Altai Territory (south of Western Siberia). Samples were thawed at room temperature in tightly closed plastic containers. Melt water was defended in a cool dark place for 7-10 days. After settling, the samples were concentrated by decantation. Prepared samples were viewed using a light microscope at a magnification of 400 times. During microscopy, a 0.2 ml Najotte counting chamber was used.

Pollen grains of woody (*Pinus sp.*, *Betula sp.*) and grassy (*Artemisia sp.*, Family *Asteraceae*, *Chenopodiaceae*, *Poaceae*) taxa were found in snow samples. Certain pollen grains belong to anemophilous plants and are of an advective nature.

To determine the territories from which pollen grains came, frequency inverse trajectories of the HYSPLIT air masses were constructed for the height of the atmospheric boundary layer and lasting 120 hours. Additional verification of the constructed trajectories was carried out using snow cover distribution maps, baric topography maps, and wind direction and speed maps. As a result of the integrated use of the methods, areas from whose territories pollen grains with precipitation were received were determined. The pollen grains of *Artemisia sp.* came from the territory of the Turan plain.

The reported study was funded by RFBR, project number 19-35-90078

REFERENCES:

1. Nakazawa F., Konya K., Kadota T. et al. Depositional and summer snow melting features in 2007–2011 on the upstream side of Potanin Glacier, Mongolian Altai, reconstructed by pollen and oxygen isotope analysis // *Environmental Earth Sciences*. – 2015. – V.74(3). – P. 1851-1859
2. Papina T.S., Blyakharchuk T.A., Eichler A. et al. Biological proxies recorded in a Belukha ice core, Russian Altai // *Climate of the Past*. – 2013. – V.9(5). – P. 2399-2411
3. Festi D., Carturan L., Kofler W. et al. Linking pollen deposition and snow accumulation on the Alto dell'Ortles glacier (South Tyrol, Italy) for sub-seasonal dating of a firn temperate core // *Cryosphere*. – 2011. – V. 11(2). – P. 937-948
4. Zaky A., Kachima K., Frontalini F. et al. Mid-to Late Holocene paleoclimatic changes and paleoenvironmental shifts inferred from pollen and diatom assemblages at Lake Hamra, Wadi El Natrun (Western Nile Delta, North Western Desert, Egypt) // *Quaternary International*. – 2020. – V.542. – P.109-120.

Пыльцевые зерна в зимних атмосферных осадках юга Западной Сибири

¹Курятникова Н.А., ²Малыгина Н.С., ²Митрофанова Е.Ю.

¹Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

²Институт водных экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

E-mail: ryabchinnatalia@gmail.com, natmgn@gmail.com, emit@iwep.ru

Пыльцевые зерна в последнее время активно используются в качестве дополнительного инструмента при палеоклиматических и палеоэкологических реконструкциях состояний окружающей среды [1, 2, 3, 4]. Такое применение пыльцевых зерен можно объяснить их хорошей устойчивостью к

изменениям условий окружающей среды – пыльца имеет оболочку из споропропилена (способствующей их сохранности) и прямой взаимосвязью с метеорологическими параметрами, что позволяет различать сезонные изменения пыльцевого спектра [5]. Поступая главным образом из биосферы, пыльцевые частицы, попадая в атмосферу, активно участвуют в процессах нуклеации, что способствует формированию атмосферных осадков и оказывает влияние на изменения метеорологических параметров [6, 7]. Кроме того, морфологические особенности пыльцевых зерен (крупные размеры – до 100 мкм и наличие воздушных мешков) позволяют им переноситься в атмосфере на значительные расстояния, что необходимо учитывать при палеоклиматических и палеоэкологических реконструкциях. Однако, изучению переноса и осаждения пыльцевых зерен с атмосферными осадками (особенно в холодный период) в виду их сезонного характера распространения, к сожалению, все еще не уделяется должного внимания.

Пробы твердых атмосферных осадков (снег) отбирали в цилиндрические пробоотборники на ключевом участке, расположенном в степной зоне Алтайского края в течение холодного периода 2019/20 гг. (с ноября 2019 г. по март 2020 г.). За холодный период принят временной интервал, когда атмосферные осадки выпадали в твердом виде, т.е. в виде снега. Необходимо отметить, что дата установления пробоотборника была выбрана согласно прогнозу начала формирования устойчивого снежного покрова, который является лимитирующим фактором и ограничивает вторичный подъем пыльцевых зерен с земной поверхности. Всего за период наблюдения было отобрано 39 проб твердых атмосферных осадков. После окончания выпадения атмосферных осадков, отобранные пробы таяли при комнатной температуре в плотно закрытых пластиковых контейнерах. В талую воду добавляли 40% формалин с целью сокращения развития микрофлоры и отстаивали в темном прохладном месте в течение 7-10 дней в зависимости от объема. После отстаивания пробы концентрировали методом декантации. В дальнейшем подготовленные образцы просматривали с помощью светового микроскопа при увеличении в 400 раз. В ходе микроскопирования использовали счетную камеру Нажотта объемом 0,2 мл. Для идентификации видовой принадлежности использовали атласы [8, 9, 10, 11], а также международные базы данных [12, 13].

В результате микроскопирования в пробах твердых атмосферных осадков, отобранных в течение холодного периода 2019/20 гг. были определены пыльцевые зерна древесных и травянистых таксонов (рис.1).

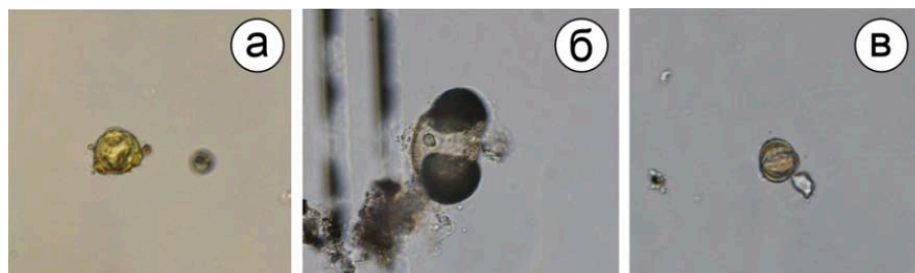


Рис. 1. Микрофотографии идентифицированных пыльцевых зерен (а) *Betula* sp.; (б) *Pinus* sp.; (в) *Asteraceae*.

Травянистые таксоны представлены (*Artemisia* sp., сем. *Asteraceae*, *Chenopodiaceae*, *Poaceae*) и составляют 51% от общего сезонного спектра. Наибольшая концентрация среди травянистых приходится на представителей сем. *Chenopodiaceae* – 26% от общего спектра, которые были выделены в три первых месяца холодного периода (рис. 2 а, б). Наименьший показатель частоты встречаемости принадлежит пыльце сем. *Poaceae* – 5% и *Artemisia* sp. – 5%. Пыльца *Artemisia* sp. была найдена только в пробах, отобранных в декабре. Пыльца сем. *Asteraceae* составляет 15% от общего спектра и была выявлена в пробах, отобранных в первые месяцы холодного периода – ноябре и декабре.

Среди древесных, составляющих 49% общего спектра и представленных только двумя таксонами (*Betula* sp., *Pinus* sp.) преобладала пыльца сосны (*Pinus* sp.) – 39% от общего спектра, определенная в пробах, отобранных в ноябре и январе (рис. 2 а, б). Пыльцевые зерна березы (*Betula* sp.) составляют 10% от общего спектра и были выделены в пробах ноября, января и февраля. Все пыльцевые зерна, интерпретированные в пробах, принадлежат анемофильным растениям, пыльца которых имеет ряд морфологических особенностей (наличие воздушных мешков, гладкая экзина/поверхность) (Сафатова, 2013), что позволяет им переноситься на значительные расстояния. В этой связи можно предположить, что идентифицированные пыльцевые зерна в пробах холодного периода имели адвективный характер. Согласно анализу карт распространения снежного покрова [14] территория отбора проб, а также сопредельные с ней территории (в радиусе 500 км) были покрыты устойчивым снежным покровом, который является лимитирующим фактором и ограничивает вторичный подъем пыльцевых зерен.

Для определения территорий, с которых, возможно, поступали пыльцевые зерна, идентифицированные в пробах, были рассчитаны HYSPLIT моделью частотные обратные траектории движения воз-



Рис. 2. Таксономическое разнообразие в пыльцевом спектре
(а) распределение таксона по месяцам; б) вклад таксона в общий спектр.

душных масс [15]. Необходимо отметить, что данный график отражает количество проходов траекторий в каждой ячейки сетки. Траектории рассчитывались продолжительностью 120 часов, что равняется средней продолжительности естественного синоптического периода для территории исследования, а высота рассчитываемых траекторий соответствовала высоте пограничного слоя атмосферы по данным, полученным с помощью ERA5 [16].

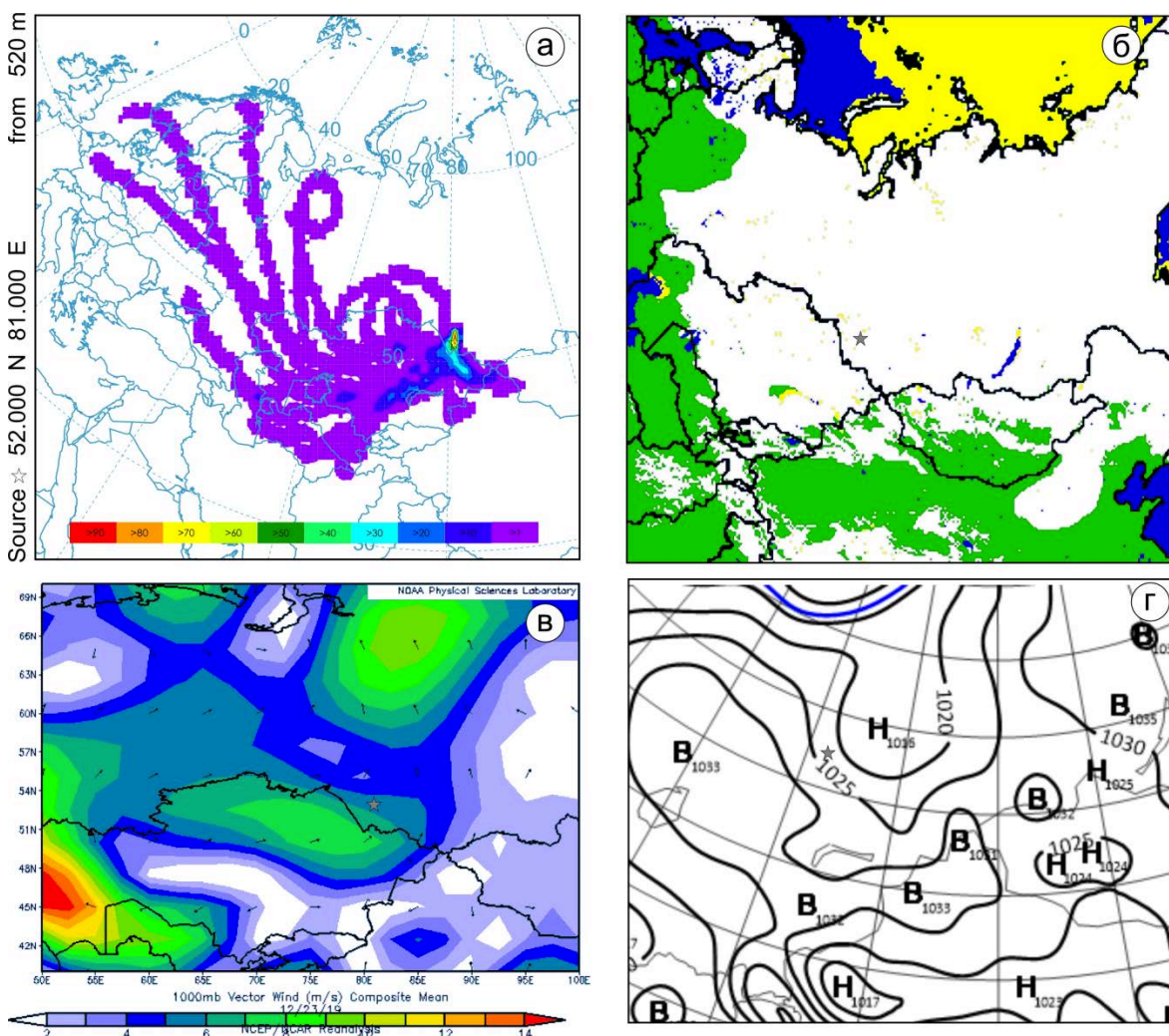


Рис. 3. Частотные обратные траектории движения воздушных масс (а), карта распространения снежного покрова (б); направления и скорости ветра (в) (звездочка – место отбора проб); карты барической топографии P00 (г) (звездочка – место отбора проб).

Так, согласно рассчитанным траекториям (рис. 2 а), пыльцевые зерна *Artemisia sp.* выделенные в пробах декабря с вероятностью более 30% поступали с территорий Туранской равнины.

Анализ карт распространения снежного покрова (рис. 2 б) показал, что территории, над которыми формировались воздушные массы, были свободны от снежного покрова, что способствовало вторичному подъему пыльцевых зерен под действием восходящих потоков воздушных масс и дальнейшему переносу на значительные расстояния. Дополнительно были проанализированы направления ветра (рис. 2 в), отражающие средние скорости (м/с) и направленность ветра на высоте 1000 мб [17], которые так же показали, что на дату выпадения осадков и предшествующие ей дни преобладали ветра юго-западного направления. Анализ карт барической топографии показал [18] (рис. 2 г), что над территориями Туранской равнины формировались восходящие потоки воздушных масс, которые способствовали вторичному подъему пыльцевых зерен с территорий свободных от снежного покрова.

Таким образом, комплексное использование частотных траекторий HYSPLIT для высоты пограничного слоя атмосферы и продолжительностью 120 часов с использованием карт барической топографии, данных реанализа NCEP/NCAR, карт распространения снежного покрова и ареалов распространения идентифицированных таксонов позволяет достоверно определять районы с территорий которых поступают пыльцевые зерна с атмосферными осадками.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90078

ЛИТЕРАТУРА:

1. Nakazawa F., Konya K., Kadota T. et al. Depositional and summer snow melting features in 2007–2011 on the upstream side of Potanin Glacier, Mongolian Altai, reconstructed by pollen and oxygen isotope analysis // *Environmental Earth Sciences*. – 2015. – V.74(3). – P. 1851-1859
2. Papina T.S., Blyakharchuk T.A., Eichler A. et al. Biological proxies recorded in a Belukha ice core, Russian Altai // *Climate of the Past*. – 2013. – V.9(5). – P. 2399-2411
3. Festi D., Carturan L., Kofler W. et al. Linking pollen deposition and snow accumulation on the Alto dell'Ortles glacier (South Tyrol, Italy) for sub-seasonal dating of a firn temperate core // *Cryosphere*. – 2011. – V. 11(2). – P. 937-948
4. Zaky A., Kachima K., Frontalini F. et al. Mid-to Late Holocene paleoclimatic changes and paleoenvironmental shifts inferred from pollen and diatom assemblages at Lake Hamra, Wadi El Natrun (Western Nile Delta, North Western Desert, Egypt) // *Quaternary International*. – 2020. – V.542. – P.109-120.
5. Fang, Y., Ma C., Bunting M. et al. Airborne Pollen Concentration in Nanjing, Eastern China, and its Relationship With Meteorological Factors // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2018. – V. 123(19). – P. 10842-10856
6. Despres V.R., Huffman J.A., Burrows S.M. et al. Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review // *Tellus B*. – 2012. – V. 64. – P. 15598.
7. Huffman J., Perring A.E., Savage N.J. et al. Real-time sensing of bioaerosols: Review and current perspectives // *Aerosol Science and Technology*. 2019. P. 1-56.
8. Куприянова Л.А., Алешина Л.А. Пыльца и споры растений флоры СССР. – 1972. – Т.1. – 171 с.
9. Куприянова Л.А., Алешина Л.А. Пыльца и споры двудольных растений флоры европейской части СССР. – 1978. – Т.1. – 174 с.
10. Дзюба О.Ф. Атлас пыльцевых зерен (неацетоллизированных и ацетоллизированных), наиболее часто встречающихся в воздушном бассейне Восточной Европы. – 2005. – 70 с.
11. Карпович И.В., Дребезгина Е.С., Еловикова Е.Н. и др. Атлас пыльцевых зерен. – 2015. – 318 с.
12. Palynological Database. URL: <https://www.paladat.org/search/A> (Дата обращения: 14.06.2020)
13. Pollen Atlas. URL: <https://pollenatlas.net/homepage> (Дата обращения: 14.06.2020)
14. U.S. National Ice Center. URL: <https://www.natice.noaa.gov/index.html> (Дата обращения: 14.06.2020)
15. Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory. URL: <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php> (дата обращения: 14.06.2020).
16. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (Дата обращения: 14.06.2020)
17. Physical Sciences Laboratory URL: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (Дата обращения: 14.06.2020)
18. Арктический и антарктический научно-исследовательский институт. URL: <http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=2> (Дата обращения: 14.06.2020).

Microplastic in snow cover of south Western Siberia

¹Malygina N.S., ¹Biryukov R.Yu., ¹Zolotov D.V., ¹Kuryatnikova N.A., ¹Mitrofanova E.Yu.,
^{1,2}Pershin D.K., ^{1,3}Chernykh D.V.

¹Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³Altai State University, Barnaul, Russia

E-mail: natmgn@gmail.com

Plastics production is growing all over the world including Russia, but the volume of plastic emissions (unprocessed, recycled or buried) unfortunately is not reducing. In the external environment, plastics degrade over time that leads to the appearance of smaller particles or fibers, which are referred to microplastics at a size of less than 5 mm. Microplastics can be released to the ambience at all stages of the life cycle of plastic products and have already been detected in almost all environments. Atmospheric transfer is one of the main ways of microplastics entering the environment. At the same time, atmospheric precipitation (in the form of rain and snow) promotes the deposition of microplastics on the underlying surface and their particles can act as condensation nuclei. In this regard, snow cover is considered as an accumulator of atmospheric scavengings of microplastics including in urban areas. The purpose of this study is to identify microplastics in the snow cover (accumulator of atmospheric scavengings during the cold period) of south of Western Siberia (Barnaul city and adjacent territories), as well as a preliminary assessment of possible sources of their supply.

Snow samples were taken during the period of maximum snow accumulation according to the requirements developed by the Norwegian Institute for Air Research. As soon as they arrived at the laboratory, the samples melted at room temperature in foil-sealed glass containers, and then filtered through fiberglass filters. The microparticles were visually evaluated using a digital microscope Dino-Lite AM211. In addition, we used a fluorescent dye (Nile Red) solution that has already been successfully applied to identify microplastics, as well as a Wood lamp (wavelength 360 nm). The Principal Component Analysis was used to differentiate the results obtained. All basic GIS analysis operations and layout originals of maps were performed in ESRI ArcGIS Pro 2.5.0. ERA5 reanalysis and HYSPLIT were used to assess the possible atmospheric propagation of microparticles. Microscopic analysis showed that microplastics (namely films, fibers, and granules) were detected in 16 of the 18 snow samples.

Микропластик в снежном покрове юга Западной Сибири

¹Малыгина Н.С., ¹Бирюков Р.Ю., ¹Золотов Д.В., ¹Курятникова Н.А., ¹Митрофанова Е.Ю.,
^{1,2}Першин Д.К., ^{1,3}Черных Д.В.

¹Институт водных экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

²Московский государственный университет им М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

E-mail: natmgn@gmail.com

Производство пластмасс увеличивается во всем мире, включая Россию, однако объемы выбросов (не переработанного, утилизированного или захороненного) пластика, к сожалению, не снижаются [1, 2]. Со временем, во внешней среде, пластик деградирует, что приводит к появлению более мелких частиц или волокон пластика, которые при размере менее 5 мм относят к вторичному микропластику [3, 4]. В окружающую среду микропластик может поступать на всех этапах жизненного цикла изделий из пластмасс и к настоящему времени уже обнаружен практически во всех средах [5, 6]. Среди основных каналов поступления микропластика в окружающую среду в последнее время выделяют атмосферный перенос, при этом атмосферные осадки (в виде дождя и снега) способствуют осаждению микропластика на подстилающую поверхность и его частицы могут выступать в качестве ядер конденсации [4, 7-9]. В этой связи снежный покров рассматривают в качестве аккумулятора атмосферных вымываний микропластика, в том числе и в городских районах, однако, метеорологические условия не всегда являются определяющими в поступлении микропластика в окружающую среду, зачастую уступая место влиянию локальных источников его поступления [10].

Исследований, посвященных изучению микропластика в снежном покрове, включая урбанизированные районы, в России до настоящего времени не проводилось, в этой связи, целью настоящей работы является идентификация микропластика в снежном покрове (аккумуляторе атмосферных вымыва-

ний в течении холодного периода) юга Западной Сибири, в частности, в городе Барнауле и прилегающих к нему территориях.

Пробы снега отбирали в период максимального снегонакопления (1 марта 2020 г.) с соблюдением требований, разработанных в Норвежском институте по исследованию воздуха [11]. По мере поступления в лабораторию пробы снега таяли при комнатной температуре в закрытых фольгой стеклянных контейнерах, а затем фильтровали через стекловолоконные фильтры (диаметр пор 0,2 мкм). Визуальную оценку микрочастиц осуществляли с использованием цифрового микроскопа Dino-Lite AM211, и дополнительно использовали раствор флуоресцентного красителя (Nile Red), который уже успешно применяется для идентификации микропластика, а также как лампу Вуда (длина волны 360 нм) [12, 13]. Все основные операции ГИС-анализа и компоновка оригинал-макетов карт были выполнены в среде ESRI ArcGIS Pro 2.5.0. Для оценки возможного атмосферного распространения и осаждения частиц проводили анализ синоптических условий холодного периода 2019-2020 гг. в районе г. Барнаула, на основе данных ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF) [14], а обратные траектории движения воздушных масс рассчитывали с помощью модели Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory – HYSPLIT [15].

В ходе проведения визуальной идентификации с использованием цифрового микроскопа Dino-Lite AM211 в пробах было обнаружено большое количество разнообразных частиц имеющих разнообразную форму и окраску (рис. 1).



Рис. 1. Разнообразные частицы, волокна, остатки животных и растений из проб снежного покрова отобранных в 12 (а), 13 (б), 8 (в) точках.

На следующем этапе флуоресцентным красителем Nile Red окрашивали фильтры с 18 точек отбора и проводилось их повторное микроскопирование с фотофиксацией результатов как при обычном, так и при ультрафиолетовом освещении. Следует отметить, что не все частицы вступили в реакцию с красителем, видимую в ультрафиолете, т.е. приобрели свечение (рис. 2). Отсутствие свечения у окрашенных частиц и волокон указывало на то, что они не относятся к пластику.

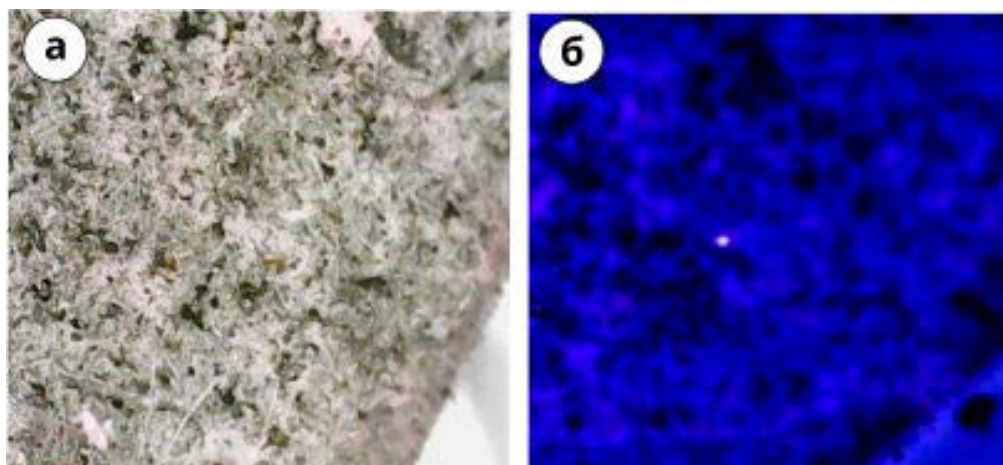


Рис. 2. Окрашенный Nile Red фильтр при обычном (а) и ультрафиолетовом освещении и частица микропластика (б) в пробе с точки 8.

Таким образом, в фильтрах, полученных для 16 точек (рис. 3), нам удалось идентифицировать частицы и волокна микропластика. Идентифицированные гранулы микропластика имели диаметр в диапазоне от 100 до 600 мкм, в то время как волокна и пленки достигали длины 1200 мкм. В двух фильтрах (точки № 12 и 13) ни одно из включений не дало свечения, т.е. не было определено ни одной частицы микропластика.

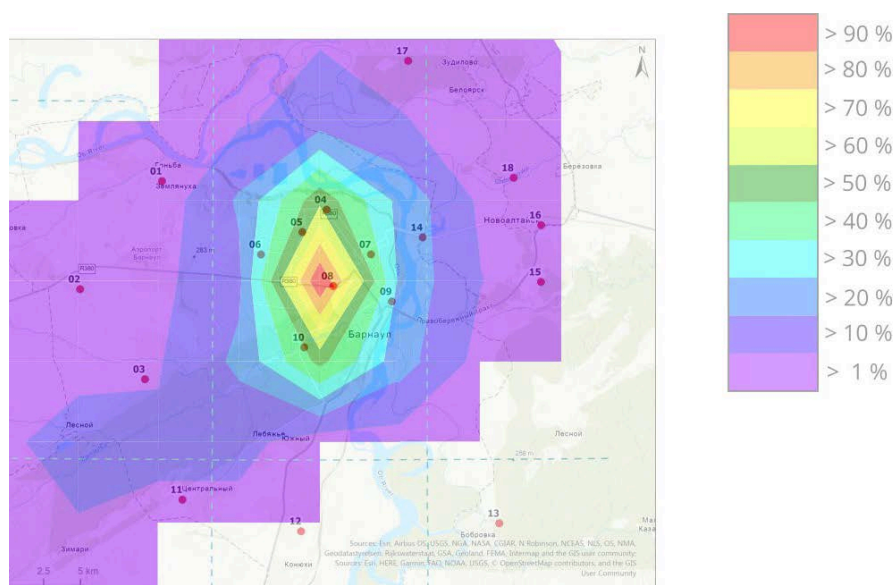


Рис. 3. Точки отбора проб в г. Барнауле и прилегающих территориях и частотные обратные траектории движения воздушных масс, рассчитанные в HYSPLIT [15] (февраля 2020 г.).

В целях оценки атмосферного поступления микропластика на высотах пограничного слоя атмосферы по данным ERA5 в HYSPLIT были рассчитаны среднесеasonные частотные обратные траектории движения воздушных масс (рис. 3). Полученные результаты показали, что для 16 точек в которых был определен микропластик, основные источники его атмосферного поступления располагались в радиусе 30 км.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50055.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Россия в цифрах. – М: Росстат, 2019. – 549 с.
2. Law Production, use, and fate of all plastics ever made / R. Geyer, J.R. Jambeck, K.L. // *Science Advances*. – 2017. – V. 3. – P. 1-5.
3. Russell Lost at sea: where does all the plastic go? / R.C. Thompson, Y. Olsen, R.P. Mitchell, A. Davis, S.J. Rowland, A.W.G. John, D. McGonigle, A.E. // *Science*. – 2004. – V. 304. – P. 838.
4. Kershaw P.J., Rochman C.M. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part two of a global assessment. – *GESAMP*, 2016. – 220 p.
5. Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions / H.S. Auta, C.U. Emenike, S.H. Fauziah // *Environment International*. – 2017. – V. 102. – P. 165-176.
6. Identifying a quick and efficient method of removing organic matter without damaging microplastic samples / J.C. Prata, J.P. da Costa, A.V. Girão, I. Lopes, A.C. Duarte, T. Rocha-Santos // *Science of the Total Environment*. – 2019. – V. 686. – P. 131-139.
7. Consistent transport of terrestrial microplastics to the ocean through atmosphere / K. Liu, T. Wu, X. Wang, Z. Song, C. Zong, N. Wei, D. Li // *Environmental Science & Technology*. – 2019. – V. 53. – P. 10616-10619.
8. Importance of atmospheric transport for microplastics deposited in remote areas / Y. Zhang, T. Gao, S. Kang, M. Sillanpää // *Environmental Pollution*. – 2019. – V. 254. – P. 295-303.
9. Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris / R. Dris, C.J. Gasperi, A.V. Rocher, B.M. Saad, N. Renault, B. Tassin // *Environmental Pollution*. – 2019. – V. 254. – P. 229-237.
10. Bertling J., Bertling R., Hamman L. Kunststoffe in der Umwelt: mikro- und makroplastik. – Dresden: UMSICHT, 2018. – 56 p.
11. Ask A., Anker-Nilssen T., Herzke D., Trevail A., Franeker J.A., Gabrielsen G. W. Contaminants in northern fulmars (*Fulmarus glacialis*) exposed to plastic. Copenhagen: TemaNord, 2016. – 49 p.
12. Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan city, China: preliminary research and first evidence / L. Cai, J. Wang, J. Peng, Z. Tan, Z. Zhan, X. Tan, Q. Chen // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2017. – V. 24. – P. 24928-24935.

13. Nile red staining in microplastic analysis—proposal for a reliable and fast identification approach for large microplastics / E. Hengstmann, E. K. Fischer // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2019. – V. 191. – P. 612- 620.
14. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (дата обращения: 07.06.2020).
15. Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory. URL: <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php> (дата обращения: 14.06.2020).

Study of fast methane variations on the Arctic coast during summer-autumn period on ground-based and satellite measurements

Starodubtsev V.S., Solovyev V.S.

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia
E-mail: starodubjr@mail.ysn.ru

Over the past two and a half centuries, total methane content in the Earth's atmosphere has more than doubled [1]. The global warming potential of methane is 20 times greater than that of carbon dioxide, considering that, monitoring and studying the properties of methane are one of the urgent tasks of modern ecology.

This paper presents a study of methane concentration variations on the Arctic coast of Alaska, according to Barrow station data (1986-2018), and remote sensing data (AIRS radiometer, Aqua satellite). Analysis of the seasonal variation of methane showed that in the off-season (summer-autumn) at station Barrow quite often there are sharp jumps (increases) in methane concentration with amplitudes exceeding the background by ~5% and lasting from several / tens of hours to several days. Similar events were mainly observed from June to November. It is logical to assume that this behavior of methane in summer and autumn, when methane content in the atmosphere above the northern seas is on average lower than over land, is due to the dynamics of north and south winds at the observation point (Barrow station). Studies were conducted of the dependence of methane concentration on the direction of wind, that showing significant jumps in methane concentration at the station were recorded with wind blowing from the land. In case of wind from the north, methane values generally corresponded to an unperturbed / background level.

Analysis of monthly averaged distribution maps of methane concentration, based on satellite data, showed that in winter, at high latitudes, methane values above the land surface and northern seas do not differ significantly. However, in summer-autumn period, the concentration of methane over land is much higher than over the seas. Additional calculations of the trajectories of air mass movements in study area also confirmed the assumption that rapid increases in methane concentration in the summer-autumn period at station Barrow, located on the Arctic coast, is caused by the transfer from the landside of the air masses with a high methane content.

Исследование быстрых вариаций метана на арктическом побережье в летне-осенний период по наземным и спутниковым данным

Стародубцев В.С., Соловьев В.С.

Институт космифизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия
E-mail: starodubjr@mail.ysn.ru

ВВЕДЕНИЕ

Эффекты глобального изменения климата, вызванного повышением содержания в атмосфере парниковых газов (CH₄, CO₂ и др.), наиболее заметны на высоких широтах, в арктической зоне, где темпы роста температуры в два раза превышают средние по Земному шару [2]. Рост температуры оказывает разрушительное действие на вечную мерзлоту, содержащую в большом количестве (по приблизитель-

ным оценкам не менее 1400 Гт метана [3]) парниковые газы CH_4 , CO_2 , и, соответственно, повышает эмиссию метана из почвы.

По сравнению с основным парниковым газом – диоксидом углерода, уровень концентрации метана в атмосфере значительно ниже, но по потенциалу глобального потепления метан более чем в двадцать раз [4] превышает аналогичный показатель CO_2 . Таким образом, выброс в атмосферу метана в результате деградации вечной мерзлоты повысит темпы нагрева атмосферы. Это обстоятельство определяет актуальность исследований метана в арктической зоне, результатам которых посвящен ряд публикаций [5-10].

Целью данной работы является исследование особенностей быстрых вариаций концентрации атмосферного метана на арктическом побережье по данным наземных и спутниковых наблюдений.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе использованы данные станции Барроу ($71^\circ 36'$ с.ш., $156^\circ 6'$ з.д.), расположенной в 500 км к северу от полярного круга (Рис. 16). Данные станции размещены в открытом доступе на интернет-ресурсе (ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg). Местность вблизи станции характеризуется отсутствием крупных инфраструктурных объектов, а также низкой плотностью населения, что существенно снижает уровень антропогенного влияния на результаты наблюдений.

Измерения метана на ст. Барроу проводятся в непрерывном режиме с 1986 г. Для измерения концентрации газовых компонент используется пламенно-ионизационный спектрограф. Данные имеют среднечасовой формат представления, даты и время указаны в формате UTC.

Среднечасовые данные по направлению и скорости ветра были взяты с интернет-ресурса, находящегося в открытом доступе, по следующей ссылке https://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/data/index.php?parameter_name=Meteorology&site=BRW.

Кроме наземных измерений, в работе использованы данные орбитального дифракционного спектрометра AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), записывающего спектры атмосферного поглощения инфракрасного излучения Земли в спектральном диапазоне от 3,75 до 15,4 мкм, который находится на борту спутника AQUA. В настоящей статье использовался продукт AIRX3STM, представляющий собой карты среднечасового распределения метана с разрешением 1×1 град. (только ascending траектории), доступные по URL-ссылке <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>.

Трассировка путей переноса воздушных масс была построена с помощью модели HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model), которой можно свободно пользоваться через web-интерфейс по URL-адресу <https://www.ready.noaa.gov/hypub-bin/trajtype.pl?runtype=archive>.

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате анализа набора наземных данных измерений метана с 1986 по 2018 гг. был выделен период июнь-ноябрь, в течение которого чаще наблюдались резкие скачки (повышения) значений концентрации метана со следующими признаками:

- резкому повышению CH_4 предшествовал спокойный, невозмущенный период в течение не менее трех суток;
- амплитуда скачка CH_4 превышала невозмущенные значения на $\sim > 5\%$;
- длительность отдельных скачков повышений концентрации метана составляла от нескольких/десятков часов до нескольких суток;
- после внезапных повышений метана наблюдался спокойный период длительностью не менее трех суток.

Пример одного из множества рассматриваемых событий с резким повышением концентрации метана представлен на рис. 1а, из которого следует, что в течение 7-12 августа 2010 г. концентрация метана оставалась на невозмущенном фоновом уровне. Начиная с 13 по 17 августа, наблюдаются несколько резких скачков концентрации с высокими амплитудами. После 17 августа концентрация метана снижается до невозмущенных значений и сохраняется на данном уровне в течение нескольких суток.

При помощи модели HYSPLIT были построены траектории переноса воздушных масс в течение двух суток, предшествующих отмеченным стрелками (рис. 1б) датам. Результаты трассировки представлены на рис. 1б. Временной интервал между точками траектории соответствует одному часу. Траектории синего цвета (№1, №2) соответствуют невозмущенным значениям концентрации метана – 10 и 12 августа, а «красные» траектории (№3-6) – резким скачкам значений концентрации 13-15 и 16 августа, соответственно.

Как следует из рис. 1б, «синие» траектории (№1 и №2) полностью находятся в акватории моря Бофорта. Траектория красного цвета №3, хотя и берет свое начало в море Бофорта, но последние $\sim 1,5$ суток проходит через сушу. Остальные траектории (№4-6) полностью или преимущественно лежат в пределах суши. Таким образом, временной ход концентрации метана, представленный на рис. 1а, вероятнее всего объясняется характером ветровой динамики: ветры, приходящие со стороны суши, приносят воз-

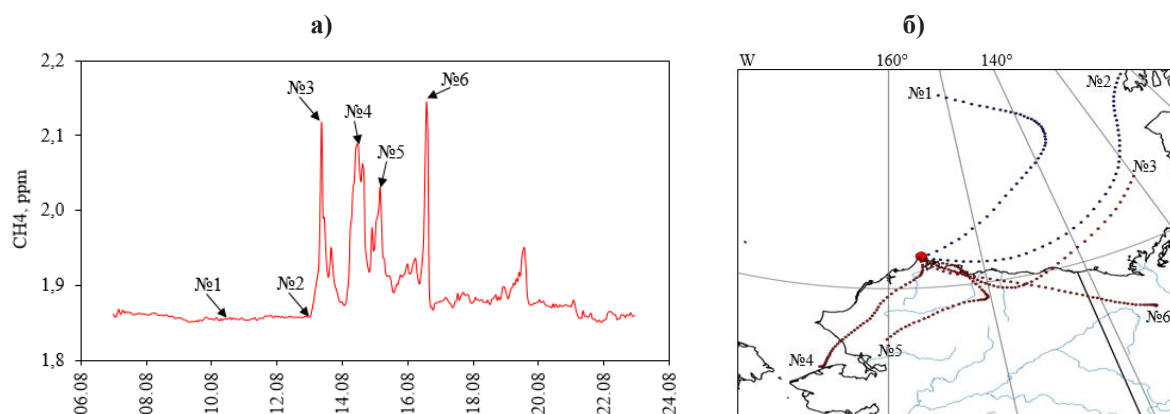


Рис. 1. а) вариации концентрации метана на ст. Барроу 7-22 августа 2010 г; б) построенные по модели HYSPLIT траектории переноса воздушных масс для соответствующих временным меткам дат.

душные массы с высоким содержанием метана и тогда на ст. Барроу регистрируется резкое его повышение, а ветер с севера – воздух с низкой концентрацией CH_4 и, соответственно, содержание метана опускается до невозмущенных значений.

На рис. 2 представлены зависимости концентрации метана (красные маркеры) и скорости ветра (синие маркеры) от азимута ветра в периоды декабрь-май и июнь-ноябрь, усреднённые за весь период наблюдений (1986-2018 гг.). Направлению ветра, дующего с суши, соответствует азимутальный сектор 80-280 град., остальные направления относятся к ветрам, дующим с акватории северных морей (Борфорта и Чукотского). Следует отметить характерную для арктического побережья ветровую динамику – ветры с северных морей в среднем имеют заметно большую амплитуду по сравнению с южными ветрами.

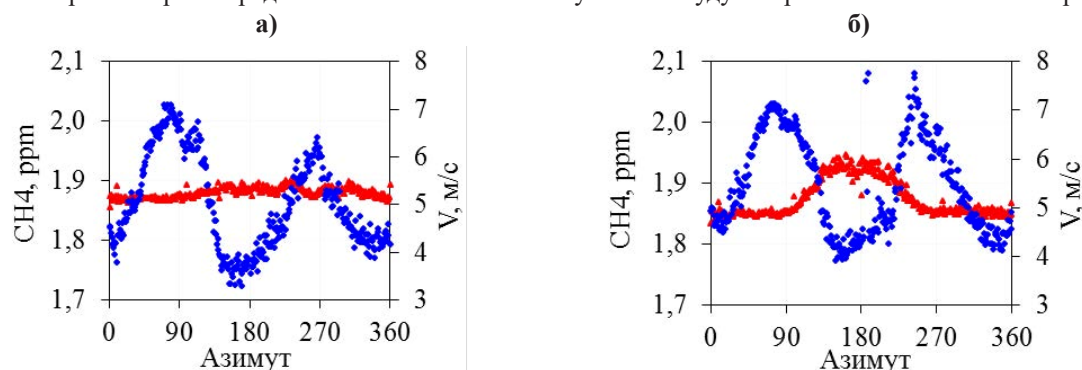


Рис. 2. Зависимость концентрации метана (красные маркеры) и скорости ветра (синие маркеры) от азимута: а) декабрь-май, б) июнь-ноябрь 1986 – 2018 гг.

Как видно на графике (Рис. 2а) уровень концентрации метана в декабре-мае не зависит от направления (азимута) ветра. Тогда как рис. 2б показывает, что в июне-ноябре для азимутального сектора суши наблюдаются заметно более высокие значения метана ($\sim >5\%$), по сравнению с азимутами ветров, дующих со стороны северных морей. Следовательно, можно предположить, что южные ветры приносят в точку наблюдения воздушные массы с высокой концентрацией метана, а ветры с морей – с низким содержанием метана.

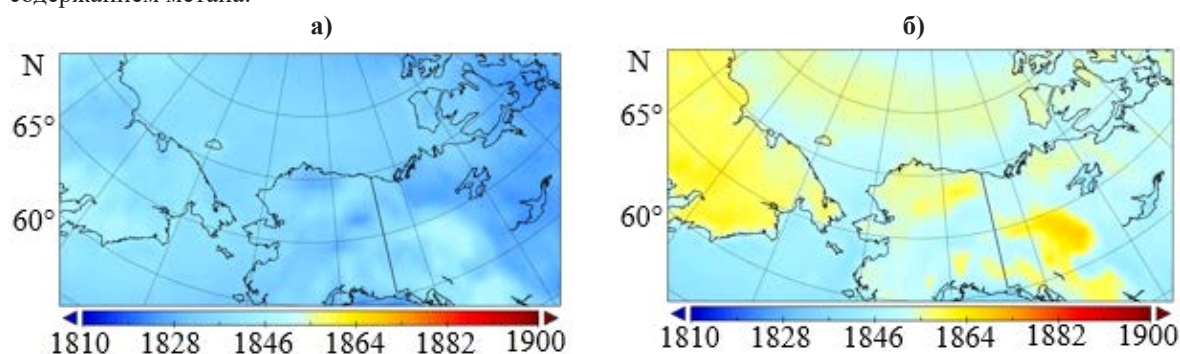


Рис. 3. Усредненные за 2003-2018 гг. карты распределения концентрации метана (единицы измерения, ppbv) на высоте 400 гПа: а) декабрь-май и б) июнь-ноябрь.

На рис. 3 представлены усредненные за 2003-2018 гг. карты распределения концентрации метана на высоте 400 гПа где, соответственно, а) распределение в декабре-мае, а б) – в июне-ноябре, построенные по данным радиометра AIRS, установленного на спутнике AQUA. Продукт AIRX3STM предоставляет возможность строить карты на разных барических высотах. Выбор использованной в настоящей работе высоты 400 гПа обусловлен рекомендациями, представленными в работах [10,11], где измерения метана на уровне 400-500 гПа (~ 6-7 км) представляются наиболее достоверными для арктической зоны.

В зимне-весеннее время, как следует из рис. 3а, заметного различия в содержании метана над сушей и водной поверхностью не наблюдается. Напротив, в период июнь-ноябрь (рис. 3б) содержание метана над сушей заметно превышает его содержание над водной поверхностью; отчетливо наблюдается граница раздела областей с высоким и низким содержанием метана, проходящая по береговой линии. Особенности картины распределения метана объясняются балансом механизмов истока (биогенные источники) и стока (окисление CH_4 свободными радикалами OH) в указанные выше времена года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа особенностей поведения метана на арктическом побережье по данным ст. Барроу (1986-2018 гг.) были сделаны следующие выводы:

- На фоне сезонного хода в летне-осенний период (чаще июнь-ноябрь) нередко наблюдаются резкие повышения концентрации метана значительно ($\sim > 5\%$), превышающие фоновый уровень, и длительностью от нескольких/десятков часов до нескольких суток;
- Подобные вариации метана в летне-осенний период на станции Барроу, расположенной на арктическом побережье, объясняются ветровым режимом в окрестностях станции наблюдения: южные ветры с суши приносят воздушные массы с повышенным содержанием метана (на станции наблюдения регистрируется резкое повышение концентрации метана), тогда как ветры с акватории северных морей – с пониженным, и уровень метана на станции снижается до невозмущенных значений.

Спутниковые наблюдения хорошо согласуются с результатами, полученными по наземным данным, и подтверждают вывод о ветровом режиме.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Анисимов О.А., Анохин Ю.А. и др. *Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме.* - ГУ "НИЦ "Планета // ГУ "НИЦ "Планета", 2008. – 28 с.
2. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, *Second Assessment Report: Climate Change* // Cambridge University Press, 1995. – P. 1-572.
3. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Kosmach D. *Anomalies of methane in the atmosphere over the East Siberian shelf: Is there any sign of methane leakage from shallow shelf hydrates?* // *Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2008, 10, EGU2008-A-01526*
4. Пачаури Р.К., Райзингер А. и основная группа авторов (ред.) МГЭИК: *Изменение климата: Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II, III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата* // МГЭИК, Женева, Швейцария, 2007. – 104 с.
5. Антонов К. Л., Поддубный В. А. и др. *Некоторые итоги мониторинга парниковых газов в арктическом регионе России* // *Арктика: экология и экономика* № 1 (29), 2018. – С. 56-67.
6. Киселев А.А., Решетников А.И. *Метан в Российской арктике: результаты наблюдений и расчетов* // *Проблемы Арктики и Антарктики*, № 2 (96), 2013. – С. 5-15.
7. Репина И.А., Аниферов А.А., Артамонов А.Ю. *Метан в атмосфере Арктики по данным дистанционного зондирования, приземных измерений и моделирования* // *Материалы III Международной научно-практической конференции "Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий"*, 2015. – С. 191-199.
8. Starodubtsev V.S., Soloviyev V.S. *Methane measurements at Polar Geocosmophysical Observatory "Tixie"* // *Proceedings of 2nd International conference «Global warming and the human-nature dimension in Siberia: social adaptation to the changes of the terrestrial ecosystem, with an emphasis on water environments» and 7th Annual International Workshop "C/H₂O/Energy balance and climate over boreal and arctic regions with special emphasis on eastern Eurasia"*, 2013. – P. 112-114.
9. Стародубцев В.С., Соловьев В.С. *Исследование вариаций метана в приземном слое воздуха по наблюдениям на ст. Тикси* // *Природопользование в Арктике: современное состояние и перспективы развития: сборник научных трудов I международной научно-практической конференции.* – Якутск: Издательство: Северо-Восточный Федеральный университет, 2015. – С. 533-541.

10. Репина И.А., Аниферов А.А., Артамонов А.Ю. Метан в атмосфере арктики по данным дистанционного зондирования, приземных измерений и моделирования // *Материалы III Международной научно-практической конференции. Геофизический центр Российской академии наук, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Управление по охране окружающей среды, природным ресурсам и чрезвычайным ситуациям Республики Адыгея, Майкопский государственный технологический университет*, 2015 – С. 191-199.
11. Xiaozhen Xiong, Chris Barnet, Eric Maddy, Colm Sweeney, Xingpin Liu, Lihang Zhou and Mitch Goldberg. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) // *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, 2008. – P. 1-14.
12. Юрганов Л.Н., Лейфер А., Лунд Майр К. Сезонная и межгодовая изменчивость атмосферного метана над морями Северного Ледовитого океана по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, Т. 13. № 2, 2016. – С. 107-119.

The role of weather and terrain in air pollution of Krasnoyarsk (Russia)

Tokarev A.V., Shaparev N.Ya., Yakubailik O.E.

Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
Federal Research Center SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
E-mail: tav@icm.krasn.ru

The sources of PM_{2.5} in the Earth's atmosphere are natural and anthropogenic processes. The former are caused by sand storms and volcanic eruptions. The latter are associated with the recovery, processing and burning of fossil fuels by heat and power generating plants, motor vehicles, stoves and also with forest and agricultural fires. Subsequent contamination of urban territories depends on daily and seasonal variations of weather conditions as well as on the terrain relief and affects certain areas in some cities and regions of various countries. According to the World Health Organization (WHO), about 7 million people died from air pollution worldwide in 2012. This is about twice as much as the previous estimates and confirms that air pollution nowadays is the world's largest environmental risk for human health.

This paper analyzes the influence of weather and terrain on the seasonal distribution of the surface concentration of PM_{2.5} in the atmosphere of the city of Krasnoyarsk in 2018-2019. To obtain the results, we used data on atmospheric pollution levels and weather conditions from automated observation posts at the RDIAS regional information and analytical system. Data processing and transmission was carried out through the Geoportal of the ICM SB RAS. This is a geographic information platform designed to create cartographic web applications and services, distributed information and analytical geographic information systems, web-GIS modules for third-party developments.

We carried out statistical analysis of variability of PM_{2.5} concentration depending on meteorological conditions: the wind speed and direction, atmospheric pressure, relative air humidity and temperature. Analysis of the statistical data shows that critical PM_{2.5} concentrations occur mostly under the following set of conditions:

- Wind speed of less than 1 m/s.
- Southeast wind direction.
- Air temperatures from -20°C to -30°C.
- Atmospheric pressure from 100 to 102.7 kPa.
- Relative humidity in the range of 70-80%.

Critical PM_{2.5} concentrations in 2018 were registered primarily in winter and were caused by the Siberian anticyclone with its typical meteorological conditions such as temperatures as low as -30°C, elevated atmospheric pressure up to 102 kPa, and the wind speed dropping below 1 m/s. Under such circumstances more fuel is burned, respectively, emissions into the atmosphere increase, but it is difficult to blow them out of the hollow in which the city is located. When there is no anticyclone, the wind blows predominantly from the south-west at a speed of up to 4-6 m/s and carries air pollutants away from the city basin. Critical PM_{2.5} concentrations were also recorded in mid-July. This was caused by the southeastern wind, which blocked particulate matter particles within the basin.

We have calculated the air quality index AQI and shown that particulate matter particles PM_{2.5} are the dominant component in AQI. It has been established that a daily average critical PM_{2.5} concentration of 35 µg/m³ corresponds to the category 'Moderate' for the AQI indicator.

Роль метеоусловий и рельефа местности в загрязнении атмосферы города Красноярска (Россия)

Токарев А.В., Шапарев Н.Я., Якубайлик О.Э.

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
E-mail: tav@icm.krasn.ru

Источниками $PM_{2.5}$ в атмосфере Земли являются природные и антропогенные процессы. Природные явления связаны с песчаными бурями и извержениями вулканов. Антропогенные процессы обусловлены добычей, переработкой и сжиганием природного сырья в теплоэлектростанциях, на транспорте, в печах отопления, а также лесными и сельскохозяйственными пожарами. Последующее загрязнение урбанизированных территорий зависит от суточного и сезонного изменения метеоусловий, а также рельефа местности и охватывает территории отдельных городов и регионов стран.

По данным Всемирной организацией здравоохранения в 2012 году от загрязнения воздуха во всем мире скончалось около 7 млн. человек [1], что примерно в 2 раза больше, чем показывали предыдущие оценки [2]. Это подтверждает тот факт, что загрязнение воздуха в настоящее время является крупнейшим в мире экологическим риском для здоровья человека.

В данной работе анализируется влияние метеоусловий и рельефа местности на сезонное распределение приземной концентрации $PM_{2.5}$ в атмосфере города Красноярска (Россия) в 2018-2019 гг. Мы используем данные с геопортала, разработанного нами, имеющего связь с региональной системой мониторинга метеоусловий (направление и скорость ветра, относительная влажность и температура воздуха, атмосферное давление) и концентрации частиц $PM_{2.5}$.

Город Красноярск находится на обеих сторонах реки Енисей и простирается вдоль течения на 25 км, а в поперечном направлении его размер около 10 км. Он расположен в удлиненной котловине, открытой с юго-восточной стороны. По данным 2018 года [3], Красноярск входит в приоритетный список из 20 городов России с наибольшим уровнем загрязнения атмосферы. Особенности рельефа территории г. Красноярска и местные климатические условия приводят к возникновению неблагоприятных метеорологических условий. В этой ситуации в атмосфере города увеличивается концентрация веществ, выбрасываемых стационарными промышленными предприятиями, автотранспортом и печами частных домов. Накопление взвешенных веществ в атмосфере приводит к возникновению смога над городом и ухудшению условий жизни населения, которое составляет около 1 млн. человек.

В г. Красноярске и его пригороде расположены 9 автоматизированных постов наблюдения (АПН): 1-Ветлужанка, 2-Покровка, 3-Северный, 4-Солнечный, 5-Кубеково, 6-Березовка, 7-Черемушки, 8-Кировский, 9-Свердловский (рис. 1). Последние 2 поста (8, 9) были введены в эксплуатацию в марте 2019 года. Посты выполняют автоматическое измерение метеорологических параметров и концентрацию загрязнений в атмосферном воздухе с периодом в 20 минут. Определяются такие загрязняющие вещества как: оксид азота, диоксид азота, диоксид серы, оксид углерода, и др. Данные передаются в информационно-аналитическую систему КВИАС [4]. В конце 2017 оборудование постов было модернизировано и добавился контроль взвешенных частиц $PM_{2.5}$. Для этого используются анализаторы пыли модели BAM-1020 (Met One Instruments Inc., США).

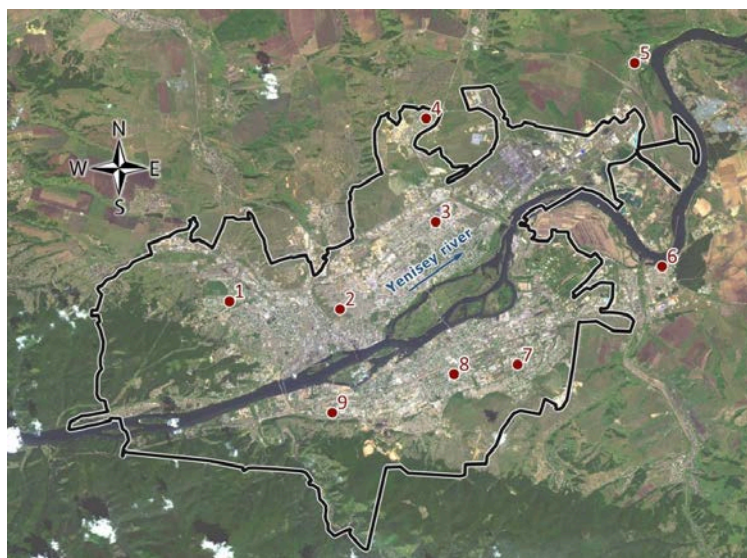


Рис. 1. Сеть мониторинга качества воздуха в г. Красноярске и его окрестностях, границы города показаны линией. Снимок Landsat от 10 июня 2016 г. (каналы 432 + PanSharpening), обработка данных выполнена авторами.

В Институте вычислительного моделирования (ИВМ СО РАН) авторами ведутся исследования и разработки программно-аппаратного обеспечения для мониторинга загрязнения атмосферы. Системообразующим ресурсом является Геопортал ИВМ СО РАН [5, 6]. Это геоинформационная платформа, предназначенная для создания картографических веб-приложений и сервисов, распределенных информационно-аналитических геоинформационных систем, веб-ГИС модулей для сторонних разработок. Пользовательский интерфейс геопортала – специализированный картографический веб-сайт, предоставляющий удаленный доступ к географическим пространственным данным и связанные с ним сервисы поиска, визуализации и редактирования.

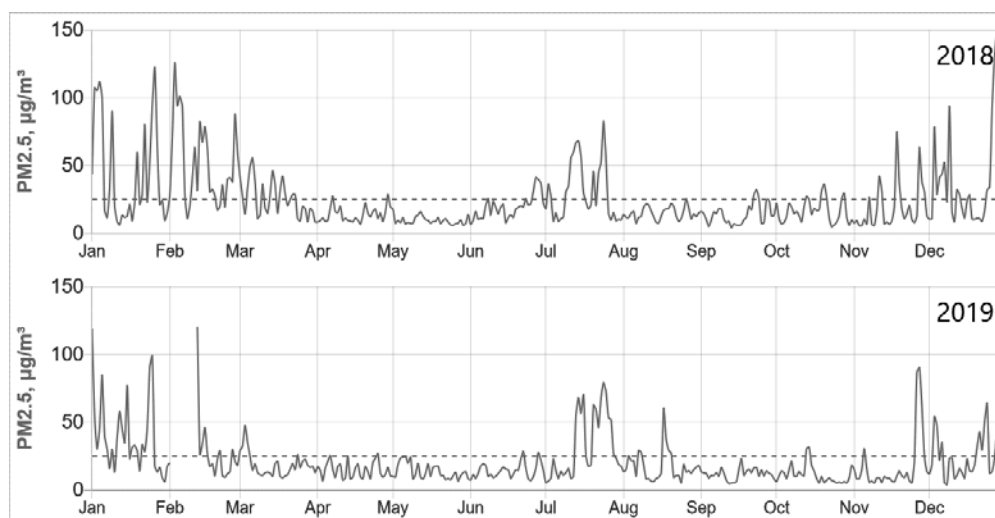


Рис. 2. Среднесуточные значения $PM_{2.5}$ за 2018 и 2019 годы, усредненные по всем постам наблюдений.

Для получения результатов использовались данные об уровне загрязнения атмосферы с автоматизированных постов наблюдения системы RDIAS за 2018-2019 годы. На рис. 2 представлены среднесуточные значения концентрации $PM_{2.5}$, усредненные по всем постам наблюдений. Пунктирной линией обозначен среднесуточный предельно допустимый уровень концентрации $PM_{2.5}$, установленный ВОЗ. Видно, что критические значения возникают с ноября по март и в июле. В 2018 году среднегодовое значение $PM_{2.5}$ составило $25.3 \mu g/m^3$, а в течение 110 дней (30%) было превышение ПДКсс (ВОЗ). В 2019 году среднегодовое значение $PM_{2.5}$ составило $20.5 \mu g/m^3$, а в течение 75 дней (20%) было превышение ПДКсс (ВОЗ). Среднегодовые значения $PM_{2.5}$ превышают нормативы ВОЗ, но остаются в пределах нормативов Российской Федерации.

Нами был выполнен статистический анализ зависимости величины $PM_{2.5}$ от метеоусловий: скорости ветра, направления ветра, атмосферного давления, относительной влажности и температуры воздуха. Анализ статистических данных показывает, что критические значения $PM_{2.5}$ устанавливаются в основном при комплексе следующих метеорологических данных:

- Скорости ветра менее 1 м/с.
- При юго-восточном направлении ветра.
- Температурах воздуха от $-20^{\circ}C$ до $-30^{\circ}C$.
- Давлении атмосферы от 100 до 102.7 кПа.
- Относительной влажности в диапазоне 70-80%.

Критические значения $PM_{2.5}$ возникали в 2018 году в основном зимой (рис. 2) и были обусловлены Сибирским антициклоном, которому свойственны следующие метеоусловия: температура понижается до $-30^{\circ}C$, атмосферное давление повышается до 102 кПа, скорость ветра падает ниже 1 м/с. В это время сжигается больше топлива, соответственно возрастают выбросы в атмосферу, но затруднено их выдувание из котловины, в которой расположен город. При отсутствии антициклона преобладающие юго-западные ветра выдувают выбросы через разрыв в горных цепях, находящийся в восточной части города.

В середине июля также возникли критические значения $PM_{2.5}$. Это было вызвано юго-восточным ветром, который не позволяет взвешенным частицам покидать котловину, затем ветер меняет направление на юго-западное и величина $PM_{2.5}$ уменьшается.

В июле 2019 года возникновения смога над городом было вызвано лесными пожарами на северных территориях Сибири (Красноярский край, Иркутская область, Республика Саха Якутия). И хотя расстояние до этих пожаров составляло несколько тысяч километров, глобальная циркуляция атмосферы принесла их последствия на территорию города. В осенний период 2019 года было слабое повышение концентрации $PM_{2.5}$ (16 сентября и 13 октября), вызванное слабым юго-восточным ветром.

Нами также выполнен расчет показателя качества воздуха AQI [7] и показано, что определяющим компонентом в его значении являются взвешенные частицы $PM_{2.5}$. Выявлено, что среднесуточное критическое значение $PM_{2.5}$ равное $35 \mu g/m^3$ соответствует категории Moderate для показателя AQI. В зимние месяцы и в июле значения индекса попадают в категорию Unhealthy for Sensitive Groups, в эту же категорию попадают февральские среднесеasonные данные. В остальные месяцы состояние атмосферы соответствует категории Moderate.

Правительство Российской Федерации утвердило комплексные планы мероприятий по снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в рамках федерального проекта "Чистый воздух" национального проекта "Экология" [8]. Общий объем финансирования реализации плана в Красноярске составит 68,69 млрд рублей. Из них почти 20 млрд рублей заложено на мероприятия по снижению выбросов от транспорта, 1,7 млрд рублей на модернизацию промышленных предприятий. На снижение выбросов от предприятий теплоэнергетики и частного сектора будет затрачено 46,5 млрд рублей. Комплексный план предполагает снос аварийных домов с печным отоплением, замещение малоэффективных угольных котельных, совершенствование системы мониторинга состояния атмосферного воздуха, регионального экологического надзора, создание лесопаркового зеленого пояса города. По программе к 2024 году объем выбросов загрязняющих веществ в Красноярске планируется уменьшить на 22,33% (или на 42,58 тысяч тонн).

Однако основным путем улучшения качества атмосферного воздуха в Красноярске является переход с каменноугольного топлива на газовое. В Красноярском крае согласована генеральная схема газоснабжения и газификации региона [9]. Предлагаются 3 сценария реализации проекта: в первом предусматривается строительство газопровода от собственных месторождений Красноярского края (83,8 млрд руб.), во втором и третьем – от газопроводов Томской (52,1 млрд. руб.) и Кемеровской областей (48,8 млрд. руб.). Однако до 2023 года заложена реализация только подготовительных мероприятий.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Burden of disease from the joint effects of Household and Ambient Air Pollution for 2012*. WHO: Geneva. 2014.
2. *Global Health Risks*. World Health Organization: Geneva. 2009.
3. *О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году*. М.: Минприроды России; НПП Кадастр. 2018. 888 с.
4. *Подсистема мониторинга загрязнения атмосферного воздуха [Электронный ресурс]*: URL: <http://krasecology.ru/Air> (дата обращения: 20.02.2020).
5. Shaparev N., Tokarev A., Yakubailik O., Soldatov A., 2018. *Web technologies for rapid assessment of pollution of the atmosphere of the industrial city*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 363. 012034. doi: 10.1088/1757-899X/363/1/012034.
6. Yakubailik O.E., Kadochnikov A.A., Tokarev A.V., 2018. *WEB Geographic Information System and the Hardware and Software Ensuring Rapid Assessment of Air Pollution*. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing 54(3). pp 243–249. doi: 10.3103/S8756699018030056.
7. *Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI)*. U.S. Environmental Protection Agency. 2016.
8. *Паспорт национального проекта «Экология»* (утвержден президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 24 декабря 2018 № 16). 2018. URL: <http://government.ru/info/35569/>.
9. *Паспорт государственной программы «Энергоэффективность и развитие энергетики»*. 2019. URL: <http://www.krskstate.ru/government/gosprogrammy/0/id/32037>.

Анализ газового и аэрозольного состава атмосферы в фоновых и городских условиях Западной Сибири для аномально теплого апреля 2020

Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Россия, Томск
E-mail: apn@iao.ru

Апрель 2020 года был вторым аномально жарким (первый в 2016) для планеты Земля. Глобальная аномалия температуры составила 1.06 °C [<https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202004>]. Наиболее выраженные аномалии температуры были характерны для Западной Сибири, где среднемесячная температура превышала норму в среднем на 5 °C, а в северных районах Западной Сибири на 10-12°C. По данным отделов Росгидромета для Западной Сибири апрель 2020 был уже не вторым, а первым самым жарким апрелем [<https://ria.ru/20200420/1570277368.html>]. Анализируется влияние аномальных условий температуры и атмосферной циркуляции в апреле 2020 на формирование газового и аэрозольного состава на юге Западной Сибири. Данные измерений состава атмосферы получены на основе мониторинга проводимого ИОА СО РАН в фоновых (станция Фоновая) и городских (TOR станция) условиях на юге Томской области. Для анализа циркуляции атмосферы использованы данные реанализа NCEP/NCAR Reanalysis 1, индекс блокирования GHGS (градиент геопотенциала), карты PV-Θ, а также модель HYSPLIT.

Выделены два эпизода повышения концентрации газов и аэрозоля для рассматриваемых станций. Событие 1-ое: 13-15 апреля с максимумом 14 апреля. Обе станции находились в пределах единого с точки зрения циркуляции атмосферы региона. Для обеих станций были характерны переносы с восточных регионов Сибири (север Иркутской области). На картах поля геопотенциала на 500 гПа в области исследуемых регионов находилась барическая седловина. Для TOR станции среднесуточная температура была значительно выше. Разница температур для районов в единой циркуляционной зоне составила 3.4°C. Повышение концентрации было характерно только для TOR станции для концентраций аэрозоля, а также NO, NO₂, CO, CO₂. Вероятной причиной различий газового и аэрозольного состава может быть мезомасштабные циркуляционные условия, а также влияние городской территории.

Событие 2-ое: 17-24 апреля с максимумом 23 апреля. В первую очередь отмечено изменение концентрации озона для обеих станций. Синхронное изменение также характерно для аэрозольной концентрации. Для обеих станций зафиксирован рост CO и CO₂. Однако для TOR станции первый эпизод был более выражен в увеличении концентрации CO и CO₂. Кроме того, мы отметили, что для рассматриваемого случая только для фоновых условий было характерно увеличение NO и NO₂, более того было также выражено увеличение концентрации SO₂. Циркуляционные условия характеризовались преобладанием меридиональной формы циркуляции с развитием гребней высокого давления в средней атмосфере, воздушные массы с южных районов (Казахстан) поступали на всю территорию юга Западной Сибири. Вторым важным фактором, характеризовавшим условия рассматриваемого периода, является наличие большого количества очагов пожаров.

The formation of the gases and aerosol composition in the background and urban location of Western Siberia: a case study for the record-breaking hot April 2020

Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Kozlov A.V., Savkin D.E., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia
E-mail: apn@iao.ru

INTRODUCTION

The study of changes in gases and aerosols composition during the period of observed climatic changes is necessary. There are many feedbacks associated with the chemical composition of the atmosphere and climate

system. One of the exciting aspects of this matter is the study of the influence of extreme episodes associated with atmospheric circulation and changes in surface temperature. April 2020 was the second abnormally hot (the first in 2016) for our planet. The global temperature anomaly was 1.06°C [<https://www.climate.gov/news-features/featured-images/april-2020-another-month-%E2%80%99s-second-warmest-record>]. The most pronounced temperature anomalies were characteristic of Western Siberia, where the average monthly temperature exceeded the norm by an average of 5°C, and in the northern regions of Western Siberia by 10-12°C. According to the Russian weather services departments for western Siberia, April 2020 was the first hottest April [<https://ria.ru/20200420/1570277368.html>]. In the present work, we discuss the observed changes in the gas and aerosol composition during an abnormally warm April; analyze the circulation patterns associated with the transfer of air masses, as well as the formation of atmospheric blocking conditions. The relevance of the study is connected both with the unusual weather conditions of April 2020, and with the fact that mainly the influence of circulation on the formation of the gas and aerosol composition of the atmosphere was considered for the winter and summer periods [1,2], and to a lesser extent during transitional seasons.

DATA AND METHODS

The gases and aerosols concentration for April 2020 have been derived from the Tropospheric ozone research station (TOR-station) [3] and Fonovaya station (FON-station) [4]. TOR and FON stations are located in suburban (Tomsk, 56°28'41"N., 85°03'15" E) and background areas (Kireyewsk, 56°21'50"N., 84°05'28" E) respectively. We used daily chemical composition and temperature data.

Meteorological data used in this study are from the NCEP/NCAR Reanalysis 1 [5]. The advantage of the NCEP/NCAR Reanalysis is its data uploading with a three-day lag to the current date. The spatial and temporal resolution is 2.5×2.5 and 12 UTC. In this work, to clarify the period and position of blocking events, we use a GHGS (geopotential height – gradient south) criterion that is developed in works [6-8]. We use GHGS with the fixed blocking latitude (ϕ_{fix}) and flexible blocking latitude (ϕ_{flex}) according to [9].

$$GHGS = \frac{Z(\phi_0) - Z(\phi_s)}{\phi_0 - \phi_s},$$

Where Z is the 500 hPa geopotential height, for ϕ_{fix} : $\phi_0 = 60^\circ \text{ N} \pm \Delta$, $\phi_s = 40^\circ \text{ N} \pm \Delta$, for ϕ_{flex} : $\phi_0 = 70^\circ \text{ N} \pm \Delta$, $\phi_s = 50^\circ \text{ N} \pm \Delta$ (for Western Siberia). Unlike in [6,7], we took the following values for Δ : $\Delta = -5^\circ, -2.5^\circ, 0^\circ, 2.5^\circ$ or 5° , which were first offered for use in [8].

For clarifying the origins of air masses advected to Western Siberia, we also used the potential temperature on the dynamic tropopause (PV- θ) [<http://weather.utah.edu/index.php?t=gfs0.25&r=NH&d=TT>]. According to [10], PV- θ is a perfect candidate to study the synoptic development of blocking as it is materially conserved in time, providing an excellent tracer for the air masses contributing to blocking formation, and can be inverted to give the balanced component of the flow. Also, the reversal of the meridional gradient PV- θ is associated with Rossby wave-breaking [13]. Also, for analysis of the general direction of air masses, we utilized the HYSPLIT model [<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>].

We used the daily data of hotspots (forest fire position) from Worldview [<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>]

RESULT

Fig. 1 shows the gases and aerosols concentration in April 2020, the surface temperature measured in TOR station, GHGS blocking conditions.

According to fig. 1, two episodes of an increase in the concentration of gases and aerosol for the stations can be distinguished (indicated by gray bars in the figure). Let's consider both episodes in detail.

Event 1st: April 13-15, with a maximum of April 14. Increases in concentration were characteristic of the suburban area for concentrations of aerosol, as well as NO, NO₂, CO, CO₂. A study of the circulation and temperature features on April 14 demonstrated several points that could understand the reason for the differences. Both stations were within a single region for atmospheric circulation (the trajectory calculations also confirm this performed using HYSPLIT, Fig. Not shown). Both stations were characterized by transfers from the eastern regions of Siberia (north of the Irkutsk region). Studied areas there were in a baric saddle according to the maps of the 500 hPa geopotential. However, an extremely curious fact is that the temperature difference for the regions in the single circulation zone was 3.4 °C. For the suburban area, the daily average temperature was significantly higher. The likely cause of differences in gas and aerosol composition may be mesoscale circulation conditions, as well as the influence of the urban area.

Event 2nd: April 17-24 with a maximum of April 23. First of all, attention is drawn to the change in ozone concentration for both stations (The O₃ was almost two times higher than average for 2009-2018 April for Fonovaya station). Synchronous change is also characteristic of aerosol concentration. It can be seen that the CO / CO₂ ratio increased for both stations; however, for the episode under consideration, it was more significant in the background. For the TOR station, the first episode was more pronounced in an increase in the concentration of CO and CO₂. Besides, we noted that for the case of the second event only for background

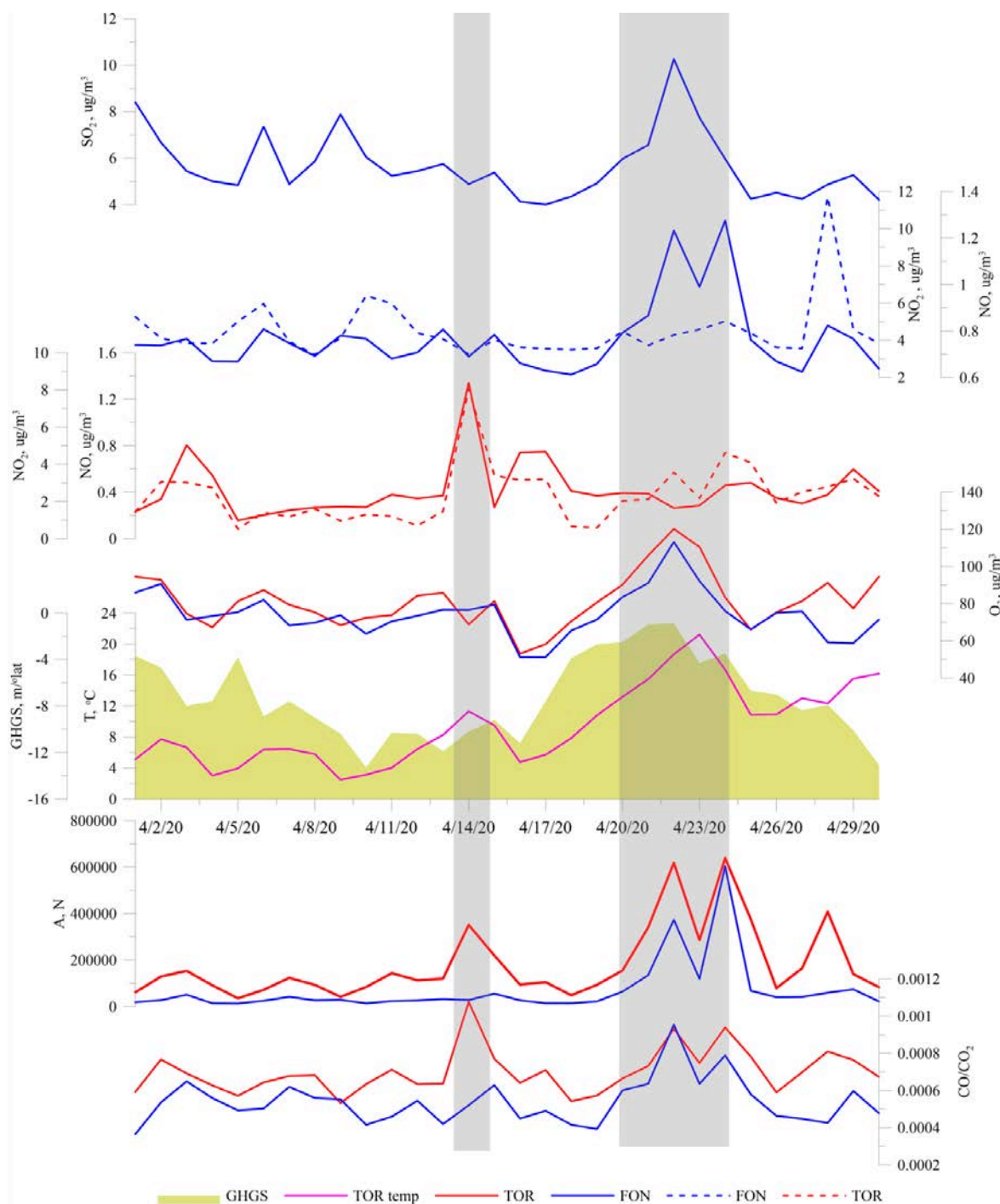


Figure 1. GHGS indexes of blocking, surface temperature (T) for TOR station, gases (CO - carbon oxide, CO₂ carbon dioxide, O₃ - ozone, SO₂ - Sulphur dioxide, NO_x - nitrogen oxides) and aerosol (A) (for TOR 0,25mkm, for FON 0,30 mkm) concentration in April 2020. Data for FON station: 10m level, daily.

conditions, an increase in NO and NO₂ was characterized. Moreover, an increase in the concentration of SO₂ was also expressed. The predominance of the meridional form with the development of high-pressure ridges for the circulation in the middle atmosphere was characterized. Air masses from the southern regions (Kazakhstan) [<http://weather.utah.edu/index.php?t=gfs0.25&r=NH&d=TT>] transport throughout the south of Western Siberia. The transport of air masses from the industrial areas of Kazakhstan is confirmed by the calculated background trajectories (Fig. 2a). The second important factor characterizing the conditions of the period under consideration is the presence of a large number of fire sources (Fig. 2b). The territory of TOR station is more subject to smoke from fires.

Thus, we can formulate two main hypotheses about the increase in gas and aerosol composition in the background and suburban conditions in the second episode of April 2020:

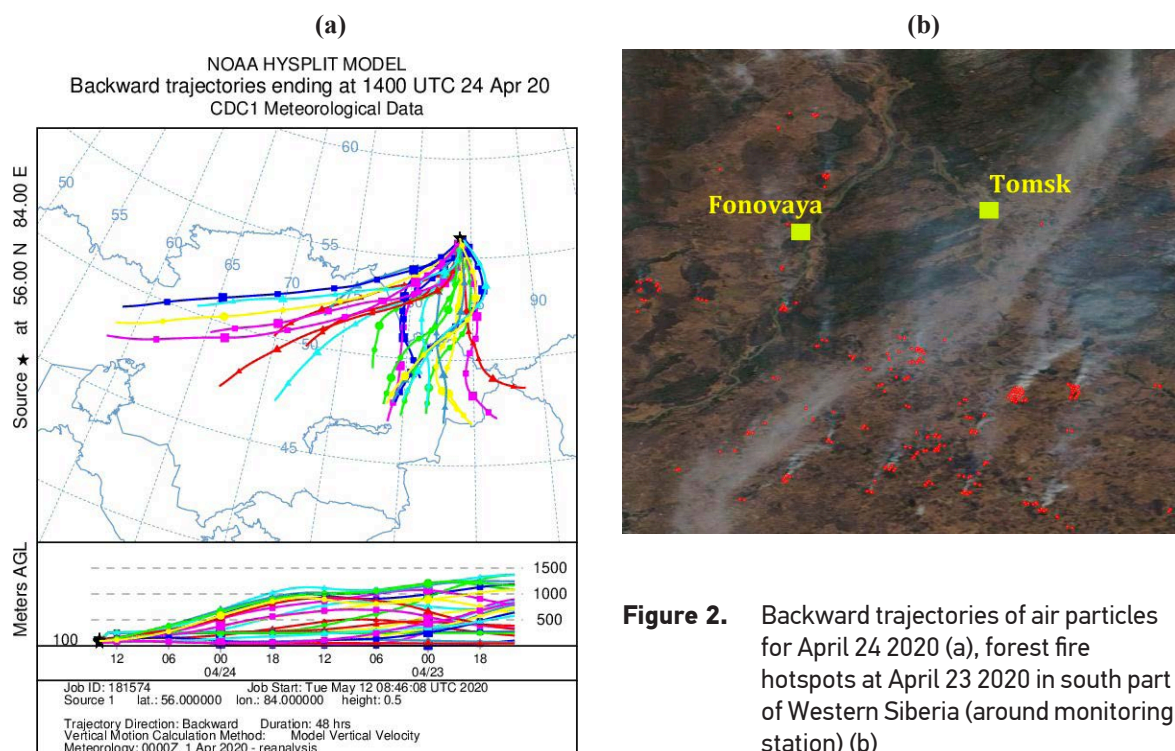


Figure 2. Backward trajectories of air particles for April 24 2020 (a), forest fire hotspots at April 23 2020 in south part of Western Siberia (around monitoring station) (b)

- the role of transfer from the industrial centers of northern Kazakhstan. The case under consideration for changes in ozone concentration is similar to that considered previously [11]. The previous paper showed the likelihood of a significant influence of the transfer of additional sources of ozone and its precursors from the southern regions of Kazakhstan for cases of three or more times the increase in the average daily MPC of ozone. So, all cases of three or more times exceeding the ozone MPC at the TOR station coincided with an increase in meridional transport from Kazakhstan and a simultaneous increase in surface temperature. The case under consideration in terms of the nature of changes in ozone concentration, surface temperature, and GHGS index entirely coincides with those considered in Savkin et al. 2017.

- the role of smoke plumes. Changes in the concentration of CO and CO₂ confirm the part of the effect of fires.

CONCLUSIONS

For the second episode of the increase in gases and aerosols composition, it can be necessary to figure out the ratio of different pollution sources (transboundary pollution transport and forest fire plume). The superposition of some sources was obvious. The influence of long-range pollution transfer is evidenced by an increase in ozone concentration, similar to earlier cases. Also, the features of concentration growth: for example, SO₂ - an increase is characteristic only for the background station where the effects of the plumes from fires are less pronounced. For suburban conditions, the effect of transboundary transport of SO₂ and NO₂ is not expressed. However, the role of fires may also be more significant.

This research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grants no. 19-05-50024). Support for the equipment used to measure gas composition (including CCU "Atmosphere") is carried out as part by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (budget funds for IAO SB RAS) (state registration number AAAA-A17-117021310142-5)

REFERENCES:

1. Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Sklyadneva T.K., Fononov A.V., Sasakawa M., Machida T Impact of atmospheric blocking in Western Siberia on the change in methane concentration in the summer period 2017 *Optics of the Atmosphere and Ocean* 30(5) 393-403
2. Sitnov S A and Mokhov I I 2018 *Anomalies in the Atmospheric Methane Content over Northern Eurasia in the Summer of 2016* *Doklady Earth Sciences* 480 637-41
3. Davydov, D.K., Belan, B.D., Antokhin, P.N. et al. Monitoring of Atmospheric Parameters: 25 Years of the Tropospheric Ozone Research Station of the Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. *Atmos Ocean Opt* 32, 180-192 (2019). <https://doi.org/10.1134/S1024856019020052>

4. Arshinov, Mikhail, et al. "Station for the Comprehensive Monitoring of the Atmosphere at Fonovaya Observatory, West Siberia: Current Status and Future Needs." 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 2018, doi:10.1117/12.2504388.
5. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. – Bull. Amer. Meteor. Soc, 1996, vol. 77, No 3, pp. 437-471.
6. Lejenäs H and Økland H 1983 Characteristics of northern hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data *Tellus A* 35A 350–62
7. Tibaldi S and Molteni F 1990 On the operational predictability of blocking *Tellus A* 42 343–65
8. Barriopedro D, García-Herrera R, Lupo A R and Hernández E 2006 A Climatology of Northern Hemisphere Blocking *Journal of Climate* 19 1042–63
9. Antokhina O Y, Antokhin P N, Zorkal'Tseva O S and Devyatova E V 2017 Atmospheric blockings in Western Siberia. Part 1. Detection features, objective criteria, and their comparison *Russian Meteorology and Hydrology* 42 644–52
10. Masato G, Hoskins B J and Woollings T J 2011 Wave-breaking characteristics of midlatitude blocking *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 138 1285–96
11. Savkin, Denis, et al. "Dependence of the Surface Ozone Concentration on the Air Temperature and Conditions of Atmospheric Circulation in Western Siberia in the Warm Season (May-September)." 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 2017, doi:10.1117/12.2287736

Distribution of low stratiform clouds and its long-term changes over the Siberia territory

Lomakina N.Ya., Lavrinenko A.V.

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: gfm@iao.ru, lnya@iao.ru

The problem of global and regional climate change is one of the important tasks of climatology and therefore the study of clouds is of great importance, since it has a significant effect on the radiation fluxes of the Earth's surface-atmosphere system. Moreover the type of cloudiness plays the most important role. Besides, the influence of the low clouds depends on the season: in the cold half-year these clouds create a greenhouse effect raising the earth's surface temperature, and in the warm half-year they lower the same temperature reflecting the incoming solar radiation.

Since cloud cover is one of the most variable in time and space elements of the climate, it is necessary to constantly reevaluate its characteristics according to the latest data, both at the global and regional levels.

This work continues research [1, 2]. According to the data of 8-term meteorological observations of 62 Siberian weather stations (<http://www.ncdc.noaa.gov/>) for the last 50 years (from 1969 to 2018) the regime of low stratiform clouds (*Sc*, *St*, *Ns*) and its long-term changes are investigated over the territory of the Siberian region. A study of the average seasonal values of the amount of lower stratiform clouds (*Sc*, *St*, *Ns*) were carried out for four seasons (winter, spring, summer, autumn). The statistical analysis of the features of long-term changes in the average annual and average seasonal values of the low cloud amounts was carried out using the interannual variation curves, as well as linear trends and their intensity (ball/decade).

As a result of the analysis, it was established that the dependence on the season is typical for the field of lower clouds. During all seasons, with the exception of summer, the maximum amount of lower stratiform clouds is observed over Western Siberia, there is the minimum over Eastern Siberia, and the amount of low cloudiness decreases from the northwest in the southeast direction, in summer the maximum is observed in the north of the Siberian region and the lower cloudiness amount decreases in the south.

Studies of long-term changes in the amount of low cloudiness for the period from 1969 to 2018 showed that winter and spring are characterized by a predominance of positive trends in Siberia, while the maximum is observed in the polar regions. In summer, negative trends in the long-term changes of lower clouds amount are observed in the most part of Western Siberia and in the polar regions of the entire Siberian region. Also, the tendency to a decrease in the lower stratiform cloudiness amount appears in the polar regions of Western Siberia in autumn. The annual average values are characterized by the predominance of positive trends in the change of the lower stratiform clouds amount over almost throughout Siberia.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. AAAA-A17-117021310142-5).

REFERENCES:

1. Komarov V.S., Matvienko G.G., Lomakina N.Ya., Il'in S.N., Lavrinenko A.V. *Statistical structure and long-term change of the lower stratiform clouds over Siberia as a base for meteorological support for solution of applied problems. Part 1. Statistics of lower stratiform clouds // Atm. Ocea. Opt.* 2015, V. 28. No. 07. 622–629.
2. Komarov V.S., Matvienko G.G., Lomakina N.Ya., Il'in S.N., Lavrinenko A.V. *Statistical structure and long-term change of the lower stratiform clouds over Siberia as a base for meteorological support for solution of applied problems. Part 2. Long-term change of the lower stratiform clouds // Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V.28. №07. 630–637.

Распределение нижней слоистообразной облачности и ее долговременные изменения над территорией Сибири

Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
E-mail: gfm@iao.ru, lnya@iao.ru

Проблема глобального и регионального изменения климата относится к одной из важных задач климатологии и поэтому большое значение имеет исследование облачности, которая оказывая существенное влияние на радиационные потоки, определяет тепловой режим системы «земная поверхность – атмосфера» [1, 2]. При этом важнейшую роль играет тип облачности, поскольку облака верхнего яруса в целом способствуют усилению парникового эффекта и тем самым нагреванию климатической системы, а облака нижнего яруса, отражая приходящую солнечную радиацию – наоборот ее выхолаживанию [3]. Причем, влияние облаков нижнего яруса зависит от сезона [4]: в холодное полугодие они создают парниковый эффект, повышая температуру земной поверхности, а в теплое полугодие, отражая приходящую солнечную радиацию, ту же температуру понижают.

Облачность относится к одному из наиболее изменчивых во времени и в пространстве элементов климата [1, 5], поэтому возникает необходимость постоянной переоценки ее характеристик по новейшим данным, как на глобальном, так и на региональном уровнях. В последние годы вопросу изменения режима облачности уделялось большое внимание [6–9], но все еще не сложилось единого мнения о современных (вторая половина XX в. – начало XXI в.) тенденциях долговременного изменения количества облаков нижнего яруса над территорией Сибирского региона. Так, согласно [2, 6], в течение рассматриваемого периода над территорией Сибири наблюдалось уменьшение количества облаков нижнего яруса, однако, по данным других авторов [7–9], для того же периода характерно, наоборот, увеличение количества нижней облачности.

Данная работа продолжает исследования [10, 11], при этом ряд наблюдений за облачностью увеличился. В работе по данным 50-летних (1969–2018 гг.) 8-срочных наблюдений 62 метеорологических станций (<http://www.ncdc.noaa.gov/>) исследуется режим нижней слоистообразной облачности (Sc, St, Ns) и ее долговременные изменения над территорией Сибирского региона. Проведено исследование среднегодовых и среднесезонных значений количества слоистообразных облаков нижнего яруса, рассчитанных для четырех сезонов (зимы, весны, лета и осени). Для статистического анализа особенностей долговременных изменений количества облаков нижнего яруса были использованы кривые межгодового хода, а также линейные тренды долговременного изменения среднесезонных и среднегодовых значений и величины их интенсивности (баллы/10 лет).

Рассмотрим результаты исследования пространственного распределения количества слоистообразной облачности нижнего яруса и современных тенденций ее долговременного изменения, наблюдаемых над территорией Сибирского региона. При этом остановимся на анализе распределения среднесезонного количества нижней облачности (рис. 1).

В результате проведенного анализа установлено, что поле нижней облачности меняется от сезона к сезону. Во все сезоны, за исключением лета, количество нижней слоистообразной облачности значительно выше над территорией Западной Сибири, чем над Восточной Сибирью, при этом ее количество убывает с северо-запада в юго-восточном направлении. Летом максимальное количество нижней слоистообразной облачности наблюдается на севере Сибирского региона (севернее 70° с.ш.) и убывает в южном направлении. Наибольшее количество облаков нижнего яруса отмечается в полярной зоне всего Сибирского региона летом и осенью, причем наиболее высокие значения – над территорией Западной Сибири (5,5–8,0 баллов), где хорошо развита циклоническая деятельность. Наименьшие количество облаков нижнего яруса (1,2–1,8 баллов) наблюдается зимой над Восточной Сибирью и находится в тес-

ной связи с высоким атмосферным давлением и низкими температурами, характерными для господствующего здесь Сибирского антициклона.

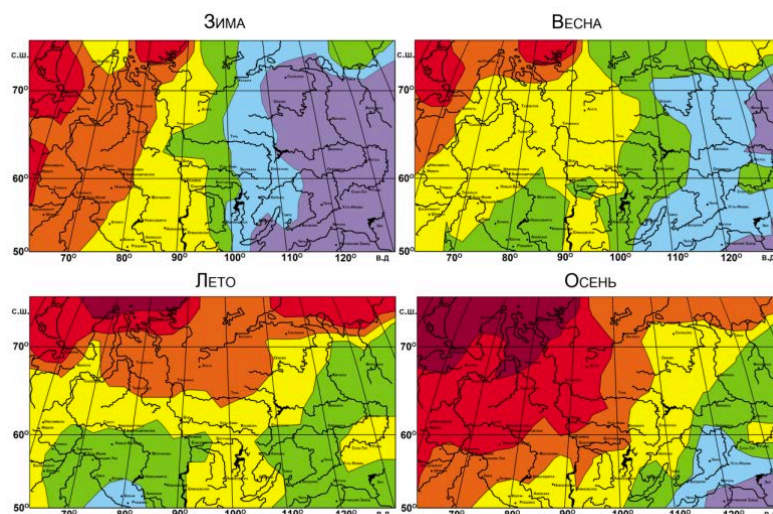


Рис. 1. Пространственное распределение по территории Сибири среднесезонного количества нижней облачности (баллы), полученного по данным за 1969–2018 гг.

Рассмотрим результаты статистической оценки современных тенденций долговременного изменения количества нижней слоистообразной облачности, наблюдаемого над Сибирским регионом. На рис.2 показано пространственное распределение по территории Сибири значений интенсивности линейных трендов (баллы/10 лет) долговременного изменения среднесезонных значений количества слоистообразных облаков нижнего яруса, полученные для временного интервала (1969–2018 гг.) по данным 62-ти сибирских станций.

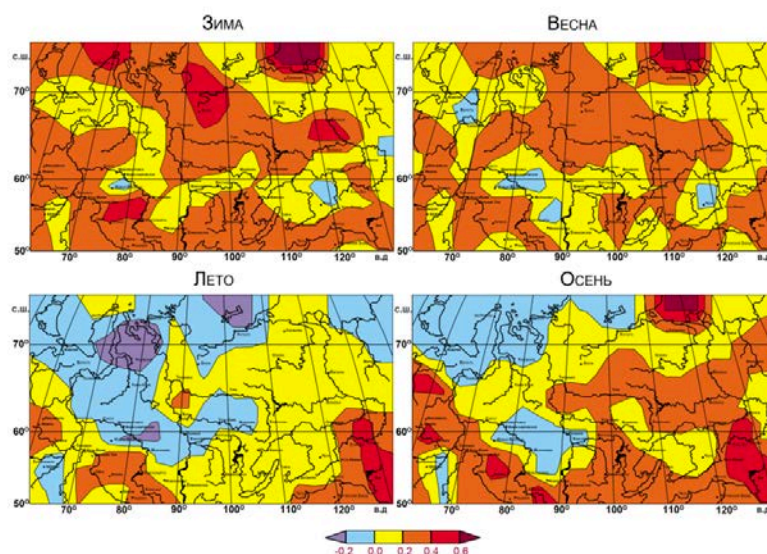


Рис. 2. Пространственное распределение по территории Сибири интенсивностей линейных трендов долговременного изменения среднесезонного количества слоистообразных облаков нижнего яруса (баллы/10 лет).

Анализ долговременных изменений количества слоистообразной облачности нижнего яруса показал, что за рассматриваемый период (1969–2018 гг.) зимой и весной на территории Сибири преобладала тенденция к увеличению среднесезонного количества нижней слоистообразной облачности с интенсивностью от 0,10 до 0,40 балла/10 лет. При этом зимой максимальный тренд наблюдается в полярных районах Западной (0,40–0,60 балла/10 лет) и Восточной Сибири (0,40–0,70 балла/10 лет), а весной – в полярных областях Восточной Сибири (0,40–0,70 балла/10 лет).

Летом характер распределения линейных трендов долговременных изменений количества нижней слоистообразной облачности существенно отличается от зимне-весеннего. Так на большей части территории Западной Сибири севернее 60-й параллели преобладают отрицательные тренды до -0,20 балла/10

лет, а в районе 70-й широты и севернее до $-0,30$ балла/10 лет. В то же время летом на большей части территории Восточной Сибири наблюдаются положительные тренды нижней слоистообразной облачности с максимумом ($0,50-0,65$ балла/10 лет) на юго-востоке.

Осенью на территории Сибирского региона преобладают положительные тренды изменения количества облаков нижнего яруса ($0,20-0,40$ балла/10 лет). Максимальные положительные тренды наблюдаются на юге региона и на севере Восточной Сибири. Отрицательные тренды отмечаются на севере Западной Сибири и в ее центральной части (от 0 до $-0,20$ балла/10 лет).

О характере линейных трендов долговременного изменения среднегодовых значений количества нижней слоистообразной облачности и их пространственном распределении по территории Сибирского региона можно судить по рис.3. Так для среднегодовых значений количества нижней облачности за последние 50 лет с 1969 по 2018 гг. характерно преобладание почти на всей рассматриваемой территории слабого положительного тренда, не превышающего $0,20$ балла/10 лет. При этом величина тренда возрастает до $0,40$ балла/10 лет на юге региона и в центральных областях Восточной Сибири, а в полярных областях Восточной Сибири может достигать $0,40-0,60$ балла/10 лет. В то же время в Западной Сибири (в районе 70-й и 60-й широт) наблюдаются два очага со слабыми отрицательными трендами долговременного изменения нижней слоистообразной облачности (до $-0,20$ балла/10 лет).

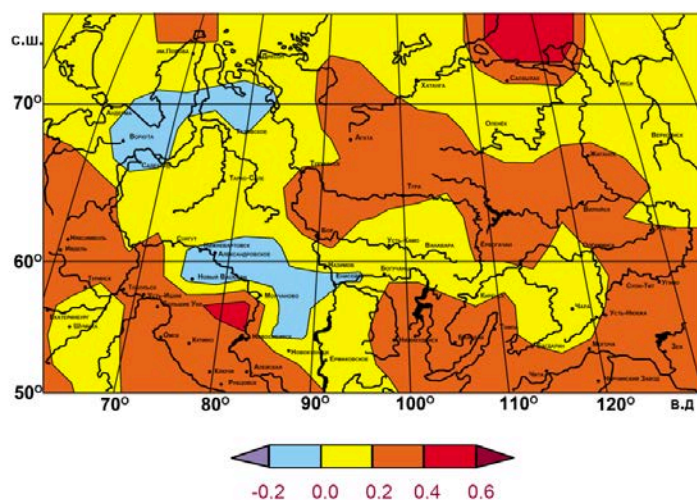


Рис. 3. Пространственное распределение по территории Сибири интенсивностей линейных трендов долговременного изменения среднегодового количества слоистообразных облаков нижнего яруса (баллы/10 лет).

Таким образом, для поля нижней облачности характерна зависимость от сезона. Во все сезоны, за исключением лета, максимум количества облаков отмечается над Западной Сибирью, минимум - над Восточной, и количество облачности убывает с северо-запада в юго-восточном направлении, летом максимум наблюдается на севере Сибирского региона и количество нижней облачности убывает в южном направлении.

Исследования долговременных изменений количества слоистообразной облачности нижнего яруса за 50-летний период с 1969 по 2018 гг. показали, что для зимы и весны характерно преобладание на территории Сибирского региона положительных трендов, при этом максимальный тренд наблюдается в полярных районах. Летом на большей части территории Западной Сибири и в полярных районах всего Сибирского региона отмечаются отрицательные тренды количества облаков нижнего яруса. Также тенденция уменьшения нижней слоистообразной облачности проявляется осенью в полярных областях Западной Сибири. Для среднегодовых значений характерно преобладание положительных трендов изменения количества нижней слоистообразной облачности почти на всей территории Сибири.

Работа выполнена в рамках проекта (рег. № АААА-А17-117021310142-5), финансируемого Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кондратьев К.Я., Биненко В.И. Влияние облачности на радиацию и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
2. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И. Радиационный баланс атмосферы и климатические проявления солнечной переменности // Оптика атмосферы и океана, 2004. Т.17. №12. С.1003–1012.

3. Hartmann D.L., Ockert-Bell M.e., Michelsen M.L. The effect of cloud type on the Earth's energy balance: Global analysis // *J. Climate*, 1992, №5. P.1281-1304.
4. Шерстюков Б.Г. Изменения, изменчивость и колебания климата. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». 2011. 293 с.
5. Климат России / Под ред. Н.В. Кобышевой. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 655с.
6. Хлебникова Е.И., Салль К.А. Особенности климатических изменений облачного покрова над территорией России // *Метеорология и гидрология*. 2009. №7. С.5–13.
7. Ефимова Н.А., Строкина Л.А., Байкова И.М., Малкова И.М. Изменение температуры воздуха и облачности в 1967–1990 гг. на территории бывшего СССР // *Метеорология и гидрология*. 1994. №69. С.66–69.
8. Байкова И.М., Ефимова Н.А., Строкина Л.А. Изменение облачного покрова над территорией России. *Метеорология и гидрология*. 2002. № 9. С. 52–61.
9. Складнева Т.К., Рассказчикова Т.М., Аришинова В.Г., Аришинов М.Ю. Изменение радиационных и метеорологических параметров атмосферы по данным наблюдений в Томске // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31. № 04. С. 288–293.
10. Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ломакина Н.Я., Ильин С.Н., Лавриненко А.В. Статистическая структура и долговременные изменения нижней слоистообразной облачности над регионом Сибири как основа для метеорологической поддержки решения прикладных задач. Часть 1. Статистика нижней слоистообразной облачности // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28. № 07. С. 622–629.
11. Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ломакина Н.Я., Ильин С.Н., Лавриненко А.В. Статистическая структура и долговременные изменения нижней слоистообразной облачности над регионом Сибири как основа для метеорологической поддержки решения прикладных задач. Часть 2. Долговременные изменения нижней слоистообразной облачности. // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28. № 07. С. 630–637.

Distribution of precipitation and their long-term changes over the territory of Siberia

Lomakina N.Ya., Lavrinenko A.V.

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia
E-mail: gfm@iao.ru, lnya@iao.ru

Precipitation, as one of the most variable climatic characteristics, is subject to long-term fluctuations; therefore, their constant reevaluation is necessary taking into account modern data. A lot of attention was paid to the study of this issue. However, for a number of reasons (such as using data from different periods of observations, changing of the methodology and terms of measurements, omissions in observations, etc.), there are difficulties in comparing the results obtained, and, therefore, in obtaining reliable conclusions about the distribution of precipitation over territory, and about modern (the second half of the XX century - the beginning of the XXI century) tendencies of their long-term change, especially in the Siberian region with a rare network of observations.

In this work, we performed a statistical analysis of the distribution characteristics of the seasonal and annual average precipitation amounts, as well as their long-term changes, for which the interannual variation curves were used, as well as linear trends and their intensity values (mm/decade). As the main initial material for the study, we used the long-term data of 8-term observations of 62 meteorological stations of the Siberian region over the past 50 years (from 1969 to 2018) (<http://www.ncdc/noaa.gov>).

An analysis of the regional features of the spatiotemporal distribution of seasonal and annual average precipitation over the territory of the Siberian region showed that the precipitation field is seasonally dependent, and in all seasons the total precipitation over Western Siberia is significantly higher than over Eastern Siberia. It should be noted that in winter, spring and autumn, the pattern of spatial precipitation distribution is similar to the distribution of lower stratiform clouds over the given territory. In the summer, despite the fact that the maximum of the lower stratiform clouds is observed in the polar regions of the Siberian region, the maximum precipitation is between 60 and 70 latitudes in the west of Western Siberia. This suggests that in summer precipitation is observed not only from stratiform clouds, but also from cumulus clouds.

Studies of modern long-term changes in precipitation over 50-years period from 1969 to 2018 showed that positive trends in total precipitation prevail in the most part of Siberia during all seasons, while the maximum trend is observed in the north of western Siberia in the region of the Ob Gulf. Negative trends are observed by

individual areas over the Central Siberian plateau and in the region of Lake Baikal more in winter, summer, and autumn, as well as in the south of Western Siberia in the winter.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. AAAA-A17-117021310142-5).

Распределение осадков и их долговременные изменения над территорией Сибири

Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
E-mail: gfm@iao.ru, lnya@iao.ru

Атмосферные осадки, как одна из наиболее изменчивых климатических характеристик [1, 2], претерпевают долговременные колебания, с чем связана постоянная их переоценка с учетом современных данных особенно на малоосвоенной территории Сибирского региона. Исследованию данного вопроса уделялось большое внимание [3–10]. Однако по ряду причин (таких, как использование данных различных периодов наблюдений, изменение методики и сроков измерений, пропуски в наблюдениях и т.п.) существуют сложности при сравнении полученных результатов, а, следовательно, и в получении достоверных выводов как о распределении осадков по территории, так и о современных (вторая половина XX в. – начало XXI в.) тенденциях их долговременного изменения, особенно на малоосвоенной территории Сибирского региона.

В настоящей работе проведен статистический анализ особенностей распределения среднесезонных и среднегодовых сумм количества осадков, а также их долговременных изменений, для которого были использованы кривые межгодового хода, а также линейные тренды и величины их интенсивности (мм/10 лет). В качестве основного исходного материала для оценки долговременных изменений количества осадков использованы многолетние данные 8-срочных наблюдений 62 метеорологических станций Сибирского региона за последние 50 лет (1969–2018 гг.) (<http://www.ncdc/noaa.gov>).

Рассмотрим региональные особенности пространственно-временного распределения среднесезонных значений суммарного количества осадков по территории Сибирского региона (рис.1). Проведенный анализ показал, что поле осадков меняется от сезона к сезону, при этом во все сезоны суммарное количество осадков над территорией Западной Сибири существенно выше, чем над Восточной.

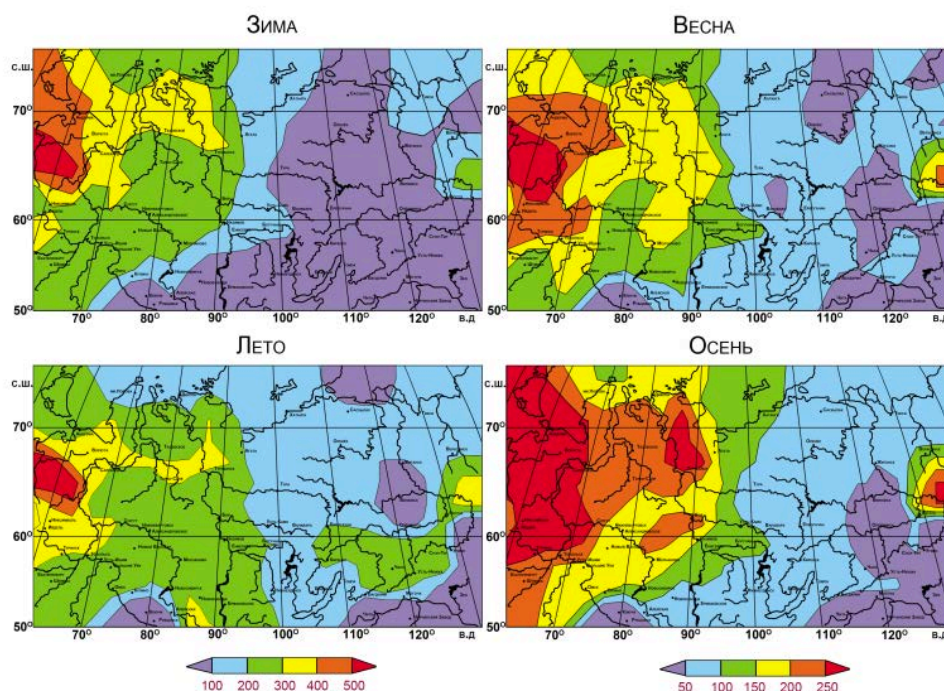


Рис. 1. Пространственное распределение по территории Сибири среднесезонного количества осадков (мм), полученного по данным за 1969–2018 гг.

Зимой наибольшее количество осадков наблюдается в северо-западных областях Западной Сибири (400–500 мм и более), количество осадков убывает в юго-восточном направлении и почти на всей территории Восточной Сибири составляет менее 100 мм.

Летом над Западной Сибирью выпадает примерно такое же количество осадков, как и зимой (не менее 200–300 мм). Для территории Восточной Сибири характерны некоторые особенности: так летом, в отличие от зимы, количество осадков здесь возрастает до 100–200 мм, а в районе 60-й параллели увеличивается до 300 мм. При этом в центральных районах Восточной Сибири вдоль 120° в.д. наблюдается минимальное количество осадков (менее 100 мм) локально в трех областях: к северу от 70-ой параллели, между 62–66° с.ш. и на юго-востоке территории.

Весной и осенью распределение осадков по территории Сибири аналогичное: уменьшается в восточном направлении, составляя более 250 мм на западе и менее 50 мм на востоке региона.

Необходимо отметить, что зимой, весной и осенью картина пространственного распределения количества осадков аналогична распределению по территории количества нижней слоистообразной облачности. Летом, несмотря на то, что максимум нижних слоистообразных облаков наблюдается в полярных районах Сибирского региона, максимальное количество осадков выпадает между 60 и 70 широтой на западе Западной Сибири. Это говорит о том, что летом помимо осадков из слоистообразных облаков еще наблюдаются осадки из кучевообразной облачности.

Анализ распределения по территории Сибирского региона сумм среднегодового количества осадков показал (рис. 2), что наибольшие значения наблюдаются на западе рассматриваемой территории (более 1500 мм) и количество осадков убывает в восточном направлении. На большей части Западной Сибири среднегодовое количество осадков составляет 600–900 мм, а на территории Восточной Сибири – 300–600 мм. При этом области с минимальным среднегодовым количеством осадков (менее 300 мм) наблюдаются на юго-востоке Западной Сибири, а также в центральных областях Восточной Сибири вдоль 120-го меридиана и в ее юго-восточных районах.

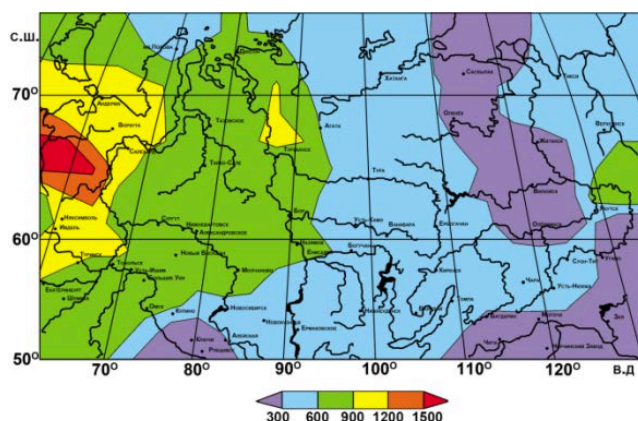


Рис. 2. Пространственное распределение по территории Сибири среднегодового количества осадков (мм), полученного по данным за 1969–2018 гг.

Рассмотрим результаты статистической оценки современных тенденций долговременного изменения суммарного количества осадков, наблюдаемых над Сибирским регионом в среднем за сезон и за год. На рис.3 показано пространственное распределение по территории Сибири значений интенсивности линейных трендов (мм/10 лет) долговременного изменения среднесезонных значений количества сумм осадков, полученные для временного интервала (1969–2018 гг.) по данным 62-ти сибирских станций.

Анализ долговременных изменений среднесезонных значений суммарного количества осадков за период с 1969 по 2018 гг. показал, что во все сезоны на большей части Сибирского региона преобладает тенденция увеличения количества осадков (до 5 мм/10 лет). Весной на территории Западной Сибири количество осадков возросло до 5–10 мм/10 лет, а в ее северных и западных районах даже более. Кроме того, во все сезоны на севере Западной Сибири в районе Обской губы наблюдается область с повышенным положительным трендом количества осадков (10–12 мм/10 лет). Отрицательные тренды количества осадков отмечаются неравномерно по территории в зависимости от сезона. Зимой отрицательный тренд наблюдается на северо-западе и северо-востоке Сибири (5–8 мм/10 лет), а также на юге Западной Сибири (5–7 мм/10 лет) и над Средне-Сибирским плоскогорьем (до 5 мм/10 лет). Весной уменьшение количества осадков за период с 1969 по 2018 гг. на 1–5 мм/10 лет отмечено в северных, восточных и юго-восточных районах Восточной Сибири. Летом область отрицательных трендов количества осадков (от -2 до -7 мм/10 лет) распространилась на большую часть Восточной Сибири с севера на юг вдоль 110 меридиана, и на юго-востоке территории может достигать по абсолютной величине 8–12 мм/10 лет. Осенью отрицательный тренд количества осадков уменьшается (по абсолютной величине) до 2–5 мм/10 лет и наблюдается на северо-западе и северо-востоке территории Сибири, а также в над Средне-Сибирским плоскогорьем и в районе озера Байкал.

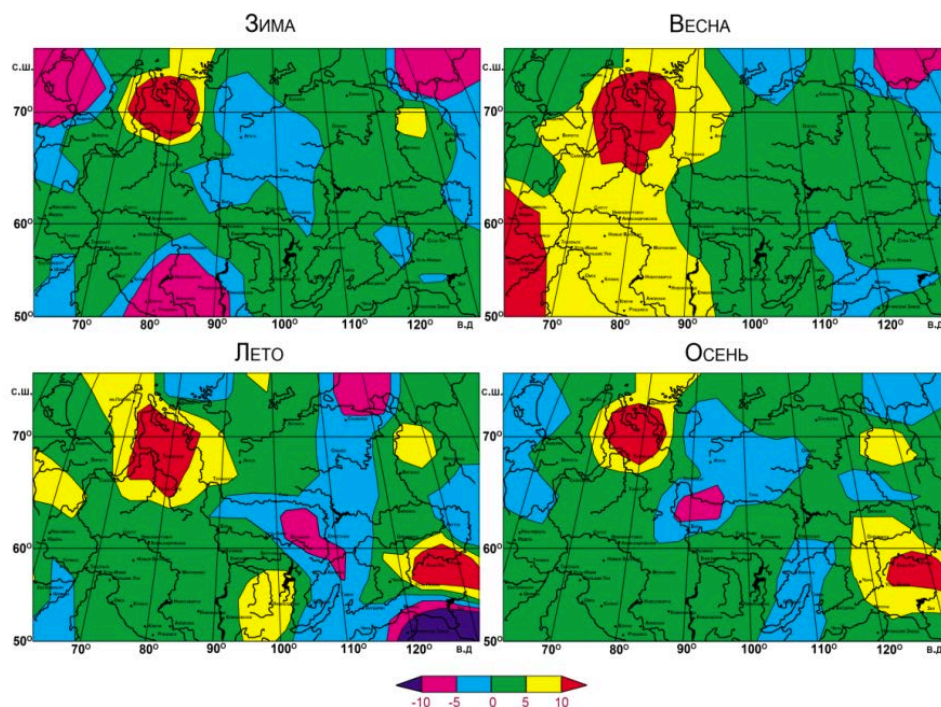


Рис. 3. Пространственное распределение по территории Сибири интенсивностей линейных трендов долговременного изменения среднесезонного количества осадков (мм/10 лет).

О характере линейных трендов долговременного изменения среднегодовых значений суммарного количества осадков и их пространственном распределении по территории Сибирского региона можно судить по рис.4. Так для среднегодовых значений количества осадков за последние 50 лет с 1969 по 2018 гг. характерно преобладание почти на всей рассматриваемой территории положительного тренда до 20 мм/10 лет. При этом максимальный рост суммарного годового количества осадков (50–70 мм/10 лет и даже более) наблюдается на севере Западной Сибири в районе пересечения 70° с.ш. и 80° в.д. Отрицательные тренды долговременного изменения суммарного количества осадков (5–15 мм/10 лет) за рассматриваемый период отмечены на северо-западе и северо-востоке Сибирского региона, а также над Средне-Сибирским плоскогорьем, в районе Байкала и на крайнем юго-востоке исследуемой территории.

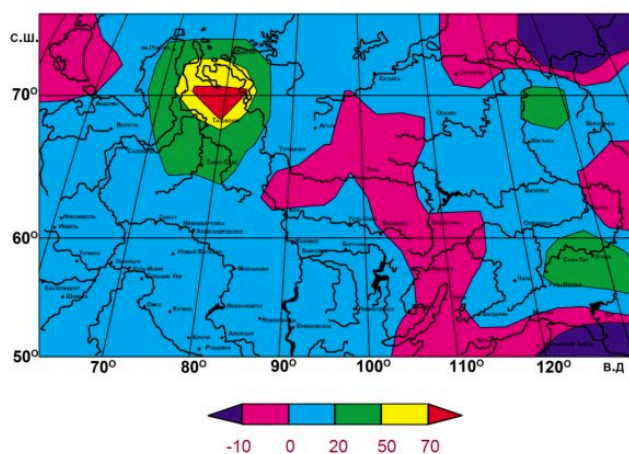


Рис. 4. Пространственное распределение по территории Сибири интенсивностей линейных трендов долговременного изменения среднегодового количества осадков (мм/10 лет).

Таким образом, для поля осадков характерна зависимость от сезона, при этом во все сезоны суммарное количество осадков над территорией Западной Сибири существенно выше, чем над Восточной. Исследования современных долговременных изменений количества осадков за 50-летний период с 1969 по 2018 гг. показали, что во все сезоны на большей части Сибири преобладают положительные тренды суммарного количества осадков, при этом максимальный тренд наблюдается на севере западной Сибири в районе Обской губы. Отрицательные тренды наблюдаются отдельными очагами и в большей степени зимой, летом и осенью над Средне-Сибирским плоскогорьем и в районе озера Байкал, а также на юге Западной Сибири в зимний период.

Работа выполнена в рамках проекта (рег. № АААА-А17-117021310142-5), финансируемого Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Климат России / Под ред. Н.В. Кобышевой. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 655с.*
2. *Швер Ц.А. Атмосферные осадки на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 302с.*
3. *Виноградова Г.М., Завалишин Н.Н., Кузин В.И. Изменчивость сезонных характеристик климата Сибири в течение XX века // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т.13. №6-7. 604-607.*
4. *Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том I. Изменение климата. М.: Росгидромет, 2008. 227 с.*
5. *Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. Т. 1. 59 с.*
6. *Дюкарев Е.А., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В. Изменение климата азиатской территории России во второй половине XX столетия: сравнение данных наблюдений реанализов // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т.19. № 11 С. 934-940.*
7. *Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В., Харюткина Е.В. Структура и динамика метеорологических полей на азиатской территории России в период интенсивного глобального потепления 1975–2005 гг. // Ж. Сибирского федерального университета. Биология. 2008. Т. 1. № 4. С. 323–344.*
8. *Попова Е.Н., Попов И.О., Семенов С.М. Оценка изменения годовой суммы активных температур и количества осадков за вегетационный период для территории России и соседних стран // Метеорология и гидрология. 2018. № 6. С. 98-105.*
9. *Данилов Ю.Г., Дегтева Ж.Ф. Современная динамика климатических изменений восточной экономической зоны Якутии // Вестник СВФУ. Серия «Науки о Земле» 2018. 2(10). 41–56.*
10. *Харюткина Е.В., Логинов С.В., Усова Е.И., Мартынова Ю.В., Пустовалов К.Н. Тенденции изменения экстремальности климата Западной Сибири в конце XX – начале XXI веков // Фундаментальная и прикладная климатология. 2019. 2. 45–65.*

СЕКЦИЯ 5

Экстремальные
климатические
явления,
региональные риски
и социо-
экономические
последствия

SESSION 5

Extreme Climatic
Events,
Regional Risks
and Socio-economic
Impacts

Методы изучения и прогноз штормовых ветров на территории России

Глебов В.В., Аникина Е.В., Шевцов В.В.

Российский университет дружбы народов, Москва,
Россия

E-mail: vg44@mail.ru

С каждым годом повсеместно растет количество погодных аномалий. Это лето также ознаменовалось шквалистыми ветрами, которые пронесли по многим регионам Российской Федерации в начале календарного лета: ураган, пронесшийся по Москве, обернулся не только серьезным многомиллионным материальным ущербом, но и пострадали и погибли люди.

Необходимо напомнить, что к штормовым ветрам относятся шквалы, смерчи, которые относятся к опасным гидрометеорологическим явлениям. По классификации, предложенное Международным комитетом такие ветра оцениваются в баллах, где ветра 8 баллов – шторм, очень крепкий ветер скоростью 20 м/с, при котором затруднено всякое движение против ветра; 12 баллов – ураган скоростью более 29–33 м/с.

Шквалистые ветра сопровождаются мощными кучево-дождевыми облаками. Такие облачные образования носят название мезомасштабными конвективными системами (МКС). Образование и формирование МКС связано с физикой атмосферы, где наблюдается мощная динамика холодной воздушной массы и вертикального сдвига ветра на фоне статической стабильности.

Механизмы формирования конвекционных процессов по-прежнему привлекает внимание специалистов, изучающие погодноклиматические явления, показывает анализ научной литературы, большая часть которых посвящены ветрам в тропической и субтропическим зонам.

Если рассматривать ситуацию в России со шквальными ветрами, то за последние годы (2017–2020 гг.) часто шквалистые ветра случались в Оренбургской области, на юге страны (Новороссийск), в Ставрополе, на севере (Воркута, Певек). Статистика утверждает, что погибших не было, однако наблюдались повреждение жилых домов.

Важно подчеркнуть, что существующая метеорологическая сеть в Российской Федерации на сегодняшний день является недостаточной для наблюдения и прогноза на всей территории страны. В этой связи важным шагом в этой проблеме является оборудование территорий сетью датчиками непрерывной регистрации метеорологической обстановки. В этом аспекте хорошо зарекомендовал себя метеорологический радар, который дает возможность оценивать структуру и физические характеристики линии шквалов.

Другим оптимальным методом в оценке зарождения и прохождения штормовых ветров является использование данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ), получаемых из околоземных космических аппаратов.

В качестве основного метода оценки штормовых ветров в российском Гидрометцентре используется физико-статистический подход при прогнозе сильных шквалов. Он основывается на выходных данных региональной гидродинамической модели (3D-уровневая модель прогноза полей метеорологических элементов с пространственным разрешением 75 км).

Большие возможности при прогнозе штормовых ветров получили методы на основе негидростатических моделей общего пользования WRF (Weather Research and Forecasting.)-ARW (Weather Research and Forecasting) и WRF-NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model). Модели WRF-ARW и WRF-NMM разработаны в США. Установлено, что все эти модели достаточно хорошо воспроизводят мезомасштабные конвективные системы и связанные с ними области сильных осадков и ветра.

Таким образом, сочетание и комплексное использование модельных прогнозов и верификация результатов счета модели по данным метеорологических радаров и ДДЗЗ, а также программных моделей WRF-ARW дают возможность строить системы раннего предупреждения о метеорологических угрозах и является важной и актуальной задачей мезометеорологии.

Methods of study and forecast of storm winds on the territory of Russia

Glebov V.V., Anikina E.V., Shevtsov V.V.

Peoples' friendship University of Russia, Moscow, Russia

E-mail: vg44@mail.ru

Every year, the number of weather anomalies is growing everywhere. This summer was also marked by squally winds that swept through many regions of the Russian Federation at the beginning of the calendar summer: the hurricane that swept through Moscow caused not only serious multimillion-dollar material damage, but also injured and killed people.

It should be recalled that storm winds include squalls and tornadoes, which are dangerous hydro meteorological phenomena. According to the classification proposed by the International Committee of Meteorology such winds are measured in points, where 8 points wind – storm, strong wind with speed of 20 m/s, which hampered any movement against the wind; 12 points – hurricane speeds over 29-33 m/s [1,2].

Squally winds are accompanied by powerful cumulonimbus clouds. Such cloud formations are called mesoscale convective systems (MCS). The formation and formation of the ISS is related to atmospheric physics, where powerful dynamics of cold air mass and vertical wind shear are observed against the background of static stability [3].

It is important to emphasize that the force of Gale-force winds carries great destructive power, despite the short-term impact.

Statistics of hurricanes in the world show that over the past 200 years, this element has caused the death of almost 2 million people. Losses reached hundreds of billions of dollars. The table shows the most destructive elements that took place in the United States (table) [4].

Table. Hurricane statistics in the world.

Hurricane' Name	Year	Hurricane Damage (billion \$)
Matthew	2016	6
Katrina	2005	125
Wilma	2005	20,6
Ivan	2004	18,8
Andrew	1992	26,5

In 2016 and 2017, there were hurricanes in the Orenburg region. Statistics state that there were no fatalities. Nine residential buildings were damaged. Their roofs were torn off. There was also a wire break.

In 2014, a hurricane in Bashkiria destroyed more than a hundred homes. Two elderly men were killed. In June 2017, there was a hurricane in Tatarstan. He caused great damage to the Republic. Houses were damaged, trees and power poles were uprooted. In 2015, there was a devastating hurricane in Chuvashia. Several locali-

ties were de-energized. 18 houses and 1 school were damaged. In June 2017, there was a hurricane in the Crimea. More than 2 thousand people were left without electricity [4]. Also, quite frequent hurricane-force winds occur on the territory of the Central black earth zone [5]

The study of deep convection is of great interest to specialists, which is confirmed by many published works [1-17]. Most of these works are devoted to tropical areas where tornadoes and tornadoes are often observed [8-10]. Such studies were also conducted in moderate [11,12] and high [13,14] latitudes, which have their own peculiarities of development. Their development occurs in a smaller vertical layer of the atmosphere and has less significant horizontal dimensions. Storm winds in moderate latitudes are associated with local storms with convective segments of the ISS that are about 30 km in size and exist for no more than an hour.

Methods for studying and forecasting storm winds

Storm winds occur, as a rule, in the Central part of a powerful thundercloud, with very high humidity in the process of precipitation [2,4,7,8]. The definition of such phenomena is still difficult, especially if it occurs outside of a populated area: the time of their impact is small; the area of passage is limited to a scale of tens of kilometers. However, even if the phenomenon occurs in a densely populated area, the fact of its passage and its intensity can be determined by the results of the damage [11-14].

It should be noted that at present the observation network in Russia is still insufficient for a full-scale assessment of convective phenomena. Therefore, an important step in this direction is to equip territories with a network of sensors for continuous recording of the meteorological situation [15]. The most optimal device that allows you to determine the structure and physical characteristics of the origin of storm winds is a weather radar [16] (Fig. 1).



Fig. 1. Weather radar.

Based on complex recognition criteria, meteorological radars automatically detect and recognize convective phenomena [38; 81], extract information about the horizontal and vertical structures of radar reflectivity of storms, horizontal and vertical speeds of cloud particles and precipitation drops inside the cloud with a resolution of up to 1 km in 5-10 minutes [16,17]. Currently, only in the Central Federal district there is a continuous coverage of the territory with observation data.

Another optimal method for estimating the origin and passage of storm winds is the use of remote sensing Data obtained (RSDO) from near-earth spacecraft [18,19] (Fig.2).



Fig. 2. Remote sensing of the Earth.

It is possible create composite maps of the spatial and temporal distribution of storm winds in the studied territories based on the RSDO.

Among the methods for predicting the occurrence of storm winds, methods based on determining the degree of instability of the atmosphere have been obtained. Back in the Soviet period (60s of the XX century), the forecast of storm winds was proposed by employees of the hydrometeorological center of the USSR B. E. Peskov, A. I. Snitkovsky, G. D. Reshetov, which was based on the analysis of the thermodynamic state of the atmosphere [20-22].

Currently, the hydrometeorological Center of Russia implements a physical and statistical approach as the main method for determining storm winds, which is based on the output data of a regional hydrodynamic model (a 30-level model for forecasting fields of meteorological elements with a spatial resolution of 75 km) [20].

Another group of methods takes into account the kinetic energy of turbulent pulsations. In this case, the calculation of wind gusts is based on the assumption of a normal distribution of wind speed, and the turbulent kinetic energy is considered as a dispersion of wind speed [12].

Another promising method for predicting storm winds is the method based on the assumption that the cause of the formation of a squall is the interaction of anomalies of the stratospheric potential Ertel vortex in the troposphere [23]. Testing of the method has shown that it is better and more reliable than traditional methods and reduces the number of "false alarms".

Methods based on non-hydrostatic General-use models WRF (Weather Research and Forecasting.) - ARW (Weather Research and Forecasting) and WRF-NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) have gained great opportunities for forecasting storm winds. The WRF-ARW and WRF-NMM models are developed in the USA. It was found that all these models reproduce mesoscale convective systems and associated areas of heavy precipitation and wind quite well. [24].

Model forecasts are evaluated and model counting results are verified using data from weather radars and RSDO [25]. Based on the WRF-ARW model, early warning systems for meteorological threats are being developed (in particular, a warning system for the degree of danger of strong winds) [26].

It should be noted that in the practice of meteorological observations, there are practically no methods for predicting storm winds (wind speeds above 33 m/s) [26].

Conclusion. Thus, the combination and integrated use of model forecasts and verification of the results of the model calculation based on meteorological radars and RSDO, as well as WRF-ARW software models make it possible to build early warning systems about meteorological threats, and is an important and urgent task of mesometeorology.

REFERENCES:

1. Erofeeva V. V., Glebov V. V., Yablochnikov S. L. *Ecology. Saratov: University education*. 2020, 148 p.
2. Alekseeva A. A. *Method of forecasting strong squalls // Meteorology and Hydrology*. 2014. №. 9. P. 5
3. Abdullaev S. M., Zhelnin A. A., Lenskaya O. Yu. *Life cycle of Mesoscale convective systems // Meteorology and Hydrology*. 2009. № 5. Pp. 34-45.
4. *The Strongest hurricanes in the world* <https://icetek.ru/face/silneishii-uragan-v-istorii-chelovechestva-samyi-silnyi-uragan-v-mire/> (accessed 20.06.2020)
5. Chernogubova Yu. Ya. *Occurrence of dangerous convective weather phenomena on the territory of the Central Chernozem UGMS and their forecasting // Tr. Hydro meteorological Center of Russia*. 2015. Issue 357. Pp. 125-145.
6. Glebov V. V., Mikhailichenko K. Yu., Chizhov A. Ya. *The state of the atmosphere in Moscow // Bulletin of the Moscow City Pedagogical University №2(10)*, 2012,-C.59-67
7. Erofeeva V. V., Glebov V. V., Yablochnikov S. L. *Assessing the sustainability of district development by creating a system of indices and indicators using GIS technologies // In the collection: Innovative approaches to solving the problems of the Sendai framework for disaster risk reduction 2015-2030. Collection of materials of the international scientific and practical conference*. 2018. Pp. 262-265.
8. Jirak I. L., Cotton V. R. *Observational analysis of predictability of Mesoscale convective systems // American meteorological society*. Vol. 22. 2007. Pp. 813-838.
9. Johnson R. H., Miner B. D., Tseselsky P. E. *Circulations between Mesoscale convective systems along the cold front // Mon. WEA. Rev*. 1995. Vol. 123. №. 3. Pp. 585-599.
10. Pomortseva A. A., Kalinin N. A. *Analytical review of the current state of the study of squalls: conditions of formation, methods of diagnostics and forecasting // geographical Bulletin*. 2016. №. 3(38). Pp. 90-104. DOI 10.17072/2079-7877-2016-3-90-104
11. Jirak I. L., Cotton V. R. *Observational analysis of predictability of Mesoscale convective systems // American meteorological society*. Vol. 22. 2007. Pp. 813-838.
12. Johnson R. H., Miner B. D., Tseselsky P. E. *Circulations between Mesoscale convective systems along the cold front // Mon. WEA. Rev*. 1995. Vol. 123. №. 3. Pp. 585-599.
13. Pomortseva A. A., Kalinin N. A. *Analytical review of the current state of the study of squalls: conditions of formation, methods of diagnostics and forecasting // Geographical Bulletin*. 2016. № 3(38). Pp. 90-104. DOI 10.17072/2079-7877-2016-3-90-104

14. Weissman M. L., K. Davis, van W., et al. Experience with explicit 0-36-h convective forecasts with the WRF-ARW model // *Wea. and forecasting*. 2008. Volume. 23. №. 3. Pp. 407-437
15. Abshaev M. T., Abshaev A.M., Malkarova A.M., Zharashuev M. V. Automated radar identification, measurement of parameters and classification of convective cells for protection from hail and storm warnings // *Meteorology and hydrology*. 2010. №. 3. Pp. 36-45.
16. Kalinin N. A., Smirnova A. A. Possibilities of meteorological radars in detecting clouds and dangerous weather phenomena. *Geograficheskiy Vestnik*. 2006. №. 2. Pp. 76-83.
17. Lenskaya O., Abdullaev S. M. The Use of Doppler radar data and ground-based observations for the study and forecast of the squalls // *Bulletin of the Chelyabinsk state University*. UN-TA. 2005. Vol. 12, No. 1. Pp. 131-143.
18. Alekseyeva A. A. Methods for forecasting maximum precipitation in areas of active convection and alternative forecast of heavy showers and squalls // *Results of testing of new and improved technologies, models and methods of Hydrometeorological Forecasts*. 2007. №. 34. Pp. 49-69.
19. Peredodtseva E. V. Model of hydrodynamic-statistical forecast with a lead time of 12-48 hours of strong squalls and tornadoes on the territory of Siberia // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2011, Vol. 8, No. 1, Pp. 263-270.
20. Kalinin N.A., Smirnova A. A. Investigation of radar characteristics for recognizing dangerous weather phenomena associated with cumulonimbus clouds // *Meteorology and hydrology*. 2005. No. 1. P. 84 to 95.
21. Reshetov G. D., Chernov V. F. Method of forecasting squalls 12-24 hours // *Meteorology and hydrology*. 1975. №. 3. Pp. 15-24.
22. Rubinstein K. G., Shiryayev M. V., Eliseev G. V., Ignatov R. Yu. The First assessment of the quality of early warning systems for meteorological threats to the Murmansk region // *Arctic: ecology and economy*. 2014. №. 4(16). Pp. 77-85.
23. Alekseeva A. A., Yusupov Yu. I., Bagrov A. N., Demidova O. Yu., Smirnova I. M., Chernogubova Yu. Ya. Test results of the method of forecasting squalls using thermodynamic parameters of the atmosphere and potential Ertel vortex // *Results of testing of new and improved technologies, models and methods of Hydrometeorological forecasts*. 2015. №. 42. Pp. 15-38.
24. Kalinin N. A., Vetrov A. L., Sviyazov E. M., Popova E. V. WR WRF // *Meteorology and Hydrology*. 2013. №. 9. Pp. 21-30.
25. Yusupov Yu. I. Method of forecasting squalls using thermodynamic parameters of the atmosphere and potential Ertel vortex // *Meteorology and hydrology*. 2013. №. 11. Pp. 55-63.
26. Holton J. R. *Introduction to dynamic meteorology* // Elsevier Academic Press. 2004. P. 290-304.

Ice rains in the Urals according to radiosonding

¹Kalinin N.A., ¹Sviyazov E.M., ¹Pomortseva A.A., ^{1,2}Pischalnikova E.V.

¹Perm State University, Perm, Russia

²Perm center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Perm, Russia

E-mail: meteo@psu.ru

Ice rain (freezing rain) is a rare meteorological phenomenon - in recent years, in Russia in the transitional periods of the year and in winter, thaws are noted quite often. In some cases, the phenomenon is accompanied by the formation of ice and a complex deposit. Ice rain is small clear ice balls, measuring 1-3 mm in diameter. It is formed when rain drops freeze, when the latter fall through the lower layer of air with a negative temperature. In literature, the term "freezing rain" is given - it is rain that falls liquid, but on the surface of the Earth and on unprotected objects it freezes, forming a layer of ice. In the latter case, precipitation should fall on a surface with a negative temperature in a supercooled form. Phenomena are similar in physical formation conditions: in the lower troposphere and on the surface of the earth, a temperature of 0 ° C and below should be noted, and a warm layer of air with a temperature of 0 ° C and above should be located above them. This temperature distribution is characteristic of the removal of a moist warm air mass associated with the passage of a warm front when a cold anticyclone is present in its path of movement.

Consider the physical conditions of education and the features of the development of the phenomenon of ice rain in the Urals. Radiosonding data close to the time of ice rain at weather stations of the Perm Territory and the Sverdlovsk Region were considered. In total, 31 cases of radiosonding at the aerological stations Perm, Verkhnyaya Dubrova, Ivdel, Kirov and Syktyvkar from November 2019 to March 2020 inclusive were considered. In addition, aerological data for the dates closest to the time when the ice rain fell were considered separately, but when the phenomenon either had not yet begun or had already ended.

However, the development of processes occurs differently in each case. In addition, there are “classical” cases where the distribution of meteorological values in the troposphere corresponds to the conditions described in the scientific literature, and “non-classical” cases when the anomalous distribution of meteorological values is noted. So in the “classical” case, the temperature near the Earth’s surface is close to zero, there is a raised temperature inversion, small values of the total dew point deficit in the layer from the Earth’s surface to the isobaric surface of 850 hPa and the presence of increased values of wind speed in the atmospheric boundary layer. The cases are classified as “non-classical” at which freezing rain occurs at negative temperatures near the earth’s surface and at heights, the absence of temperature inversion and, sometimes, with a large total dew point deficit. Another feature of the considered processes is the presence of cases with a surface temperature (T_s) above $+6^\circ\text{C}$ (9.7% or 3 cases).

The average height of the lower boundary of the inversion is about 760 m above sea level. It is approximately the same both for cases with freezing precipitation and for cases without phenomena. The maximum height of the lower cloud cover in cases with ice rain is 1331 m, which has similar values to observations when there were no phenomena (1150 m). In the case of freezing precipitation, the maximum height is almost 2 times higher – 2250 m. The temperature at the lower and upper boundaries of the inversion during ice precipitation is fixed higher than in other cases, the same as was noted for the temperature and humidity characteristics that we examined earlier.

A strong wind at altitude indicates the presence of large baric gradients and contributes to the removal of warm moist air. The height at which the maximum wind speeds in the boundary layer ($H_{\max}$) are observed is on average about 1000 m for cases with phenomena and about 780 m when phenomena were not observed. The prevailing direction of maximum wind is southwest. Moreover, on average, maximum speeds are higher in cases of freezing rain and freezing precipitation.

In general, it can be said that the vertical distribution of meteorological values under ice rain and freezing rain bears a great resemblance to each other, but, despite the general physical conditions for the formation and development of these phenomena, each case has its own process characteristics.

Ледяной дождь на Среднем Урале по данным радиозондирования

¹Калинин Н.А., ¹Связов Е.М., ¹Поморцева А.А., ^{1,2}Пищальникова Е.В.

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

²Пермский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Пермь, Россия

E-mail: meteo@psu.ru

Ледяной дождь (замерзающий дождь) – редкое метеорологическое явление – в последние годы в России в переходные периоды года и зимой при оттепелях отмечается довольно часто. В отдельных случаях явление сопровождается образованием гололеда и сложного отложения. Согласно [2], ледяной дождь представляет собой «мелкие прозрачные ледяные шарики, размером 1–3 мм в диаметре. Образуется при замерзании капель дождя, когда последние падают сквозь нижний слой воздуха с отрицательной температурой». В западной литературе приводится термин «замерзающий дождь», – это дождь который выпадает жидким, но на поверхности Земли и на незащищённых предметах он замерзает, формируя слой гололёда [3]. В последнем случае осадки должны выпадать на поверхность с отрицательной температурой в переохлажденном виде. Явления сходны по физическим условиям формирования: в нижней тропосфере и на поверхности земли должна отмечаться температура 0°C и ниже, а над ними должен быть расположен тёплый слой воздуха с температурой 0°C и выше. Такое распределение температуры характерно для выноса влажной тёплой воздушной массы, связанной с прохождением тёплого фронта, фронта окклюзии или волнового возмущения при наличии на пути их перемещения холодного антициклона.

Рассмотрим физические условия образования и особенности развития явления ледяного дождя на Урале.

Рассмотрены данные радиозондирования близкие ко времени выпадения ледяного дождя на метеостанциях Пермского края и Свердловской области. При этом пункты радиозондирования выбирались по возможности как можно ближе к месту фиксации данного явления. Всего был рассмотрен 31 случай радиозондирования на аэрологических станциях Пермь, Верхняя Дуброва, Ивдель, Киров и Сыктывкар с ноября 2019 г. по март 2020 г. включительно. Кроме того отдельно были рассмотрены аэрологические данные за сроки, ближайшие ко времени выпадения ледяного дождя, но когда явление либо еще не началось, либо уже закончилось.

В целом можно сказать, что вертикальное распределение метеорологических величин при ледяном дожде и замерзающем дожде имеет большое сходство друг с другом (таблица). Однако развитие процессов происходит по-разному в каждом случае. Кроме того, выделяются «классические» случаи, когда распределение метеорологических величин в тропосфере соответствует описанным в научной литературе условиям, и «неклассические» случаи, когда отмечается аномальное распределение метеорологических величин. Так в «классическом» случае температура у земной поверхности близка к нулю, отмечается приподнятая инверсия температуры, небольшие значения суммарного дефицита точки росы в слое от земной поверхности до изобарической поверхности 850 гПа и наличие повышенных значений скорости ветра в пограничном слое атмосферы. К «неклассическим» отнесены случаи, при которых образование ледяного дождя происходит при отрицательных температурах у земной поверхности и на высотах, отсутствии инверсии температуры и, иногда, с большим суммарным дефицитом точки росы. Например, 23 декабря 2019 г. по данным за 00 ч ВСВ (всемирное скоординированное время) температура у поверхности Земли составила $-12,3^{\circ}\text{C}$, при этом максимальная температура составила $-3,5^{\circ}\text{C}$ на верхней границе инверсии. Количество случаев, когда температура во всем слое отрицательна, составляет 41,9% (13 случаев) от общего количества случаев радиозондирования. В 44,5% (14 случаев) приземная температура была в пределах от $+2$ до -2°C .

Еще одна особенность рассмотренных процессов заключается в наличии случаев с приземной температурой (T_s) выше $+6^{\circ}\text{C}$ (9,7% или 3 случая). Так 07 ноября 2019 г. максимальное значение T_s составило $+7,4^{\circ}\text{C}$. Это выше значений приземной температуры, которая может наблюдаться при замерзающих осадках (около 0°C). Минимальные значения приземной температуры также выше при ледяном дожде, чем при замерзающих осадках и составляют $-12,3^{\circ}\text{C}$ (-20°C при замерзающих осадках). При рассмотрении ситуаций без явлений, но близких ко времени регистрации ледяного дождя температура у поверхности Земли близка к значениям, отмечавшимся при выпадении замерзающих осадков. Закономерности распределения приземных значений температуры точки росы (Td_s) близки к таковым для значений приземной температуры. Аналогичная особенность отмечается для температуры изобарической поверхности 850 гПа (T_{850}). Соответственно высота изотермы минус 10°C (уровень кристаллизации) расположена выше при ледяном дожде, чем в других приведенных нами случаях.

Исходя из параметров радиозондирования, по методу Ягудина [1] оценивалась возможность возникновения гололеда. В соответствии с методом прогностическими предикторами были температура у поверхности Земли, температура на изобарической поверхности 850 гПа и высота уровня кристаллизации. В 61,2% (19 случаев) наблюдений по данному методу прогнозировался гололед, из них в 9,7% умеренный гололед (3 случая).

Распределение метеорологических параметров в атмосфере при ледяном дожде, замерзающем дожде и при отсутствии явлений на Среднем Урале

Показатель	Ледяной дождь			Замерзающий дождь			Без явлений		
	Среднее	Мин.	Макс.	Среднее	Мин.	Макс.	Среднее	Мин.	Макс.
T_s	-0,5	-12,3	7,4	-4,3	-20	0	-3,5	-20,9	4,6
Td_s	-4,1	-13,3	7,1	-5,4	-22	0	-5,9	-23,9	4,2
T_{850}	-0,9	-7,9	3,2	-5,8	-13	4	-2,1	-7,1	4
Td_{850}	-6,2	-28,6	3,2	-	-	-	-7	-25,3	4
H_{-10}	3494	2555	4000	2619	600	4400	2996	2050	3800
$H_{нг}$	769	-	1331	765	-	2250	615	-	1150
$T_{нг}$	-4	-12	5	-8,5	-25	-1	-6	-21	1
$H_{нг}$	1247	285	2018	1277	180	2650	1245	802	1800
$T_{вг}$	0,2	-7,9	6,2	-4,4	-13	4	-0,6	-7,1	4
ΔH	477	9	1298	510	9	1500	630	87	1425
Σd	8,9	0,3	41	3,9	1	19	7,3	0,4	22,5
H_{max}	1044	218	2231	1002	450	2200	781	350	1037
D_{max}	246*	20*	325*	246	15	350	236	165	280
V_{max}	19	5	30	17	6	35	15	8	27

Далее рассматривалась высота распространения зон инверсионного распределения температуры во всех исследуемых случаях. Установлено, что средняя высота нижней границы инверсии составляет около 760 м над уровнем моря. Она примерно одинакова как для случаев с замерзающими осадками, так и со случаями без явлений. Максимальная высота нижней границы облачности ($H_{нг}$) в случаях с ледяным дождем составляет 1331 м, что имеет сходные значения с наблюдениями, когда явлений не было

(1150 м). В случае замерзающих осадков максимальная высота почти в 2 раза выше – 2250 м. Температура на нижней и верхней границах инверсии при ледяных осадках фиксируется выше, чем в остальных случаях, так же, как это отмечалось для рассмотренных нами ранее температурно-влажностных характеристик.

Средняя высота верхней границы инверсии ($H_{\text{вг}}$) составляет примерно 1250 м как с явлениями, так и без них. Минимальная высота верхней границы с явлениями составляет 285 м при ледяном дожде, 180 м при замерзающих осадках и 800 м при отсутствии явлений, т.е. примерно в 3–4 раза выше.

Мощность инверсий (ΔH) в пограничном слое для разных вариантов аэрологических данных примерно одинакова и составляет в среднем около 500–600 м.

Средний суммарный дефицит точки росы (Σd) в слое от земной поверхности до изобарической поверхности 850 гПа имеет самые высокие значения для случаев ледяного дождя (8,9°C), а самые низкие значения этого показателя характерны для замерзающих осадков (3,9°C).

Сильный ветер на высоте свидетельствует о наличии больших барических градиентов и способствует выносу теплого влажного воздуха. Высота, на которой наблюдаются максимальные скорости ветра в пограничном слое (H_{max}), в среднем составляет около 1000 м для случаев с явлениями и около 780 м, когда явления не наблюдались. Преобладающее направление максимального ветра – юго-западное. При этом в среднем максимальные скорости выше в случаях ледяного дождя и замерзающих осадков.

Таким образом, несмотря на общие физические условия образования и развития явлений ледяного и замерзающего дождя, каждый случай имеет свои особенности протекания процесса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-45-590021).

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Руководство по краткосрочным прогнозам погоды: Ч. I. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 546 с.*
2. *Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.*
3. *Glossary of Meteorology. Boston, Massachusetts: American meteorological society, 1959. 638 p.*

Mapping changes of stress-strain state of a landslide slope using Earth's natural pulsed electromagnetic field method

Malyshkov S.Yu., Gordeev V.F., Polivach V.I.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: msergey@imces.ru

Tomsk region presents a wide variety of hazardous natural processes and phenomena. Such events, that may indirectly induce or amplify socio-economic or technogenic risks, exhibit considerably varying scales in time and space. Landslide processes are rather common phenomena in Tomsk region. Landslides are one of the major negative influences on the ecological situation in Tomsk. Landslide processes reduce the stability of real estate objects, compromise the integrity of transportation and utility infrastructure, endanger population safety. In the capital city of Tomsk region the most probable reason for landsliding is the technogenic stress to the geological environment, and with the city growth the stress increases, hence there is an increasing urgency to research and forecast landslide activity.

Field research was carried out on the bank slopes of the Tom river in order to optimize mapping methods of active landslides and instrumental detection of their hazard category. The research used Earth's natural pulsed electromagnetic field (ENPEMF) method based on the phenomenon of electromagnetic emission - dielectric materials emissive ability when they are acted on. Electromagnetic emission emerges in the process of charges generation and relaxation on fracture planes during the stress state of the rocks. Pulses emerge both when dielectric uniformity changes and when electrolyte-filled capillars rift. Observing electromagnetic emission allows the monitoring of stress-strained state of the rock formation. We have chosen the spatial distribution of ENPEMF intensity as the informative feature when calculating ENPEMF anomalies.

Field research on the landslide indicated that exogenic slope processes can develop rapidly and occasional surveys are not enough to protect infrastructure objects. The fact that landslide activity and dynamics depend on the humidity of the constituting materials and the groundwater line is widely known for a long time. However, we didn't find any references to the research on the relation between the stress-strain state of the rocks and precipitation intensity.

During landslide surveys there are usually the following operations:

- geotechnical survey of a terrain, establishing parameters of revealed landslides and active focuses (landslide heads, rib spalling, drag and pressure ramparts) and their influence on geodynamics;
- Fracture-morphological survey of active landslides and adjacent slopes, distinguishing landslide tension fractures, tension and shear fractures, lowered tension and shear fractures, compression fractures and pressure ramparts, which provide evidence about landslide processes development.

In both cases surveys are occasional and in the latter case results are subjective and heavily depend on the specialist's qualification.

There is a persisting risk of socially significant facilities disruption due to a landslide activity in Tomsk and many of Tomsk region's residential areas. An ongoing online monitoring of stress-strain state of the rocks is necessary. Such monitoring can be implemented using ENPEMF method.

Картирование изменений напряженно-деформированного состояния оползневого склона методом естественного импульсного электромагнитного поля Земли

Малышков С.Ю., Гордеев В.Ф., Поливач В.И.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
E-mail: msergey@imces.ru

Территория Томской области представлена широким спектром опасных природных процессов и явлений. Эти события, которые могут напрямую и опосредованно провоцировать или усиливать социально-экономические или техногенные риски, характеризуются существенно различными масштабами во времени и пространстве. Довольно распространенным явлением в Томской области являются оползневые процессы. Наиболее остро оползневая проблема стоит в таких населенных пунктах, как г. Томск, г. Колпашево, п. Кедровка, п. Усть-Бакчар и др., в пределах которых установлен особый градостроительный регламент и введены специальные нормы и правила использования территорий. Оползни являются одним из главных факторов, которые отрицательно влияют на экологическую обстановку в Томске. Оползневые процессы снижают устойчивость объектов недвижимости, нарушают целостность транспортной и инженерной инфраструктуры, а также угрожают безопасности проживания людей. В областном центре Томской области, самой вероятной причиной схода участков грунта является техногенная нагрузка на геологическую среду, а с ростом города, нагрузка все время увеличивается, поэтому проблема изучения и прогнозирования оползней становится все более актуальной.

С целью оптимизации методов картирования активных оползней и инструментального определения категории их опасности в 2019 году были проведены экспедиционные исследования на береговом склоне р. Томь в районе Лагерного сада. Лагерный сад расположен в южной части г. Томска, включает в себя участок Коммунального моста через р. Томь до ул. 19-ой Гвардейской Дивизии. Этот участок подвержен интенсивному развитию оползневых процессов, овражной эрозии и плоскостного смыва. В 1979г. для предотвращения разрушения склона и защиты инженерных сооружений в этой части города был разработан ряд рабочих проектов противооползневых мероприятий, реализация которых в той или иной мере позволила снизить активность оползневых процессов. В дальнейшем был разработан "Комплексный проект противооползневых мероприятий на правом берегу р. Томи в г. Томске", согласно которого на склоне были проведены соответствующие мероприятия, выполнено строительство различных видов противооползневых. Несмотря на проведенные противооползневые мероприятия экзогенные склоновые процессы в Лагерном саду продолжают, что делает разработку новых методов прогноза подвижек грунтов еще более актуальным для региона. На выбранном для исследований участке проявляются внешние признаки активного оползня, а именно: оползневые трещины, оползневые уступы, заболоченность, «пьяный» лес, взбугренность ландшафта, разрушенное здание. Оползень угрожает объектам инфраструктуры города, которые находятся в непосредственной близости.

Исследования проводились методом естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) основанном на явлении электромагнитной эмиссии – способности диэлектрических материалов излучать электромагнитные сигналы при воздействии на них. Электромагнитная эмиссия возникает в процессе образования и релаксации зарядов на плоскостях трещин при изменении напряженного состояния массива горных пород. Они возникают как при изменении сплошности материалов-диэлектриков (горных пород), так и при разрыве, заполненных электролитом капилляров. Наблюдения за процессом электромагнитного излучения позволяет контролировать напряженно-деформированное состояние горного массива. В горных породах источниками естественных электромагнитных полей являются неоднородности структуры грунтов, разнонапряженные структуры, трещины и микротрещины. В результате ме-

ханоэлектрических преобразований под действием деформационных волн из нижней мантии, приливных сил, микросейсмических колебаний, ветровой и техногенной нагрузки на этих источниках возникают импульсные электромагнитные поля, которые и создают естественный электромагнитный фон литосферного происхождения. Многолетние измерения в различных регионах показали, что ЕИЭМПЗ литосферного происхождения имеет ярко выраженный устойчивый суточный и сезонный ход. Это объясняется тем, что деформационные волны в земной коре связаны с неравномерным вращением Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца. Суточные хода, зависят от календарной даты, географических координат местности, ее геофизических особенностей. Импульсные электромагнитные поля могут меняться как при изменении состояния грунтов, так при изменении воздействия на источники полей. Например, типичные суточные хода могут нарушаться в случаях изменения ритмичного движения земной коры в результате объединения ее отдельных блоков в консолидированную область при подготовке землетрясений или при изменении напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтов. Таким образом, метод регистрации ЕИЭМПЗ является универсальным инструментом для геофизической разведки, мониторинга геодинамической активности земной коры и научных исследований в области наук о Земле.

Естественное ритмичное движение земной коры хорошо выявляется только при определенной оптимальной чувствительности регистраторов. При слишком высокой чувствительности аппаратуры в регистрируемом потоке импульсов преобладают шумовые компоненты атмосфериков и импульсы помехи. При низкой чувствительности регистрируются только импульсы от наиболее мощных грозových разрядов, и отсутствуют импульсы от литосферных источников. Поэтому чувствительность регистраторов должна иметь некоторые оптимальные значения, зависящие от свойств геологической среды, характера атмосферных явлений в районе регистрации и от решаемых задач. Перед началом работ все используемые многоканальные геофизические регистраторы были настроены на одинаковую чувствительность с учетом местных геологических условий и уровнем техногенных помех. Настройка проводилась на расстоянии, не превышающем длину волны от намеченных профилей для измерения ЕИЭМПЗ в центральной части площадки. Для настройки на оптимальную чувствительность использовались специальные тарировочные зависимости, полученные на основе многолетних исследований естественного импульсного электромагнитного поля Земли в различных регионах Евразии, Windows-приложения "MGR-Explorer", "MGR_Analiz", "MGR_Field". Авторство всех перечисленных программ принадлежит исполнителям настоящих работ, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

В дальнейшем при производстве работ регистратор с серийным номером 0003 использовался как вариационный (реперный) для измерения фоновых вариаций ЕИЭМПЗ в режиме непрерывных измерений. Регистраторами с заводскими номерами 0004, 0005 производилась съемка пространственно-временных вариаций ЕИЭМПЗ по заранее заданным пикетам.

Каждым из маршрутных и реперным регистратором производилась съемка параметров ЕИЭМПЗ по двум каналам преимущественного приема в направлениях С-Ю и З-В. На каждом из пикетов измерения производились в течение 2 минут с интервалом дискретизации 1 секунда. Реперным регистратором производились замеры в режиме непрерывного мониторинга с дискретом 1 секунда. Синхронизация регистраторов по времени производилась перед началом работ.

В качестве информативного признака при расчете аномалий ЕИЭМПЗ было выбрано пространственное распределение интенсивности ЕИЭМПЗ. Для его расчета сначала проводился сравнительный анализ данных, зарегистрированных реперной и маршрутной станцией. В дальнейшем из расчета удалялись импульсы большой амплитуды, имеющие одно время прихода на регистраторы. Такие импульсы считались пришедшими от далеких источников не связанных с локальным геологическим строением, например гроз. Затем рассчитывалось среднее значение интенсивности импульсного потока на каждом пикете и среднее значение интенсивности на реперной станции за тоже время измерений. Путем деления средней интенсивности на пикете на среднюю интенсивность на реперной станции получали коэффициент, отражающий пространственное изменение ЕИЭМПЗ для каждого из пикетов.

Отрицательные аномалии в структуре ЕИЭМПЗ, как правило, приурочены к зонам сжатия, либо к осевым линиям тектонических нарушений из-за того, что они забиты малоизлучающей глиной трения. Так, крупные активные геологические разломы выделяются в структуре ЕИЭМПЗ бухтообразной аномалией с положительным превышением интенсивности ЕИЭМПЗ в 10 и более раз на бортах разлома и снижением интенсивности относительно фоновых значений по его осевой линии. Участки со сложным напряженно-деформированным состоянием залегания горных пород, как правило, выделяются положительной аномалией по одному из направлений приема ЕИЭМПЗ с отрицательной по каналу с другим направлением приема. На таких участках возможны активизация оползней, осыпи и другие локальные геодинамические процессы.

Таким образом, при выполнении настоящих работ в качестве критерия опасности геодинамических структур различной кинематики были выбраны следующие показатели:

- превышения ЕИЭМПЗ в 10 и более раз относительно фоновых значений – особо активные;
- изменения в 1,3-10 раз слабоактивные или приуроченные к зонам трещиноватости;
- отличие от фоновых значений на 30% и менее – неактивные структуры.

Фоновые значения – значения, равные 1.

Всего на выбранном участке было проведено два площадных исследования. Для этого участок был разбит на 4 профиля с расстоянием между профилями 40 м и каждый профиль разбит на 15 пикетов с расстоянием между пикетами 15 м. Таким образом, общее количество точек измерений составило 60 пикетов.

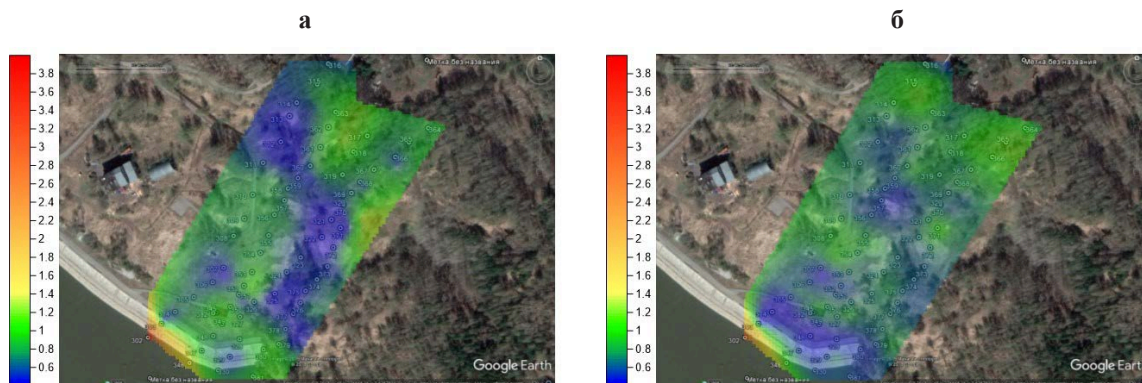


Рис. 1. Карта аномального ЕИЭМПЗ: а – канал С-Ю; б – канал З-В.

Карта аномального ЕИЭМПЗ полученная в начале августа по двум взаимно ортогональным направлениям приема приведена на рисунке 1. Исследования показали, что большая часть склона находится в напряжении сжатия. При этом, прибрежная зона находится в растяженном напряженном состоянии. Следует отметить засушливые условия лета 2019 года в районе исследования. Низкий уровень грунтовых вод и слабая обводненность способствовала устойчивому состоянию горных пород на склоне.

Повторные экспедиционные исследования были проведены по тем же пикетам в конце августа. Инструментальные измерения показали, что прошедшие в промежутке времени между экспедициями дожди изменили напряженно-деформированное состояние горных пород в пределах исследуемого участка. Обобщенная картина поля приведена на рисунке 2. На карте аномального ЕИЭМПЗ можно выделить 2 участка с напряженным состоянием в виде растяжения. Эти участки хорошо повторяют контуры двух оползней выявленных геоморфологическим анализом и разделенных между собой валом напользания, который территориально попал в центр исследуемой площадки. Контуры этих оползней на карте аномалий (рисунок 2) нанесены пунктирной линией.

Экспедиционные исследования на оползне показали, что экзогенные склоновые процессы могут развиваться с достаточно высокой динамикой и для защиты объектов инфраструктуры эпизодических исследований недостаточно. Нужен постоянный мониторинг НДС горных пород.



Рис. 2. Карта аномального ЕИЭМПЗ.

Исследования С.Ю. Малышкова и В. Ф. Гордеева выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ проекта 18-47-700005 р_а), исследования Поливача В. И. выполнены в рамках государственного задания ИМЗС СО РАН.

Radar characteristics of ice rains in the Urals and adjacent areas

Pomortseva A.A.

Perm State University, Perm, Russia
E-mail: meteo@psu.ru

Ice rain leads to ice, icing of transport, structures and mechanisms, wire breakage, damage to trees. In recent years, an increase in the number of cases of this phenomenon has been recorded. It is recorded not only in the transition periods of the year, but also in winter with thaws. The process develops when there are layers of positive and negative air temperature in the lower atmosphere. From the warm layer, rain drops enter the lower layer of air with a negative temperature and freeze, forming ice balls with liquid supercooled contents. If at the same time the temperature of the surface and objects on which ice rain falls below 0 °C, then ice forms. A study of the meteorological conditions of the formation of ice rains, taking into account the data of modern recording instruments, will make it possible to better study this dangerous phenomenon and improve the quality and advance forecast of it.

Ice rain is noted when passing a warm front, warm occlusion fronts or during wave formation. Due to the removal of warm moist air, clouds of layered and cumulus-shaped forms are formed, precipitation of a cover and storm nature occurs. Such clouds are well recorded by meteorological radars. The modern network of the Russian DMRL includes 54 radars, from which information is transmitted every 10 minutes with a horizontal resolution of 1-4 km. By the values of radar reflectivity in the cloud thickness by kilometer layers, the height of the cloud radio echo and their changes, the intensity of processes taking place in the atmosphere and their trend can be estimated.

This paper presents the results of the study of the radar characteristics of cloudiness in case of supercooled precipitation in the study territory from November 2019 to March 2020. The values of radar reflectance in the core during the period of highest precipitation intensity, maximum height of the radio echo of cloudiness), the type of phenomenon, as well as the change of these characteristics during the passage of the front are considered. The data of the DMRL Vologda, Kotlas, Izhevsk, N. Novgorod, Kirov were evaluated. The assessment of the synoptic situation and weather conditions was carried out on the basis of data from the network of weather stations and weather maps provided by the Perm Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring.

In general, it can be noted that subcooled precipitation causing ice deposits and ice formation in the transition periods of the year falls out of clouds with reflectance values in the radar core, corresponding to weak storm precipitation and strong and moderate cover precipitation (respectively clouds and cloud systems Cb and As-Ns) of the warm period.

The work was carried out with the support of RFBR (project No. 19-45-590021).

Радиолокационные характеристики ледяных дождей на Урале и прилегающих территориях

Поморцева А.А.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия
E-mail: meteo@psu.ru

Ледяной дождь приводит к гололеду, обледенению транспорта, сооружений и механизмов, обрыву проводов, повреждению деревьев. В последние годы фиксируется увеличение числа случаев этого явления. Фиксируется оно не только в переходные периоды года, но и зимой при оттепелях. Процесс развивается при наличии в нижней атмосфере слоев положительной и отрицательной температуры воздуха. Из теплого слоя капли дождя попадают в нижний слой воздуха с отрицательной температурой и замерзают, образуя ледяные шарики с жидким переохлажденным содержимым. Если при этом температура поверхности и предметов, на которые выпадает ледяной дождь ниже 0°C, то образуется гололед. Исследование метеорологических условий образования ледяных дождей, с учетом данных современных регистрирующих приборов, позволит лучше изучить это опасное явление и повысить качество и заблаговременность его прогноза.

Ледяной дождь отмечается при прохождении теплого фронта, теплых фронтов окклюзии или при волнообразовании. За счет выноса теплого влажного воздуха образуются облака слоистообразных и кучевообразных форм, выпадают осадки обложного и ливневого характера. Такие облака хорошо фиксируются метеорологическими радиолокаторами. Современная сеть ДМРЛ России включает 54 радара, информация с которых передается каждые 10 мин с горизонтальным разрешением 1–4 км. По значениям радиолокационной отражаемости в толще облака по километровым слоям, высоте радиоэха облачности и их изменениям можно оценить интенсивность проходящих в атмосфере процессов и их тенденцию.

В данной работе приводятся результаты исследования радиолокационных характеристик облачности при выпадении переохлажденных осадков [1, 2] на территории исследования в период с ноября 2019 г. по март 2020 г. Рассмотрены значения радиолокационной отражаемости (Z) в облаке в период наибольшей интенсивности осадков, максимальной высоты радиоэха облачности ($H_{\max}$), тип явления, а также изменение этих характеристик при прохождении фронта. Оценивались данные ДМРЛ Вологда, Котлас, Ижевск, Н. Новгород, Киров. Оценка синоптической ситуации и погодных условий производилась на основании данных сети метеостанций и по картам погоды, предоставленным Пермским ЦГМС.

Поскольку радиолокационные данные представляют собой по сути отраженный от метеоцели сигнал, преобразованный в вид явления на основе физических закономерностей, то для повышения достоверности обрабатываемых данных были использованы только те радиолокационные сроки зондирования, которые совпадали со временем фиксации ледяного дождя на метеостанциях. При этом принимались следующие допущения: радиолокационный срок может отличаться от времени регистрации явления не более чем на 5 минут, конвективные ячейки с явлением находятся на удалении не более 30 км от метеостанции.

За период исследования на европейской территории России был зафиксирован ряд случаев ледяного дождя, три из которых легли в основу данного исследования: 10–11 ноября 2019 г., 23–24 декабря 2019 г. и 8 марта 2020 г. Первые два случая вызвали сильные гололеды и повлекли значительный материальный ущерб. В первом случае явление охватило в основном Пермский край, во втором наиболее сильно пострадали Удмуртия, Кировская область и юго-запад Пермского края, в третьем при смещении фронта ледяные осадки и образование гололеда были зафиксированы на ряде метеостанций Пермского края.

11 ноября 2019 г. через Пермь проходил теплый фронт. Утром 11 ноября по центральным и южным районам Пермского края и в Перми начался переохлажденный дождь. Днем зона осадков распространилась на северные районы. В Перми выпало 5 мм осадков в виде переохлажденного дождя, что привело к образованию сильнейшей гололедицы. На севере края осадков выпало больше, чем по югу (в Ныробе 12 мм, в Кочево 8 мм, в Березниках 9 мм). Днем температура воздуха перешла через 0°C , и часть осадков выпала в виде обычного дождя. Максимальный диаметр отложений гололеда (4 мм) отмечен в Ныробе, Березниках и Кочево.

По мере приближения фронта произошло увеличение мощности облаков системы Ns-Cb, усиление интенсивности осадков. Основная система облаков и осадков была сдвинута вперед относительно приземной линии фронта. При прохождении атмосферного фронта изменялось состояние атмосферы и погодные условия. Эти изменения отражались на микрофизических свойствах облака и, следовательно, на его радиолокационных характеристиках (радиолокационной отражаемости на разных уровнях в пределах облака). В период с 00:00 до 01:50 ч МСВ средняя высота радиоэха составила 8 км, а радиолокационная отражаемость в нижнем километровом слое (у поверхности Земли) – 30 дБZ, что соответствует ливневым

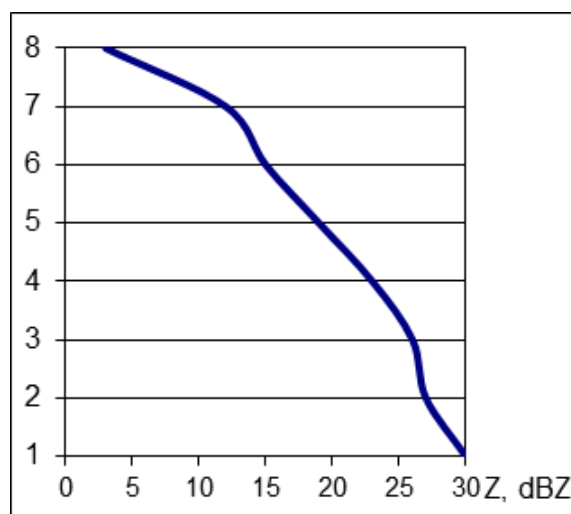


Рис. 1. Средний профиль радиолокационной отражаемости облачности в сроки 00:00–01:50 ч МСВ 11.11.2019 г.

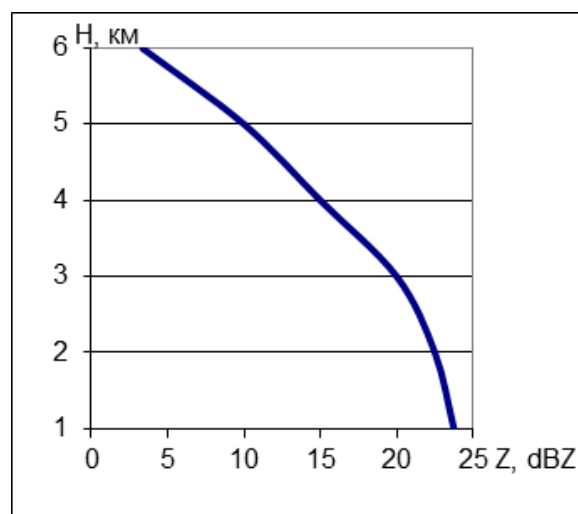


Рис. 2. Средний профиль радиолокационной отражаемости облачности в сроки 02:00–06:00 ч МСВ 11.11.2019 г.

осадкам слабой и умеренной интенсивности или сильным обложным осадкам. Максимальные значения радиолокационной отражаемости (24-30 дБZ) фиксировались до высоты 4 км, в слое облака от 5 до 7 км происходит плавное снижение отражаемости до 12 дБZ, выше 7 км – резкое падение Z до нулевых значений (рис. 1). Подобное распределение отражаемости с высотой является признаком развития конвекции и полях слоистообразных облаков и выпадения ливневых осадков на фоне обложных.

Непосредственно перед, на и за линией фронта у земли отмечается понижение высоты радиоза и прекращение ливневых осадков (01:30-06:00 ч МСВ). В полях средних характеристик отмечены следующие значения: средняя высота радиоза 5-6 км, радиолокационная отражаемость у Земли – 24 дБZ, максимальные величины отражаемости наблюдаются до высоты 3 км, выше 3 км к вершине облака отражаемость резко уменьшается до нуля. Такой профиль радиолокационной отражаемости характерен для облаков Ns-As с осадками сильной и умеренной интенсивности (рис.2).

Оттепель в конце декабря 2019 г. стала результатом выноса тепла при выходе южного циклона и смещения малоподвижного теплого фронта. 23-25 декабря ледяной дождь отмечался на территории нескольких субъектов РФ. От гололеда пострадали Кировская область (Киров), респ. Удмуртия (Ижевск, Глазов, Игра), Пермский край (Верещагино, Ножовка, Пермь).

В этот период наиболее сложные погодные условия наблюдались в Кирове 23.12.2019 г. с 00:00 ч МСВ. В нижнем слое облака отмечалась радиолокационная отражаемость 40 дБZ, что соответствует выпадению ливневых осадков сильной и умеренной интенсивности. Выше происходит достаточно резкое падение отражаемости, которая вблизи верхней границы радиоза на высоте 7 км сохраняет значение 15 дБZ. Такое распределение отражаемости является признаком развития конвекции и полях слоистообразных облаков.

Распределение радиолокационных характеристик на территориях в той или иной степени подвергшихся выпадению переохлажденных осадков с формированием гололеда 23-25.12.2019 г. отражает рис. 3. На нем приведены средний профиль радиолокационной отражаемости с высотой, а также распределение по высоте минимальных и максимальных значений отражаемости в вертикальном профиле.

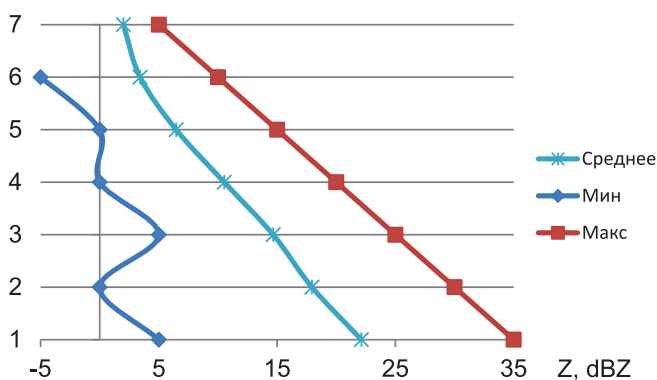


Рис. 3. Средний профиль радиолокационной отражаемости при переохлажденных осадках 23-25.12.2019 г.

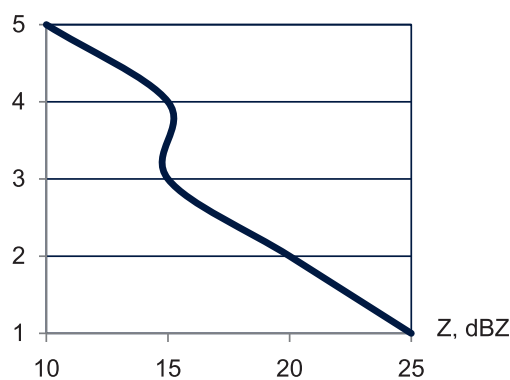


Рис. 4. Средний профиль радиолокационной отражаемости облачности 08.03.2020 г.

8 марта 2020 г. за счет интенсивного затока теплого влажного воздуха с районов средиземноморья отмечались интенсивные осадки. На рис. 4 приведен средний профиль радиолокационной отражаемости в облаках при выпадении ливневых осадков в г. Чайковский и Кунгур.

В целом можно отметить, что переохлажденные осадки, вызывающие отложения гололеда и образование гололедицы в переходные периоды года, выпадают из облачности с значениями отражаемости в радиолокационном ядре, соответствующими слабым ливневым осадкам и сильным и умеренным обложным осадкам (соответственно облакам и облачным системам Cb и As-Ns) теплого периода.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-45-590021).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Калинин Н.А., Поморцева А.А. Исследование радиолокационных характеристик переохлажденных осадков. Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края: сб. науч. тр. Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2014. Вып. 7. С. 47—49.
2. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Исследование радиолокационных характеристик для распознавания опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевой облачностью // Метеорология и гидрология, 2005, № 1. С. 84—95.

The selection of Scots pine seedlings' growth stimulants in extreme conditions of the Northern Kazakhstan steppe zone

¹Kabanova S.A., ²Musoni W., ²Zenkova Z.N., ²Danchenko M.A.

¹Kazakh Forestry Research Institute, Shchuchinsk, the Republic of Kazakhstan

²Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: kabanova.05@mail.ru, t-ekos@mail.ru

The main purpose of this research is to determine the optimal technology for the growth of plant seeds in extreme climate and soil conditions of Northern Kazakhstan using various growth stimulants for pre-sowing of Scots pine seeds treatment and the introduction of growth substances into the soil to increase seed germination and accelerate seedling growth [1].

This research was conducted in the forest nursery of the State Forest Natural Park "Ertis Ormany" in Pavlodar region and the Arykbalyk branch of the State National Natural Park "Kokshetau" in Akmola region. The climate in the regions of interest is sharp continental. The unfavorable climate conditions of the nursery area represented as late spring and early autumn frosts, droughts, strong winds that often turn into dust storms. All these factors create extreme conditions for the growth of woody vegetation.

The main focus of this research were two-year-old Scots pine seedlings. Pre-sowing seed treatment was carried out by various stimulants: GNB, "Humate + 7 trace elements" and "Extrasol". In addition to pre-sowing seed treatment with stimulants, the soil was irrigated with "Extrasol" stimulator and the "AridGrow" soil activator along with the drip irrigation of sowing seeds.

The authors carefully examined the effects of various types of stimulants on the growth of Scots pine seedlings (height in cm) from two different nurseries. The measurements were taken at the end of the first and the second years of the trees' life. The bootstrap resampling method was used to study the significant differences in average plants height (number of repeats $M = 50\ 000$) [2]. As a result, it was found that the average height of the pines is normally distributed regardless of the year when the measurements were taken and the stimulants treatment, however, the parameters of normal distributions that depend on nurseries and stimulants were very different. For trees in the forest nursery of "Ertis Ormany", all stimulants helped to increase the trees' height compared to the control group of seeds. The most significant influence of the stimulants was observed after the second year of trees' life. For trees in the forest nursery of "Kokshetau", the stimulants' influence was not so obvious. A stable but not very significant influence was observed for the duration of two years by means of irrigation with soil activators "AridGrow" leading to increase by 7% for the first year and 24.7% for the second year.

The research proved that even in extreme climate and soil conditions of Northern Kazakhstan, pre-sowing treatment with stimulants positively affected the germination of seeds and the growth of one- and two-year-old seedlings. All the considered options of stimulants used in the nursery of "Ertis Ormany" demonstrated improved growth than that of the control sample of trees. In the climate and soil conditions of the Pavlodar region, authors recommend pre-sowing seed treatment with the "Humate + 7 trace elements" stimulants and irrigation of soil with the "AridGrow" stimulator, which most effectively affected the growth of seedlings. For the conditions of the Akmola region, we proposed to carry out pre-sowing treatment of pine seeds with "Extrasol" stimulator, spraying with GNB and irrigating the soil with an "AridGrow" stimulator. Thus, the authors established a set of substances for better stimulation of the Scots pine seedlings' growth in the extreme climate conditions of forest nurseries of Northern Kazakhstan.

REFERENCES:

1. Kabanova S.A., Zenkova Z.N., Danchenko M.A. *Regional Risks of Artificial Forestation in the Steppe Zone of Kazakhstan (Case Study of the Green Belt of Astana)*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, vol. 211, pp. 012055-1-012055-9.
2. Efron, B. *Bootstrap methods: Another look at the jackknife*. The Annals of Statistics 7, 1979, pp. 1-26

Обоснование подбора стимуляторов роста семян сосны обыкновенной в экстремальных условиях степных районов Северного Казахстана

¹Кабанова С.А., ²Мусони У., ²Зенкова Ж.Н., ²Данченко М.А.

¹Казахский научно-исследовательский институт лесного хозяйства и агролесомелиорации, Щучинск, Республика Казахстан

²Национальный исследовательский институт Томский государственный университет, Томск, Россия
E-mail: kabanova.05@mail.ru, t-ekos@mail.ru

Введение. Лесное хозяйство является одной из форм природопользования, которая имеет исключительное значение в сохранении и улучшении биологического и ландшафтного разнообразия. Как известно, леса играют важнейшую роль в глобальном углеродном цикле, накоплении ресурсов пресной воды, защите почвы от ветровой и водной эрозии. Проблемы лесопользования и лесопользования становятся все более многообразными и сложными. За последние годы очень сильно изменились стандарты управления лесами, которые должны отвечать возросшим международным, социальным, экологическим и экономическим требованиям [1].

Интенсификация лесного хозяйства резко усилила потребность отрасли в качественном посадочном материале для лесовозобновления в Казахстане. Все вышесказанное обуславливает перевод выращивания посадочного материала на промышленную основу, путем создания постоянных лесных питомников. Пересмотр существующих технологий выращивания посадочного материала и интенсификация использования имеющихся производственных ресурсов является актуальной задачей для Республики Казахстан [2].

Цель исследований – определение оптимальных технологий выращивания посадочного материала в экстремальных почвенно-климатических условиях Северного Казахстана, с применением различных стимуляторов для предпосевной обработки семян сосны обыкновенной и внесением в почву ростовых веществ для повышения всхожести семян и ускорения роста сеянцев.

Объекты и методы исследований. Данное исследование проводилось в лесном питомнике Государственного лесного природного парка (ГЛПР) «Ертіс орманы» Павлодарской области. На территории ГЛПР лес является комплексом экологических систем, объединяющим в одно целое растительный и животный мир, земельные и водные ресурсы. Уникальные ленточные боры Прииртышья являются уникальным природным богатством и требуют к себе бережного отношения. Основной задачей лесного хозяйства при проведении различных работ в борах является их сохранение и повышение продуктивности. Резерват расположен в подзоне сухой степи, характеризующейся резко континентальным климатом с жарким сухим летом, суровой малоснежной зимой, большими амплитудными колебаниями температур. Почвы в лесном питомнике боровые песчаные. Также опыты были заложены в Арыкбалыкском филиале государственного национального природного парка (ГНПП) «Кокшетау» Акмолинской области. Климат в районе исследования резко-континентальный, почвы – обыкновенный чернозем. К неблагоприятным особенностям климата района расположения питомников, создающим экстремальные условия для произрастания древесной растительности, следует отнести поздние весенние и ранние осенние заморозки, засухи, сильные ветры, которые часто переходят в пыльные бури [3].

Объектами исследования являлись двухлетние сеянцы сосны обыкновенной. Семена для выращивания посадочного материала были местного происхождения и собраны в насаждениях нормальной селекционной категории, 1-го класса качества. Предпосевная обработка семян проводилась различными стимуляторами – ГНБ, «Гуматом + 7 микроэлементов» и «Экстрасолом». Замачивание семян в растворах стимуляторов производилось в течение разного времени – от 5 минут до 24 часов согласно рекомендациям производителей ростовых веществ. После замачивания семена промывались водой и просушивались до воздушно-сухого состояния. Контролем служили семена, замоченные в чистой воде в течение 6 часов, как принято при производственном посеве в учреждениях лесного хозяйства. Посев семян выполнялся соответственно принятым в учреждениях лесного хозяйства требованиям. Контроль закладывался в двукратной повторности в конце каждого цикла вариантов опыта. Кроме предпосевной обработки семян стимуляторами производился полив почвы стимулятором «Экстрасолом» и активатором почвы «ЭридГроу». В питомнике применялось капельное орошение посевов, шланги для которого прокладывались одновременно с посевом.

За посевами проводились наблюдения за грунтовой всхожестью, которая определялась путем перечета всходов на учетном одном погонном метре во время массовых всходов. За учетный отрезок всегда принималась третья строчка на посевной ленте. Осенью производился подсчет сохранившихся растений и определялась выживаемость сеянцев в процентном отношении от грунтовой всхожести и замеры высоты у растущих сеянцев линейкой с точностью до 0,1 см, от поверхности почвы до верхушечной почки. Все полученные данные заносились в журнал наблюдений.

Результаты и обсуждение. В данной работе исследовалось влияние различных видов стимуляторов на рост сеянцев сосны обыкновенной (высота в см), которые выращивались в двух различных питомниках, измерения производились в конце первого и второго годов жизни деревьев. Так как результаты измерений были округлены или недостаточно точны (точность составляла 5 мм), а объемы выборки не всегда велики, то классические статистические тесты не позволили выявить нормальность рядов данных. Это не просто сузило, а фактически, ликвидировало возможности применения традиционных статистических процедур проверки гипотез о различии средних значений. Тест Манна-Уитни показал наличие значимых различий в ряде случаев, когда его применение было допустимо, но не их характер. В итоге, для детального изучения значимости различий в средней высоте растений был применен метод размножения выборок бутстреп с параметром моделирования $M = 50\,000$ [4,5]. В результате было выявлено, что средняя высота сосен распределена нормально вне зависимости от того, в какой год произведены измерения, обрабатывались ли семена стимуляторами или нет, однако параметры нормальных распределений оказались весьма различны [6]. В таблицах 1-4 представлены результаты бутстреп-анализа применения стимуляторов: полив почвы стимулятором «Экстрасол» разной концентрации (Ex 0.05 и 0.1 shower) и активатором «ЭридГроу» (ErGrw shower), опрыскивание препаратом ГНБ (GNB spray), предпосевная обработка семян стимуляторами – ГНБ (GNB 5 min), «Гумат + 7 микроэлементов» (Gum+7 18 h и Gum+7 24 h) и «Экстрасол» (Ex 0.1 5 min и Ex 0.05 5 min).

Заметим, что в питомнике ГЛРП «Ертіс орманы» все стимуляторы привели к увеличению роста деревьев по сравнению с контрольной группой семян, которая не подвергалась никакому воздействию, при этом улучшение было более значительным после второго года жизни растений (таблица 1, 2). Наилучшие результаты в течение обоих лет показало применение стимулятора «Гумат + 7 микроэлементов» и полив «ЭридГроу». Через год после обработки полив «ЭридГроу» показал прирост высоты на 14.1%, через два – на 37.2%, в то время как стимулятор «Гумат + 7 микроэлементов» – на 20.2% и 30.4%.

Для питомника в ГНПП «Кокшетау» влияние стимуляторов оказалось не столь очевидным (таблицы 3, 4). Стабильное, хоть и незначительное положительное влияние в течение двух лет дал полив стимулятором «ЭридГроу» – 7% в первый год и 24.7% во второй.

Таблица 1. Параметры бутстреп-распределения высоты сосен в см для питомника ГЛРП «Ертіс орманы», первый год жизни растений.

	Ex 0.05 shower	Ex 0.1 shower	Ex 0.1 5 min	Ex 0.05 5 min	GNB spray	GNB 5 min	ErGrw shower	Gum+7 18 h	Gum+7 24 h	Control
Среднее	2.789	2.627	2.634	2.678	2.831	2.726	2.829	2.980	2.569	2.480
Медиана	2.790	2.626	2.634	2.677	2.831	2.726	2.829	2.980	2.569	2.479
Мода	2.795	2.635	2.627	2.669	2.838	2.723	2.830	2.986	2.564	2.482
СКО	0.050	0.051	0.052	0.056	0.054	0.050	0.059	0.062	0.051	0.063
N	202	200	200	202	204	203	203	203	201	200

Таблица 2. Параметры бутстреп-распределения высоты сосен в см для питомника ГЛРП «Ертіс орманы», второй год жизни растений.

	Ex 0.05 shower	Ex 0.1 shower	Ex 0.1 5 min	Ex 0.05 5min	GNB spray	GNB 5min	ErGrow shower	Gum+7 18 h	Gum+7 24 h	Control
Среднее	7.739	7.063	6.350	6.963	7.262	7.337	8.575	8.150	7.562	6.250
Медиана	7.739	7.062	6.351	6.963	7.261	7.336	8.575	8.149	7.560	6.249
Мода	7.745	7.062	6.322	6.956	7.295	7.330	8.604	8.162	7.554	6.245
СКО	0.189	0.166	0.117	0.116	0.098	0.124	0.126	0.138	0.154	0.165
N	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40

Таблица 3. Параметры бутстреп-распределения высоты сосен в см для питомника ГНПП «Кокшетау», первый год жизни растений.

	Ex 0.1 shower	Ex 0.05 5min	GNB spray	Ex 0.1 5 min	Ex 0.05 shower	Gum+7 24 h	Gum+7 18 h	Control	ErGrow shower	GNB 5min
Среднее	4.044	4.481	4.676	5.043	4.287	4.144	4.228	4.600	4.939	4.152
Медиана	4.043	4.481	4.676	5.043	4.286	4.143	4.228	4.600	4.940	4.152
Мода	4.000	4.500	4.680	5.000	4.250	4.167	4.250	4.500	4.942	4.167
СКО	0.070	0.070	0.053	0.088	0.066	0.056	0.052	0.077	0.059	0.049
N	80	80	82	80	75	80	79	75	82	79

Таблица 4. Параметры бутстреп-распределения высоты сосен в см для питомника ГНПП «Кокшетау», второй год жизни растений.

	Ex 0.1 shower	Ex 0.05 5min	GNB spray	Ex 0.1 5 min	Ex 0.05 shower	Gum+7 24 h	Gum+7 18 h	Control	ErGrow shower	GNB 5 min
Среднее	15.326	11.696	11.703	11.294	11.309	12.410	13.638	11.587	14.452	13.525
Медиана	15.328	11.697	11.701	11.293	11.309	12.409	13.639	11.587	14.450	13.524
Мода	15.500	11.500	11.705	11.200	11.320	12.500	13.500	11.500	14.500	13.500
СКО	0.272	0.302	0.260	0.203	0.280	0.255	0.172	0.207	0.282	0.222
N	23	31	42	40	42	40	40	40	20	40

Выводы. Исследования показали, что даже в экстремальных климатических и почвенных условиях Северного Казахстана предпосевная обработка стимуляторами положительно воздействовала на всхожесть семян и рост одно- и двухлетних сеянцев. Все изученные варианты использования стимуляторов в питомнике ГЛРП «Ертіс орманы» показали результат лучше контроля. В условиях Павлодарской области можно рекомендовать проведение предпосевной обработки семян стимуляторами «Гумат + 7 микроэлементов», использовать полив почвы стимулятором «ЭридГроу», которые наиболее эффективно повлияли на рост сеянцев. Для условий Акмолинской области предлагается проведение предпосевной обработки семян сосны обыкновенной стимулятором «Экстрасол», опрыскиванием препаратом ГНБ и полив почвы стимулятором «ЭридГроу».

В результате проведенных работ и анализа роста сеянцев сосны обыкновенной в питомниках Северного Казахстана выявлен определенный набор оптимальных ростовых веществ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Данченко М.А., Кабанова С.А. Особо охраняемые природные территории Республики Казахстан и проблемы их сохранения // Актуальные проблемы лесного комплекса. - 2004. № 9. С. 86–88.
2. Kabanova S.A., Zenkova Z.N., Danchenko M.A. Regional Risks of Artificial Forestation in the Steppe Zone of Kazakhstan (Case Study of the Green Belt of Astana). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, vol. 211, pp. 012055-1–012055-9.
3. Байзаков С.Б., Искаков С.И., Нысанбаев Е.Н. Рекомендации по восстановлению леса на гарях в ленточных борах Прииртышья. Алматы, 2012. 12 с.
4. Shapiro S.S., Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika. 52 (3–4): 591–611, 1965, p. 593
5. Efron, B. Bootstrap methods: Another look at the jackknife. The Annals of Statistics 7, 1979, pp. 1–26
6. De Pascale S., Rouphael Y., Colla G. Plant Biostimulants: Innovative Tool for Enhancing Plant Nutrition in Organic Farming. Eur. J. Hortic. Sci., 2017, vol. 82, pp. 277–285.

Assessment of the use of reanalyses for the diagnosis of avalanche hazard in the Caucasus mountains

Kuksova N.E., Toropov P.A., Oleinikov A.D., Surkova G.V.

Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, Moscow, Russia
E-mail: kuksova_97@mail.ru

Now avalanches are a widespread natural phenomenon that significantly complicates the economic development of mountainous regions and poses a threat to human life. Avalanches are dangerous glaciological phenomena, and the forecast of future climate changes is inextricably linked with the forecast of associated dangerous phenomena. However, unlike other phenomena, avalanches are local and very complex in the variety of physics of the processes that cause them. Therefore, it is necessary to look for some physically justified methods, but capable of generalizing the forecast for the scale of the region, and not of one valley.

In order to assess the avalanche hazard, winter classification by air temperature and precipitation was performed using 31 HMSs of the Greater Caucasus during the cold period [Oleinikov, 2002]. The classification is based on the principle of a correlation matrix, in which winters are divided into four groups according to temperature conditions and moisture supply [Oleinikov, 2012]. Deviations are calculated through the seasonal

temperature value (the sum of precipitation for the season) and the standard deviation of this value. The ratio of hydrothermal conditions in the matrix determines 16 possible types of winters.

To solve the same problem, based on model results, we took the data of reanalyses Era-Interim (1980-2017), CFSR (1980-2019) and NCEP-NCAR (1948-2019). Seasonal values of surface temperature and precipitation totals for the period from November to March (winter period) for the Greater Caucasus region were selected. The reanalysis data was estimated using information from a network of meteorological stations. It can be concluded that reanalyses reproduces both actual values and the temporal dynamics of seasonal temperatures well. All reanalyses reproduce seasonal precipitation satisfactorily. Based on the data of meteorological stations, graphs of seasonal sums of precipitation and temperature values were constructed for selected points from 1960 to the current time for the winter period. No significant trend was detected, which indicates only the absence of changes on a seasonal scale, perhaps such changes take place within the season.

According to such data, a calculation was made using the hydrothermal matrix described above, and then compared with the data obtained at the weather station in Azau and compared with information about real seasonal avalanche conditions. We turn to the analysis of the type of avalanche hazard according to reanalysis. In areas of the Greater Caucasus, winters with extreme avalanches were observed in the winter of 1953-1954, 1955-1956, 1967-1968, 1971-1972, 1975-1976, 1986-1987, 1988-1989, 1992-1993 (statistics presented from 1951 to 1993). The same calculations were performed for all three reanalyses, and a comparison was made with the results of the Terskol meteostation. It should be noted that according to the results of calculations based on reanalyses over the past 20 years, 4 type of avalanche hazard were practically not observed. Thus, over the past 20 years, we have seen a decrease in the number of extreme avalanches.

Let us consider in more detail the comparison of the avalanche hazard index according to reanalysis data with meteorological observations. Most often, the degree of avalanche activity coincides for both types of data. In the NCEP-NCAR reanalysis, there is no discrepancy in more than 2 categories, unlike other reanalyses. It can be noted that NCEP-NCAR most often overestimates the avalanche hazard, while CFSR, on the contrary, often underestimates (but to a lesser extent). The Era-Interim reanalysis did not find such patterns.

According to the analysis of the main characteristics of the winter atmosphere, a large number of hazard avalanches were associated exclusively with a negative temperature anomaly at altitudes of 850, 700, and 500 hPa. Since the mid-20th century, a decrease in the integral moisture content in the air column has been observed, while catastrophic avalanches were associated precisely with the negative anomaly in the moisture content.

REFERENCES:

1. Oleynikov A.D. *Snow avalanches in the Bolshoy Caucasus in the conditions of general climate warming. Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. // Data of Glaciological Studies. – 2002. – No. 93. – p. 67–72. [In Russian].*
2. Oleinikov A. D., Volodicheva N. A. *Extreme winters of the XX-XXI centuries as indicators of snowfall and avalanche hazard in the conditions of the past and predicted climate changes // Ice and snow. - 2012. - No. 3 (119). - p. 52–57. [In Russian].*

Оценка использования реанализов для диагностики лавинной опасности в горах Кавказа

Куксова Н.Е., Торопов П.А., Олейников А.Д., Суркова Г.В.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия
E-mail: kuksova_97@mail.ru

Снежные лавины – опасное гляциальное явление, которое существенно усложняет хозяйственное освоение горных районов и представляет угрозу для жизни людей. Этот факт обосновывает необходимость детального изучения физических механизмов нарушения устойчивости снежных масс на горных склонах, зарождения и движения лавин, разработки методов прогнозирования лавинной опасности и совершенствования противолавинных мероприятий и технических сооружений. Не менее важной является оценка изменения лавинной опасности в горных районах на фоне меняющегося климата. В отличие от многих других опасных природных явлений, лавины очень локальны как по пространству, так и по времени, а комплекс порождающих их физических механизмов, весьма разнообразен. Поэтому одна из центральных задач современного лавиноведения – разработка простой, но физически обоснованной методики, способной выполнить вероятностный диагноз и прогноз лавинной опасности не для отдельно взятого склона, а для достаточно крупного горного региона. В большинстве

случаев исследования направлены на моделирование процессов в отдельно взятом лавиносборе, с подробным описанием физических процессов в снежной толще, на склоне и при движении снежно-воздушного потока [Турчанинова и др., 2015]. Такой подход не подходит для анализа, диагноза и прогноза лавинной опасности по всему горному региону. Существуют работы по синоптической типизации зим [Mock, Birkeland, 2000], однако они выполнены на основе разрозненных данных наблюдений, и без использования результатов численного моделирования атмосферы, а значит не предназначены для прогностических задач.

В данной работе для оценки лавинной опасности используется типизация зим по температуре воздуха и осадкам, выполненная по 31 ГМС Большого Кавказа за холодный период [Олейников, 2002]. В основу типизации положен принцип корреляционной матрицы, в которой зимы и по температурным условиям, и по влагообеспеченности разбиты на четыре группы. Отклонения считаются через сезонное значение температуры (сумма осадков за сезон) и среднеквадратическое отклонение данного значения. Соотношение гидротермических условий в матрице определяет 16 возможных типов зим (рис. 1).

		А	Б	В	Г
		$t \geq \bar{t} + \delta$	$\bar{t} \leq t < \bar{t} + \delta$	$\bar{t} - \delta \leq t < \bar{t}$	$t < \bar{t} - \delta$
①	$x \leq \bar{x} - \delta$	1950/51			1948/49
	$x - \delta < x \leq \bar{x}$				
	$\bar{x} < x \leq \bar{x} + \delta$				1953/54 1975/76
	$x > \bar{x} + \delta$	1962/63		1955/56, 1967/68, 1986/87	

□ 1 ▨ 2 ▩ 3 ■ 4

Рис. 1. Экстремальные зимы на Большом Кавказе (1936–1987 гг.): А – anomalно тёплые; Б – умеренно тёплые; В – умеренно холодные; Г – anomalно холодные; цифры в кружках: 1 – anomalно сухие; 2 – с дефицитом осадков; 3 – с осадками выше нормы; 4 – anomalно увлажнённые; лавинная опасность зим: 1 – слабая; 2 – средняя; 3 – сильная; 4 – anomalно сильная [Олейников, 2012].

Для решения той же задачи на основе модельных результатов были взяты данные реанализов Era-Interim (1980–2017 гг), CFSR (1980–2019 гг) и NCEP-NCAR (1948–2019 гг) с шагом сетки 0.75x0.75°, 0.5x0.5° и 2.5x2.5° соответственно. Далее были выбраны сезонные значения приземной температуры и сумм осадков за период с ноября по март (зимний период) для района Большого Кавказа. Предварительно было выполнено сравнение данных реанализов с наблюдениями на метеорологических станциях. Можно сделать вывод, что реанализы достаточно хорошо воспроизводит как фактические значения, так и временную динамику сезонных температур: средняя ошибка для зимнего сезона составляет ($\pm 0.65^\circ\text{C}$). Сезонные суммы осадков все реанализы воспроизводят удовлетворительно ($\pm 6.4\%$ от годовой суммы осадков). Простейший статистический анализ данных наблюдений за период 1960 – 2018 не выявил статистически значимых трендов температуры и осадков за холодный период (ноябрь–март), хотя тенденция к увеличению повторяемости теплых зимних сезонов с начала XXI века явно растет (рис. 4а). Внутрисезонные изменения коснулись, прежде всего, осадков, максимум которых с зимних месяцев смещается на март.

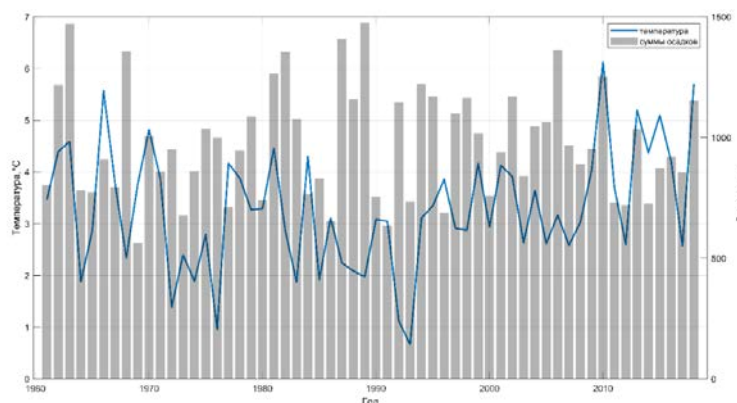


Рис. 2. Ход сезонных значений (ноябрь–март) приземной температуры и осадков на станции Красная Поляна.

Результаты расчета по гидротермической матрице, приведенной выше сравнивались с данными, полученными по метеостанции в Азау, и сопоставлялся с информацией о реальных лавинных сезонных условиях. Перейдем к анализу степени лавинной опасности по данным реанализа. В районах Большого Кавказа перечень зим с экстремальными лавинами следующий: 1953-1954, 1955-1956, 1967-1968, 1971-1972, 1975-1976, 1986-1987, 1988-1989, 1992-1993 (статистика представлена с 1951 по 1993 гг., [Володичева, 2014]). По классификации, предложенной в работе [Олейников, 2002] при расчете степени лавинной опасности 4 зимы попали в градацию “очень высокая лавинная опасность”, 2 – “высокая”. Такие же расчеты были проведены для всех трех реанализов, также было проведено сопоставление с результатами по метеостанции Терскол. Стоит отметить, что по результатам расчетов по реанализам за последние 20 лет практически не наблюдалась 4 степени лавинной опасности. Это связано как с температурным фактором (меньше зим с ярко выраженными отрицательными аномалиями температуры), так и с влажностным – сезонные суммы осадков практически не изменились, но внутри зимы максимумы сместились ближе к марту, когда вероятность сильных морозов существенно ниже. Таким образом за последние 20 лет мы наблюдаем уменьшение количества экстремальных лавин.

Рассмотрим подробнее сопоставление показателя лавинной опасности по данным реанализов с данными метеонаблюдений (рис. 3). Чаще всего степень лавинной активности совпадает по обоим видом данных. В реанализе NCEP-NCAR не встречается расхождение более, чем на 2 категории, в отличие от других реанализов. Можно отметить, что NCEP-NCAR чаще всего завышает лавинную опасность, а CFSR – наоборот чаще занижает (но в меньшей степени). У реанализа Era-Interim таких закономерностей не обнаружено.



Рис. 3. Сопоставление степени лавинной активности по данным реанализов NCEP-NCAR (а), Era-Interim (б) и CFSR (в) с метеостанцией Терскол. Цифрами обозначены, количество случаев.

По результатам анализа основных характеристик свободной атмосферы зимы с большим числом катастрофических лавин были связаны исключительно с отрицательной аномалией температуры на высотах 850, 700 и 500 гПа (рис. 4а), и при этом во всех случаях совпадали отрицательной аномалией влагосодержания (рис. 4б).

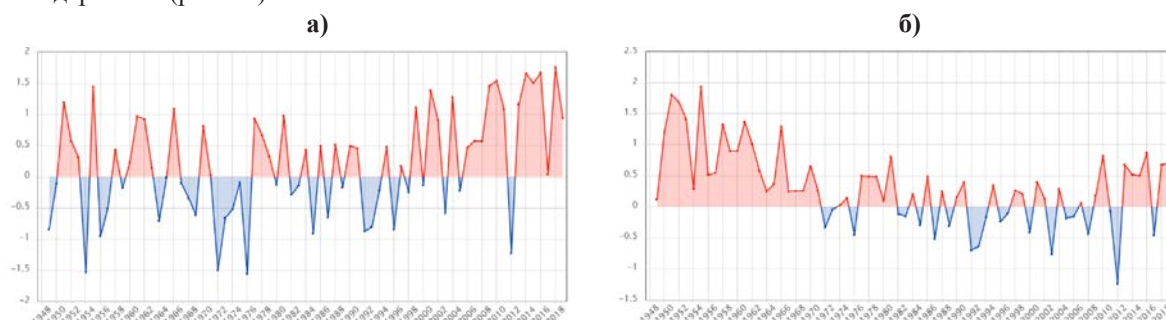


Рис. 4. Аномалии температуры относительно климатических норм на 850 гПа (а) и аномалия влагосодержания в столбе воздуха, кг/м² (б) для Кавказского региона.

Это означает, что ключевым фактором повышенной лавинной опасности на Центральном Кавказе по всей видимости является температурный фактор, а не интенсивность осадков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-05-00280)

ЛИТЕРАТУРА:

1. Турчанинова А. С., Селиверстов Ю. Г., Глазовская Т. Г. Моделирование снежных лавин в программе RAMMS в России // Геориск. – 2015. – № 4. – с. 42-47.

2. Олейников А. Д. Снежные лавины на Большом Кавказе в условиях потепления климата // *Материалы гляциологических исследований*. – 2002. – № 93. – с. 67-72.
3. Олейников А. Д., Володичева Н. А. Экстремальные зимы XX-XXI вв. как индикаторы снежности и лавинной опасности в условиях прошлого и прогнозируемого изменений климата // *Лед и снег*. – 2012. – № 3 (119). – с. 52–57.
4. Володичева Н.А., Олейников А.Д., Володичева Н.Н. Катастрофические лавины и методы борьбы с ними. // *Лед и снег*. – 2014. – № 4 (128) – с. 63-71.
5. Mock, C.J., Birkeland, K.W. *Snow Avalanche Climatology of the Western United States Mountain Ranges* // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* – 2000. – 81. – p. 2367-2392.

Assessment of conditions of aridity and humidity of the growing season on the territory of the Samara region

Mirsaeva N.A.

Kazan Federal University, Kazan, Russia

E-mail: NAMirsaeva@kpfu.ru

The paper analyzes the conditions of aridity and humidity of the vegetation period in the Samara region on the basis of the following agroclimatic indicators: D.A. Pedyu, the index of biological effectiveness and the coefficient of moisture G.N. Vysotsky and N.N. Ivanova. The analysis of the long-term dynamics of these indicators is carried out, the main spatio-temporal patterns in their distribution are revealed. The average daily data on air temperature and precipitation at ten stations of the Samara region for the period 1954-2019 were used as initial data NIIGMI.

According to the repeatability of humidification conditions according to the averaged data of the Samara region, in almost half of the considered cases, normal humidification conditions are observed. Medium droughts are more likely to occur in July.

Droughts are usually observed with an anticyclonic form of circulation. A spur of the Azores anticyclone extends to the territory of the Samara region, in the eastern periphery of which rapidly warming Arctic air masses invade. The most extreme values of the index D.A. Pedyu in the case of droughts in the summer, peaks were reached in July 2010 at most stations in the region; the maximum was noted at st. Syzran (4.44) and in August 1972 at the station Novodevichye (4.40). Averaged over the growing season (May-September) D.A. Pedyu reached a maximum at all stations of the Samara region in 2010.

According to the results, in the Samara region there is a tendency to increase the average annual air temperature.

The linear trend of long-term changes in the summer index D.A. Pedyu for the period 1954-2019, in which the active phase of warming was observed, is statistically significant and indicates an increase in the index for the entire growing season, in the 21st century there is a tendency to increase aridity, which must be taken into account in forestry and agricultural production.

Analysis of the spatiotemporal variability of agroclimatic characteristics allows us to establish that more arid conditions are growing in the region, especially in the warm period. This is more evident in the south and southwest, where droughts are more intense than in other areas of the region.

The Ivanov-Vysotsky wetting coefficient and the BEC index have almost the same dynamics. Temporary analysis of the indicated hydrothermal indicators did not reveal significant changes.

Оценка условий засушливости и увлажненности вегетационного периода на территории Самарской области

Мирсаева Н.А.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

E-mail: NAMirsaeva@kpfu.ru

В работе проанализированы условия засушливости и увлажненности вегетационного периода на территории Самарской области на основе следующих агроклиматических показателей: индекса засушливости Д.А. Педея, индекса биологической эффективности и коэффициента увлажнения Г.Н. Высоцкого и Н.Н. Иванова. Проведен анализ многолетней динамики указанных показателей, выявлены основные пространственно-временные закономерности в их распределении. В качестве исходных данных использовались среднесуточные данные по температуре воздуха и атмосферным осадкам по десяти станциям Самарской области за период 1954 – 2019 гг. НИИГМИ.

Для определения условий засушливости и увлажненности вегетационного периода, наблюдающегося с мая по сентябрь для территории Самарской области рассчитывался индекс Д.А. Педея, который учитывает отклонение от среднего значения суммы осадков и температуры воздуха [1]:

$$S_S = \frac{\Delta T}{\sigma_T} - \frac{\Delta R}{\sigma_R}, \quad (1)$$

где S_S – летний индекс Д.А. Педея, ΔT и ΔR – аномалии среднемесячных температур воздуха и количества осадков; σ_T и σ_R – их среднеквадратические отклонения.

Таблица 1. Градации коэффициента засушливости Д.А. Педея (S_S) [1].

Сезон года	Критерии S_i	Погодно-климатические условия
Теплый период	$S_i \geq 3$	Сильная засуха
	$3 > S_i > 2$	Средняя засуха
	$1 < S_i \leq 2$	Засушливые условия (слабая засуха)
	$-1 \leq S_i \leq 1$	Нормальные условия увлажнения
	$-2 \leq S_i < -1$	Влажные условия (слабое избыточное увлажнение)
	$-3 < S_i < -2$	Сильное избыточное увлажнение
	$S_i \leq -3$	Сильное избыточное увлажнение

Повторяемость условий увлажненности по осредненным данным Самарской области представлена в таблице 2.

Таблица 2. Повторяемость атмосферных засух (%) по индексу Д.А. Педея.

1 – средняя засуха, 2 – нормальное увлажнение, 3 – среднее избыточное увлажнение.

Станция	май			июнь			июль			август		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Тольятти	4,5	34,8	7,6	7,6	40,9	7,6	4,5	27,3	9,1	7,6	4,5	10,6
Новодевичье	4,5	37,9	7,6	9,1	37,9	10,6	10,6	28,8	6,1	6,1	47,0	9,1
Сызрань	1,5	47,0	10,6	10,6	40,9	9,1	15,2	37,9	1,5	7,6	39,4	10,6
Безенчук	0,0	24,2	24,2	12,1	30,3	7,6	10,6	33,3	10,6	7,6	50,0	9,1
Челно-Вершины	9,1	34,8	9,1	9,1	45,5	12,1	9,1	47,0	9,1	6,1	56,1	6,1
Клявлино	10,6	45,5	4,5	12,1	37,9	6,1	10,6	43,9	9,1	3,0	51,5	6,1
Серноводск	10,6	42,4	7,6	13,6	34,8	12,1	9,1	42,4	4,5	3,0	53,0	7,6
Самара, ОГМС	6,1	47,0	3,0	10,6	34,8	6,1	7,6	31,8	0,0	7,6	43,9	9,1
Аглюс	3,0	45,5	6,1	10,6	27,3	6,1	15,2	36,4	4,5	6,1	42,4	9,1
Авангард, Зерносовхоз	7,6	57,6	1,5	12,1	48,5	87,9	12,1	54,5	0,0	4,5	37,9	15,2

Согласно данным таблицы 2, практически в 50% случаев наблюдаются нормальные условия увлажнения (рис. 1). Средние засухи чаще случаются в июле (рис. 2).

Засухи, как правило, наблюдаются при антициклонической форме циркуляции. На территорию Самарской области распространяется отрог Азорского антициклона, в восточную периферию которого вторгаются быстро прогревающиеся арктические воздушные массы. Наиболее экстремальные значения индекса Д.А. Педа в случае засух летом достигались в июле 2010 года на большинстве станций области, максимум отмечался на ст. Сызрань (4,44) и в августе 1972 г. на ст. Новодевичье (4,40). Осредненное за вегетационный период (май-сентябрь) значение индекса Д.А. Педа достигало максимума на всех станциях Самарской области в 2010 году, как и в целом по Приволжскому федеральному округу [2, 3].

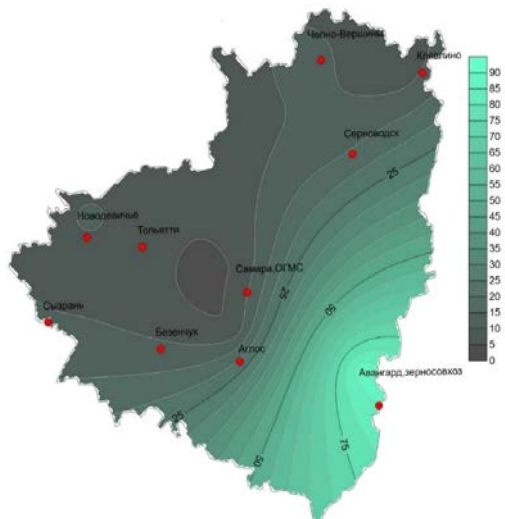


Рис. 1. Повторяемость (%) среднего избыточного увлажнения в июне по индексу Д.А. Педа.

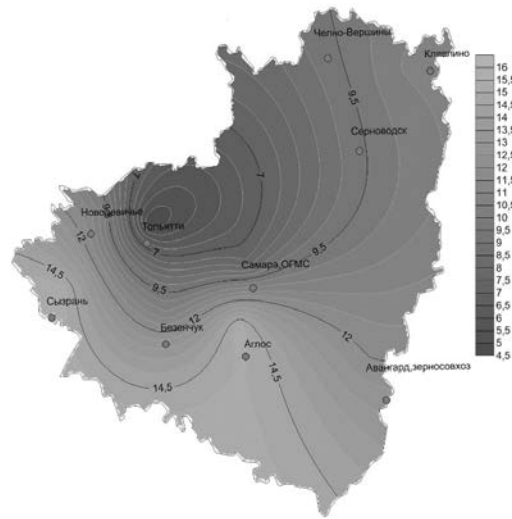


Рис. 2. Повторяемость (%) средней засухи в июле по индексу Д.А. Педа.

Согласно полученным результатам, на территории Самарской области наблюдается тенденция к повышению среднегодовой температуры воздуха.

Линейный тренд долговременных изменений летнего индекса Д.А. Педа для периода 1954-2019 гг., в котором отмечалась активная фаза потепления, статистически значим и говорит о росте индекса для всего вегетационного периода (рис. 3), в XXI столетии отмечается тенденция к увеличению засушливости, что необходимо учитывать в лесном и сельскохозяйственном производствах. Кроме того, индекс Д.А. Педа имеет хорошую связь с урожайностью [4].



Рис. 3. Долговременные изменения летнего индекса Д.А. Педа за период 1954 – 2019 гг.

В качестве показателя засушливости рассматривался индекс биологической эффективности (БЭК) представляет собой произведение суммы активных температур $T > 10^{\circ}\text{C}$ в сотнях градусов ($0,01\sum T > 10$) на коэффициент увлажнения (КУ):

$$\text{БЭК} = (0,01\sum T > 10) \cdot \text{КУ} \quad (2)$$

БЭК синтезирует важнейшие климатические параметры: атмосферные осадки, температуру и относительную влажность воздуха, рассматриваемые в их годовом ходе, а также годовую теплообеспеченность, и хорошо выражает общий экологический фон. Зоне экологического оптимума соответствует БЭК порядка 22.

Коэффициент увлажнения рассчитывался по формуле Высоцкого-Иванова [5], его используют для выявления условий различной степени засушливости (табл. 3).

Таблица 3. Классификация условий по грациям коэффициента увлажнения КУ.

Условия	КУ
Очень влажные (экстрагумидные)	Более 1,33
Влажные (гумидные)	1,33-1,00
Полувлажные (семигумидные)	1,00-0,55
Полусухие (семиардные)	0,55-0,33
Сухие (аридные)	0,33-0,12
Очень сухие (экстрааридные)	Менее 0,12

Таблица 4. Агроклиматические показатели на территории Самарской области.

Станции	КУ	БЭК
Тольятти	0,92	22,12
Новодевичье	0,70	16,03
Сызрань	0,65	15,00
Безенчук	0,59	14,3
Челно-Вершины	0,73	16,03
Клявлино	0,89	19,13
Серноводск	0,57	13,19
Самара, ОГМС	0,67	16,46
Аглос	0,57	13,89
Авангард, Зерносовхоз	0,49	11,29

В Самарской области средняя по территории величина показателя БЭК изменяется от 11 до 22 (табл. 3). Наибольшие его величины наблюдаются на севере области: ст. Тольятти (22,1) и Клявлино (19,1). Наименьшие значения БЭК отмечаются на юге: ст. Аглос и Авангард, Зерносовхоз (рис. 4). Величина коэффициента увлажнения (КУ) изменяется от 0,49 (полусухие условия) на ст. Авангард, Зерносовхоз до 0,92 (полувлажные условия) на ст. Тольятти.

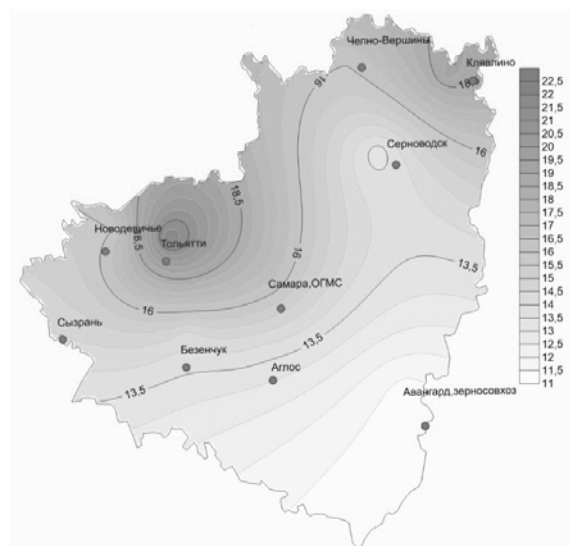


Рис. 4. Осредненные значения индекса биологической эффективности по территории Самарской области.

Согласно оценке условий засушливости и увлажненности вегетационного периода, на территории Самарской области, получены следующие выводы:

Линейный тренд долговременных изменений летнего индекса Д.А. Педа для периода 1954-2019 гг., в котором отмечалась активная фаза потепления, статистически значим и говорит о росте индекса для всего вегетационного периода.

Анализ пространственно-временной изменчивости агроклиматических характеристик позволяет установить, что на территории области происходит нарастание более засушливых условий, особенно в теплый период. В большей степени это проявляется на юге и юго-западе, где засухи более интенсивные, чем в других районах области

Коэффициент увлажнения Иванова-Высоцкого и индекс БЭЖ имеют практически аналогичную динамику. Временной анализ указанных гидротермических показателей существенных изменений не выявил.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект 18-05-00087 А и проект 20-55-00014 Бел_а).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Педь Д.А. О показателях засухи и избыточного увлажнения / Д.А.Педь // Труды Гидрометцентра СССР. – 1975. – Вып. 156. – С. 19-39.
2. Черенкова Е.А. Количественные оценки атмосферных засух в федеральных округах Европейской территории России // Известия РАН Серия географическая. – 2013. – № 6, С. 76–85.
3. Переведенцев Ю.П., Шарипова Р.Б., Важнова Н.А. Агроклиматические ресурсы Ульяновской области и их влияние на урожайность зерновых культур/ Ю.П. Переведенцев, Р.Б. Шарипова, Н.А. Важнова // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. – 2012. – Вып.2. – С. 130-136.
4. Уланова Е.С., Страшная А.И. Засухи в России и их влияние на урожайность зерновых культур // Тр. ВНИИСХМ. – 2000. – Вып. 33. – С. 64-83.
5. Зоидзе Е. К. Опыт агроклиматического и оперативного мониторинга засушливых явлений в России по наземным данным / Е. К. Зоидзе, О. И. Задорнова, Т. В. Хомякова // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – 2012. – № 565. – С. 152-164.

СЕКЦИЯ 6

Инструментальная
и информационно-
измерительная
инфраструктура
региональных
исследований
окружающей среды

SESSION 6

Instrumental
and Information
and Measuring
Infrastructure
of a Regional
Environmental
Study

Automatic weather station ArcticMeteo. First field test results

Korolkov V.A., Kobzev A.A.,
Tikhomirov A.A., Telminov A.E.,
Pustovalov K.N., Bogushevich A.Ya.,
Kalchikhin V.V., Kurakov S.A.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological
Systems SB RAS, Tomsk, Russia
E-mail: kor@imces.ru, alexey-kobzev@mail.ru,
tikhomirov@imces.ru

The report provides a description of the created experimental prototype of the Arctic Meteo automatic weather station (AWS), which is designed to work in remote and in hard-to-reach areas with difficult climatic conditions. The created AWS provides the measurement of meteorological values included in the basic list of Roshydromet: air temperature, wind speed and direction, relative air humidity, atmospheric pressure, underlying surface temperature and the amount of liquid precipitation. In addition, the AWS measures a number of meteorological values for the additional list: snow depth, incoming solar radiation, and soil temperature profile. The AWS includes sensors of meteorological quantities (measurement units): wind parameters; air temperature; humidity and atmospheric pressure; underlying surface temperature; amount of liquid precipitation; snow depth; the intensity of solar radiation; soil temperature profile. The signals from these sensors are sent to a data acquisition, assimilation and transmission system, which packages them accordingly and transfers them for permanent storage to an external server. Data is transferred to an external server via a cable channel, cellular and satellite communication channels and is performed in automatic mode with a period set by the user, or in the "by user request" mode. AWS has an autonomous power supply system, which includes batteries, solar panels, a fuel cell generator (methanol) and a wind power installation. In addition, the AWS includes service systems that provide automatic continuous monitoring of the operation of meteorological units and their automatic calibration.

Since the beginning of 2020, the AWS has been tested in real and critical conditions at the meteorological site of IMCES SB RAS. The results of measuring meteorological values during a hurricane that took place in Tomsk on May 26, 2020 are presented. Maximal wind velocity was 24,9 m/s, maximal rain intensity came to 100 mm/h and total rainfall in during hurricane consisted of 25,5 mm.

This work was financially supported by the Russian Ministry of Education and Science (Agreement No. 14.607.21.0205, project unique identifier RFMEFI60718X0205).

Автоматическая метеостанция АрктикМетео. Первые результаты натурных испытаний

Корольков В.А., Кобзев А.А., Тихомиров А.А., Тельминов А.Е., Пустовалов К.Н.,
Богушевич А.Я., Кальчихин В.В., Кураков С.А.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
E-mail: kor@imces.ru, alexey-kobzev@mail.ru, tikhomirov@imces.ru

В ИМКЭС СО РАН завершена разработка и изготовление экспериментального образца автоматической метеостанции (АМС) АрктикМетео, которая предназначена для работы на удаленных и труднодоступных территориях со сложными климатическими условиями [1]. В ней использован опыт, полученный при разработке АМС АМК-03 [2] и ее модификаций различного назначения при последующем серийном производстве АМС в ООО "Сибаналитприбор" [3]. Созданная АМС обеспечивает измерение метеорологических величин, входящих в основной перечень Росгидромета [4]: температура воздуха, скорость и направление ветра, относительная влажности воздуха, атмосферное давление, температура подстилающей поверхности и количество жидких атмосферных осадков. Кроме того, АМС измеряет ряд метеорологических величин дополнительного перечня [4]: высота снежного покрова, величина приходящей солнечной радиации и профиль температуры почвы.

Структурная схема АМС показана на рис. 1. АМС включает измерительные датчики (блоки измерения) вышеперечисленных метеовеличин, в которых использованы оптические, акустические и электронные методы измерений, и ряд основных и сервисных вспомогательных систем. Основные блоки измерений размещаются на высотных уровнях 2 и 10 м мачты М-82. Сервисные системы и блок измерения осадков размещены в удалении от мачты.

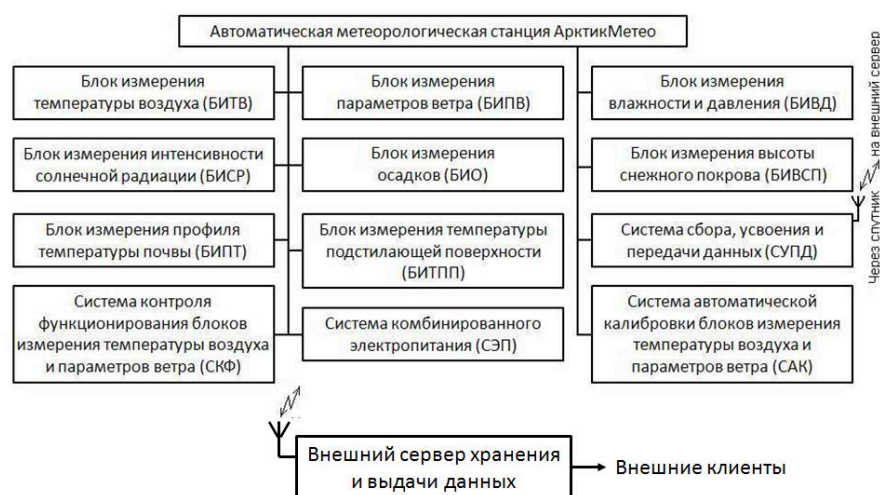


Рис. 1. Структурная схема АМС АрктикМетео.

БИПВ обеспечивает измерение мгновенных, средних (за период), максимальных и минимальных значений скорости горизонтального ветра V в диапазоне от 0,1 до 60 м/с, с погрешностью $\pm(0,1 + 0,02V)$ при $V < 30$ м/с и не более $\pm 10\%$ при $V \geq 30$ м/с; определение направления горизонтального ветра в диапазоне от 0 до 360 градусов с погрешностью не более ± 4 град и скорости вертикального ветра до 15 м/с, с погрешностью не более 10 %. Измерения проводятся на основе акустического метода [2]. БИТВ также на основе этого метода обеспечивает измерение средних (за период), максимальных и минимальных значений температуры воздуха в диапазоне от минус 60 до $+55$ °C с погрешностью $\pm 0,5$ °C. БИВД использует электронные сенсоры для измерения средних (за период), максимальных и минимальных значений относительной влажности воздуха в диапазоне от 15 до 100 % с погрешностью $\pm 2,5\%$ при $T > 0$ °C и $\pm 5\%$ при $T < 0$ °C, среднего (за период), а также для измерения атмосферного давления в диапазоне от 520 до 800 мм рт. ст. с погрешностью $\pm 0,5$ мм рт. ст. БИТПП обеспечивает измерение мгновенных и средних (за период), максимальных и минимальных значений температуры подстилающей поверхности в диапазоне от минус 60 до $+55$ °C, с погрешностью ± 1 °C на основе бесконтактного радиационного метода измерений. БИО использует оптический метод получения и анализа теневых изображений частиц осадков и обеспечивает измерение суточного количества жидких осадков ($X_{жс}$) в диапазоне от 0 до 500 мм с допустимой погрешностью $\pm(0,1 + 0,2X_{жс})$ мм; измерение интенсивности жидких осадков, а также времени начала и длительности выпадения осадков. БИВСП на основе метода акустической ло-

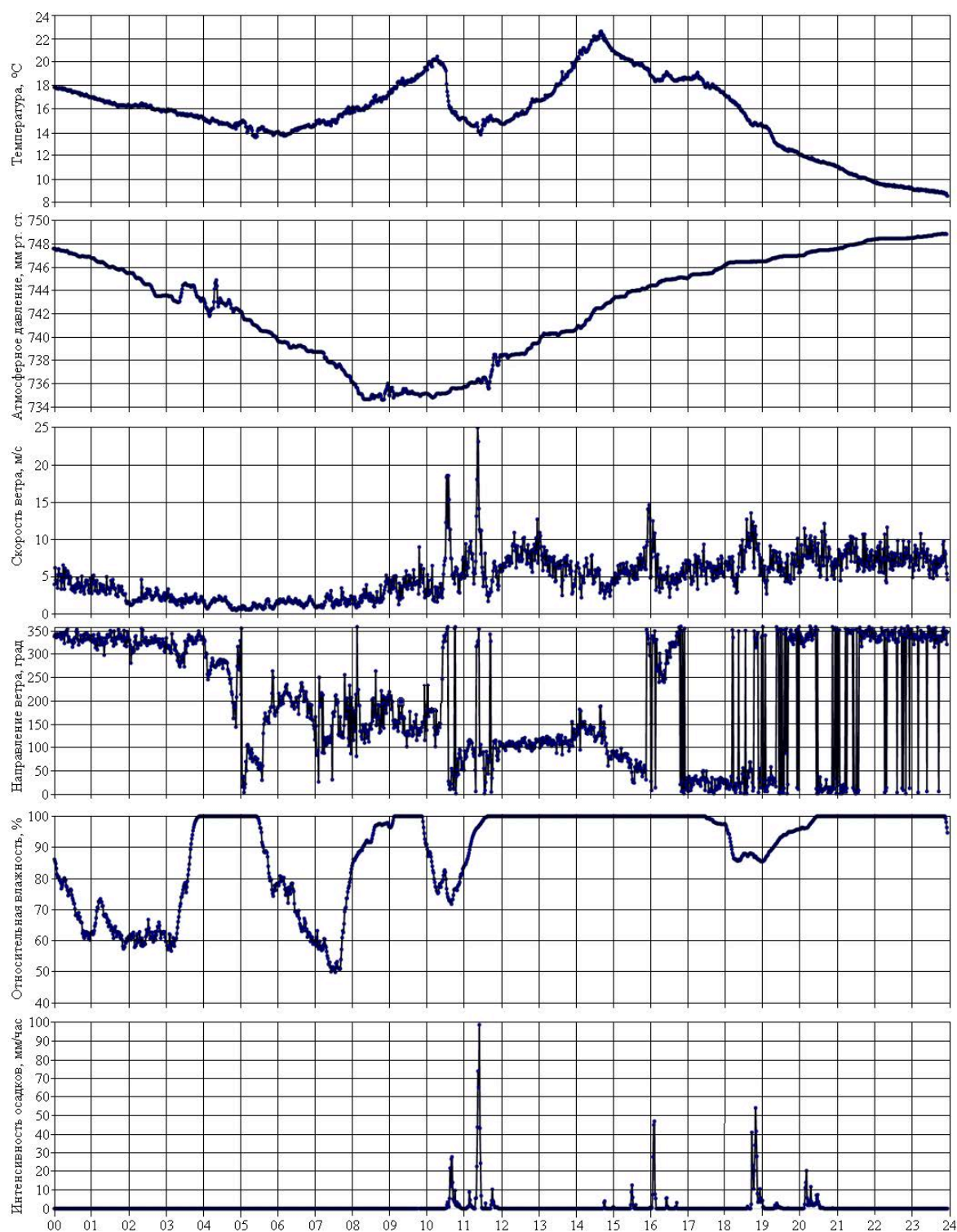


Рис. 2. Результаты измерения основных метеовеличин в течение суток 26 мая 2020 г. (по оси абсцисс указано местное время в часах).

кации обеспечивает измерение высоты снежного покрова в диапазоне от 2 до 100 см, с погрешностью ± 2 см при высоте снежного покрова менее, либо равной 20 см и ± 10 % при высоте снежного покрова более 20 см. БИСР на основе дифференциального метода регистрации электромагнитного излучения обеспечивает измерение суммарной приходящей солнечной радиации в диапазоне от 0,1 до 1,60 кВт/м² с погрешностью ± 11 %. БИПТ с помощью линейки контактных сенсорных датчиков температуры обеспечивает измерение профиля температуры почвы в диапазоне от минус 50 °С до +55 °С на глубинах от 10 до 100 см с шагом 10 см с погрешностью $\pm 0,7$ °С.

СУПД осуществляет сбор, усвоение и передачу на внешний сервер хранения и выдачи данных, получаемых с блоков измерения метеорологических величин и сервисных систем (СЭП, СКФ, САК). Передача данных на внешний сервер осуществляется по кабельному каналу, каналам сотовой и спутни-

ковой связи и производится в автоматическом режиме с периодом, устанавливаемым пользователем, либо в режиме "по запросу пользователя".

Использование СЭП связано с необходимостью обеспечения функционирования АМС на удаленных территориях при отсутствии стационарных систем электропитания. СЭП включает в себя следующие источники питания: аккумуляторные батареи суммарной емкостью 900 А·ч (6×150 А·ч), фотоэлектрическая станция на базе солнечной батареи с мощностью до 1,5 кВт, ветроэнергетическая установка мощностью до 1 кВт и генератор на топливных элементах (в качестве сырья применяется метанол). Емкость аккумуляторных батарей рассчитана на обеспечение непрерывной работы АМС в режиме максимального потребления в течение двух суток в отсутствие возможности подзарядки.

Сервисные системы СКФ и САК представляют собой программно-аппаратные электронные комплексы, обеспечивающие в автоматическом режиме непрерывный контроль функционирования блоков измерения метеорологических величин и сервисных систем, а также восстановление метеорологических характеристик БИТВ и БИПВ за время, не превышающее 10 мин.

В начале 2020 г. АМС была установлена на метеорологической площадке ИМКЭС СО РАН, где проводятся ее натурные испытания в реальных и критических метеорологических условиях. АМС успешно выдержала испытания в штормовых условиях, наблюдавшихся 26 мая 2020 г. в г. Томске. В этот день, согласно критериям, описанным в [5, 6], были достигнуты пороги опасных явлений (ОЯ) "Очень сильный ветер" (скорость ветра при порывах не менее 25 м/с или средняя скорость не менее 20 м/с) и "Крупный град" (град диаметром 20 мм и более).

На рис. 2 показаны результаты измерений с помощью АМС АрктикМетео основных метеовеличин в течение рассматриваемых суток. Согласно этому рисунку, максимальный порыв ветра достиг 24,9 м/с. Количество выпавших за сутки осадков составило 25,5 мм, а их максимальная интенсивность, наблюдавшаяся во время наибольших порывов ветра, достигала ~100 мм/ч.

Кроме того, в течение рассматриваемых суток отмечалась интенсивная грозовая деятельность. Согласно рис. 3, построенному по данным Всемирной грозопеленгационной сети WWLLN [7], в ближней зоне пункта установки АМС АрктикМетео, под которой понималась зона радиусом 16 км, соответствующая визуальным наблюдениям за грозами на стандартных метеостанциях [8], за 26 мая 2020 г. было отмечено 248 разрядов молний. При этом максимальная интенсивность грозы (14 разрядов/мин) отмечалась во время наиболее сильных порывов ветра и максимальной интенсивности осадков.

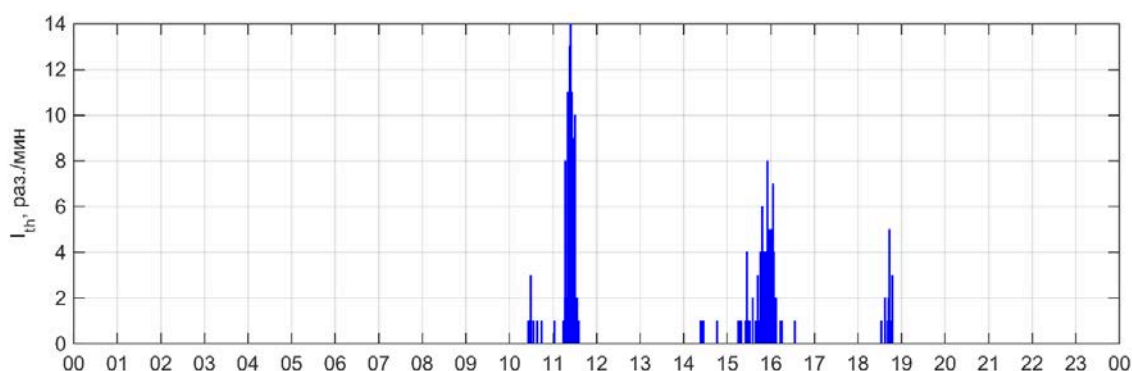


Рис. 3. Изменение интенсивности грозовой деятельности (I_{th} , разряды/мин) в ближней зоне пункта установки АМС АрктикМетео.

Работа финансово поддержана Минобрнауки России (Соглашение № 14.607.21.0205, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60718X0205).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Корольков В.А., Тельминов А.Е., Тихомиров А.А. Экспериментальная автоматическая метеостанция АрктикМетео // Методологические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии и систем аэрокосмического мониторинга / Сб. научных статей по материалам V Всероссийской НПК (19-20 марта 2019 г.) Воронеж: ВУНЦ ВВС "ВВА", 2019. С. 60-62.
2. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // Метеорология и гидрология. 2006. № 11. С. 89-97
3. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Кобзев, А.А. Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации // Датчики и системы. 2012. № 3. С. 47-52.

4. РД 52.18.761–2018. Средства измерений гидрометеорологического назначения сетевые / Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2018. 40 с.
5. Гидрометцентр России. Типовой перечень и критерии опасных метеорологических явлений [Электронный ресурс]. – URL: <https://meteoinfo.ru/hazards-definitions> (дата обращения: 16.06.2020 г.).
6. ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС». Перечень опасных явлений [Электронный ресурс]. – URL: <http://meteo-nso.ru/pages/115> (дата обращения: 16.06.2020 г.).
7. World Wide Lightning Location Network [Электронный ресурс]. – URL: <http://wwlln.net/> (дата обращения: 16.06.2020 г.).
8. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Часть I. Метеорологические наблюдения на станциях. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 301 с.

Использование современных методик изучения гидрометеорологических измерительных систем

Сабирова М.В., Баканин А.С., Короткова Н.В.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Россия
E-mail: 1marina.isaeva@mail.ru, mailaru@mail.ru, fonadia@yandex.ru

Среди множества электронных средств обучения студентов в особую структуру можно выделить информационные и поисковые справочные системы, позволяющие вводить, хранить и предъявлять обучающим и обучающимся лицам информацию. Цель данного исследования и полученного электронно-образовательного продукта - создать условия для развития учащегося в области гидрометеорологии, для профессионального и личностного самоопределения студента. Изученный электронно-образовательный продукт работает на основе мобильного приложения Aurasma, которое использует технологию дополненной реальности, чтобы оживлять страницы журналов, фотографии, афиши и другие объекты массового пользования, заинтересовав пользователя и с успехом достигая своей рекламной цели [1]. Как инструмент самообучения и саморазвития это информационно-поисковое приложение особенно актуально.

Принцип работы Aurasma схож с повсеместно используемой технологией распознавания QR кодов [2]. Для идентификации объектов из окружающего пространства приложение использует фотокамеру мобильного устройства. Далее они транслируются на экране с наложенным поверх файлами, называемыми аурами (фотографии, видеоролики, картинки). У Aurasma есть возможность воспользоваться набором готовых аур, а также произведенными самими пользователями. Некоммерческий аккаунт позволяет создавать безграничные ауры в приложении, которое обращается при поиске к каналам. Последние используются, как папки, хранящие коллекцию аур. Если в базе уже имеются ранее созданные объекты визуализации, достаточно навести фотокамеру на исследуемый объект. Создается метка для распознавания картинки приложением Aurasma. Пользователь настраивает результат отображения и время трансляции. Камера улавливает объект, сравнивает изображение с данными в базе и выводит на экран всю информацию о нем.

Применение Aurasma возможно на практических занятиях дисциплины «Информационно-измерительные системы в гидрометеорологии». Каталог метеорологических приборов и комплексов поможет легко определить вид и модель устройства на практике. В «аурах» (каналах) можно внести полную информацию о принципах работы и описании каждого прибора. Расположение и количество на площадке метеорологических будок и приборов согласно требованиям Росгидромета можно проверить с помощью модели-плана, внесенного в Aurasma. Естественно, что полноценную образовательную деятельность сможет реализовать только преподаватель, а Aurasma, как современный информационно-поисковый инструмент, поможет ему добиться хороших результатов в обучении студентов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Алексеев К. «Aurasma» - Мобильные технологии дополненной реальности. [Электронный ресурс] URL: <https://te-st.ru/entries/aurasma/> (дата обращения 03.12.2015).
2. What is a QR code? [Электронный ресурс] URL: <http://www.qrcode.com/en/about/> (дата обращения 18.02.2016).

The use of the modern methodologies for the study of hydrometeorological measuring systems

Sabirova M.V., Bakanin A.S., Korotkova N.V.

Kazan (Volga Region) Federal University, Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky, Russia
E-mail: 1marina.isaeva@mail.ru, mailaru@mail.ru, fonadia@yandex.ru

At the present time the most effective form of education becomes e-learning. This form of education allows to achieve proficient training and to maintain the required constant qualification level of students. There are a lot of e-learning modalities for students of higher vocational education: e-courses, multimedia tutorials, online seminar, etc. Among them informative and searching directory assistances that allow to add, to store and to present information to educators and trainees could be identified as a separate structure (they include, for example, various training databases). Information and communications technologies provide unlimited possibilities for those of us, who wants to know something new, increase your level of education, use almost unlimited world resources in one area of another. The objective of this research and of electronic educational product obtained by it is to provide conditions for the students' development in different areas of hydrometeorology, for professional and personal self-determination of student.

It is natural that introduction of new technologies shall be provided with the consideration of the disciplines focus. For the students of natural and engineering specialties this is especially important. It is insufficient to study off-campus to obtain qualification in these areas, additional electronic systems and resources for knowledge verification and control by lecturer are appropriate. It is to this type of e-learning modalities that the application program created is relevant. It will train skills, develop competence, and after studying it students will definitely know more and be able to do more, to work more effectively, make less mistakes. In such a manner opportunity arises to ensure the quality of the best training of hydrometeorologists in college. Training in this electronic multimedia product, adapted to hydrometeorological information and measurement systems will allow consolidating gained knowledge, skills and abilities by applying them in educational internship.

This electronic educational product works on the platform of a mobile application Aurasma, which capitalize on the technology of augmented reality to animate the pages of magazines, photographs, posters and other public facilities, this way it fascinate user and successfully reach its advertising goal [1]. As an instrument of self-education and self-development this informational and search system is particularly topical.

Aurasma technology was created in Cambridge by Autonomy Corporation plc and was first demonstrated to the public in 2011 at MipTV in Cannes. The mobile version of Aurasma for iPhone was launched on May 5, 2011, in June of the same year, a version for Android was launched. From the moment of its official launch Aurasma became the platform for more than 2000 applications, connect by partnership more than 20 000 organizations in more than 100 countries. Among the most famous service users are KFC, MarvelEntainment, Universal Pictures, Tesco and others.

Aurasma operation principle is akin to routine recognition technology of QR codes [2]. The application uses phone camera, GPS, Bluetooth, WI-FI, acceleration indicator and horoscope to identify various objects from the external environment. In the following these objects are broadcast on the device screen with overlaid video, pictures, photographs or other files called auras.

The creator of mark upon which Aurasma will recognize object customizes displaying result and broadcasting time. To help users in their endeavors creators of Aurasma enclosed a pack of predefined auras, but it is assumed that all of them will be created by the users themselves.

Key advantage of Aurasma technology is its availability. By contrast with Goggle Glass, Aurasma demonstrate the same augmented reality only for less money. One more advantage of the program is its wide applicability. It could be used not only in advertising promotion of commercial projects, but also for social development endeavors support, such as educational technologies in teaching.

As a first step you will need an account. After filling out the questionnaire, your application will be reviewed and processed in 24 hours. More details would be e-mailed to you. By becoming a partner you will get free access to Aurasma for non-commercial use. You could register and get an account on the web-site: <https://studio.aurasma.com/register>.

Non commercial user account allow also to create unlimited auras in application. Partners could create any tools via online using Aurasma Studio (Fig.1). This approach allows to download contents through this site. Aura which links images to video via click through URL (network) allows to download and go live.

The creation of Auras (AR) in Aurasma is as follows. There are two approaches for the AR creation in Aurasma [3]:

1. Creating examples from an installed application.
2. Using existing layers in a mobile device.



Figure 1. Creating your own auras with Aurasma Studio.

As an example we used first method. Boot sequence and application operation on the device used:

1. Become a partner.
2. Creation of a trigger (launch action, work).
3. Creation of stackings.
4. Creation of channels.
5. Creation of AR from your channels.

Bring to notice that Aurasma application refers to the channel when searching. Latter are used as a folders holding a collection of auras. Users can look over and find in Aurasma application channels for further unblocking and visual scanning. The more keywords that are entered, the easier it is to search. Enter names of channels and content descriptions distinctly for outlines download.

Necessary elements for the work with Aurasma:

1. Smartphone, tablet or phone with integrated camera
2. Android (IOs) operating system.
3. Internet access.

Step-by-step process of using the application:

1. Download the application from official site or special app store, for example GoogleMarket.
2. Installs the application.
3. Start the application.



Figure 2. Use of Aurasma application at Meteorological observatory's site in Kazan University.

If there are previously created objects of visualization in library, just point the camera at the desired object. Camera will catch the object similize picture with data in the library and displays information about the current object (Fig. 2,3)

To create your own visualization objects manually, it is better to register and to get an account. Otherwise all manually created objects would be available for only one user of this device. Registration takes place on the web-site: <https://studio.aurasma.com/register>. Registration allows posting personally created objects to the global net in such a manner making them public. Thus, any manually created visualization objects can be made available for all users of this application. Along with that there are additional opportunities in creation and search for required layers when working in an Aurasma application.



Figure 3. Operating procedures of Aurasma application.

In Meteorological physics module students could use this application while studying sections “Types and forms of clouds”, “Optical phenomena in atmosphere”. Visualization of cloud types is carried out through the use of cloud database created according to the international classification in application in discuss. Alongside with morphological characteristic the information provided presents microtexture and origin of one or another types of clouds, based on the specifics of atmospheric processes. With the help of Aurasma application you could also determine the amount of clouds by setting the camera to the appropriate shooting mode that covers the whole firmament. This meteorological parameter could be determined only in fairly open space excluding urban development.

Optical and light phenomena also could have their own information databases in application used. Its availability could be determined on photo by comparison with available images of create your own catalogue with rare sights on firmament, stipulated by reflection, deflection and diffraction of light in droplets and crystals of clouds. For daily meteorological observation for changes in the color of the sky you could use palette of colors of blue chronicled in application’s information base.

Aurasma application could also be used while studying types of mixed and solid precipitations. For this you should create database visualizing every kind of crystals adding the appropriate morphological description and meteorologic conditions of formation.

It is also possible to use application for definition and analysis of developmental stages of one or another convective phenomenon (for example cumuliform and Cb cloud, sandstorm). Visualization in such case will help to predict the further development of convection.

Aerological diagrams indicating the state of the atmosphere also could be discerned and analyzed using a common weather database listed in the application in discuss.

When studying module “Space research methods” it is possible to use Aurasma application in the analysis of cloud field space images and state of the atmosphere. You could save in “auras” related images of the most characteristic for this or that synoptic situation of clouds over the studied territory. Such hydrologic phenomena as heave of the sea, rise and fall of the tide, approximate wave elevation also could be determined by using this application.

The use of modern educational technologies in teaching requires the revitalization of the process of knowledge of students. This is especially challenging in the field of natural sciences. Modern teaching methods, filing educational material help lecturer be more informative, guide the student to find the knowledge in the discipline they need and develop skills and abilities necessary for the practice of the future specialist.

It is natural that full educational activity could be implemented only by lecturer and Aurasma application as a modern information-retrieval instrument will help him to achieve high results in hydrometeorological students training.

Most common use of this application is possible in studying discipline “Information-retrieval instruments in hydrometeorology” in particular on practical classes. Catalog of hydrometeorological instruments and complexes will help to easily identify the type and the model of measuring device in practice. In “auras” (channels) you could bring in copious information on operating principles and description of each and every hydrometeorological instrument. Location and number of meteorological instruments and thermometer screens on site according to the Russian meteorological service requirements and rules could be checked using a model plan itemized in Aurasma application.

REFERENCES:

1. Alekseev K. «Aurasma» - Augmented Reality Mobile Technology. [Electronic source] URL: <https://te-st.ru/entries/aurasma/> (access date 03.12.2015).
2. What is a QR code? [Electronic source] URL: <http://www.qrcode.com/en/about/> (access date 18.02.2016).
3. QR Code Tutorial: Introduction. [Electronic source] URL: <https://www.thonky.com/qr-code-tutorial/introduction> (access date 28.02.2016).

Software tool for the study of turbulence of the atmospheric boundary layer according to measurements with AMK-03

Ivanov E.A., Botygin I.A.

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia
E-mail: eai17@tpu.ru, bia@tpu.ru

The study of the turbulence characteristics in the atmospheric boundary layer is an important part of the study of the entire boundary layer. The program is developed on a high-level programming language Python, as a 32/64-bit Windows application, which can work in any of the latest versions of Windows, starting with Windows 7. We'll use the mon.imces.ru website. We will take data from AMK-30 sensor. Files containing data are encoded in byte sequence. We will decode and convert them to provide a normal user. PyCharm was used as the development environment, and used Python libraries:

- 1) For mathematical calculations the numpy library.
- 2) To calculate Pearson's correlation coefficient, the library scipy, seaborn.
- 3) For visualization of statistical data the seaborn library.
- 4) The matplotlib library has been used to display the scattering diagram and to build charts.

Generalized algorithm of the program:

- 1) Dynamic meteorological data loading from AMK-03 server.
- 2) Conversion of data from byte to numeric format.
- 3) Construction of initial charts.
- 4) Calculation and visualization of Pearson coefficients.
- 5) Calculation of earth layer turbulence parameters.
- 6) Construction of linear regression for interrelated parameters.

The program has a function that allows you to save and upload the downloaded and processed data for further investigation and calculation of parameters only without an internet connection. When you start the program, a dialog box opens in which you should set the required time interval. After you confirm the set range and upload the data, the program will inform us about the successful upload of data and provide us with a set of tools for the required tasks.

One of the widely used tools for the analysis of meteorological data is the probabilistic-statistical approach. The Pearson correlation model, which reveals their statistical relationships between each other, is a relatively effective tool for the study of meteorological observation series. Building a linear regression for interlinked parameters and applying the forecasting method.

In this program, the Pearson correlation analysis was chosen as a method to study the interrelation of the main meteorological parameters, which was used to identify their statistical dependence, and linear regression was used to further predict on the data for the Tomsk region.

Программный инструмент для исследования турбулентности приземного слоя атмосферы по измерениям с АМК-03

Иванов Е.А., Ботыгин И.А.

Томский политехнический университет, Томск, Россия

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: eai17@tpu.ru, bia@tpu.ru

Интенсивное развитие цифровых технологий оказало большую роль в разработке качественно новых ультразвуковых метеостанций, обладающих существенно лучшими техническими возможностями для оценивания параметров атмосферной турбулентности [1, 3]. Современные устройства этого типа могут измерять мгновенные значения температуры воздуха и трех ортогональных компонентов скорости ветра с наилучшими показателями, что очень важно при оценивании параметров турбулентности [2]. К этим показателям относятся: инерционность измерений ($\sim 10^{-3}$ с), пороговая чувствительность к пульсациям метеорологических параметров ($\sim 10^{-2}$ °С или м/с) и частота повторения измерений (от 10 до 160 Гц). Первые два показателя определяют разрешающую способность прибора к турбулентным флуктуациям метеорологических параметров по амплитуде, а третий – значение верхней границы их разрешения в частотных спектрах.

Необходимо отметить, что в современные ультразвуковые метеостанции встраиваются дополнительные датчики для измерения относительной влажности воздуха, атмосферного давления, контроля угловых отклонений вертикальной оси термоанемометра и др., позволяющие осуществлять различный мелкомасштабный вероятностно-статистический подход для анализа и установления взаимосвязи метеорологических параметров.

Представленный в настоящей работе программный комплекс разработан на высокоуровневом языке программирования Python [4], как 32/64-битовое Windows-приложение которое может работать в любой из последних версий Windows, начиная с Windows 7. Ниже представлены основные функциональные модули комплекса.

1. Динамическая загрузка метеоданных с сервера измерений АМК-03.
2. Преобразование данных из байтового формата в числовой.
3. Графическая визуализация и экспорт обрабатываемых данных.
4. Вычисление и визуализация корреляционных коэффициентов Пирсона.
5. Вычисление базовых параметров турбулентности приземного слоя атмосферы.
6. Построение линейной регрессии для взаимосвязанных параметров.

Существует много теоретических соотношений для вычисления характеристик турбулентности атмосферы. В работе использовалась самая простая модель, базирующаяся на теории подобия Монина-Обухова [5]. Ниже приведены формулы для вычисления параметров турбулентности приземного слоя:

- 1) $E_v = (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) / 2$ – полная энергия турбулентных движений (где $\sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_w^2$ – дисперсии турбулентных пульсаций трех компонентов скорости ветра u', v', w').
- 2) $I_v = E_v / V_m^2$ – относительная интенсивность флуктуаций скорости ветра.
- 3) $E_t = \sigma_t^2 / 2$ – энергия температурных флуктуаций, (где σ_t^2 – дисперсия турбулентных пульсаций температуры T').
- 4) $\langle u'w' \rangle$ – момент потока импульса.
- 5) $\langle T'w' \rangle$ – момент потока тепла.
- 6) $\tau = -\rho \langle u'w' \rangle$ – вертикальный поток импульса, где ρ – плотность воздуха.
- 7) $H = c_p \rho \langle T'w' \rangle$ – вертикальный поток тепла, где c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении.
- 8) $v^* = \sqrt{-\langle u'w' \rangle}$ – скорость трения (масштаб ветра).
- 9) $T^* = -\langle T'w' \rangle / v^*$ – масштаб температуры.
- 10) $C_d = (v^* / \langle V \rangle)^2$ – коэффициент сопротивления потоку.
- 11) $C_T^2 = \langle [T'(t + \Delta t) - T'(t)]^2 \rangle \langle V \Delta t \rangle^{-2/3}$ – структурная постоянная температурных флуктуаций, где V – модуль среднего вектора скорости ветра, Δt – временной интервал между измерениями мгновенных метеорологических величин.
- 12) $C_v^2 = \langle [u'(t + \Delta t) - u'(t)]^2 \rangle \langle V \Delta t \rangle^{-2/3}$ – структурная постоянная ветровых флуктуаций.
- 13) $C_{na}^2 = (C_T^2) / 4 \langle T \rangle^2 + (C_v^2) / \langle c \rangle^2$ – структурная постоянная флуктуаций акустического показателя преломления, где T_k – температура воздуха в Кельвинах, c – скорость звука.
- 14) $C_{no}^2 = \{8 \cdot 10^{-5} \langle P \rangle / \langle T \rangle^2\}^2 C_T^2$ – структурная постоянная флуктуаций оптического показателя преломления, где P – атмосферное давление в гПа.

15) $L^* = \langle T \rangle (v^*)^2 / \chi^* g^* T^*$ – масштаб Монина-Обухова, где $\chi = 0,4$ и $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Перечисленных параметров достаточно для оценивания турбулентности в приземном слое атмосферы.

Для вычисления коэффициентов Пирсона использовалось следующее соотношение [6]:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - M_x)(y_i - M_y)}{\sqrt{\sum (x_i - M_x)^2 \cdot \sum (y_i - M_y)^2}}$$

где r_{xy} – коэффициент линейной корреляции между двумя признаками x и y ;

d – отклонения от средних арифметических данных ряда x и ряда y .

Для иллюстрации работы разработанного программного комплекса использовались измерения с ультразвукового термоанемометра АМК-03 (измерения 2020 г), расположенного на полигоне ИМКЭС СО РАН. Интерфейс программного комплекса представлен на рис.1.

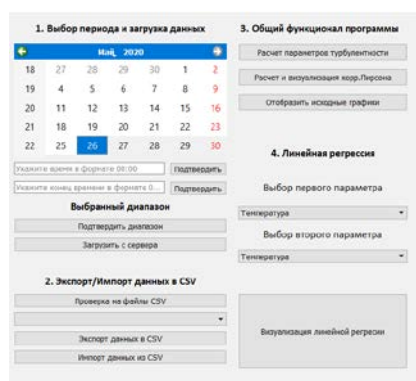


Рис. 1. Главная оконная форма комплекса.

	Значение
Полная энергия турбулентных движений	6.13709
Относительная интенсивность флуктуаций скорости ветра	0.84857
Энергия температурных флуктуаций	13.21109
Момент потока импульса	-0.90233
Момент потока тепла	2.30121
Вертикальный поток импульса	1.10536
Вертикальный поток тепла	2.81899
Скорость трения (масштаб ветра)	0.94991
Масштаб температуры	-2.42255
Масштаб Монина-Обухова	1.10196

Рис. 2. Расчетные характеристики турбулентности.

Скриншот с вычисленными характеристиками приземного слоя атмосферы приведен на рис. 2.

Результаты вычисления некоторых характеристик турбулентности со сменой диапазона измерений приведено в таблице 1.

Таблица 1. Масштабирование измерений.

Диапазон	17.01.20 12:00 – 18:00	18.01.20 12:00 – 18:00	19.01.20 12:00 – 18:00	20.01.20 12:00 – 18:00
Модуль ср. вектора скорости ветра	5.920945823664853	2.289455807416715	3.1360767762712736	3.602202004075949
Полная энергия турбулентных движений	5.78376806703739	3.766140080065457	5.101588854017524	3.8769547205854407
Пульсация ветра	-0.9009381867328989	-1.7257660452137866	1.954124195113059	-2.3696424344326497
Момент потока импульса	-0.6514490767358385	-0.13483904486732912	-0.16417432379476368	-0.10302935918183469

Результаты вычисления некоторых характеристик турбулентности со сменой шага измерений приведено в таблице 2. Стартовая дата: 17.01.2020 г. на временном отрезке с 12:00 до 18:00. Интервалы дискретизации: 5 минут, 10 минут, 30 минут, 1 час.

Таблица 2. Дискретизация измерений.

Диапазон	17.01.20 12:00 – 18:00	18.01.20 12:00 – 18:00	19.01.20 12:00 – 18:00	20.01.20 12:00 – 18:00
Модуль ср. вектора скорости ветра	731.1468873485421	731.2181161664399	731.1425034317754	731.1215113735177
Полная энергия турбулент- ных движений	0.8563721545827604	0.8025515846994469	0.7468549154334043	0.6972601214574913
Пульсация ветра	0.58906977	-0.77442623	-0.37090909	-0.32025641
Момент потока импульса	-0.2486569497025451	-0.33248059661381435	-0.33061074380165134	-0.33913280736357293

На рис. 3 приведен скриншот вычисленной матрицы корреляций. Из матрицы корреляций видно, что между многими параметрами существует взаимосвязь. Рассмотрим коэффициент корреляции между «температурой» и «атмосферным давлением» – -0.75 . Знак «-» говорит о том, что большие значения «температуры» соответствуют малым значениям «атмосферного давления». Это свидетельствует о наличии обратной зависимости между «температурой» и «атмосферным давлением». Рассмотрим теперь коэффициент корреляции между «температурой» и «относительной влажностью воздуха» – 0.4 . Знак «+» свидетельствует о том, что большие значения «температуры» соответствуют большим значениям «относительной влажности воздуха». И наоборот, малые значения «температуры» соответствуют малым значениям «относительной влажности воздуха».

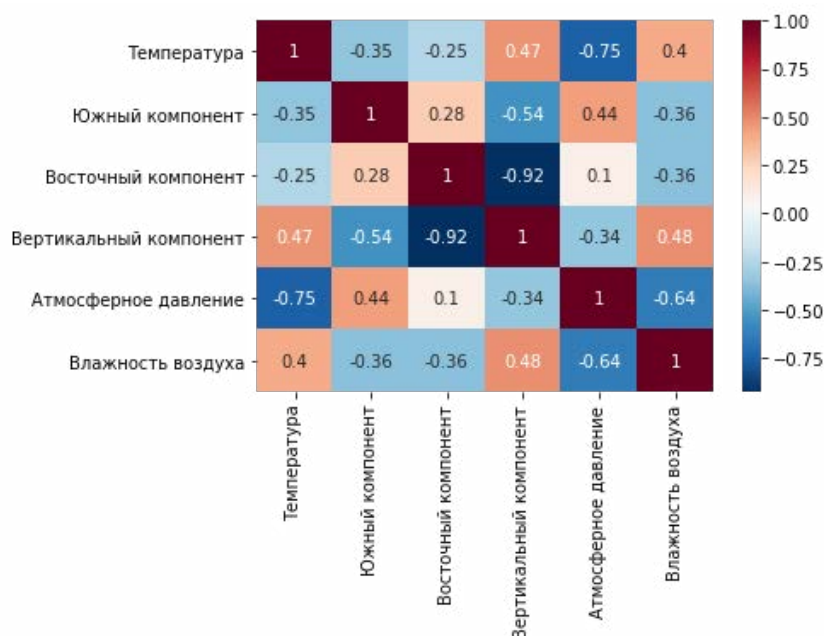


Рис. 3. Матрица корреляции по Пирсону.

Как сервис в программном комплексе реализована функция, позволяющая работать с ранее загруженными и обработанными данными. При запуске программы, открывается диалоговое окно, в котором необходимо установить требуемый временной интервал. Затем необходимо подтвердить установленный диапазон и загрузить данные. После сообщения об успешной загрузке данных предоставляется набор инструментов для их функциональной обработки. В противном случае необходимо вернуться к выставлению нового запроса данных.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Богушевич А.Я. Ультразвуковые методы оценивания метеорологических и турбулентных параметров атмосферы // *Оптика атмосферы и океана*. 1999. Т. 12, № 2. С. 170-175.
2. Тихомиров А.А. Ультразвуковые термометры и анемометры для измерения пульсаций скорости и температуры и воздушных потоков. Обзор // *Оптика атмосферы и океана*. 2010. Т. 23, № 7. С. 585-600.

3. Автоматизированный метеорологический комплекс АМК-03 <http://www.imces.ru/index.php?rm=news&action=view&id=402>
4. Python [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Python>
5. Монин А.С., Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы – Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1954, №24(151), с.163-187.
6. Корреляция Пирсона [Электронный ресурс]. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/glossary/GlossaryTwo/P/PearsonCorrelation.htm>

Lidar technologies for studying the vertical structure of the optical-physical parameters of the atmosphere over the territory of Siberia

Nasonov S.V., Balin Yu.S., Klemasheva M.G., Kokhanenko G.P., Novoselov M.M., Penner I.E.

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: nsvtsk@gmail.com

One of the main factors determining the formation of the climate of our planet is the amount of solar radiation entering the atmosphere. Cloud and aerosol fields in the atmosphere to a large extent determine its optical properties and are one of the key objects in the tasks of climate research and weather forecasting.

Lidar research methods in many cases seem to be practically the only tool for operational, remote and multicomponent monitoring of the vertical distribution of atmospheric parameters. Based on them, experimental studies of global processes such as climate change, anthropogenic pollution of the atmosphere, natural hazards and man-made disasters are carried out. The information received is the basis for further planning and implementation of measures to minimize negative consequences for the environment and humans. Placing lidar systems on various media, such as cars, airplanes, ships or spacecraft and the formation of remote sensing networks are the main and complementary directions for solving the problems described. The process of forming joint information systems on the state of the atmosphere based on satellite and ground-based network measurements has become one of the main areas of work in the field of environmental control in the projects of space agencies NASA, ESA and measuring networks AERONET, EARLINET, GALION, NDACC, GAW.

In modern studies of aerosol fields by laser sensing, the functionality of lidars is constantly expanding. This is achieved by increasing the number of probe radiation wavelengths, using the registration channels of Raman signals, as well as the polarization components of elastic backscattering signals. Due to this, the set of restored aerosol optical characteristics, such as the Angstrom index and the color ratio, is expanded, and based on the analysis of polarization characteristics, an additional selection of aerosol types is carried out. In the direction of developing tools for remote monitoring of the atmosphere, at the V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics. created new and regularly updated existing lidar systems, as well as processing algorithms for the data obtained with their use, in order to more accurately and quickly restore the optical and microphysical characteristics of the medium under study.

The lidar systems developed at the Institute of Atmospheric Optics are in demand in the tasks of environmental monitoring of various industrial emissions and smoke plumes, mapping of air pollution in cities, for studying the processes of transboundary transport of aerosol fields. The design features of the created lidars allow using them both stationary and installed on various mobile carriers, which makes it possible to conduct both short-term local observations and large-scale long-term measurements of the state of the atmosphere. Such systems include the LOZA-A2 multiwavelength mobile aerosol-Raman polarization lidar, the LOZA-M3 scanning polarization lidar and the CIMEL CE-372NP micropulse compact lidar.

Лидарные технологии для исследования вертикальной структуры оптико-физических параметров атмосферы над территорией Сибири

Насонов С.В., Балин Ю.С., Клемашева М.Г., Коханенко Г.П., Новоселов М.М., Пеннер И.Э.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

E-mail: nsvtsk@gmail.com

Одним из основных факторов определяющих формирование климата нашей планеты, является количество солнечного излучения, поступившего в атмосферу. Облачные и аэрозольные поля в атмосфере в значительной степени определяют ее оптические свойства и являются одним из ключевых объектов в задачах исследования климата и прогнозирования погоды.

Лидарные методы исследований во многих случаях представляются практически единственным инструментом для оперативного, дистанционного и многокомпонентного мониторинга вертикального распределения атмосферных параметров. На их основе проводятся экспериментальные исследования таких глобальных процессов, как климатические изменения, антропогенные загрязнения атмосферы, опасные природные явления и техногенные катастрофы. Получаемая информация является основой для дальнейшего планирования и реализации мероприятий по минимизации отрицательных последствий для окружающей среды и человека. Размещение лидарных систем на различных носителях, таких как автомобили, самолеты, корабли или космические аппараты и формирование сетей дистанционного зондирования являются основными и взаимодополняющими направлениями решения описанных задач. Процесс формирования совместных информационных систем о состоянии атмосферы на основе спутниковых и наземных сетевых измерений стал одним из основных направлений работ в области контроля окружающей среды в проектах космических агентств NASA, ESA и измерительных сетей AERONET, EARLINET, GALION, NDACC, GAW.

В современных исследованиях аэрозольных полей методами лазерного зондирования функциональные возможности лидаров постоянно расширяются. Это достигается за счет увеличения количества зондирующих длин волн излучения, использования каналов регистрации сигналов комбинационного рассеяния света, а также поляризационных компонент сигналов упругого обратного рассеяния. Благодаря чему расширяется набор восстанавливаемых оптических характеристик аэрозоля, таких как показатель Ангстрема и отношение цветности, а на основе анализа поляризационных характеристик проводится дополнительная селекция типов аэрозоля. В направлении развития средств для дистанционного мониторинга атмосферы, в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева создаются новые и регулярно обновляются уже существующие лидарные системы, а также алгоритмы обработки получаемых с их использованием данных, с целью более точного и оперативного восстановления оптических и микрофизических характеристик исследуемой среды.

В 2018 г. был создан и прошел первые тестовые испытания многоволновой мобильный аэрозольно-рамановский поляризационный лидар «ЛЮЗА-А2». При проектировании данной установки использовались современные конструктивные решения. Так как эксплуатация данной системы предполагалась в корабельных и самолетных экспедициях, при ее разработке были заложены высокие требования на устойчивость к различным нагрузкам, чтобы сохранять оптические юстировки при длительных транспортировках. В тоже время лидар не должен быть слишком громоздким. Поэтому корпус «ЛЮЗА-А2» был изготовлен из высокопрочного углепластика, который кроме того имеет слабую температурную зависимость и защищает от влияния неблагоприятных погодных условий. Конструкция корпуса лидара предусматривает возможность установки на сканирующую платформу, для того чтобы получать пространственные разрезы аэрозольных полей в вертикальной и горизонтальной плоскостях (например, для картирования пространственного распределения аэрозольных загрязнений над городом при наземном базировании), либо установку на борт самолета.

В лидаре была реализована возможность зондирования двумя длинами волн излучения твердотельного лазера YAG:Nd (1064 нм и 532 нм), который при этом выдает большую энергию в каждом импульсе излучения с частотой посылок до 20 Гц, что также существенно увеличивает пространственное разрешение. Прием обратнорассеянного излучения осуществляется в двух каналах для каждой соответствующей длины волны, которые состоят из идентичных асферических линзовых объективов с диаметрами линз 120 мм и фокусными расстояниями 500 мм.

На длине волны 532 нм реализована возможность поляризационных измерений. В приемной части этого канала расположена призма Волластона, которая формирует два взаимно ортогонально поляризованных пучка, которые одновременно регистрируются с помощью фотоумножителей. В этой же части приемного тракта доля излучения, с помощью дихроичного зеркала отражается и попадает в канал 607

нм, где регистрируется сигнал спонтанного комбинационного рассеяния на молекулах атмосферного азота. Данный канал используется в темное время суток, в режиме накопления. Реализация этого технического решения в лидаре «ЛЮЗА-А2» дает возможность корректно восстанавливать количественные оптические характеристики атмосферного аэрозоля (коэффициент ослабления и аэрозольную оптическую толщину) [1].

Зондирование атмосферы может осуществляться круглосуточно, в дневное и ночное время в высотном диапазоне от приземного слоя до верхней тропосферы (100÷12000 м), с пространственным разрешением 6 м.

Разработанный многоволновой мобильный аэрозольно-рамановский поляризационный лидар «ЛЮЗА-А2» уже показал свою эффективность при проведении корабельных экспедициях 2018-2019 гг. на озеро Байкал [T.V. Khodzher, G.S. Zhamsueva, A.S. Zayakhanov, A.L. Dement'eva, V.V. Tsydypov, Yu.S. Balin, I.E. Penner, G.P. Kokhanenko, S.V. Nasonov, M.G. Klemasheva, L.P. Golobokova, V.L. Potemkin. Ship-based studies of aerosol-gas admixtures over Lake Baikal basin in summer 2018. Atmos. Ocean. Opt. 2019. Vol. 32. №04. PP. 434-441. <https://doi.org/10.1134/S1024856019040067>]. Проведенные испытания в самолетной экспедиции 2018 г. над северной частью Сибири позволили оценить возможность использования лидара для задач обнаружения источников повышенного загрязнения атмосферы с борта самолета. И там, и там конструкция лидара «ЛЮЗА-А2» хорошо показала себя при транспортировке и эксплуатации, в том числе во время сложных погодных условий, обеспечив жесткую связку всех оптических элементов и надежную работу системы.

Еще одним из действующих малогабаритных лидаров серии «ЛЮЗА» является сканирующий поляризационный лидар «ЛЮЗА-М3» [2], разработанный и эксплуатируемый в Институте оптике атмосферы. Основными особенностями лидара «ЛЮЗА-М3» являются:

1) автоматическая сканирующая колонка, позволяющая изменять направление зондирования в верхней полусфере со скоростью до 1,5° в секунду, с точностью установки угла измерений не менее 1 угловой минуты;

2) разделение поляризационных компонент принимаемого излучения I_{co} , которая совпадает с исходным посылаемым излучением, и компонента I_{cros} , ортогональная ему, осуществляется непосредственно за приемным телескопом без установки элементов, искажающих поляризацию (таких как дихротические зеркала и светоделители);

3) непрерывное изменение исходного состояния поляризации (линейная-круговая) от импульса к импульсу, что позволяет оценивать некоторые элементы матрицы обратного рассеяния света (МОРС).

В качестве передатчика использован лазер Q-Smart 850 (Quantel) с энергией излучения на основной гармонике 850 мДж и с частотой повторения 10 Гц. Излучение передатчика линейно поляризовано. Используются два приемных объектива - ахроматический линзовый с диаметром 40 мм и фокусным расстоянием 200 мм для ближней зоны и зеркальный объектив Кассегрена с диаметром 200 мм и фокусом 1000 мм для дальней зоны. Сигналы детектируются фотоприемниками в аналоговом режиме: лавинные фотодиоды для 1064 нм и фотоумножители для 532 нм.

Благодаря использованию вращающихся платформ с фазовыми пластинками (синхронно с частотой лазерных импульсов) в приемном и передающем каналах, можно изменять состояние поляризации последовательно от линейной к круговой и наоборот. Лидарные сигналы записываются отдельно для каждой позиции пластин и могут суммироваться (накапливаться) при дальнейшей обработке за определенный период времени. Обычно это занимает от десяти секунд до минуты. Это позволяет одновременно измерять поляризационные характеристики (например, коэффициент деполаризации) как для линейной, так и для круговой поляризации. Благодаря чему можно исключить изменчивость элементов матрицы обратного рассеяния за время наблюдения.

В 2018-2019 гг. в Томске было проведено несколько экспериментов по исследованию микроструктуры кристаллических облаков верхнего яруса в режиме зенитного сканирования. Описанные технические возможности лидара позволяют детально изучать преимущественную ориентацию кристаллов льда в облаках. Результаты показали, что степень горизонтальной ориентации частиц облаков может существенно различаться в разных частях облака.

Еще один лидар CIMEL CE-372NP задействован в регулярных круглосуточных измерениях проводимых атмосферных параметров [3]. Лидар был поставлен в Томск в рамках совместного российско-французского сотрудничества Института оптики атмосферы и Лаборатории LAMOS Университета Сорбонны (Париж, Франция). Лидар предназначен для круглосуточного зондирования атмосферы практически в любых климатических условиях, в автоматическом режиме. Основная цель использования данной установки - получение долговременных серий высотных профилей обратнорассеянного излучения от аэрозольной составляющей нижней тропосферы, с целью получения информации о высоте пограничного слоя атмосферы, оценке его оптической толщи и лидарного отношения в сочетании с данными фотометра CIMEL CE-318.

Лидар CE-372NP относится к классу микроимпульсных лидаров, работающих на одной длине волны. Лидар спроектирован по двухосной оптической схеме с минимальной базой, что позволяет прини-

мать сигнал с высоты 150 м. Малая энергия импульса (4 мкДж) и длина волны излучения полупроводникового лазера в красном диапазоне длин волн (808 нм) делают его безопасным для глаз. Система регистрации отраженного сигнала представляет собой фотоприемный модуль компании EXCELITAS Technologies (США) на основе лавинного фотодиода, работающего в режиме счета фотонов. Небольшое поле зрения оптической приемной системы (290 мкрад) и узкий интерференционный фильтр (0,6 нм) позволяют получать полезный сигнал в режиме счета фотонов даже в присутствии солнечной фоновой засветки. Это обеспечивает круглосуточную работу лидара в широком динамическом диапазоне фоновых шумов с максимальной частотой счета до 35 МГц. Общее электроснабжение осуществляется как от стационарной сети 220 В переменного тока, так и от источников постоянного тока напряжением 24-28 В, чтобы использовать лидар на платформах различных мобильных носителей (автомобиль, самолет).

Лидар установлен в прочный герметичный корпус в соответствии с классом защиты IP65 и обеспечивает его работоспособность в условиях окружающей среды до 100% влажности и в диапазоне температур от -10 ° до + 40 ° С. Нижний предел температуры до -10 °С обусловлен используемыми электронно-оптическими компонентами в лидаре. Для обеспечения круглогодичной эксплуатации лидара в Томске, он помещается в термостабилизированный контейнер, для защиты от низких температур окружающей среды.

В сентябре 2015 года для длительных непрерывных измерений параметров атмосферы лидар был установлен на территории обсерватории «Фоновая» Института оптики атмосферы, которая расположена в фоновом районе Томской области (56°25'с.ш., 84°04' в.д.) на расстоянии 60 км к западу от Томска. В случае долгосрочных измерений оптических параметров атмосферы удаленность местоположения от крупных промышленных центров позволяет более правильно оценить вклад различных источников аэрозоля в оптическую толщину при трансграничном переносе.

Описанные выше лидарные системы, разрабатываемые в Институте оптики атмосферы, являются востребованными в задачах экологического контроля различных промышленных выбросов и дымовых шлейфов, картирования загрязнения воздушного бассейна городов, для изучения процессов трансграничного переноса аэрозольных полей. Конструктивные особенности лидаров позволяют использовать их как стационарно, так и устанавливая на различные мобильные носители. Благодаря этому возможно проводить как кратковременные локальные наблюдения, так и вести масштабные долговременные измерения состояния атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. S.V. Samoilova, Yu.S. Balin, G.P. Kokhanenko, I.E. Penner. *Investigations of the vertical distribution of troposphere aerosol layers based on the data of multifrequency raman lidar sensing. Part I. Method of optical parameter retrieval* // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 22. No. 3. PP. 302-315. <https://doi.org/10.1134/S1024856009030075>.
2. G. P. Kokhanenko, Y. S. Balin, M. G. Klemasheva, S. V. Nasonov, M. M. Novoselov, I. E. Penner and S. V. Samoilova. *Scanning polarization lidar LOSA-M3: opportunity for research of crystalline particle orientation in the ice clouds* // *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 1113–1127, 2020. <https://doi.org/10.5194/amt-13-1113-2020>.
3. G. Ancellet, I. E. Penner, J. Pelon, V. Mariage, A. Zabukovec, J. Christophe Raut, G. Kokhanenko, and Yu. Balin. *Aerosol monitoring in Siberia using an 808nm automatic compact lidar* // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. Vol. 12. №1. PP. 147–168. <https://doi.org/10.5194/amt-12-147-2019>.

СЕКЦИЯ 7

Информационно-
вычислительная
инфраструктура
региональных
исследований
окружающей среды

SESSION 7

Information
Computational
Infrastructure
of a Regional
Environmental
Study

Standardization of forms and tools for inter-machine interaction in the exchange of hydrometeorological data

Vyazilov E.D., Melnikov D.A., Mikheev A.S.

RIHMI-WDC, Obninsk, Russia

E-mail: vjaz@meteo.ru

INTRODUCTION

In the field of hydrometeorology, the international exchange of data has always been an important point in the replenishment of the state fund of data on hydrometeorology and environmental monitoring (State Fund). Initially, he was carried out on paper (tables, reports, punch cards), then on magnetic media (magnetic tapes, magnetic cartridges, floppy disks), then on compact disks (CD-ROM, DVD), by email. Now data exchange is required between software located on different nodes (servers) of the Internet system. The system of World Data Centers of the International Council of Scientific Unions (ICSU) is currently being transformed into a World Data System, where the main method of exchange is machine-to-machine interaction between automated systems.

There are already examples of such cooperation within the framework of pan-European projects EUDAT (<https://www.eudat.eu>), SeaDataNet (<http://www.seadatanet.org>). In Russia, it is the State Services Portal (<https://www.gosuslugi.ru/>), which uses the System of interagency electronic interaction to fulfill user requests for government services of various departments.

Implementation of inter-machine interaction between various information systems requires of the standardization of metadata, codes and classifiers, parameter names, formats for collecting, exchanging and storing data, forms of information products issuing, data access services, user interfaces.

Requirements for data exchange are following:

- organizations shared in the exchange of data must be accredited, for example, as is now done for the ICSU World Data Centers [5];
- exchanged data bases (data sets) must be certified;
- exchanged data must satisfy the FAIR principles [4] (findable, accessible, interoperable and reusable), according to these principles, the data must have unique identifiers, relevant metadata for their detection;
- data must be transmitted in an open, encrypted form or with an electronic digital signature;
- formats should provide the ability to transfer (exchange) data, be known and widespread;
- formats should be cross-platform;
- any system that recorded the file must subsequently read it and restore all the information;

- information carriers must have technological compatibility at the write-read level, any system will be able to read the file recorded by any other system, and at the same time receive all the information that it is able to process;
- any system will be able to read the file and restore all information from it if this file was originally written by this system, but was subsequently modified by another subsystem and saved again (property to save data);
- data sets should be documented and have metadata;
- all records must have key attributes;
- the physical data structure on the medium should be as close as possible to the logical data structure;
- the list of parameters should correspond to the composition of the observations defined by the current manuals;
- main parameters should have signs of quality.

Formats for data transmissions are using to collect and store observed inverted, calculated data sets, and exchange data.

Formats of data collection are using to present observations results. They should provide all observable and related information about the methods of obtaining, data sources, and systems of measuring. International formats are using for collecting operational data from the global Formats for collection are using to present observations results. They should provide all observable and related information about the methods of obtaining, data sources, and systems of measuring. In most cases, international formats are using here for collecting operational data from the global telecommunication system and national formats for collecting hydrometeorological data in mode of-line [1]. Measurement data on the vertical profile consists of two tables: information on profile and profile data.

For data exchange formats, transport international formats can be used (for example, HDF, NetCdf, GRID, GRIB, BUFR, ODV, etc.) or extensible markup language XML and JSON (GeoJSON) language.

There are two basic requirements for data storage formats - data packaging in order to reduce the amount during data storage and the presence in the format of metadata attributes (name of the country, organization name of ship-owner, name of the research vessel, etc.). The State fund for data storage uses the Language for the Description of Hydrometeorological Data [2].

The main requirement for inverted data storage formats is to bring them as close as possible to further processing. This is the ease of data representation, high-speed access and availability of information on the sources of these data. Data may present as a point, profile, grid, catalog of objects. The structure of this data should be such that these data sets can use by data management systems (DBMS), i.e. they must have a simple structure and fixed length record.

To store the interpolated parameter values the type formats are applying: "Profile" - results of interpolation of parameters for standard horizons (heights); 'Grid' - the results of the spatial interpolation of data measured at fixed points in space, to regular grid. The interpolated data in the nodes of the regular grid may present in the form of three tables (information for grid, information about each field and data matrix with latitude and longitude for every point). Data on time series are storage in the form of two tables - information for the every time series and the matrix of values (date, time, value) [3]. Information about the object files with text and graphic information - documents, pictures, images, photos, video, and audio - must include information about the date, time, and type, name of the sources, the device and link on object.

Moreover, information products may been describe, using the extensible markup language XML. For this, it is necessary to create an XML schema that includes all metadata and information product parameters, as well as develop universal forms for describing and presenting information products.

Services for access to data and information. The processing results of data can present on the site, by stand-alone applications, by map services, and by web services.

A standalone application is a type of product characterized by a permanent link on the network and involving interaction with the user by the visual interface. Here is subject to standardization the format of the link, such as DOI; valid request types and their parameters; styles, user interface elements; legend, naming and formats of significant interface elements. All of them must correspond to the used names and classifiers.

Service - a type of product characterized by the presence of a permanent link on the network and involving interaction between two software components. It is subject to standardization the format of the link; valid query types and their parameters; legend for image; naming and numerical value formats must match the naming conventions used.

A web service identified by a web address is a software system with standardized interfaces. Web services can interact with each other and with third-party applications through messages based on registers and protocols (UDDI, WSDL, SOAP, XML-RPC, REST, XML thematic scheme). In order to use XML more widely for data exchange, it is necessary to create an XML scheme for all hydrometeorological parameters, in which a description of all parameters of the subject area should present.

Application Programming Interface (API) is a set of ready-made classes, procedures, functions, structures and constants provided by an application (library, service) for use in external software products. Using the API, the access to databases can organize.

Cartographic services are a standard protocol for using geographically linked images over the Internet generated by a cartographic server based on databases. The main types of mapping services are from OGC standards - WMS, WFS, and WCS.

GeoTIFF format is an open format for presenting raster data in TIFF format, having metadata and geo-referenced. GeoPDF format - is an advanced PDF format containing spatial information with the ability to view in Adobe Reader. GeoPDF makes it possible to compile several layers in one PDF file, insert coordinates, hyperlinks and view of various visual information; add notes on map.

Thematic metadata for the data used. When exchanging data, metadata should be widely used, both to describe information resources and information products obtained on their basis. In addition, for some information products, additional metadata objects may be required, for example, information about observing platforms may be required for most of the observed data, since they usually contain only basic identifying attributes (synoptic index, call sign for ship or buoy, and etc.).

The main objects of metadata are information on arrays and databases; information resources, as part of the existing arrays and databases included in the integrated data base; organizations - sources, custodians and distributors of data; projects and programs within the framework of which certain data were obtained; platforms for observation - research vessels, surface drifting, anchored and others buoys, hydrometeorological stations and posts, satellites; instruments for observation; expeditions of research vessel; models and calculation methods, etc.

All metadata objects are visualizing according to a standard scheme (for example, <http://esimo.ru/portal/portal/esimo-user/metadata>) - on the left is the possibility of choosing the values of synchronized attributes. Above the table, there is an opportunity to set a search by keywords. Only basic attributes are placing in the table. For complete information, you must click the button “i” in the circle in the first column of the table, after which all the attribute values will be displayed. You can disable individual attributes during visualization, as well as send for export part of the table displayed on the screen. To get the copy and metadata, the selected information can export in CSV format.

ABOUT CODES AND CLASSIFICATORY

For data exchange, it is necessary to use the highest level of standardization classifiers - international, national, and industry. To search for classifiers in the systems involved in the exchange of data, databases of common codes and classifiers must create. For example, in ESIMO (<http://portal.esimo.net/portal/portal/tech/>), contains more than 500 classifiers and there are tools for searching, viewing them and export.

Unification of parameter names in various information resources requires using the Unified parameter dictionary. For example, in ESIMO (<http://esimo.ru/portal/auth/portal/esimo-user/metadata>) information about 2500 parameters presented. Availability of the English name of the parameter allows it to use for international data exchange; the short name is used in various software interfaces. The parameter code is represented according to the scheme: ANNNN_SS_K, where, A is the section of the parameter dictionary (P is the main parameters, M is the metadata attribute, R is the parameter characterizing the content of the object data); NNNN - numeric code of parameter; SS - a numerical code reflecting the name of the statistical characteristic; K - properties of parameter (indicator dangerous, sign of data quality, etc.).

DATA VISUALIZATION

For universal visualization of integrated data are used the following representations:

- map, graph, table — regular information products, obtaining for each information resource by default;
- interactive map - the creation of thematic combinations of layers is based on the use of map services, in the interactive map there is the possibility of accessing to tables, figures at a point;
- directory of object files - allows you to quickly find the storage address of the required instance (file) and, if necessary, download it to your computer;
- preparing information products in the form of regularly updated (“live”) of web pages - is a dynamic page and, having the permanent address on the Internet for each information resource;
- matrix of information products - develop by geographical areas (for example, separate seas), for parameters summarized in the form of a triad - observations, forecasts, climate;
- indication of parameter values - allows to get dangerous deviations from the threshold parameter values (local and national, climatic values, etc.);
- combining the observed and prognostic information on one graph;
- data export - for structured data, the formats NetCDF, ASCII files of a flat structure, CSV, XML, Excel, PDF files are used; for unstructured data - graph and maps in the form of files such as gif, tiff;
- representation of the information’s resources in the application task - specially programmed interface for receiving of analytics data.

CONCLUSIONS

For a one-time exchange of hydrometeorological data, HDF, NetCdf formats must use, and for constant regular exchange - languages XML, JSON. For the first time in hydrometeorology, the idea of standardizing

formats for storing and exchanging data in the form of time series, grid data, and catalogs of object files for relational DBMSs using multidimensionality approach is proposed. In addition to standardizing formats, is applicable the standardizing common codes and classifiers used in data exchange, a Unified dictionary of parameters, and external interfaces.

Prospects for the development of standardization are the development of tools for the inter-machine interaction of existing information systems.

Acknowledged. The work financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, a unique project identifier RFMEFI61618X0103.

REFERENCES:

1. *Guidance on the design of the results of marine scientific research*. - Obninsk. RIHMI-WDC. - 2013. - 28 p.
2. *Language for the description of hydrometeorological data for IBM PC*. - Obninsk. RIHMI-WDC Proceedings. 1995. Issue 160. p. 41 - 54.
3. *Viazilov ED Creation and use of databases*. Germany Palmarium Academic Publishing. 2018. - 545 pp. ISBN: 978-620-2-38198-7.
4. *FAIR Principles*. <https://www.go-fair.org/fair-principles/>.
5. *Accreditation of WDS Network Members*. <http://www.icsu-wds.org/services/certification/accreditation-of-wds-network-members>.

Data assimilation methods for nonlinear geophysical models based on based on ensemble approach

Klimova E.G.

Federal Research Center for Information and Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, Russia
E-mail: klimova@ict.nsc.ru

The problem of optimal estimation of geophysical fields based on observations and mathematical models (the data assimilation problem) is one of the most relevant now. The realization of observational data processing using models of geophysical processes has a lot of computational and technological difficulties. This is a high dimension of the modeled variables, as well as large volumes of continuously incoming observational data. To obtain high accuracy of estimation of geophysical fields, it is necessary to use modern methods and approaches to solving the data assimilation problem. Methods of data assimilation must take into account the non-linearity of model equations, in addition, they must be implemented on modern computers.

In general, if the prognostic geophysical fields and observational data considered as random variables, the Bayesian approach is used to solve the data assimilation problem. In the case of a linear model and a linear observation operator, the optimal estimate from the observations and forecast at the end of the time interval is called the Kalman filter. If the optimal estimate is considered for a given time interval, this problem is called the smoothing problem [1].

The Monte Carlo method for solving filtering and smoothing problems, the so-called ensemble filtering and smoothing algorithms are proposed in [2]. Ensemble filtering and ensemble smoothing algorithms do not solve the non-Gaussian problem. In addition, there are problems with implementing these algorithms in the case of large-dimensional problems, as well as the problem of convergence of the algorithms. One of the approaches to solving the non-linearity problem is the use of iterative smoothing algorithms, which are a variational problem using ensembles for calculating covariances and linearization of forecast and observation operators [3].

In the strictly nonlinear non-Gaussian case, the particle method is used, which is based on the Bayesian approach [1]. The particle method is currently becoming very popular. At the same time, methods based on the particle filter, which use the ensemble approach and previously developed algorithms for ensemble Kalman filters are proposed.

A number of authors consider an approach to solving the nonlinear filtration problem based on the representation of the density distribution as a sum of Gauss functions. It is known that if the density distribution is represented as the sum of Gauss functions, then the optimal estimate is the sum with weights of the estimates obtained in Kalman filters corresponding to the Gaussian distribution densities.

The report considers an approach to solving the nonlinear filtration problem based on the representation of the distribution density as a sum of Gauss functions. When implementing the algorithm, the ensemble π -algorithm proposed in [4-5] is used. The algorithm is local, which allows its implementation in the case of large-dimensional geophysical models.

REFERENCES:

1. Carrassi A., Bocquet M., Bertino L., Evensen G. *Data assimilation in the geosciences: An overview of methods, issuers and perspectives* // *Wiley interdisciplinary reviews: Climate Change*. 2018. V. 131, Issue5, e535, doi: 10.1002/wcc535.
2. Evensen, G. *Data assimilation. The ensemble Kalman filter*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 307 p.
3. Evensen G. *Analysis of iterative ensemble smoother for solving inverse problems* // *Computational Geosciences*. 2018. 22. P.885-908. doi.org/10.1007/s10596-018-9731-y.
4. Klimova, E. *A suboptimal data assimilation algorithm based on the ensemble Kalman filter* // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2012. V. 138, P. 2079-2085.
5. Klimova E G *The Kalman stochastic ensemble filter with transformation of perturbation ensemble* // *Siberian. J. Num. Math.* 2019 V. 22, P. 27-40

Методы усвоения данных для нелинейных геофизических задач, основанные на ансамблевом подходе

Климова Е.Г.

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: klimova@ict.nsc.ru

ЗАДАЧА УСВОЕНИЯ ДАННЫХ

Задача оптимальной оценки геофизических полей по данным наблюдений и математической модели (задача усвоения данных) является одной из наиболее актуальных в настоящее время. Создание технологической линии обработки данных натурных наблюдений с применением современных моделей геофизических процессов связано с рядом вычислительных сложностей. Это высокая размерность моделируемых переменных, а также большие объемы непрерывно поступающей информации. Для получения высокой точности оценки геофизических полей требуется привлечение современных методов и подходов к решению задачи усвоения данных. Методы усвоения данных должны учитывать нелинейность моделей, кроме того, они должны быть реализуемы на современных вычислительных устройствах.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УСВОЕНИЯ ДАННЫХ

Наиболее общая постановка задачи усвоения данных приведена в монографии [1]. Задачей обратного моделирования называют оценку неизвестного вектора параметров большой размерности $x \in R^M$ по вектору данных наблюдений $y \in R^P$. Если предположить, что $y = M(x) + \delta$, где M – известный оператор прогноза-наблюдений, δ – случайный шум с заданной функцией распределения.

Под задачей усвоения данных принято понимать последовательное по времени оценивание неизвестной величины по данным наблюдений. Решение задачи обратного моделирования для заданной модели процесса и набора данных наблюдений циклически по времени является задачей усвоения данных [1]. В проблему обратного моделирования включена также задача оценки параметров модели.

В общем случае, если моделируемые геофизические поля и данные наблюдений рассматриваются как случайные переменные, для решения задачи усвоения данных используется байесовский подход. В случае линейной модели и линейного оператора наблюдений оптимальная оценка по данным наблюдений и модели в конце временного интервала ищется с помощью фильтра Калмана. Если рассматривается оптимальная оценка на заданном временном интервале, такая задача называется задачей сглаживания [2-3].

В линейном гауссовском случае решением задачи фильтрации является фильтр Калмана, решением задачи сглаживания – сглаживание Калмана [2-3].

АНСАМБЛЕВЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ УСВОЕНИЯ ДАННЫХ

В работе [4] предложено использовать метод Монте-Карло для решения задач фильтрации и сглаживания, так называемые ансамблевые алгоритмы фильтрации и сглаживания. В ансамблевом фильтре Калмана в нелинейном случае прогноз ковариационной матрицы осуществляется с помощью нелиней-

ной модели, при этом нарушается условие гауссовости. Также в этом случае оценка на шаге анализа является приближением оценки минимальной дисперсии.

Таким образом, алгоритмы ансамблевой фильтрации и ансамблевого сглаживания не решают проблемы негауссовости. Кроме того, возникают проблемы реализации этих алгоритмов в случае задач большой размерности, а также проблема сходимости алгоритма.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УСВОЕНИЯ ДАННЫХ В НЕЛИНЕЙНОМ СЛУЧАЕ

Одним из подходов к решению проблемы нелинейности является применение итерационных алгоритмов сглаживания, представляющих собой вариационную задачу с использованием ансамблей для вычисления ковариаций и линеаризации операторов прогноза и наблюдений [5].

В строго нелинейном негауссовом случае используется метод частиц, который основан на байесовском подходе [6]. Метод частиц в настоящее время становится очень популярным. При этом разрабатываются методы, основанные на фильтре частиц, в которых применяется ансамблевый подход и разработанные ранее алгоритмы ансамблевых фильтров Калмана [6, 7].

АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ, ОСНОВАННЫЙ НА ПРЕДСТАВЛЕНИИ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ВИДЕ СУММЫ ФУНКЦИЙ ГАУССА

Рядом авторов рассматривается подход к решению задачи нелинейной фильтрации, основанный на представлении плотности распределения в виде суммы функций Гаусса. Известно, что если плотность распределения представляется в виде суммы функций Гаусса, то оптимальной оценкой будет сумма с весами оценок, полученных в фильтрах Калмана, соответствующих гауссовским плотностям распределения.

Предположим, что плотность распределения представляет собой сумму функций Гаусса [8]:

$$p(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^L \alpha_i g(\mathbf{m}_i, \mathbf{P}_i),$$

где $\sum_{i=1}^L \alpha_i = 1$, g – функция Гаусса, $\mathbf{m}_i$ – n -векторы, $\mathbf{P}_i$ – положительно определенные матрицы. Из теории известно, что в этом случае среднее значение и ковариационная матрица этого случайного процесса будут равны, соответственно [8]

$$\hat{\mathbf{x}} = \sum_{i=1}^L \alpha_i \mathbf{m}_i, \quad (1)$$

$$\hat{\mathbf{P}} = \sum_{i=1}^L \alpha_i [\mathbf{P}_i + (\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{m}_i)(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{m}_i)^T]. \quad (2)$$

Алгоритм усвоения данных принято представлять в виде шага прогноза по модели и шага анализа (оценки значений по данным наблюдений и прогнозу). Если предположить, что плотность распределения на шаге прогноза имеет вид

$$p(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^L \alpha_i g(\mathbf{m}_f^i, \mathbf{P}_f^i),$$

то при наличии данных наблюдений у плотность распределения будет иметь вид [8]:

$$p(\mathbf{x} | \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^L \tilde{\alpha}_i g(\mathbf{m}_a^i, \mathbf{P}_a^i), \quad (3)$$

где

$$\mathbf{m}_a^i = \mathbf{m}_f^i + \mathbf{K}_i [\mathbf{y} - h(\mathbf{m}_f^i)], \quad (4)$$

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{P}_f^i \mathbf{H}_i^T (\mathbf{H}_i \mathbf{P}_f^i \mathbf{H}_i^T + \mathbf{R}_i)^{-1}, \quad \mathbf{H}_i^T = \left. \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{m}_f^i} \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_a^i = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{H}_i) \mathbf{P}_f^i, \quad (6)$$

$$\tilde{\alpha}_i = \alpha_i \frac{g[\mathbf{y} - h(\mathbf{x}_f^i), \mathbf{H} \mathbf{P}_f^i \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]}{\sum_{l=1}^L g[\mathbf{y} - h(\mathbf{x}_f^l), \mathbf{H} \mathbf{P}_f^l \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]} \quad (7)$$

То есть, искомая оценка (среднее значение) будет равно сумме с весами значений, полученных в L алгоритмах фильтра Калмана. В [8] доказано, что это имеет место, если матрица $\mathbf{P}_f^i$ убывает со временем (мала). При этих же условиях на шаге прогноза

$$p(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^L \tilde{\alpha}_i g[f(\mathbf{m}_a^i), \mathbf{F}_i \mathbf{P}_a^i \mathbf{F}_i^T + \mathbf{Q}_i], \quad (8)$$

где f – нелинейный оператор модели, $\mathbf{F}_i = \left. \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{m}_a^i}$.

Одной из серьезных проблем фильтра частиц, вариант которого здесь рассматривается, является его «расходимость» со временем, когда один из весовых коэффициентов становится близким к 1, а остальные – к 0. В этом случае используется так называемое обновление (resampling), когда генерируется выборка в соответствии с плотностью распределения (3), а после шага прогноза алгоритм аналогичен 1-му шагу, когда ковариационная матрица приближенно оценивается по выборке (9). Генерирование выборки, соответствующей плотности распределения (3), может проводиться с помощью алгоритмов, предложенных в [6, 7].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНСАМБЛЕВОГО π -АЛГОРИТМА ДЛЯ ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

В докладе рассматривается подход к решению задачи нелинейной фильтрации, основанный на представлении плотности распределения в виде суммы функций Гаусса. При реализации алгоритма используется предложенный в [9-10] ансамблевый π -алгоритм. Алгоритм является локальным, что позволяет осуществлять его реализацию в случае геофизических моделей большой размерности.

Элемент ансамбля, соответствующий плотности распределения на шаге анализа (3) имеет вид

$$\mathbf{x}_{i,j}^a = \mathbf{x}_{i,j}^f + \mathbf{K}_i(\mathbf{y} + \boldsymbol{\varepsilon}_i - \mathbf{H}_i \mathbf{x}_{i,j}^f), \quad (9)$$

при этом i – это номер функции Гаусса в сумме (3) ($i = 1, \dots, L$), j – номер элемента ансамбля, соответствующий i -й функции Гаусса и коэффициенту $\hat{\alpha}_i$, $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ – Гауссовская случайная переменная: $E[\boldsymbol{\varepsilon}_i \boldsymbol{\varepsilon}_i^T] = \mathbf{R}^i$. Согласно алгоритму, предложенному в [7], количество случайных величин, соответствующих i -й функции Гаусса, пропорционально коэффициенту $\hat{\alpha}_i$.

В работах [9-10] предложен стохастический ансамблевый фильтр Калмана, который реализуется локально, так же как детерминированный алгоритм LETKF [11] (ансамблевый π -алгоритм). В этом алгоритме элемент выборки имеет вид (9).

Шаг анализа алгоритма состоит из следующих процедур:

- 1). по ансамблю возмущений прогноза $\mathbf{dx}_j^f$ вычисляется ансамбль возмущений анализа $\mathbf{dx}_j^a$ с использованием формул π -алгоритма;
- 2) зная ковариационную матрицу ошибок анализа $\mathbf{P}_a$ вычисляется N анализов «средних» для соответствующих функций Гаусса (3) $\{\mathbf{dx}_a^i, i = 1, \dots, N\}$;
- 3) вычисляется выборка $\mathbf{dx}_{i,j}^a$ в соответствии с формулой для плотности распределения (3).

Далее определяется ансамбль прогнозов по ансамблю анализов и производится повторение процедуры анализа. Важной частью алгоритма являются задание начальной плотности распределения, процедура вычисления весовых коэффициентов (7), а также предотвращение расходимости алгоритма.

Локальность процедуры анализа обусловлена свойствами π -алгоритма: шаг анализа может осуществляться для любого шага сетки независимо. Все арифметические операции осуществляются с матрицами, размерность которых равна количеству элементов ансамбля.

Были проведены численные эксперименты, в которых алгоритм реализован для нелинейной одномерной тестовой модели. С помощью численных экспериментов показано, что алгоритм позволяет улучшить точность ансамблевого фильтра Калмана, однако точность зависит от количества ансамблей, частоты усвоения (влияния нелинейности) и задаваемых параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- В докладе рассматриваются современные подходы к задаче усвоения данных для нелинейных геофизических моделей.
- Отмечаются технологические сложности, возникающие при практической реализации системы усвоения данных.
- Предлагается новый алгоритм усвоения данных, который может быть использован в нелинейном случае. Алгоритм представляет собой приближенное решение задачи нелинейной фильтрации.
- Алгоритм основан на представлении плотности распределения в виде суммы функций Гаусса и применении локального ансамблевого фильтра Калмана с трансформацией матрицы ковариаций (ансамблевого π -алгоритма). Предлагаемый алгоритм обладает важным свойством локальности, что делает его применимым для современных геофизических моделей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Nakamura G., Potthast R. *Inverse Modeling*. IOP Publishing. 2015. 509 pp. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-1218-9>.
2. Carrassi A., Bocquet M., Bertino L., Evensen G. *Data assimilation in the geosciences: An overview of methods, issuers and perspectives // Wiley interdisciplinary reviews: Climate Change*. 2018. V. 131, Issue5, e535, doi: 10.1002/wcc535.

3. Vetra-Carvalho S., P.J. van Leeuwen, L. et al. State-of-the-art stochastic data assimilation methods for high-dimensional non-Gaussian problems // *Tellus A*: 2018, 70, 1445364, <https://doi.org/10.1080/16000870.2018.1445364>
4. Evensen, G. *Data assimilation. The ensemble Kalman filter*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 307 p.
5. Evensen G. Analysis of iterative ensemble smoother for solving inverse problems // *Computational Geosciences*. 2018. 22. P.885-908. <https://doi.org/10.1007/s10596-018-9731-y>.
6. P.J. van Leeuwen, H.R. Kunsch, L. Nerger, R. Potthast, S. Reich Particle filters for high-dimensional geoscience applications: A review // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, 1-31, DOI: 10.1002/qj.3551
7. Stordal A.S., Karlsen H.A., Nævdal, Skaug H.J., Valles B. Bridging the ensemble Kalman filter and particle filter: the adaptive Gaussian mixture filter // *Comput Geosci* 2011, 15, 293-305. DOI: 10.1007/s10596-010-9207-1
8. Anderson B.D., Moore J.B. *Optimal filtering*. 1979. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 357 p.
9. Klimova, E. A suboptimal data assimilation algorithm based on the ensemble Kalman filter // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2012. V. 138, P. 2079-2085.
10. Климова Е.Г. Стохастический ансамблевый фильтр Калмана с трансформацией ансамбля возмущений // *Сибирский журнал вычислительной математики /РАН. Сибирское отделение – Новосибирск*. 2019. – Т.22, №1. С. 27-40.
11. Houtekamer, H.L. Zhang, F. Review of the ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation // *Monthly Weather Review*. 2016. V. 144. P. 4489-4532.

An approach to digital environmental monitoring of forest resources of the Baikal natural territory

Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Popova A.K.

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, Irkutsk, Russia
E-mail: idstu@icc.ru

1/5 of the world's forest area and 1/2 in coniferous species is concentrated in the Baikal natural territory. Forests have a global biosphere value, perform environment-forming functions and ensure the preservation of the environment.

Significant environmental problems of forest resources of the Baikal natural territory is:

- a decrease in the stock of forest resources of BNT due to forest pathologies, illegal logging and fires, which cause significant harm to the economy and the environment;
- growth of epidemiological damage to conifers of taiga massifs;
- lack of a consistent system of reforestation and forest maintenance, which leads to depletion of the resource and the development of new territories.

Digital environmental monitoring of the BNT forest should be based on:

- introduction of the concept of digital platforms, end-to-end technologies, which is associated with the active introduction of digitalization in modern modeling, monitoring and forecasting of the state of the environment;
- interdisciplinary integration of the schemes and methods of forest monitoring participants, based on the development and implementation of digital platforms, spatial data infrastructure, service-oriented environment, end-to-end technologies, WPS services (Web Processing Service), etc;
- the creation of the basic types of digital platforms for distributed environmental monitoring of the BNT forest, which allow quasi-continuous mode (24/12/365) to automate the registration of parameters (including using IoT sensors) and online transfer them to a single archive-information center or data center, which will allow you to quickly receive, transmit and process data;
- the creation of a distributed (cloudy) network of centers for processing interdisciplinary spatio-temporal data of digital monitoring of the forest, which will significantly improve the quality of forecast models;
- increasing the reliability of spatio-temporal forest monitoring data due to their multiplicity (Big Data) and the complexity of obtaining sensors, measuring instruments, and remote sensing data from a distributed network;

- development of original mathematical, information models and software for the complex processing of a large amount of time variations of heterogeneous parameters for monitoring the state of the forest resource potential, with the identification of significant relationships and trends that are the basis for expert assessment and forecasts;
- organizing the effective use of spatio-temporal thematic data for monitoring the BNT forest and planning WPS services (basic and thematic) between CPU participants;
- creation of thematic WPS services for identifying and assessing changes in the state of vegetation cover over time series of remote sensing data;
- extrapolation of the results of a comprehensive analysis of the ecological characteristics of BNT forests in Siberia with similar landscape conditions;
- information availability of the results of scientific research for the management of forest resources of the BNT, forecasting the main risks associated with the anthropogenic pressure on nature.

Подход к организации цифрового экологического мониторинга лесных ресурсов на примере Байкальской природной территории

Бычков И.В., Ружников Г.М., Фёдоров Р.К., Попова А.К.

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, Иркутск, Россия
E-mail: dstu@icc.ru

ВВЕДЕНИЕ

Уникальные ландшафты Байкальской природной территории (БПТ) находятся под защитой «Конвенции об охране всемирного культурного и природного наследия ЮНЕСКО», требующей сохранять территорию в неизменном естественном виде. БПТ расположена на площадях трёх субъектов Российской Федерации: 28,5 % в Иркутской области, 57,1% – в Республике Бурятия, 14,4% – в Забайкальском крае. Площадь БПТ равна 386 тыс. км², на ней расположена 31 особо охраняемая природная территория, в том числе 3 заповедника, 2 национальных парка, 5 заказников, 6 рекреационных местностей и более 128 памятников природы.

Основные запасы леса находятся в Сибири и на Дальнем Востоке, их площади занимают до 50% площади страны. В Байкальской природной территории сосредоточена 1/5 часть площади лесов мира, по хвойным породам – 1/2 часть. Леса имеют глобальное биосферное значение, выполняя средообразующие функции и обеспечивая сохранность окружающей среды.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОНИТОРИНГ ЛЕСНЫХ РЕСУРСОВ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

Комплексные наблюдения за состоянием окружающей среды в РФ осуществляет государственный экологический мониторинг, важной частью которого является мониторинг лесных ресурсов. Государственный экологический мониторинг – это комплексная система наблюдения за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов, а также обеспечения потребностей государства, юридических и физических лиц в достоверной информации, необходимой для предотвращения и (или) уменьшения неблагоприятных последствий изменения состояния окружающей среды.

В систему государственного экологического мониторинга входят две подсистемы, связанные с регулярным наблюдением за состоянием лесов – лесопатологического мониторинга и мониторинга воспроизводства лесов. Государственный лесопатологический мониторинг охватывает надзор за санитарным и лесопатологическим состоянием лесов (болезни деревьев, повреждение насекомыми и погодными условиями). Мониторинг воспроизводства лесов ориентирован на учёт земель, требующих лесовосстановления, оценку изменения лесных площадей, на характеристики семенного и посадочного материала, а также эффективность проводимых мероприятий.

Информация в подсистемы мониторинга лесов поступает из государственного лесного реестра, статистических отчетов, данных инвентаризации лесов, лесных планов субъектов РФ, лесохозяйственных регламентов лесничеств, актов лесопатологических обследований, данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ). Результаты мониторинга публикуются в виде ежегодного отчета, содержащего аналитическую информацию, таблицы данных, схемы, тематические карт-схемы.

На территории БПТ ведение подсистем государственного мониторинга лесов возложено на региональные филиалы ФБУ «Рослесозащита» – «Центр защиты леса Иркутской области», «Центр защиты леса Забайкальского края» и «Центр защиты леса Республики Бурятия», которые проводят регулярные и выборочные наземные и дистанционные наблюдения за санитарным и лесопатологическим состоянием лесов, популяциями вредных организмов, оценивают общее состояние лесов. Среди значимых экологических проблем лесных ресурсов Байкальской природной территории следует выделить:

- снижение запасов лесного фонда БПТ из-за лесопатологий, нелегальной заготовки древесины и пожаров, которые наносят ощутимый вред экономике и экологии;
- рост эпидемиологического поражения хвойных пород деревьев таежных массивов;
- отсутствие последовательной системы лесовосстановления и ухода за лесами, что приводит к истощению ресурса и освоению новых территорий.

В свою очередь, особенностью мониторинга состояния лесных ресурсов БПТ является:

- локализованность ведомственных схем наблюдений (Рослесхоз, МЧС и др.), территориальная распределённость программно-аппаратных комплексов систем мониторинга леса;
- формирование больших объёмов пространственно-временных данных мониторинга леса, которые не скоординированы между собой, в параметрическом, хронологическом и других аспектах;
- различные виды хранения (в бумажном, цифровом) и разноформатность данных мониторинга, а также использование систем координат, отличных от местной в проектной документации и лесоустроительных планшетах;
- отсутствие единой системы хранения пространственно-временных данных мониторинга, содержащей достоверные данные о качественных, количественных и стоимостных характеристиках лесного фонда, а также интегрированной информационной системы оценки лесных ресурсов БПТ (состав, вырубки, пожары, возобновления лесов, лесопатологическая оценка и т.д.);
- низкая актуализация официальной лесоустроительной информации о лесах (средний возраст материалов лесостроительства в России составляет 23 года);
- не достаточная оперативность и ограниченность доступа к данным мониторинга, что осложняет принятие управленческих решений, а также проведение междисциплинарных научных исследований.

Это обосновывают необходимость перехода на новый технологический уклад – организацию цифрового экологического мониторинга лесов БПТ.

ОРГАНИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО МОНИТОРИНГА

Цифровой мониторинг – это постоянно меняющийся цифровой профиль, содержащий исторические и актуальные данные о физическом объекте или процессе, основанный на большом объёме накопленных данных, полученных в ходе измерений ряда показателей объекта (процесса) реального мира. Анализ накопленных данных позволяет получать точную информацию об объекте или процессе для принятия решений.

Для полного перехода на новый технологический уклад необходимо провести междисциплинарные научные исследования по созданию платформы цифрового (ЦП) мониторинга и анализа лесных ресурсов с использованием сквозных технологий, а также её наполнение содержанием в форме цифровых двойников, математических и компьютерных моделей отдельных процессов и систем в целом, дополненных инструментами сбора, хранения и обработки данных мониторинга, в том числе данных ДЗЗ и наземных сенсорных сетей.

Цифровой экологический мониторинг леса БПТ должен базироваться на:

- внедрении концепции цифровых платформ, сквозных технологий, что связано с активным внедрением цифровизации в современное моделирование, мониторинг и прогнозирование состояния окружающей среды;
- междисциплинарной интегрированности схем и методов участников мониторинга леса, основанной на развитии и внедрении цифровых платформ, инфраструктуры пространственных данных, сервис-ориентированной среды, сквозных технологий, WPS-сервисов (Web Processing Service), больших данных и т.д.;
- создании базовых типов цифровых платформ распределённого экологического мониторинга леса БПТ, позволяющих в квазинепрерывном режиме (24/12/365) автоматизировать регистрацию параметров (в том числе с помощью IoT-датчиков) и онлайн транслировать их в единый архивно-информационный центр или ЦОД, что позволит оперативно получать, передавать и обрабатывать данные;
- создании распределённой (облачной) сети центров (ЦОД) обработки междисциплинарных пространственно-временных данных цифрового мониторинга леса БПТ, что позволит значительно повысить качество прогнозных моделей;
- повышении достоверности пространственно-временных данных мониторинга леса за счёт их множественности (Big Data) и комплексности получения с распределённой сети сенсоров, измерительных приборов, данных ДЗЗ;

- разработке оригинальных математических, информационных моделей и программного обеспечения комплексной обработки большого объема временных вариаций разнотипных параметров мониторинга состояния ресурсного потенциала лесных ресурсов, с выделением значимых связей и трендов, являющихся основой для экспертной оценки и прогнозов;
- организации эффективного использования пространственно-временных тематических данных мониторинга леса БПТ и планирования WPS-сервисов (базовых и тематических) между участниками ЦП;
- создании тематических WPS-сервисов выявления и оценки изменений состояния растительного покрова по временным сериям ДЗЗ под воздействием деструктивных факторов (включая пожары, вырубки, вспышки массового размножения насекомых, техногенные загрязнения, аномальные метеорологические явления);
- формировании информационно-аналитической системы (среды) комплексной оценки, анализа и прогнозирования значимых экологических проблем лесных ресурсов БПТ, использующей информационно-математические методы, современные распределённые сервис-ориентированные и сквозные информационные технологии обработки больших пространственно-временных данных об экологических параметрах лесов БПТ;
- экстраполяции полученных результатов комплексного анализа экологических характеристик лесов БПТ на территории Сибири со схожими ландшафтными условиями;
- информационной доступности результатов научных исследований для управления лесными ресурсами БПТ, прогнозирования основных рисков, связанных с антропогенной нагрузкой на природу, обеспечения безопасности населения.

Одним из преимуществ цифровых платформ мониторинга леса БПТ является возможность взаимодействия и совместного использования услуг, сервисов и данных всеми участниками.

Для проведения мониторинга озера Байкал в ИДСТУ СО РАН разрабатываются эффективные методы и технологии, а также распределенная сервис-ориентированная информационно-аналитическая среда (ИАС) геопортального типа, включающая подсистемы сбора, передачи, хранения, поиска и обработки больших объемов разноформатных пространственно-временных данных и знаний.

Для организации комплексного мониторинга экологических систем озера Байкал сервисы тематического экологического мониторинга интегрируются с помощью логических конструкций для решения задач обработки данных, управления потоком выполнения и т.д. Разнообразие коллекций разрабатываемых сервисов тематического экологического мониторинга позволит передавать данные между ними, согласовывать форматы данных, запускать асинхронные вычислительные процессы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие сервис-ориентированного подхода и компонент инфраструктуры пространственных данных, центров обработки данных позволяет упростить применение систем моделирования за счет предоставления программного и пользовательского интерфейса, реализации получения данных мониторинга и т.д. Также можно выполнять моделирование и адаптацию моделей к актуальным данным сенсоров в онлайн-режиме. Это позволит получать актуальные результаты моделирования. Реализация такого подхода требует организации инфраструктуры моделирования, взаимодействия с данными сенсоров, создания программных интерфейсов и интерфейсов пользователя, хранения данных моделирования (большие данные) и модификации существующих моделей для соответствия новой концепции.

Цифровизация даёт положительный эффект в области экологического мониторинга уникальных экологических систем Сибири. Это подчёркивает научную и общественную значимость проведения междисциплинарных научных исследований по разработке цифровых платформ с использованием сквозных технологий, математических и компьютерных моделей отдельных процессов и экосистем в целом, дополненных инструментами для сбора и анализа данных мониторинга экосистем, в том числе данных ДЗЗ и данных с наземных сенсорных сетей.

Application of Netatmo personal weather stations data for urban climate research, monitoring and mapping of meteorological conditions and thermal comfort in the Moscow megacity

^{1,2,3,4}Varentsov M.I., ^{1,3}Samsonov T.E., ¹Kargashin P.E., ¹Korosteleva P.A., ¹Varentsov A.I.,
¹Perkhurova A.A., ^{1,4}Konstantinov P.I.

¹Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Faculty of Geography, Moscow, Russia

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

³Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

⁴RUDN University, Smart urban nature laboratory, Moscow, Russia

E-mail: mvar91@gmail.com

This study considers the experience in use of crowdsourced meteorological observations from the network of Netatmo citizen weather stations (CWSs) for urban climate research and for the real-time monitoring of the meteorological conditions and thermal comfort in Moscow megacity. This research topic is motivated by the need for spatially-resolving observational data in urban areas for various scientific and practical applications. Crowdsourcing paradigm is an emerging alternative to the development of expensive urban meteorological networks. The world's biggest network of CWSs, Netatmo (<https://www.netatmo.com/>) counts thousands of CWSs in big European cities. A significant problem in using the CWS data is inability to explicitly control the quality and representativeness of the observations. However, several pioneering studies have already demonstrated effectiveness of statistically-based algorithms to filter out misrepresentative observations (Meier et al., 2017; Napoly et al., 2018), and an opportunity to use the CWS data for urban climate studies (Meier et al., 2017) as well as for improvement of the numerical weather forecasts (Nipen et al., 2020).

In order to access the real-time data from Netatmo network and maintain the retrospective database for Moscow region, we have developed a software for automated downloading the data by sending the regular requests to Netatmo API. We have experimentally analyzed the instrumental biases of the Netatmo CWS as well as uncertainties, induced by the different ways of their installation by the users, and developed a quality-control algorithm for filtering out the misrepresentative observations (e.g. when the CWS is placed inside the building or is not shaded properly). Observations from more than 1500 CWSs as well as reference observations were used to analyze spatial patterns of the summertime nocturnal UHI. Both types of data showed the UHI covering the whole city and its suburbs, with a tendency of a temperature decrease with the distance from the city center (Varentsov et al., 2020). As a prototype a monitoring application, based on CWS data, we developed a web-service for near-real-time temperature mapping in Moscow, that is based on PostgreSQL database, Node.js and OpenLayers visualization tools. The web-service is available at <http://carto.geogr.msu.ru/mosclim/>. The further development of web-service would include the real-time thermal comfort assessment based on contemporary PET and UTCI biometeorological indices, visualization of the interpolated fields and the interface improvements.

The study was supported by the RFBR and Moscow Government project No. 19-35-70009 mol_a_mos. Work of P.I. Konstantinov was supported by the Russian Science Foundation project No. 19-77-30012.

REFERENCES:

1. Meier F., Fenner D., Grassmann T., Otto M., Scherer D. Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research // *Urban Clim.* 2017. V. 19. P. 170–191.
2. Napoly A., Grassmann T., Meier F., Fenner D. Development and Application of a Statistically-Based Quality Control for Crowdsourced Air Temperature Data // *Front. Earth Sci.* 2018. V. 6. P. 1–16.
3. Nipen T.N., Seierstad I.A., Lussana C., Kristiansen J., Hov Ø. Adopting citizen observations in operational weather prediction // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2020. V. 101. № 1. P. E43–E57
4. Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Shartova N.V., Samsonov T. E., Kargashin P.E., Varentsov A. I., Fenner D., Meier F. Urban heat island of the Moscow megacity: long-term trends, spatial structure and new approaches for monitoring and research based on a crowdsourcing data. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2020 (accepted).

Применение данных персональных метеостанций Netatmo для исследования городского климата, мониторинга и картографирования метеорологических условий и термического комфорта Московском мегаполисе

^{1,2,3,4}Варенцов М.И., ^{1,3}Самсонов Т.Е., ¹Каргашин П.Е., ¹Коростелева П.А., ¹Варенцов А.И.,
¹Перхурова А.А., ^{1,4}Константинов П.И.

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Географический факультет, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

⁴Университет РУДН, Центр смарт технологий устойчивого развития городских экосистем в условиях глобальных изменений, Москва, Россия

E-mail: mvar91@gmail.com

Современные тенденции климатических изменений, урбанизации, а также растущие запросы населения на комфортную и безопасную городскую среду определяют рост актуальности прикладных исследований в области городской метеорологии и климатологии, в том числе – разработки специальных сервисов, информирующих городские службы и население о состоянии окружающей среды.

Климат большого города существенно отличается от окружающих территорий за счет эффекта острова тепла и других микро- и мезоклиматических особенностей (Oke et al., 2017; Климат Москвы..., 2017). Особенности городского климата сказываются на условиях термического комфорта, а в условиях «волн жары» могут приводить к усилению теплового стресса и связанной с ним смертности населения (Gabriel, Endlicher, 2011; Tan et al., 2010). Характерной особенностью городских ландшафтов является ярко выраженная мозаичность, что определяет высокую пространственную изменчивость микроклиматических условий и термического комфорта. Это осложняет организацию внутригородского мониторинга метеорологических условий и получения данных наблюдений, необходимых для фундаментальных исследований городского климата, для верификации численных моделей атмосферы и методов дистанционного зондирования, а также для информирования городских служб и населения. Для получения таких данных в некоторых городах создаются городские метеорологические сети (Muller et al., 2013), однако это требует значительных финансовых и трудовых затрат.

Альтернативой созданию специализированных сетей наблюдений является парадигма краудсорсинга, то есть использования данных, создаваемых любителями и энтузиастами. В эпоху «Интернета вещей», парадигма краудсорсинга включает использование данных, создаваемых подключенными к Интернету устройствами, в том числе так называемыми персональными метеостанциями (Bell et al., 2013; Chapman et al., 2015). Использование наблюдений персональных метеостанций в науке и прикладных задачах осложняется является невозможностью явно контролировать их качество и репрезентативность. Однако, ряд исследований уже продемонстрировали возможность успешного применения статистических алгоритмов контроля качества таких данных (Meier et al., 2017; Napoly et al., 2018) и возможность их использования для изучения городского климата (Meier et al., 2017) и улучшения численных прогнозов погоды (Nipen et al., 2020).

Целью данного исследования является разработка технологии использования данных крупнейшей сети персональных метеостанций Netatmo (<https://www.netatmo.com>) для исследования городского климата и разработки картографического веб-сервиса по мониторингу метеорологического режима и условий термического комфорта на примере Московского мегаполиса. Метеостанции Netatmo – это устройства, позволяющие пользователю получать в специальном приложении на смартфоне текущую информацию о метеорологических условиях «за окном» своего дома (Рис. 1а). По умолчанию, метеостанции Netatmo измеряют температуру, влажность и давление, дополнительно могут быть добавлены датчики ветра и осадков. Метеостанции подключаются к сети Wi-Fi и передают данные на центральный сервер и далее на смартфоны владельцев. При этом допускается получение архивных и текущих данных сети метеостанций с сервера для научных задач через протокол Netatmo Weather API. В настоящее время в крупных европейских городах число метеостанций Netatmo превышает несколько тысяч, что делает их наблюдений бесценным источником информации для исследований в области городской метеорологии. В Москве и Московской области по состоянию на 2020 г. работает более 1500 таких метеостанций.

Для формирования базы данных наблюдений метеостанций Netatmo разработано программное обеспечение, отправляющее регулярные запросы к серверу с помощью метода “getpublicdata” Netatmo API. В ответ на запрос сервер выдает информацию о работающих в данный момент метеостанциях и их текущие показания, которые сохраняются в базу данных. Поступление данных в режиме практически реального времени и позволяет использовать их и для создания прототипа картографического веб-сервиса по мониторингу метеорологического режима и условий комфортности. Архив данных по Московскому региону формируется таким образом с сентября 2019 г. Также использованы данные, накопленные схожим способом для Московского региона коллегами из Технического университета Берлина за несколько предшествующих лет.

Для оценки репрезентативности метеостанций Netatmo на базе Метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова проведен эксперимент по оценке их инструментальных погрешностей (Рис. 1б), а также погрешностей, возникающих при различных способах их установки пользователями. Показано, что при установке метеостанций в идеальных условиях (в психрометрической будке) их инструментальные погрешности малы и соответствуют заявленным производителем значениям, однако при установке в незатененных условиях в дневные часы метеостанции подвержены солнечному нагреву, что приводит к существенному, до 10 °С, завышению наблюдаемой температуры воздуха (Varentsov et al., 2020). Однако при хорошем затенении или же в ночные часы, наблюдения метеостанций Netatmo, даже при их установке на стенах и крыше здания, достаточно хорошо согласуются с эталонными наблюдениями по температуре и влажности.



Рис. 1. Внутренний и наружный модули метеостанции Netatmo и приложение для смартфона, изображение с сайта <https://www.amazon.co.uk/> (а); наружные модули 10 метеостанций Netatmo во время эксперимента по их поверке в психрометрической будке (б).

Для выбраковки нерепрезентативных данных, загружаемых через Netatmo API, разработан много-ступенчатый алгоритм контроля качества, основанный на идеях предшествующих исследований (Meier et al., 2017; Napolý et al., 2018), но при этом опирающийся на использование данных официальной системы мониторинга в Московском регионе (Varentsov et al., 2020). Алгоритм позволяет выбраковать наблюдения метеостанций, установленных в помещении или подверженных перегреву за счёт попадания прямых солнечных лучей. Как правило, около 70 % всех данных оказывается выбракованными, однако оставшиеся 30% (более 300 станций) – все равно очень много по сравнению несколькими десятками пунктов официальных метеорологических наблюдений в московском регионе. Опыт использования данных Netatmo для анализа пространственного распределения температуры в мегаполисе показал, что они адекватно отражают его характерные особенности, включая наличие эффекта острова тепла, выраженный наиболее ярко в центре города, и тенденцию уменьшения температуры по мере отдаления от центра (Varentsov et al., 2020). В настоящее время ведется работа по анализу вклада различных факторов, определяющих пространственную структуру острова тепла Москвы, по данным метеостанций Netatmo и официальных систем метеорологического мониторинга.

Для демонстрации возможностей применения данных сети Netatmo в прикладных задачах, включая задачи мониторинга, нами разработан прототип веб-приложения по картографированию температуры воздуха в Московском регионе в режиме, близком к реальному времени. Приложение объединяет программное обеспечение для автоматизированного сбора наблюдений Netatmo и официальных данных Росгидромета (последние загружаются из открытых источников в Интернете), базу данных PostgreSQL; инструменты предварительной обработки данных, включая модуль контроля качества наблюдений Netatmo; инструменты визуализации на базе Node.js и OpenLayers и элементы пользовательского интерфейса. Текущая версия веб-приложения доступна в Интернете по адресу <http://carto.geogr.msu.ru/mosclim/>.

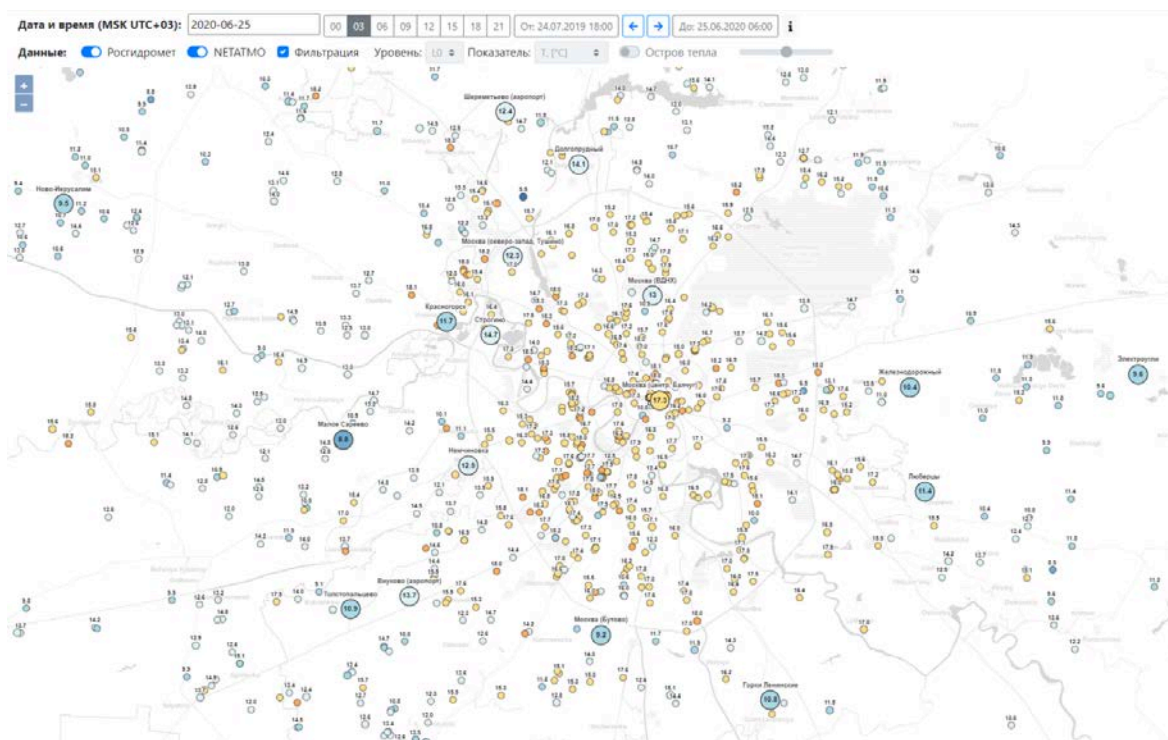


Рис. 2. Пример работы разработанного картографического веб-приложения для срока 3:00 25 июня 2020 г., 3 ч. Крупные пунсоны показывают значения температуры воздуха по данным метеостанций Росгидромета, маленькие – по данным персональных метеостанций Netatmo.

В настоящее время веб-приложение позволяет визуализировать значения температуры воздуха в различных районах города по данным метеостанций Netatmo и Росгидромета с задержкой в 1-3 часа относительно реального времени (задержка обусловлена ограничениями по получению данных наблюдений на метеостанциях Росгидромета из открытых источников). На Рис. 2 показаны примеры работы веб-приложения для случая с ярко выраженным эффектом острова тепла Московского мегаполиса ночью 25 июня 2020 г. В дальнейшем планируется расширение возможностей веб-приложения, а именно интегрировать в него модуль онлайн-расчета показателей термического комфорта, основанный на использовании современных биометеорологических индексов PET и UTCI и диагностической модели RayMan (Perkhurova et al., 2019), реализовать визуализацию метеорологических величин в виде интерполированных полей, усовершенствовать алгоритмы контроля качества данных.

Исследование выполнено при поддержке проекта РФФИ и Правительства Москвы № 19-35-70009 мол_а_мос. Работа П.И. Константинова поддержана проектом РНФ № 19-77-30012.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Bell S., Cornford D., Bastin L. The state of automated amateur weather observations // *Weather*. 2013. V. 68. № 2. P. 36–41.
2. Chapman L., Muller C.L., Young D.T., Warren E.L., Grimmond C.S.B., Cai X.M., Ferranti E.J.S. The birmingham urban climate laboratory: An open meteorological test bed and challenges of the Smart city // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2015. V. 96. № 9. P. 1545–1560.
3. Gabriel K.M.A., Endlicher W.R. Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany // *Environ. Pollut.* 2011. V. 159. № 8–9. P. 2044–2050.
4. Meier F., Fenner D., Grassmann T., Otto M., Scherer D. Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research // *Urban Clim.* 2017. V. 19. P. 170–191.
5. Muller C.L., Chapman L., Grimmond C.S.B., Young D.T., Cai X. Sensors and the city: A review of urban meteorological networks // *Int. J. Climatol.* 2013. V. 33. № 7. P. 1585–1600.
6. Napoly A., Grassmann T., Meier F., Fenner D. Development and Application of a Statistically-Based Quality Control for Crowdsourced Air Temperature Data // *Front. Earth Sci.* 2018. V. 6. P. 1–16.
7. Nipen T.N., Seierstad I.A., Lussana C., Kristiansen J., Hov Ø. Adopting citizen observations in operational weather prediction // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2020. V. 101. № 1. P. E43–E57.
8. Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. *Urban climates*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 509 pp.

9. Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Shartova N.V., Samsonov T. E., Kargashin P.E., Varentsov A. I., Fenner D, Meier F. Urban heat island of the Moscow megacity: long-term trends, spatial structure and new approaches for monitoring and research based on a crowdsourcing data. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2020 (принято к печати).
10. Perkhurova A.A., Konstantinov P.I., Varentsov M.I., Shartova N.I., Samsonov T.E., Krainov V.N. Real-time microscale modeling of thermal comfort conditions in Moscow region // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019. V. 386. P. 12046.
11. Tan J., Zheng Y., Tang X., Guo C., Li L., Song G., Zhen X., Yuan D., Kalkstein A.J., Li F., Chen H. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai // Int. J. Biometeorol. 2010. V. 54. № 1. P. 75–84.
12. Климат Москвы в условиях глобального потепления / под ред. А.В. Кислов. Москва: Издательство Московского университета, 2017. 288 с.

The structure and content of the GIS 'Hydrological and environmental safety of the Selenga River basin'

¹Garmaev E.Zh., ²Pyankov S.V., ¹Tsydypov B.Z., ²Shikhov A.N., ¹Ayurzhanayev A.A.,
¹Sodnomov B.V., ²Abdullin R.K.

¹The Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia

²Perm State University, Perm, Russia

E-mail: bz61@binm.ru, gis@psu.ru

Global climate change has substantially affected hydrological processes in the Baikal Lake basin (Frolova et al., 2017). The runoff of Selenga river is the key factor for the stability of the Baikal ecosystem, since it gives up to 50 % of water runoff and more than 50 % of chemical runoff to the lake. An important feature of the Selenga river basin is its transboundary position, since two thirds of the basin area is located in Mongolia. In the Mongolian part of the basin, it is planned to build a hydropower stations on the large tributaries of the Selenga river, which can have a strong impact on the water inflow into Baikal lake (Frolova et al., 2017; Garmaev et al., 2019).

The extremely long-term low-flow period was observed in the Selenga river basin from 1996 to 2018, which led to a decrease of the water level in Baikal lake (Frolova et al., 2017). However, in 2018-2019 the average annual rainfall has increased substantially. Due to possible cyclic change in the precipitation regime, the frequency of floods, flood-related erosion and landslide processes can increase. Nowadays, more than 100 settlements, including the city of Ulan-Ude, as well as 236.3 thousand hectares of agricultural land are under the threat of flooding in the Selenga river basin. The area of the city of Ulan-Ude is characterized by highest flood risk in the Baikal region according to (Kichigina, 2018).

Due to the existing complex of hydrological and environmental problems, there is a need for scientific justification for ensuring hydrological and environmental safety in the Selenga river basin. The development of the web-GIS and publication of long-term hydrological and environmental observations in user-friendly interface may substantially improve the information support both scientific research and evidence-based decision making in this area. So, the main purpose of the web-GIS development is the integration, display and analyze of the data. GIS will be organized as a web-based mapping application, accessible to a wide range of Internet users.

The structure of the online web map service will include three main thematic sections. They provides the data and maps of the climatic and hydrological regimes of the territory, hazardous hydrological events as well as the damaging impact of surface water on landscapes, settlements and infrastructure within the basin.

The first section of the GIS will include the maps and data on various average and extreme climatic characteristics estimated on the basis of weather stations network, as well as the WorldClim 2.0 dataset. Maps of various climatic extremes indices proposed by (Donat et al., 2013) and their long-term dynamics will also be created. The second section will present the maps of long-term hydrological characteristics based on data from hydrological gauges. The third section will include the database of hazardous hydrological events developed with the use of the innovative structure (Napolitano et al., 2018). Also it will contain the areas affected by hazardous geomorphological processes (landslides, mudflows and river coasts collapse) and the flooding zones in settlements estimated with HEC-RAS software tool and high-resolution topographic maps. In addition, the results of hydrological risk assessment will be included in the GIS database.

The study was funded by the Russian Scientific Foundation, project number 20-17-00207

REFERENCES:

1. Donat M.G., Alexander L.V., Yang H., Durre I., Vose R. and Caesar J. *Global Land-Based Datasets for Monitoring Climatic Extremes*, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2013. V. 94, P. 997–1006.
2. Fick S.E., Hijmans R.J. *WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas* // *International Journal of Climatology*. 2017. V. 37. P. 4302–4315.
3. Frolova N.L., Belyakova P.A., Grigor'ev V.Yu., Sazonov A.A. and Zotov L.V. *Many-year variations of river runoff in the Selenga basin* // *Water Resources*, 2017, V. 44, P. 359–371.

Структура и информационное наполнение ГИС «Гидроэкологическая безопасность бассейна р. Селенги»

¹Гармаев Е.Ж., ²Пьянков С.В., ¹Цыдыпов Б.З., ²Шихов А.Н., ¹Аюржанаев А.А.,
¹Содномов Б.В., ²Абдуллин Р.К.

¹Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

E-mail: bz61@binm.ru, gis@psu.ru

Глобальное изменение климата, проявившееся с начала 1970-х гг., заметно повлияло на гидрологические процессы в бассейне крупнейшего озера планеты – Байкала, в том числе и на сток рек (Фролова и др., 2017). Ключевым фактором устойчивости экосистемы Байкала является режим р. Селенги, несущей до 50 % водного и более 50 % химического стока в озеро (Гармаев, Христофоров, 2010). Также особенностью бассейна р. Селенги является его трансграничное положение относительно природных и политико-административных рубежей. Так, две трети площади бассейна р. Селенги находится на территории Монголии. В этом сопредельном государстве в настоящее время идет интенсивное развитие экономики – увеличиваются поголовье скота и площади посевных земель, разрабатываются месторождения полезных ископаемых, а также планируется строительство ГЭС на крупных притоках Селенги, что может оказать существенное влияние на сток (Фролова и др., 2017; Гармаев и др., 2019).

Период с 1996 по 2018 гг. в бассейне р. Селенги отличался продолжительным маловодьем, которое привело к значительному снижению уровня воды в Байкале (Хажеева, Плюснин, 2016; Фролова и др., 2017). Однако в 2018-2019 гг. среднегодовое количество осадков существенно возросло, что может быть признаком смены климатических фаз. При возможной смене режима увлажнения увеличивается водность и сток рек, возможен рост частоты наводнений и связанных с ними эрозионных и оползневых процессов. Так, под угрозой наводнений в бассейне р. Селенги находятся свыше 100 населенных пунктов, в том числе г. Улан-Удэ, а также 236.3 тыс. га сельскохозяйственных угодий (Борисова, 2010; Kichigina, 2018). Район г. Улан-Удэ отнесен к областям максимальной опасности наводнений в Байкальском регионе (Kichigina, 2018).

Таким образом, возникает необходимость в научном обосновании обеспечения гидроэкологической безопасности на территории бассейна р. Селенги. Одним из инструментов, способных помочь в решении указанной научной задачи являются ГИС-технологии. В рамках данной работы планируется создание проблемно-ориентированной ГИС для обеспечения гидроэкологической безопасности бассейна р. Селенги, основным назначением которой будет интеграция, отображение и возможность анализа данных. ГИС будет организована в виде картографического веб-приложения, доступного широкому кругу пользователей в сети Интернет.

В структуре ГИС будет выделено три основных тематических раздела. Они характеризуют климатический и гидрологический режимы территории, опасные гидрологические явления, а также негативное воздействие поверхностных вод на ландшафты, населенные пункты и антропогенную инфраструктуру в пределах бассейна. Ниже представлена более подробная характеристика информационного наполнения указанных разделов.

В первом разделе ГИС представлен широкий спектр карт режимных и экстремальных климатических характеристик территории, полученных из разных источников. Основным источником информации для наполнения данного раздела послужили многолетние климатические данные по метеостанциям Росгидромета, полученные из открытого ресурса ВНИИГМИ-МЦД (<http://aisori.meteo.ru/ClimateR>) за период с 1966 г. по н.в., а так же открытые данные по метеостанциям России за период с 2011 г. (<http://pogodaiklimat.ru/archive.php>). На их основе созданы карты, характеризующие термический режим (карты среднегодовой температуры воздуха, средней температуры воздуха по месяцам, а также средней минимальной и максимальной температуры воздуха в январе и июле соответственно). По этим же данным построены карты характеристик осадков (годовая сумма и суммы теплого и холодного пери-

одов) и снежного покрова (продолжительность залегания, средние многолетние сроки установления и схода, годовая норма высоты снежного покрова и максимального снегозапаса).

Вторым источником для создания карт режимных климатических характеристик являются данные проекта WorldClim 2.0 (Fick and Hijmans, 2017), которые представляют собой поля пространственного распределения ряда климатических переменных за 1971-2000 гг. с шагом сетки до 1 км. На основе данных WorldClim 2.0 построены карты характеристик солнечной радиации (средней многолетней суммы и суммы по сезонам года), влажности воздуха (относительной и абсолютной за год и по месяцам), ветрового режима (среднегодовая скорость ветра и средняя скорость ветра по месяцам). Помимо этого, получены данные о некоторых характеристиках, определяющих развитие растительности в бассейне, а именно: сумме активных температур, среднегодовой суточной амплитуде температуры и продолжительности вегетационного периода.

Карты экстремумов температуры и осадков будут построены в соответствии с индексами, предложенными в работе (Alexander et al., 2006). Климатические экстремумы по метеостанциям, рассчитанные за период 1966-1995 гг. доступны из набора данных Global Historical Climatology Network Daily Dataset (Donat et al. 2013) и актуализированы по данным метеостанций. В частности, построены карты таких характеристик, как максимумы и минимумы температуры воздуха 1 % повторяемости, среднегодовой максимум суммы осадков за 1 и за 5 суток, среднегодовое число дней с осадками не менее 20 мм, среднегодовое число дней с осадками 1 % повторяемости, среднегодовое число дней без осадков. Эти характеристики имеют непосредственное отношение к пространственному распределению риска наводнений и засух. Для их картографирования использована методика, ранее реализованная для территории Урала (Shikhov et al., 2020)

Второй раздел ГИС посвящен характеристикам гидрологического режима. Для информационного наполнения указанного раздела использованы данные измерений уровня воды и величины стока на гидрологических постах, расположенных в пределах водосбора р. Селенги. Стандартные гидрологические характеристики включают режимные характеристики уровней и расходов воды (средние многолетние значения, максимумы и минимумы за период открытого русла, уровни воды при ледоходе и ледоставе, а также соответствующие даты). Характеристики стока включают среднегодовой модуль стока, норму максимального стока весеннего половодья, летне-осеннего и зимнего периодов, а также абсолютные максимумы и минимумы. Для перечисленных параметров рассчитаны коэффициенты вариации (Cv) и асимметрии (Cs), а также их отношение. Для годового стока построено также распределение параметра q_{cp} (норма модуля стока, приведенная к определенной высоте) и параметра q_0 (норма модуля максимального стока, приведенного к площади 1000 км² и средней для рассматриваемых водосборов высоте 1300 м).

Основой третьего раздела ГИС будет база данных опасных гидрологических явлений (ОГЯ) в бассейне р. Селенги, а также дополнительные слои, характеризующие места возникновения опасных геолого-геоморфологических процессов. База данных ОГЯ будет создана на основе структуры, предложенной в работе (Napolitano et al., 2018). Данная структура включает три уровня описания ОГЯ:

- Point report – точечное событие, т.е. достижение неблагоприятного или опасного уровня воды на гидропосту или в конкретном населенном пункте, либо затопление/разрушение объекта инфраструктуры.
- Event – группа точечных наблюдений, связанных пространственно (например, расположенных вдоль одной реки), и зафиксированных в одно и то же время.
- Driver – метеорологическое явление, с которым были связаны ОГЯ, например выпадение сильных осадков на одной или нескольких метеостанциях.

В целом такая структура базы данных позволяет оптимальным образом представить разнородную информацию, опыт создания подобных баз данных для крупных речных бассейнов в России отсутствует.

Источниками для наполнения базы данных являются многолетние ряды наблюдений на гидропостах и метеостанциях, международные базы данных о наводнениях, например (Dartmouth Flood Observatory, 1985–2017) и ранее опубликованные работы по исследуемому региону (Kichigina, 2018), а также фондовые материалы, сообщения очевидцев и СМИ, подтвержденные фотографиями и видеозаписями явлений. Дополнительные слои включают данные о местах проявления опасных геоморфологических процессов, вызванных воздействием вод, в частности селевых потоков и обрушения берегов. Также, в базе данных будут представлены результаты моделирования и картографирования зон затопления в населенных пунктах при прохождении весеннего половодья и летне-осенних паводков 1, 3 и 5% обеспеченности, в том числе заторно-зажорного характера.

Помимо этого в ГИС будут включены слои оценки риска от опасных гидрологических явлений, которые будут созданы на основе одной из методик описанных в работе (Liuzzo et al., 2019). Оценка риска будет выполнена покомпонентно, т.е. с определением физического риска, социального риска, риска для сельского хозяйства как отрасли экономики, наиболее подверженной негативному воздействию от наводнений. Также будет определен интегральный риск, учитывающий такие характеристики как повторяемость, интенсивность, площадь затопления и реципиенты риска, расположенные в зонах затопления.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 20-17-00207.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Борисова Т.А. Геоэкологическая оценка природно-антропогенного риска в бассейне р. Селенга. Автореф. дисс. канд. геогр. наук. Улан-Удэ, 2010. 23 с.
2. Гармаев Е.Ж., Болгов М.В., Аюржанаев А.А., Цыдыпов Б.З. Водные ресурсы Монголии и их современное состояние // Метеорология и гидрология. 2019. № 10. С. 40–49.
3. Гармаев Е.Ж., Христофоров А.В. Водные ресурсы рек бассейна озера Байкал: основы их использования и охраны. Новосибирск: ГЕО, 2010. 227 с.
4. Фролова Н.Л., Белякова П.А., Григорьев В.Ю., Сазонов А.А., Зотов Л.В. Многолетние колебания стока рек в бассейне Селенги // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 3. С. 243–255.
5. Хажеева З.И., Плюснин А.М. Изменение климатических и гидрологических характеристик в бассейне р. Селенга в пределах Российской Федерации // Метеорология и гидрология, 2016. № 9. С. 69–78.
6. Alexander L., Zhang X., Peterson T., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M. and Vazquez-Aguirre J. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation // Journal of Geophysical Research, 2006, 111, D05109.
7. Dartmouth Flood Observatory, 1985–2017. Global Register of Large Flood Events. Dartmouth College, Department of Geography (Hanover, USA) [Электронный ресурс]. <http://floodobservatory.colorado.edu/Archives/index.html> (дата обращения 29.06.2020).
8. Donat M.G., Alexander L.V., Yang H., Durrie I., Vose R. and Caesar J. Global Land-Based Datasets for Monitoring Climatic Extremes, Bull. Amer. Meteor. Soc. 2013. V. 94, P. 997–1006.
9. Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. 2017. Vol. 37. PP. 4302–4315. DOI: 10.1002/joc.5086.
10. Kichigina, N.V. Flood Hazard on the Rivers of the Baikal Region // Geography and Natural Resources, 2018. Vol. 39 (2), P. 120–129.
11. Napolitano, E., Marchesini, I., Salvati, P., Donnini, M., Bianchi, C., Guzzetti, F. LAND-deFeND – An innovative database structure for landslides and floods and their consequences // Journal of Environmental Management, 2018. V. 207, P. 203–218.
12. Shikhov A.N., Abdullin R.K., Tarasov A.V. Mapping temperature and precipitation extremes under changing climate (on the example of The Ural region, Russia). Geography, Environment, Sustainability, V.13 (2), P. 154–165.

Aircraft Icing Nowcasting Technique

^{1,2}Mordus D.P., ¹Zuev V.V., ¹Pavlinkii A.V.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

²West Siberian Branch FSBI «Aviamettelecom Roshydromet», Novosibirsk, Russia

E-mail: dariymordus@gmail.com, vzuev@list.ru, wf@inbox.ru

Flight safety depends on a number of meteorological factors, including icing. The forecast of aircraft icing implies only taking into account the meteorological conditions, therefore, “icing possibility” is forecasted. The next step in forecasting technique is a transition to the technology for predicting the current state of the weather — the nowcasting. This technology, in turn, requires continuous input measurement data with a minimum time step. These requirements can be met using atmosphere remote sensing.

A new methodology for detecting possible aircraft icing areas is based on remote measurement of the air temperature profile in the lower kilometer layer and the total vapor content of the atmosphere. The total vapor content was measured using the RMS-1 radiometric system. The data series of air temperature profiles and total vapor content of the atmosphere in the area of St. Petersburg airport (Pulkovo) were analyzed for the period from November 2018 to March 2020. This allowed determining the distribution patterns for temperature and total vapor content, typical for the moment of icing occurrence.

Based on the data obtained, the ranges of air temperature and total vapor content for icing forecasting were determined as follows:

The air temperature:

$-13\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq +2\text{ }^{\circ}\text{C}$

The total moisture content:

$0.4\text{ g/cm}^3 \leq Q \leq 1.15\text{ g/cm}^3$.

Icing is considered possible for the areas where these inequalities are satisfied, which is the basis of the proposed methodology for predicting possible aircraft icing areas. Its accuracy can be increased using the data on the cloud ceiling height if available.

Методика сверхкраткосрочного прогноза обледенения воздушных судов

^{1,2}Мордус Д.П., ¹Зуев В.В., ¹Павлинский А.В.

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Западно-Сибирский филиал ФГБУ «Авиаметтеком Росгидромета», Новосибирск, Россия

E-mail: dariymordus@gmail.com, vzuev@list.ru, wf@inbox.ru

Безопасность полетов воздушных судов (ВС) зависят от ряда метеорологических факторов в том числе и от обледенения. Обледенение самолетов в полете – всемирно признанная проблема безопасности. Несмотря на наличие противообледенительных средств, летные происшествия, обусловленные обледенением, имеют место [1].

К настоящему времени накоплено множество работ по изучению физики образования обледенения, на основе которых разработаны методы прогноза и борьбы с данным явлением [2-5]. Однако прогноз обледенения ВС подразумевает лишь учет метеорологических условий, поэтому прогнозируется «возможное» обледенение ВС. Практически значимыми являются прогнозы, полученные на основе численных моделей, точность которых значительно повысилась, а результаты используются для построения прогностических карт особых явлений погоды [6]. Период действия данных прогнозов составляет от 6 до 12 часов, при этом временные масштабы изменения метеорологических условий, приводящих к обледенению, часто составляют минуты или десятки минут. Поэтому для прогнозирования обледенения ВС необходим переход к технологии прогноза текущего состояния погоды - наукастинга. Данная технология, в свою очередь, требует непрерывных измерений входных данных с минимальным временным шагом. Таким требованиям отвечает дистанционное зондирование атмосферы [7].

Одним из примеров методики наукастинга является прогнозирование зон возможного обледенения с использованием температурного профилера МТР-5 [8]. В ней используются данные о профиле температуры воздуха в нижнем километровом слое и производится восстановление профиля влажности, а по модели Шульца-Политович и формуле Годске прогнозируются зоны возможного обледенения, однако точность такого прогноза недостаточна. Предлагается новая методика прогноза возможных зон обледенения ВС, основанная на дистанционном измерении профиля температуры воздуха в нижнем километровом слое и общего влагосодержания атмосферы. Для измерений общего влагосодержания используется радиометрическая система РМС-1 [9].

В работе анализируются данные измерений температуры воздуха в нижнем километровом слое атмосферы и общего влагосодержания в районе аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) за период с ноября 2018 г. по март 2020 г. На их основе были выявлены закономерности в распределении температуры и влагосодержания, характерные для момента возникновения обледенения ВС. Далее были определены критерии прогнозирования обледенения.

Так, наибольшее количество случаев обледенения зафиксировано в температурном диапазоне от 0 до -10°C (рис. 1). При температуре ниже -10°C вероятность обледенения уменьшается, однако отмече-

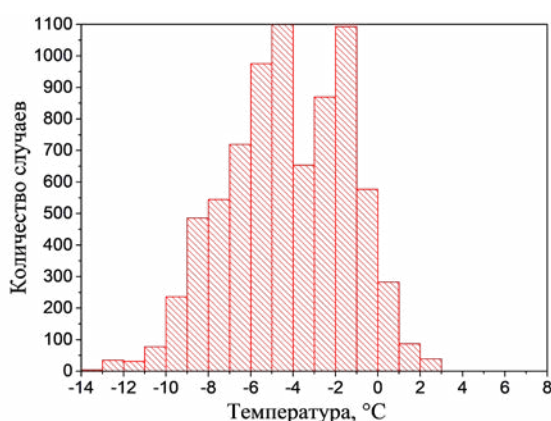


Рис. 1. Распределение температур на момент начала обледенения на высотах от 0 до 1 км в районе аэродрома Пулково.

ны единичные случаи обледенения при температуре до -14°C . Случаи обледенения ВС наблюдались и при положительных температурах, до $+2 - +3^{\circ}\text{C}$. Такое обледенение происходит в результате адиабатического расширения воздуха, обтекающего поверхность летательного аппарата. При расширении происходит охлаждение потока до температуры ниже нуля, из-за чего при наличии достаточного количества влаги становится возможным отложение льда на обтекаемой поверхности [10].

Общее влагосодержание (Q) в районе аэродрома Санкт-Петербурга (Пулково) в период наблюдений изменялось от 0.15 до 5.5 г/см^2 . Для случаев обледенения ВС (на момент начала обледенения) общее влагосодержание составляло от 0.31 до 3.59 г/м^2 (Рис.2) Распределение величин влагосодержания (зеленая линия) близко к нормальному с максимумом при $Q=0.9 \text{ г/см}^2$. Плотность вероятности при этой величине влагосодержания составляет около 89% (синяя линия). Основная часть случаев обледенения наблюдается при общем влагосодержании от 0.4 до 1.2 г/см^2 с выраженным наибольшим количеством случаев при $Q=0.6 - 1 \text{ г/см}^2$ (75% случаев). Поэтому за нижний предел влагосодержания можно считать значение равное 0.4 г/см^2 , что также характерно и для района аэродрома Томска. При больших значениях Q вероятность обледенения снижается. Зарегистрировано только три случая обледенения при влагосодержании более 2 г/см^2 .

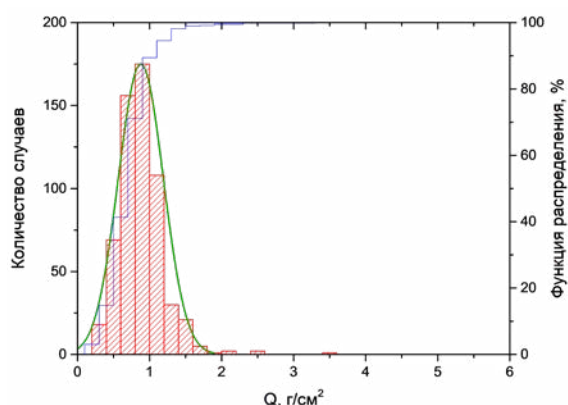


Рис. 2. Распределение общего влагосодержания атмосферы (Q) на момент начала обледенения.

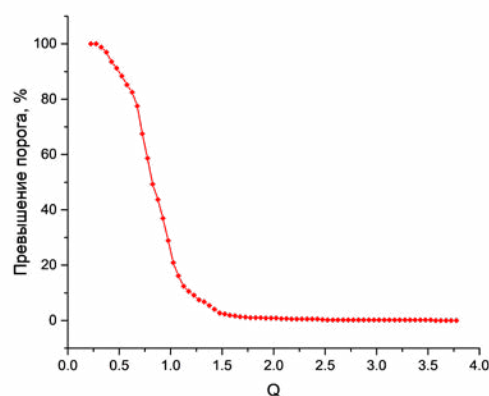


Рис. 3. Количество случаев общего влагосодержания выше заданных порогов.

Для определения верхнего порога влагосодержания построен график процентного отношения количества случаев обледенения, при которых влагосодержание превышало заданный порог (рис. 3). За верхний предел влагосодержания при обледенении принято значение $Q=1.15$ в точке перегиба графика. Количество оставшихся случаев обледенения при больших значениях Q составило менее 10%.

Исходя из полученных данных, диапазоны температуры воздуха и общего влагосодержания, при которых имеется вероятность обледенения, можно определить как:

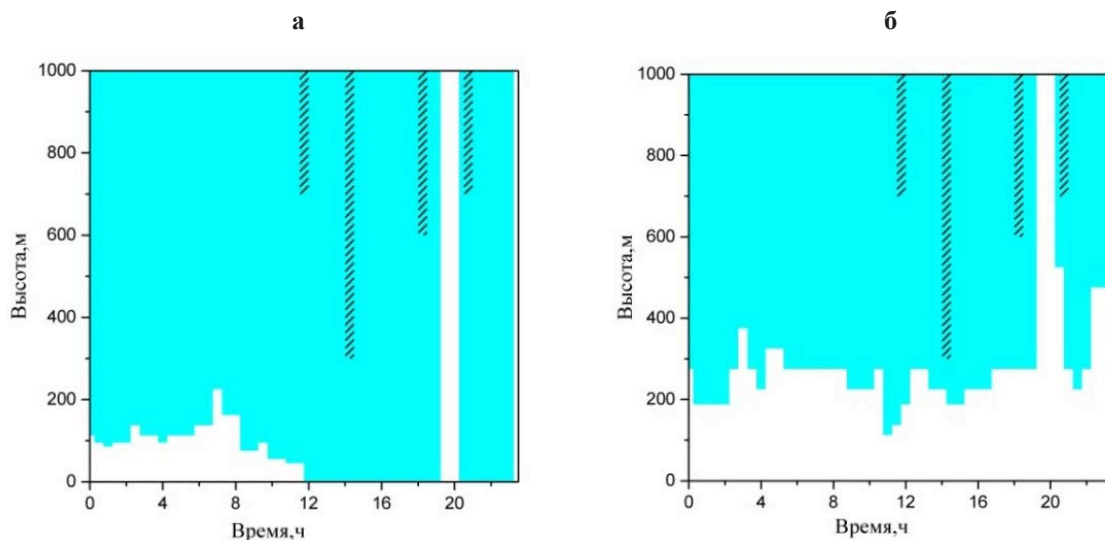


Рис. 4. Результаты расчета вертикальных зон возможного обледенения ВС для Международного аэропорта Санкт-Петербурга на 20 февраля 2019 г.

температура воздуха:
 $-13^{\circ}\text{C} \leq T \leq +2^{\circ}\text{C}$
 общее влагосодержание:
 $0.4 \text{ г/см}^3 \leq Q \leq 1.15 \text{ г/см}^3$.

Зонами возможного обледенения считаются области, где выполняются данные неравенства, что и положено в основу предложенной методики прогноза возможных зон обледенения ВС. При наличии данных о высоте нижней границы облачности (ВНГО), точность определения зон возможного обледенения повышается.

На рис.4 представлены примеры результатов расчета зон обледенения ВС по данной методики для Международного аэропорта Санкт-Петербурга на 20 февраля 2019 г. без учета ВНГО (рис.4а) и с учетом ВНГО (рис.4б). Голубой цвет соответствует пространственным зонам возможного обледенения ВС, а белый цвет – зонам, в которых метеорологические условия не способствуют обледенению. Черными штриховыми линиями обозначены зоны фактического обледенения, информация о котором поступала с бортов самолетов в течение рассмотренного периода времени.

По данным бортовых наблюдений экипажами ВС, в районе аэродрома Пулково умеренное обледенение наблюдалось в разные периоды времени, как в нижнем километровом слое атмосферы, так и выше.

Из расчета вертикальных зон возможного обледенения ВС на основе измерений профиля температуры и общего влагосодержания (рис.4а), видно, что обледенение прогнозировалось в течение дня во всем нижнем километровом слое, но фактически подтвердилось лишь в некоторых случаях. Использование же данных о ВНГО дает более точный результат, при этом в значительной степени сокращается зона «перестраховочного» прогноза (рис.4б).

Таким образом, применение новых критериев по температуре и общему влагосодержанию воздуха позволяет более точно определить вероятность обледенения ВС в районе наблюдений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-80051.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Shakina N.P., Ivanova A.R., Skriptunova E.N., Gorlach I.A. Boeing 737-800 crash: Weather conditions in Rostov-on-Don on March 19 // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016. T. 41. № 7. P. 513–517.
2. Трунов, О.К. Безопасность взлета в условиях обледенения. Сведения, правила, рекомендации для летного и наземного персонала гражданской авиации. М.: АФЕС. 1995. 70 с.
3. McDonough F., Politovich M.K., Brown B.G., Ratvasky T.P., Miller D.R., Wolff C.A., Cuning G. Current icing potential: algorithm description and comparison with aircraft observations // *J. Appl. Meteorol.* 2005. V. 44. P. 969–986.
4. Скриптунова Е. Н., Иванова А. Р., Горлач И. А. О результатах испытания метода прогноза зон возможного обледенения воздушных судов // *Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*. М.: Гидрометцентр России. 2010. № 37. С. 142–153.
5. De Laat J., Meirink J.F., Defer E. An operational geostationary satellite data product for detection High Ice Water Content (HIWC) // *Proceedings of the WMO Aeronautical Meteorology Scientific Conference*. 2017. P. 1–35.
6. Иванова А. Р., Шакина Н. П. Перспективы развития наукастинга для обеспечения авиации в рамках реализации глобального аэронавигационного плана (ГАНП) // *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2016. № 360. С. 113–134.
7. Pierce C., Seed A., Ballard S., Simonin D., Zhihong Li. Nowcasting // *Doppler radar observations – weather radar, wind profiler, ionospheric radar and other advanced applications*. InTech. 2012. P. 97–142.
8. Дистанционный способ определения пространственных зон вероятного обледенения воздушных судов в режиме реального времени: Пат. 2580375 / В.В. Зуев, Д.П. Нахтигалова, А.П. Шелехов, Е.А. Шелехова. ИМКЭС СО РАН. Заявл. 30.12.2014. Опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10.
9. Ильин Г.Н., Троицкий А.В. Определение тропосферной задержки радиосигнала радиометрическим методом // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 2017. т. 60. № 4. С. 326–335.
10. Демидов А.И., Шишелова Т.И. Проблема обледенения летательных аппаратов и применяемые методы борьбы с ней // *Международный журнал экспериментального образования*. 2014. № 8-2. С. 88–89.

Local climate zoning and urban heat island in Nur-Sultan

¹Berlessova A., ^{1,2}Konstantinov P.

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

²RUDN University, Laboratory of smart technologies for sustainable development of urban environment under global changes, Moscow, Russia

E-mail: aleka_05_02@mail.ru, kostadini@mail.ru

Nowadays under the conditions of modern development, an increase of population leads to a significant increase in urban settlements with their own characteristics, which in turn have a significant impact on the formation of special microclimatic conditions within cities [1].

The purpose of this work is to determine the connection between the phenomenon of the urban heat island and the conditions of thermal comfort with a change in urban built types in the city of Nur-Sultan. Within the confines of this work the methodological side of the study consisted of three parts. The first one was devoted to local climate zoning of Nur-Sultan using the WUDAPT method (The World Urban Database and Access Portal Tools), which involves dividing the city into local climate zones, that mean the areas with homogeneous properties of the underlying surface and depend on density and height. The second part of the methodology was devoted to determining the intensity of the urban heat island, and the third to the calculation of thermal comfort. Landsat multitemporal images served as initial data for zoning.

The relevance of research. By carrying out local climate zoning, there were obtained data on the areas of each zone and their relationship with changes in microclimatic conditions. In the future, the results can be used as a starting point for regulating the layout of the city in order to stabilize the inner-city temperature and other meteorological parameters, which affect on thermal comfort. To calculate the intensity of the urban heat island one central weather station was selected. The use of data from one meteorological station is acceptable, because according to the observations of the World Meteorological Organization (WMO) and also according to research of Tim Oke, who developed the classification of local climate zones, temperature differences in the city are smoothed out. Despite the fact that urbanization leads to a change in all components of the radiation balance, its overall change is negligible. In this way, there was constructed a curve of the average annual intensity of the urban heat island, on the basis of which it was revealed that the city is really warmer than a less built-up background territory.

As a result of zoning, maps of local climate zones for 2006, 2011, 2016 and 2019 were obtained. Then, the percentage ratio of the areas of each local climate zone was calculated, and it was revealed that by 2019 the share of low-rise buildings had decreased and the proportion of dense middle and high-rise buildings had increased.

The third part of the work was devoted to modeling the conditions of thermal comfort, namely, modeling of the PET and UTCI indices.

The research revealed an increase in the effect of the heat island and, therefore, an increase in thermal discomfort in Nur-Sultan. It can be explained by an increase in the share of high-rise and dense buildings obtained by local climate zoning.

Локальное климатическое районирование и городской остров тепла г. Нур-Султан

¹Берлесова А.А., ^{1,2}Константинов П.И.

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова Географический факультет, Москва, Россия

²Научный центр «Смарт технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений» РУДН, Москва, Россия

E-mail: aleka_05_02@mail.ru, kostadini@mail.ru

В связи с увеличением численности населения возникает необходимость территориального расширения городов, большинство из которых обустраивается со значительно высокой скоростью, что может приводить к резким изменениям микроклиматических условий в пределах городов. Особое внимание при рассмотрении изменения микроклимата стоит уделить структуре и планировке застройки. На сегодняшний день наиболее актуальной задачей является принятие разумных проектных решений в области структуры застройки, которая по возможности не должна нарушать естественный ход процессов в окружающей среде.

Целью данной работы является выявление связи явления острова тепла и условий термического комфорта с изменением городской застройки в городе Нур-Султан.

Одной из характеристик микроклиматических условий является городской остров тепла. Это – площадь во внутренней части большого города, характеризующаяся повышенными по сравнению с периферией температурами воздуха.

В ходе исследований явления острова тепла многие ученые обратили внимание на возможность воздействия городской среды на комфортность проживания в нем жителей города. Термический комфорт – те условия окружающей среды, которые обеспечивают оптимальное функционирование организма без напряжения терморегуляторного аппарата. В рамках данной работы рассматривались 2 биоклиматических индекса комфорта: тепловой индекс PET и холодовой индекс UTCI. Оба индекса учитывают всю совокупность метеорологических параметров, физиологические особенности человека, а также изоляционную способность одежды.

Локальное климатическое районирование подразумевает разделение территории города на «локальные климатические зоны» – это микроклиматический тип застройки, обозначающий территорию, обладающую однородными свойствами подстилающей поверхности над которой формируется уникальная температура воздуха, и зависящая от плотности и высоты застройки.

Согласно классификации локальных климатических зон, выделяют 16 типов зон, условно поделенных на антропогенные и природные ландшафты. Считается, что основной вклад в изменение микроклимата в городе вносит плотный высотный и плотный среднеэтажный тип застройки, т.е. ЛКЗ-1 и ЛКЗ-2.

В рамках данной работы методическая часть исследования состояла из трех частей, первая посвящена локальному климатическому районированию, вторая – определению интенсивности острова тепла, а третья – расчету термического комфорта.

Для создания локальных климатических зон в данной работе была использована методика, разработанная в рамках проекта WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools), направленного на получение глобальной базы данных о городах. Исходными данными послужили разновременные космические снимки Landsat за 2006, 2011, 2016 и 2019 года.

Исходя из разработанной классификации локальных климатических зон была проведена оцифровка участков города исследования в Google Earth, относящихся к тому или иному типу зон. Далее была проведена автоматическая классификация с обучением с использованием инструмента Local Climate Zone Classification в программном обеспечении SAGA GIS куда были внесены оцифрованные ранее тренировочные зоны. Таким образом были получены карты ЛКЗ за исследуемые года. Доля каждой ЛКЗ была рассчитана на основе количества пикселей в каждой зоне, что отображается в свойствах слоя при экспортировании данных из Сага в Аркгис.

Для изучения явления острова были рассмотрены следующие характеристики интенсивности этого явления:

- среднегодовой ход УНІ
- типичный суточный ход УНІ
- сезонная изменчивость интенсивности УНІ.

Для исследования выбрана одна центральная метеостанция. Использование данных одной метеостанции в рамках данной работы является допустимым, поскольку согласно наблюдениям Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) температурные различия в городе сглаживаются и распределяются равномерно.

Для моделирования условий теплового и холодowego комфорта была использована расчетная модель RayMan. Входными данными для подсчета послужили географические координаты территории исследования, метеорологические параметры окружающей среды в объекте исследования, физиологические особенности человеческого организма и термостойкость одежды.

В качестве метеорологических данных в программу были заложены такие метеопараметры, как: температура воздуха, относительная влажность, средняя скорость ветра, общее количество облачности в окантах.

В результате районирования были получены карты локальных климатических зон. На карте ЛКЗ за 2006 год (рис. 1) можно отметить, что в периферийной части столицы преобладала просторная, рассредоточенная и плотная малоэтажная застройка, как правило, представленная частным сектором. Основная его часть располагалась на западе и юго-востоке города, в частности эти территории включали в себя микрорайон «Юго-восток», а также дачные участки. В центральных частях города доминировала просторная среднеэтажная застройка. Промышленная зона размещалась на севере и северо-востоке города. К ней относятся территории ТЭЦ, а также различные предприятия, такие как: вагоно-ремонтный завод, Целиноградский керамический комбинат и т.д. Таким образом, в сумме 74% территории занимала малоэтажная застройка различной плотности, тогда как на долю среднеэтажной и высотной застройки приходилось лишь 17%, а плотная высотная застройка вовсе отсутствовала.

В 2019 году (рис. 1) территория левого берега была застроена достаточно активно, что обусловило наличие здесь плотной высотной застройки, на периферийных участках столицы все так же преоблада-

ет малоэтажная застройка, а на правом берегу отмечается достаточно пестрый набор локальных климатических зон с преобладанием среднеэтажной застройки высокой плотности. Таким образом, с 2006 по 2019 год доля всех типов малоэтажной застройки сократилась с 74% до 42%, а доля плотной высотной и среднеэтажной застройки (ЛКЗ-1 и ЛКЗ-2) увеличивалась с 2 до 15%.

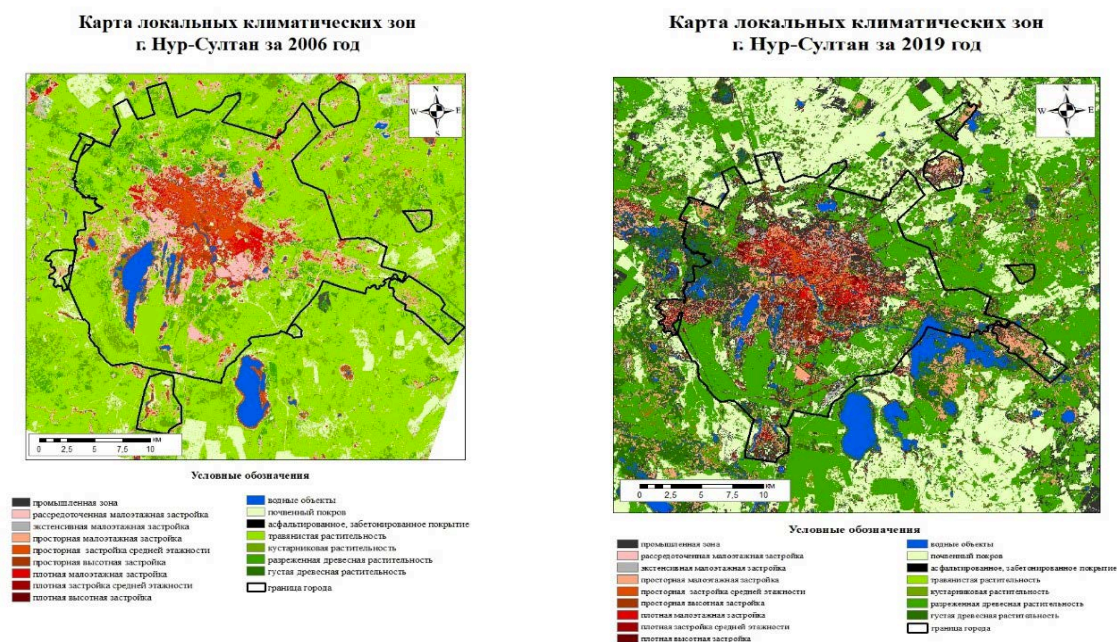


Рис. 1. Карта локальных климатических зон г. Нур-Султан за 2006 и 2019 год.

Исходя из среднегодовой интенсивности острова тепла отмечается тенденция к увеличению данного явления, с 2006 по 2019 год значение интенсивности увеличилось с 1,26 °C до 1,8 °C (рис. 2). На графике связи среднегодовой интенсивности городского острова тепла с изменением структуры застройки видно, что интенсивность данного явления возрастает одновременно с увеличением доли плотной застройки, что указывает на прямую взаимосвязь данных показателей. Таким образом, можно сделать вывод о наличии прямой зависимости формирования городского острова тепла от изменения характера городской застройки.



Рис. 2. Связь среднегодовой интенсивности УИИ с изменением плотной высотной (ЛКЗ-1) и среднеэтажной (ЛКЗ-2) застройки (2006-2019 гг.).

На графике суточного хода (рис. 3) интенсивности острова тепла видно, что дневной и ночной ход данного явления также имеет прямую связь с увеличением доли плотной застройки, ночной ход интенсивности более ярко отражает разницу между городской и сельской местностью, поскольку за весь день здания накапливают тепловую энергию, и в связи с этим за ночь городская территория выхолаживается медленнее, создавая значительную разницу в значениях температуры с неурбанизированной местностью. Тогда как разница температур в дневное время суток не очень велика, поскольку солнечная радиация распределяется более-менее равномерно.

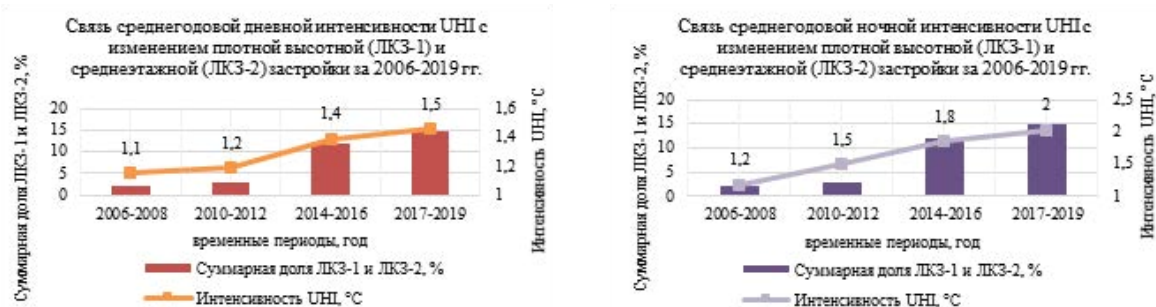


Рис. 3. Связь среднегодовой дневной и ночной интенсивности УНТ с изменением плотной высотной и среднеэтажной застройки.

Таким образом, в ходе исследования было выявлено, что увеличение доли плотной высотной (ЛКЗ-1) и среднеэтажной (ЛКЗ-2) застройки отобразилось на увеличении интенсивности городского острова тепла, как среднегодового, так и сезонного хода, которое в свою очередь оказало влияние на рост теплового индекса РЕТ и уменьшение холодного индекса UTCI. Полученные результаты дают количественную взаимосвязь исследуемых показателей, которая указывает на наличие зависимости микроклиматических условий от изменения структуры застройки.

Данное исследование может быть интегрировано с городским планированием для содействия в разработке конкретных стратегий смягчения последствий для каждой локальной климатической зоны с целью стабилизации внутригородских метеорологических параметров (температура воздуха, скорость ветра и т.д.), которые в свою очередь оказывают прямое воздействие на термический комфорт.

Авторы благодарны преподавателю кафедры экологии и природопользования Казахского Филиала МГУ Дехничу Владимиру Сергеевичу и научному сотруднику кафедры картографии и геоинформатики Грищенко Михаилу Юрьевичу за консультацию в вопросах построения карт локальных климатических зон.

Computing core of the software package for 'cloud' analysis of climate change and the environment

^{1,2}Okladnikov I.G.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

²ICT SB RAS, Tomsk branch, Tomsk, Russia

E-mail: oig@scert.ru

The computing core of the information and computing software package based on a dedicated software framework for carrying out scientific research related to a statistical processing and analysis of spatial geophysical data archives, obtained both from observations and modeling, is presented. During the development, the accumulated experience in a development of information-computational web GISs for processing of large amounts of spatial data was used. Basic components of the computing core are represented by modules for searching, selecting, and processing spatial data arrays, and by a core manager governing processing and data flows. Its modular structure provides a possibility of operative expansion of the functionality of the software complex using various procedures for mathematical and statistical analysis, processing and graphical representation of results in a form of graphs, diagrams and fields on a map of a respective territory.

Вычислительное ядро программного комплекса для «облачного» анализа климатических изменений и окружающей среды

^{1,2}Окладников И.Г.

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Институт вычислительных технологий СО РАН, Томский филиал, Томск, Россия

E-mail: oig@scert.ru

ВВЕДЕНИЕ

Климатические изменения стимулировали развитие систем наблюдений и моделирования состояния окружающей среды, что уже привело к появлению достигающих петабайтных объёмов архивов пространственных данных наблюдений и моделирования. Анализ таких данных становится невозможным без соответствующей вычислительно-информационной поддержки. Создание эффективных инструментов вычислительно-информационной поддержки анализа больших объёмов данных и организация их эффективного использования для получения новых знаний, и их использования для практических применений является одним из направлений современной климатической науки. По сути, для решения этой задачи необходимо создание основанной на современных информационно-телекоммуникационных технологиях программной среды [1, 2], удовлетворяющей требованиям инфраструктуры пространственных данных (ИПД, [3, 4]), что подразумевает использование современных технологий обработки геофизических данных, позволяющих интегрировать различные программные решения для выполнения облачных вычислений с использованием удаленных высокопроизводительных вычислительных ресурсов. Разработка тематических информационно-вычислительных комплексов, формирующих необходимую инфраструктуру, должна основываться на использовании Веб-ГИС-технологий [5-8]. Их использование является перспективным способом повышения эффективности мультидисциплинарных региональных и глобальных исследований в области наук о Земле, включая анализ климатических изменений и их влияния на пространственно-временное поведение растительных экосистем.

В мире на сегодняшний день существует ряд веб-ориентированных информационно-вычислительных систем, посвященных обработке пространственно-привязанных геофизических данных, к которым относится система анализа метеорологических данных в режиме реального времени [9]. Намного более функциональной системой для обработки и визуализации данных спутниковых наблюдений является система GES-DISC Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure (GIOVANNI), разработанная в NASA [<http://daac.gsfc.nasa.gov/techlab/giovanni/>]. Одной из наиболее развитых является система RIMS для интегрированной онлайн-обработки разнородных данных по климату, гидрологии, дистанционного зондирования и др. (<http://RIMS.unh.edu/>).

Однако, несмотря на ряд сделанных попыток, в области информатизации наук о Земле по-прежнему нет высокопроизводительного инструмента, предоставляющего унифицированные пользовательские и программные интерфейсы и объединяющего широкие возможности по обработке, анализу и визуализации наборов данных, полученных из различных источников, для интегрированного исследования глобальных и региональных изменений климата.

В данной работе представлено вычислительное ядро программного комплекса для анализа природно-климатических изменений, его ключевые компоненты и возможности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Одним из ключевых элементов программного комплекса является модульное вычислительное ядро, представляющее собой набор программных компонент, связанных через унифицированный программный интерфейс (API) и выполняющих поиск, выборку, обработку и визуализацию пространственных данных. Программный комплекс ориентирован на «облачную» распределённую обработку больших наборов пространственных климатических данных и может быть развёрнут на нескольких связанных между собой каналах передачи данных вычислительных узлов. На каждом узле устанавливается отдельное вычислительное ядро, связанное со своим архивом пространственных данных и базой метаданных [9]. Выбор необходимого вычислительного ядра, его запуск и контроль выполнения осуществляет геопортал, используя принцип «локальности данных». Также он реализует логику веб-приложений, связь с картографическими веб-сервисами и обеспечивает работу с хранилищем метаданных. При этом архивы пространственных данных, связанные с вычислительным ядром, могут быть представлены данными моделирования (реанализы, глобальные и региональные климатические и метеорологические модели) и данными наблюдений (метеостанции, данные спутниковых наблюдений, и т. д.) различного пространственного разрешения, заданными на различных пространственно-временных доменах и представленными в формате NetCDF или HDF [10].

Вычислительное ядро программного комплекса представляет собой независимый программный блок, отдельные функциональные возможности которого реализуются различными модулями, связанными специализированным программным интерфейсом (API). Ядро разработано с использованием языков программирования GNU Data Language (GDL, <http://gnudatalanguage.sourceforge.net/>) и Python (<http://python.org>), предоставляющих проверенные процедуры математической обработки и визуализации пространственных данных, а также программные интерфейсы для чтения/записи файлов в формате NetCDF, ESRI Shapefile, и доступа к базам данных под управлением СУБД PostgreSQL. Для управления работой ядра, формирования вычислительного конвейера и контроля выполнения модулей служит менеджер вычислительного ядра (рисунок 1), обеспечивающий вызов модулей ядра и передачу между ними промежуточных результатов. Обработка данных выполняется с помощью вычислительного конвейера, представляющего собой последовательность вызовов модулей вычислительного ядра с передачей данных с выхода одного модуля на вход другого. Формирование вычислительного конвейера осуществляется на основе специального файла-задания в формате XML, подготавливаемого веб-порталом по результатам действий пользователя в рамках графического интерфейса, отображаемого в окне интернет-браузера. Файл-задание содержит ключевые характеристики наборов пространственных данных, подлежащих обработке, описание вычислительного конвейера в виде последовательности вызовов вычислительных модулей и массивов промежуточных данных, передаваемых между ними, а также параметры записи результатов в графический файл.

Например, так выглядит файл-задание, описывающее расчёт средней за 1961 год температуры воздуха на высоте 2 м по данным реанализа ECMWF ERA-40 в каждой ячейке сетки с разрешением 2,5х2,5 градуса для территории всей Земли.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no" ?>
<!DOCTYPE task SYSTEM "ctdl.dtd">
<task uid='Task1' owner='Owner1' description='' root_path='' data_module_path=''>
  <metadb host='localhost' name='cvcdatadb' user='' password='' />

  <data uid='Data_1' type='dataset'>
    <description title='Collection long name' name='Temperature' units='K' />
    <dataset name='ERA40' resolution='2.5x2.5' time_step='6h' scenario='-'/>
    <variable name='2T' tempk2c='no' />
    <region units='degrees'>
      <point lon='-180' lat='88' />
      <point lon='180' lat='88' />
      <point lon='180' lat='-88' />
      <point lon='-180' lat='-88' />
    </region>
    <levels values='2m' />
    <time uid='Input_1' template='YYYYMMDDHH'>
      <segment name='Seg1' beginning='1961010100' ending='1961123118' />
    </time>
  </data>

  <destination uid='Image_1' type='image'>
    <file name='output.tiff' type='geotiff' />
    <projection name='cylindrical'>
      <p0lon units='degrees'>0</p0lon>
      <p0lat units='degrees'>0</p0lat>
      <rot units='degrees'>0</rot>
      <limits units='degrees'>
        <limit role='left'>-180</limit>
        <limit role='right'>180</limit>
        <limit role='top'>90</limit>
        <limit role='bottom'>-90</limit>
      </limits>
    </projection>
    <graphics title='' kind='shaded'>
      <width units='pixels'>3072</width>
      <height units='pixels'>2304</height>
      <legend title='Temperature' kind='file' type='continuous' position='none'>
        <units>K</units>
        <nlabels>11</nlabels>
        <ncolors>10</ncolors>
        <limited>no</limited>
        <minimum>-15.0</minimum>
      </legend>
    </graphics>
  </destination>
</task>
```

```

        <maximum>15.0</maximum>
        <file name='output.sld' type='xml' />
    </legend>
    <colortable>RAINBOW</colortable>
    <colorscale>linear</colorscale>
    <smoothing>yes</smoothing>
    <steps>30</steps>
</graphics>
</destination>

<destination uid="File_1" type="raw">
<file name='output.nc' type="netcdf"/>
</destination>

<data uid='Result_1' type='array'>
    <description title='Average' name='Temperature' units='K' source='Data_1' />
    <time uid='Output_1' template='YYYYMMDDHH'>
        <segment name='Seg1' beginning='1961010100' ending='1961123118' />
    </time>
</data>

<data uid='ModuleParameters_1' type='parameter'>
    <param uid='timeMean' type='string'>data</param>
</data>

<processing uid='Process_1' class='cvcCalcTiMean' module_path=''>
    <input uid='P1Input1' data='Data_1' />
    <input uid='P1Parameter1' data='ModuleParameters_1' />
    <output uid='P1Output1' data='Result_1' />
</processing>

<processing uid='Visualization_1' class='cvcOutput'>
    <input uid='V1Data1' data='Result_1' />
    <input uid='V1Destination1' data='Image_1' />
</processing>

<processing uid="Output_1" class="cvcOutput">
<input uid="O1Data1" data="Result_1"/>
<input uid="O1Destination1" data="File_1"/>
</processing>

</task>

```

Этому файлу-заданию соответствует следующий алгоритм в вербальной форме:

1) вызвать модуль расчёта среднего `cvcCalcTiMean` для данных `Data_1`, соответствующих температуре воздуха на высоте 2 м, с пространственным разрешением 2,5х2,5 м, шагом по времени 6 ч из ре-анализа ECMWF ERA-40 с дополнительным параметром `timeMean='data'`; промежуточный результат сохранить в массив с именем `Result_1`,

2) записать массив `Result_1` в графический файл 'output.tiff' в формате GeoTIFF совместно с легендой 'output.sld' в виде дескриптора слоя со стилем (Styled Layer Descriptor – SLD) в формате XML путём вызова модуля `cvcOutput`,

3) записать массив `Result_1` в файл 'output.nc' в формате NetCDF путём вызова модуля `cvcOutput`.

В функциональном виде этот конвейер выглядит следующим образом:

```

Result_1 = cvcCalcTiMean_1(Data_1, ModuleParameters_1);
cvcOutput(Result_1, 'output.tiff', 'output.sld');
cvcOutput(Result_1, 'output.nc');

```

На основе файла-задания менеджер ядра формирует вычислительный конвейер и обеспечивает последовательный запуск соответствующих модулей вычислительного ядра с передачей между ними массивов данных с промежуточными результатами.

Модули обработки вычислительного ядра (вычислительные модули) представляют собой набор независимых классов, написанных на языке программирования GNU Data Language, которые обеспечивают численную обработку геофизических данных, хранящихся на системах хранения данных. Общая схема работы каждого модуля выглядит следующим образом:

- инициализация модуля,
- чтение входных данных через специализированный API доступа к данным,

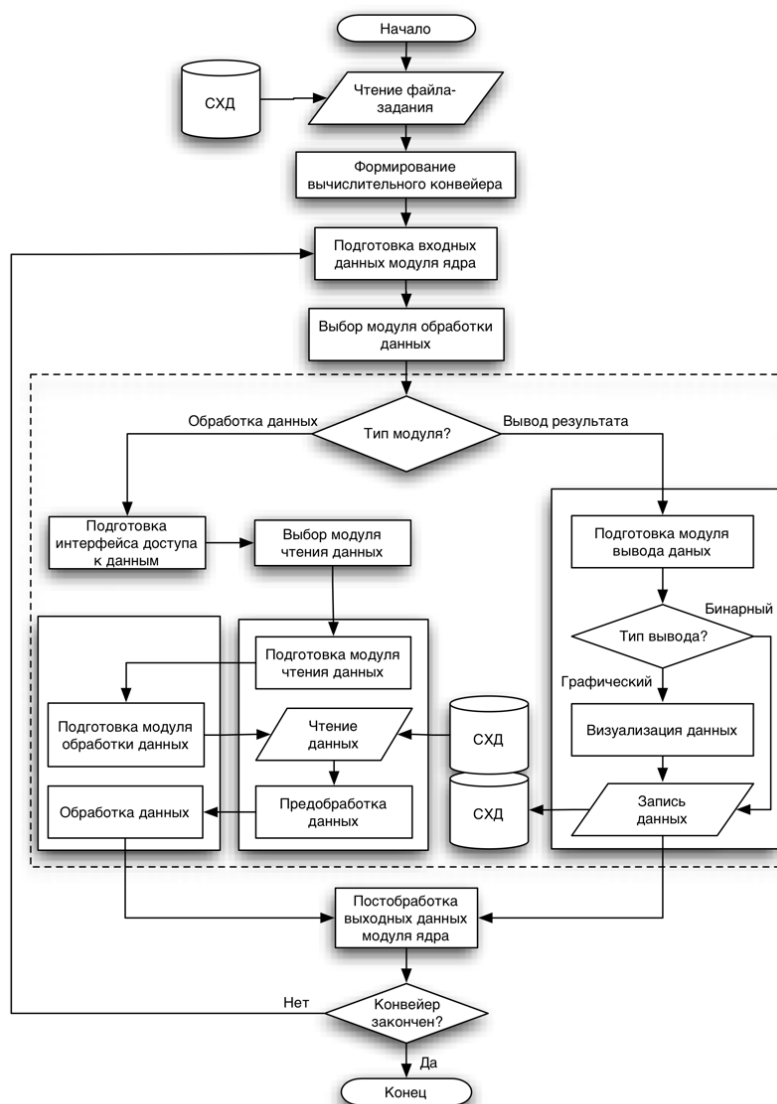


Рис. 1. Общий алгоритм работы менеджера вычислительного ядра программного комплекса.

- обработка данных внутренней логикой модуля,
- возврат результата менеджеру вычислительного ядра через специализированный API.

Входными данными для модуля являются массивы пространственных данных на заданном пространственно-временном домене. Выходные данные вычислительного модуля – это также массивы пространственных данных, являющиеся результатами обработки входных массивов. Менеджер вычислительного ядра обеспечивает хранение и передачу от модуля к модулю промежуточных результатов, включая запись конечного результата в файлы с помощью модулей доступа к данным.

Каждый программный модуль численной обработки данных отвечает за один тип обработки. Комбинируя последовательное выполнение различных модулей, можно формировать потоки работ любой сложности для численной обработки пространственных данных. Результаты обработки в растровом виде сохраняются в графических файлах формата GeoTIFF, а в векторном виде – в файлах ESRI Shapefile. Массивы данных, при этом, записываются в файлы формата NetCDF, содержащие дополнительные метаданные. В дальнейшем эти файлы передаются в геопортал для подготовки и отображения пользователю картографических слоев на интерактивной карте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа направлена на разработку тематического программного комплекса для анализа природно-климатических изменений путём интеграции междисциплинарных (географических, климатических, метеорологических) архивов наблюдений, моделирования и дистанционного зондирования в виде тематической распределённой информационно-вычислительной системы, обладающей ГИС-функцио-

нальностью и возможностью «облачной» обработки разнородных пространственных данных. Такой вычислительный комплекс является следующим шагом в процессе разработки прикладных информационно-телекоммуникационных систем, предоставляющих специалистам различных областей науки уникальные возможности надежного анализа разнородных геофизических данных. Использование апробированных вычислительных алгоритмов обеспечит достоверность получаемых в конкретных предметных областях результатов. Доступность системы через Интернет и возможность работы с данными без использования специальных знаний в программировании позволит широкому кругу исследователей и лиц принимающих решения сконцентрироваться на решении конкретных задач.

Вычислительное ядро, являющееся одним из ключевых элементов программного комплекса для анализа природно-климатических изменений, представляет собой независимый программный блок, включающий в себя набор модулей для доступа и обработки пространственных данных и менеджер ядра, контролирующий выполнение модулей и передачу данных между ними. Оно может быть легко адаптировано к различным наборам геофизических данных и задачам из разных областей наук о Земле. Открытое программное обеспечение, использованное при его разработке, даёт возможность развёртывания и некоммерческого использования на различных программно-аппаратных платформах под управлением ОС семейства Linux.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы №AAAA-A17-117013050037-0.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Stefano Nativi, Mohan Ramamurthy, Bernd Ritschel. EGU-ESSI Position Paper. [Эл. ресурс]. — Режим доступа: <https://sites.google.com/a/imaacnr.it/egu-essi/Home/documents>
2. Гордов Е.П., Лыкозов В.Н. Развитие информационно-вычислительной инфраструктуры для интегрированного исследования окружающей среды Сибири // *Выч. тех.* 2007. Т. 12. Спец. вып. 2. С. 19-30.
3. Steiniger S., Hunter A.J.S. Free and open source GIS software for building a spatial data infrastructure. / In: Bocher E., Neteler M., (eds.), *Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century*, LNC, Heidelberg, Springer, 2012a, p. 247-261.
4. Кошкарев А.В., Ряховский В.М., Серебряков В.А. Инфраструктура распределенной среды хранения, поиска и преобразования пространственных данных. — *Открытое образование*, 2010, № 5. — С. 61-73.
5. Frans J. M. van der Wel, 2005. *Spatial data infrastructure for meteorological and climatic data*. Meteorol. Appl. 12, 7–8.
6. Gordov E.P., Fazliev A.Z., Lykosov V.N., Okladnikov I.G., Titov A.G. Development of web based information-computational infrastructure for Siberia Integrated Regional Study / *Environmental Change in Siberia* // *Earth Observation, Field Studies and Modelling*, Balzter, Heiko (Ed.) 1st Edition, 2010, 300 p.
7. Атаева О.М., Кузнецов К.А., Серебряков В.А., Филиппов В.И. Портал интеграции пространственных данных «ГеоМета». — М.: ВЦ РАН, 2010. — 106 с.
8. Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г. Использование Веб-ГИС технологий для разработки информационно-вычислительных систем для анализа пространственно-привязанных данных // *Вестник НГУ, Серия: Инф-е технологии*. 2011. Том 9, вып. 4. Стр. 94-102.
9. I G Okladnikov, E P Gordov, A A Ryazanova and A G Titov Elements of software package for “cloud” analysis of the environment and climate change // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. — 2019. — V.386. — 012037. — doi:10.1088/1755-1315/386/1/012037.
10. I. G. Okladnikov, E. P. Gordov and A. G. Titov. Development of climate data storage and processing model // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2016. V. 48. 012030. doi:10.1088/1755-1315/48/1/012030

Development real-time system for thermal comfort conditions monitoring in Moscow metropolis

¹Perkhurova A.A., ¹Konstantinov P.I., ²Varentsov M.I., ¹Samsonov T.E., ¹Kargashin P.E.

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia

E-mail: an.perkh@gmail.com

To evaluate the thermal perception of humans, a large number of indices of thermal comfort have been developed in the field of urban biometeorology. Some of them are calculated using empirical equations. More complex ones are based on a balance of human energy or models of human heat fluxes [1]. All indices are calculated based on both meteorological and physiological parameters. In this paper, we used the two most common thermal indexes.

A regularly used indicator for assessing a person's thermal comfort is Physiologically Equivalent Temperature (PET). This parameter is based on a simplification of the Munich Energy Balance Model for Individuals (MEMI) [2]. Currently, PET is one of the most commonly used indicators of human thermal comfort.

The Universal Thermal Climate Index (UTCI) is defined as "the equivalent ambient temperature of the reference environment that provides the same physiological response of the reference person in a real environment" [3]. The described bioclimatic indices can be obtained using the RayMan microscale model, designed to calculate radiation fluxes.

In 2019, with the joint efforts of the staff of the Department of Cartography and Geoinformatics and the Department of Meteorology and Climatology of the Geography Department of Moscow State University, based on the data of the web service, the technology for calculating comfort indices was developed. To simulate the conditions of thermal comfort, the incoming information is downloaded from the PostgreSQL database management system using the "sqlalchemy" library of the Python programming language. Then the data is formatted and then directly loaded into the RayMan model. The model is difficult to automate, since it is necessary to make mouse clicks in it, as well as to prescribe file paths. Interaction with the buttons of the keyboard and computer mouse was carried out using specialized libraries of the Python programming language ("pyautogui", "pywinauto"). After receiving information about comfort indices, visualization was also performed on an interactive web map using the Python language ("folium" library). The result is presented in a visually understandable form with a spatial distribution of thermal stress in the form of punsons with signed index values at the location of weather stations throughout Moscow and surrounding areas. An example of visualization is shown in Figure 1.

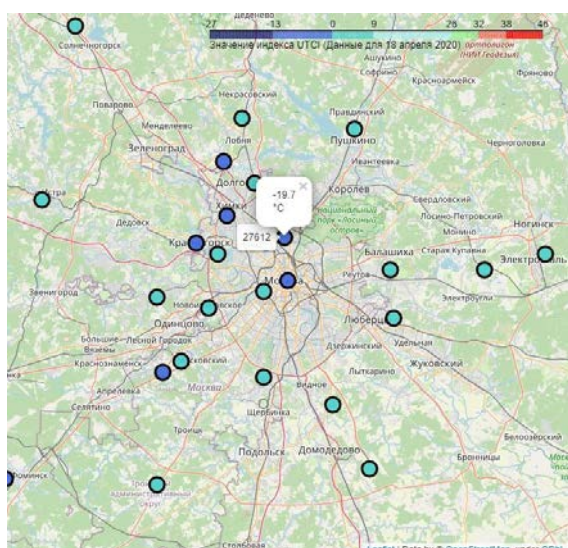


Figure 1. An example of visualization of the calculated values of the UTCI comfort index (0 hours on April 18, 2020 data).

At the moment, the module for calculating comfort is under development, however, in the future, its implementation is planned to be implemented on a common platform of an information technology product.

One of the specified parameters in the RayMan model, on which the radiation flux values are weighted, is the sky view factor. The sky view factor (SVF) is the fraction of the sky open from obstacles visible from a certain point.

In this study a model sensitivity to SVF test was performed. It was also revealed that for the summer sample of cases with thermal stress in the open area (SVF = 1) is 15% more than in the area with the maximum closed horizon (SVF = 0.2).

For some meteorological stations of the national meteorological service network, aspect ratio values were provided, from which SVF values were further calculated (the derivation of the expression for evaluating SVF is based on trigonometric formulas). It was shown that most often strong and extreme heat stress conditions were observed in the open areas of Sheremetyevo and Domodedovo airports - together 38% of the total. Most rarely, these conditions were observed in a closed area in the city center - Baltshug station (1% of cases).

REFERENCES:

1. Fanger, P., 1972: *Thermal comfort*. McGraw-Hill. New York.
2. Höppe, P., 1984: *Die Energiebilanz des Menschen. Berichte des Meteorologischen Instituts Nr. 49 Ludwig-Maximilians-Universität München.*
3. Jendritzky, G.; Dear, de R.; and Havenith, G., 2012: *UTCI-Why another thermal index? Int J Biometeorol (56), 421–428.*

Разработка системы мониторинга условий термического комфорта для населения Московского мегаполиса в режиме реального времени

¹Перхурова А.А., ¹Константинов П.И., ²Варенцов М.И., ¹Самсонов Т.Е., ¹Каргашин П.Е.

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, НИВЦ, Москва, Россия

E-mail: an.perkh@gmail.com

В настоящее время более половины населения мира проживает в городах. Доля городского населения растет и, как ожидается, будет расти в будущем [1]. Из этого следует, что здоровье и благополучие городского населения уже является важным аспектом при городском планировании [2], но в дальнейшем будет иметь все большее значение. Повышенные значения температуры воздуха и специфика микроклимата в городах оказывают влияние на экосистемы, экономику, а также на здоровье и комфорт населения. В последние годы были проведены многочисленные исследования, которые показывают сильную корреляцию между здоровьем людей и биометеорологическими индексами. Показано, что тепловой стресс в летние месяцы приводит к увеличению сердечно-сосудистых заболеваний и смертности [3].

Крупнейшей моноцентрической городской агломерацией в России и Европе является Москва. Население составляет около 16-17 миллионов человек [4]. Такие крупные города нуждаются в качественных информационных сервисах для обеспечения благосостояния населения. С метеорологической точки зрения такими сервисами являются центры оперативного прогнозирования и мониторинга условий погоды. К первым относится, например, центр прогноза погоды национальной гидрометеорологической службы “Росгидромет”. Ко вторым – “Мосэкомониторинг” и другие. Однако в Москве (как и во многих других городах) отсутствуют пространственно-разрешающие исследования городского климата и общедоступные службы мониторинга в реальном времени. На данный момент в этапе разработки находится веб-сервис мониторинга и картирования характеристик погоды в реальном времени для Московского региона на основе краудсорсинговой сети метеорологических станций “Netatmo”, а также сети регулярных станций “Росгидромета”. Целью данного исследования являлась разработка блока расчёта условий термического стресса в описанном веб-сервисе.

У людей нет какого-либо датчика для измерения метеорологических параметров, таких как температура воздуха и влажность, но они могут ощущать интегральный эффект посредством температуры своей кожи и крови в системе терморегуляции, за которую отвечает гипоталамус [5]. Таким образом, тепловое восприятие человека основано на огромном количестве параметров и поэтому не может быть описано с помощью отдельных метеорологических параметров, например, только температура воздуха [6]. Чтобы оценить тепловое восприятие человека, в области биометеорологии было разработано большое множество индексов термического комфорта. Некоторые из них рассчитываются при помощи эмпирических уравнений. Более сложные следуют подходу эквивалентной температуры и основаны на балансе энергии человека или моделях тепловых потоков человека [7]. Все индексы рассчитываются на основе как метеорологических, так и физиологических параметров. К первым относятся: температура воздуха, относительная влажность воздуха или давление водяного пара, скорость ветра и средняя радиационная температура. Физиологические параметры следующие: рост, вес и пол человека, его производимая энергия в результате деятельности или положения, например, стоя или сидя [8]. В настоящей ра-

боте были использованы два наиболее распространённых термических индекса. Они используют градус Цельсия как расчетную единицу, облегчая интерпретацию обывателем [9].

Регулярно используемым показателем для оценки теплового комфорта человека является физиологическая эквивалентная температура (Physiologically Equivalent Temperature – PET). PET определяется как «температура воздуха, при которой для обычных комнатных условий тепловой баланс человеческого тела остается сбалансированным со значениями температуры внутренних органов и температуры кожи для рассматриваемой ситуации» [10]. Параметр основан на упрощении модели энергетического баланса тепла человека «Munich Energy Balance Model for Individuals» (MEMI) [11]. В настоящее время PET является одним из наиболее часто используемых показателей теплового комфорта человека.

Универсальный термический индекс климата (Universal Thermal Climate Index – UTCI) определяется как «эквивалентная температура окружающей эталонной среды, обеспечивающая такую же физиологическую реакцию эталонного лица в реальной среде» [12]. В отличие от других показателей, физиологические параметры не задаются для расчёта UTCI. Помимо самоадаптирующейся термоизоляции одежды предполагается постоянная скорость ходьбы и внутреннее тепловыделение [12]. UTCI рассчитывается при помощи многосегментной модели терморегуляции, включающей модель одежды, которая автоматически адаптируется к текущим условиям [13].

Описываемые биоклиматические индексы могут быть получены при помощи микромасштабной модели RayMan, предназначенной для расчёта потоков излучения в простых и сложных средах. RayMan является одной из наиболее успешных моделей в городской биометеорологии и применяется во многих исследованиях по всему миру.

С 2019 года совместными усилиями сотрудников кафедры картографии и геоинформатики и кафедры метеорологии и климатологии географического факультета МГУ и НИВЦ МГУ ведется разработка общедоступного картографического веб-сервиса, главной целью которого являлось предоставление новых подходов к исследованию и мониторингу в реальном времени эффекта городского острова тепла и пространственной неоднородности температуры в городе, основанные на использовании данных сети «Росгидромет» и краудсорсинговой сети. Прототип веб-сервиса доступен в Интернете по адресу <http://carto.geogr.msu.ru/mosclim/>. Основываясь на данных веб-сервиса, производилась разработка технологии расчёта индексов комфортности. Каждые 3 часа информация с метеорологических станций поступает в общую базу данных, созданную сотрудниками кафедры картографии и геоинформатики. Для моделирования условий термического комфорта производится скачивание поступающей информации из системы управления базами данных PostgreSQL при помощи библиотеки “sqlalchemy” программного языка Python. Затем данные форматируются и дальше непосредственно загружаются в модель RayMan. Необходимость использования модели состояла в том, что уравнения расчётов индексов скрыты в программном коде от простого пользователя и не прописаны в документации. Модель тяжело автоматизируема, поскольку в ней необходимо совершать нажатия кнопок мыши, а также прописывать пути к файлам. Взаимодействие с кнопками клавиатуры и компьютерной мыши было осуществлено с помощью специализированных библиотек программного языка Python (“pyautogui”, “pywinauto”). После получения информации об индексах комфортности производилась визуализация на интерактивной веб-карте также средствами языка Python (библиотека “folium”). Результат предоставляется в визуально понятной форме с пространственным распределением термического стресса в виде пунсонов с подписанными значениями индексов в месте расположения метеостанций по территории Москвы и прилегающих областей. Пример визуализации приведён на рисунке 1.

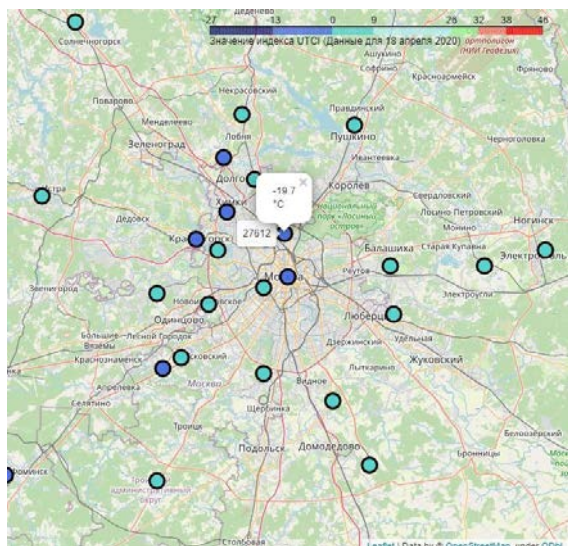


Рис. 1. Пример визуализации рассчитанных значений индекса комфортности UTCI на территории Москвы и Московской области (данные за 0 часов 18 апреля 2020 года).

На данный момент блок расчёта комфортности находится в разработке, однако в дальнейшем планируется его внедрение на общую платформу информационно-технологического продукта. Веб-сервис должен обеспечить всей необходимой информацией как обычных людей, так и властей, обеспечивающих работу городских планировщиков, при оценке термического комфорта местности в различных вариантах застройки. В будущем планируется развитие и усиление веб-сервиса, а также накопление архивных погодных данных.

Одним из задаваемых параметров в модель RayMan, на который взвешиваются значения радиационных потоков, является коэффициент открытости неба. Коэффициент открытости неба (SVF) - это доля открытого от препятствий неба, видимого с определенной точки (Оке, 1995). Он безразмерен и находится в диапазоне от 0 до 1, где 0 означает, что небо полностью закрыто ландшафтом или препятствиями, а 1 означает открытое небо. Он создается в программе на основе изображений типа «Fish eye», либо рассчитывается из значений отношения аспекта.

Чтобы определить, насколько изменяются индексы при варьировании значения SVF был произведён тест на чувствительность модели. Предварительно были специально разработаны изображения для параметра SVF с идеализированной ровной застройкой. Всего создано 9 изображений для следующих значений SVF: 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9. 1. Результат теста представлен в 3 формах: график зависимости с выявлением уравнения тренда, диаграмма размаха и круговая диаграмма повторяемости различных градаций теплового стресса. Показано, что параметр PET более чувствителен к изменению SVF, чем UTCI. Также выявлено, что для летней выборки случаев с тепловым стрессом на открытой площадке (SVF = 1) на 15% больше, чем на площадке с максимально закрытым горизонтом (SVF = 0.2).

По некоторым метеорологическим станциям сети «Росгидромет» были взяты данные о значениях отношения аспекта (отношение высоты зданий H к ширине «городских каньонов» W), полученные по методике исследования [14]. Далее по этим данным были вычислены значения SVF (вывод выражения для оценки SVF основывается на тригонометрических формулах). Используя информацию картографического веб-сервиса, был произведён расчёт индексов термического комфорта по метеостанциям с учётом коэффициента открытости неба по данным за август 2019 года. После моделирования индексов были отобраны все значения, соответствующие сильному и экстремальному уровню теплового стресса. Затем были получены процентные отношения количества случаев на каждой из станций к общему количеству сроков, когда наблюдались данные градации термического стресса. Показано, что чаще всего сильные и экстремальные условия теплового стресса наблюдались на открытых территориях аэропортов Шереметьево и Домодедово (совместно 38% случаев от общего количества). Реже всего эти условия наблюдались на закрытой площадке в центре города – станция Балчуг (1% случаев).

В настоящий момент система мониторинга индексов комфортности является уникальной в России и имеет большой потенциал. Она может быть использована в ряде задач, которые требуют оценки теплового комфорта различных климатических условий, например, в городском или региональном планировании, а также в туризме и медицине.

Исследование выполнено при поддержке проекта РФФИ и Правительства Москвы № 19-35-70009 мол_а_мос. Работа П.И. Константинова была поддержана проектом РНФ № 19-77-30012

ЛИТЕРАТУРА:

1. Population Division, 2012: *World Urbanization Prospects, the 2011 Revision*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs New York.
2. Matzarakis, A.; Röckle, R.; Richter, C.-J.; Höfl, H.-C.; Steinicke, W.; Streifeneder, M.; and Mayer, H., 2008: *Planungsrelevante Bewertung des Stadtklimas – Am Beispiel von Freiburg im Breisgau. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* (68), 334–340.
3. Muthers, S.; Matzarakis, A.; and Koch, E., 2010: *Summer climate and mortality in Vienna - a humanbiometeorological approach of heat-related mortality during the heat waves in 2003*. *Wiener Klinische Wochenschrift* 122(17-18), 525–531. doi: 10.1007/s00508-010-1424-z.
4. Cox W. (2018). *Demographia World Urban Areas (World Agglomerations)*. Wendel Cox Consultancy, Illinois (14th Annual Edition). Belleville, Illinois.
5. Tromp, S., 1980: *Biometeorology. The impact of the weather and climate on humans and their environment (animals and plants)*. Heyden & Son Ltd. London, Philadelphia, Rheine.
6. Höppe, P. R., 1993: *Heat balance modelling*. *Experientia* 49(9), 741–746.
7. Fanger, P., 1972: *Thermal comfort*. McGraw-Hill. New York.
8. Watson, I. and Johnson, G., 1988: *Estimating person view-factors from fish-eye lens photographs*. *International Journal of Biometeorology* 32(2), 123–128.
9. Höppe, P. R., 1999: *The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment*. *Int J Biometeorol* 43, 71–75.

10. Mayer, H. and Höppe, P., 1987: *Thermal Comfort of Man in Different Urban Environments. Theoretical and Applied Climatology* (38), 43–49.
11. Höppe, P., 1984: *Die Energiebilanz des Menschen. Berichte des Meteorologischen Instituts Nr. 49 Ludwigs-Maximilians-Universität München.*
12. Jendritzky, G.; Dear, de R.; and Havenith, G., 2012: *UTCI-Why another thermal index? Int J Biometeorol* (56), 421–428.
13. Havenith, G.; Fiala, D.; Błażejczyk, K.; Richards, M.; Bröde, P.; Holmér, I.; Rintamaki, H.; Benshabat, Y.; and Jendritzky, G., 2012: *The UTCI-clothing model. International Journal of Biometeorology* 56(3), 461–470. doi: 10.1007/s00484-011-0451-4.
14. Самсонов Т. Е., Варенцов М. И. *Определение параметров городской среды Московского мегаполиса для детализированного численного прогноза погоды в рамках модели COSMO. Метеорология и гидрология*, 2020, выпуск №7, стр. 112-119.

СЕКЦИЯ 8

Программа
«Будущее Земли»
и инициатива
«Будущее Северной
Евразии»

SESSION 8

Future Earth
Program
and Northern
Eurasia Future
Initiative

Variability of Northern Hemisphere storm-tracks under future climate conditions in INM-CM5 climate model output

¹Martynova Yu.V., ²Vargin P.N.,
³Volodin E.M.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

²Central Aerological Observatory, Dolgoprudny, Russia

³Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: FoxyJ13@gmail.com, p_vargin@mail.ru,
volodinev@gmail.com

Storm tracks (ST) are areas of strong baroclinicity, where extratropical cyclones are formed, accompanied by strong winds and precipitation. STs transfer a large amount of heat, momentum, and moisture to high latitudes and are observed at mid latitudes. In the Northern Hemisphere (NH), two ST are dominant: the North Pacific (NP) and the North Atlantic (NA) [1, 2]. The shift or expansion of the ST regions as well as its intensification or weakening leads to changes in the weather conditions and precipitation.

In this paper, we assessed the response of STs, their geographic location and intensity, to present and possible future climate changes set by a new generation of climate scenarios.

The study was carried out using the results of the climate model INM-CM5 [3, 4], taken from the CMIP6 data archive [5]. Present and possible future climate changes were specified using the Historical climate scenarios (for the present climate, until 2014), and SSP2-4.5 and SSP5-8.5 (for the future climate, 2015-2100) [6]. Previously, for the INM-CM5 model, good agreement was obtained between the reproduction of the STs with the reanalysis NCEP2 and ERA-Interim [7].

We analyzed the ST intensity (amplitude) $v'v'$, which is the eddy kinetic energy transmitted from the vortices to the zonal flow.

Variation of the ST intensity were determined as the difference between the mean values of $v'v'$ over 20-year periods. For the historical scenario, the periods 1970-1990 and 1994-2014 were selected for analysis. For climate scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5, the more time-separated periods were considered: 2015-2035 and 2080-2100. Differences between the final and initial periods were calculated.

In the work, significant spatial differences were obtained between the behavior of NP and NA in different climatic conditions. In addition, when analyzing the change in the response of STs over time, a shift of one month was obtained in the manifestation

of changes in the considered STs relative to each other. It is important to emphasize that in time the strongest changes in the STs activity do not occur in the months of their maximum activity, but later when their amplitude begins to decrease.

Climatic scenarios set the conditions for global climate change, determining radiation forcing and the level of warming, for the planet. As a result, there is a change of regional vertical and horizontal temperature gradients. These changes are most pronounced in extra-tropical and high latitudes. In turn, this can have a significant effect on the location and intensity of the ST in NH.

This research was supported by the Russian Found for Basic Research under project (#19-05-00370) on "Investigation of stratosphere-Troposphere Dynamical Coupling in Present and Future Climate".

Изменчивость шторм-треков Северного полушария в условиях будущего климата по расчетам климатической модели INM-CM5

¹Мартынова Ю.В., ²Варгин П.Н., ³Володин Е.М.

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, Долгопрудный, Россия

³Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

E-mail: FoxyJ13@gmail.com, p_vargin@mail.ru, volodinev@gmail.com

Шторм-треки (ШТ) представляют собой области сильной бароклинности, где происходит формирование внетропических циклонов, сопровождающихся сильными ветрами и осадками. ШТ переносят большое количество тепла, импульса и влаги к высоким широтам и наблюдаются в средних широтах. В Северном полушарии (СП) доминируют два ШТ: Северо-Тихоокеанский (СТ) и Северо-Атлантический (СА) [1, 2]. Смещение или расширение областей ШТ приводит к изменениям погоды и режима осадков в соседних регионах.

В данной работе мы оценили отклик ШТ, их географического положения и интенсивности, на современные и возможные в будущем климатические изменения, задаваемые новым поколением климатических сценариев.

Исследование было проведено с помощью результатов работы климатической модели INM-CM5 [3, 4], взятых из банка данных CMIP6 [5]. Современные и возможные в будущем климатические изменения были заданы при расчете с помощью климатических сценариев Historical (для современного климата, до 2014 г.), и SSP2-4.5 и SSP5-8.5 (для климата будущего, 2015-2100 гг.) [6]. Сценарий SSP2-4.5 характеризует относительно умеренную интенсивность воздействия человека на окружающую среду с максимальной эмиссией парниковых газов, приходящейся на середину 21 века с последующим ее плавным снижением. Радиационный форсинг, при этом, к концу 21 века составит 4.5 Вт/м², а рост температуры достигнет 2.5°. Климатический сценарий SSP5-8.5 существенно более агрессивный. Он задает условия, при которых интенсивного развития промышленности, использующей углеводороды, а также сравнительно активную разработку территорий под сельскохозяйственные угодья. Эмиссии парниковых газов достигнут своего пика к концу 21 века, вызвав радиационный форсинг равный 8.5 Вт/м² и потепление на 5°. Ранее для модели INM-CM5 было показано хорошее согласие воспроизведения ШТ с данными реанализов NCEP2 и ERA-Interim [7].

Анализ проводился для характеристики интенсивности ШТ, полученной на основе меридиональной составляющей скорости ветра, v . Предварительно к полям v был применен высокочастотный фильтр, позволяющий выявить изменчивость синоптических масштабов [7]. Далее, была определена характеристика интенсивности (амплитуда) ШТ [2]:

$$v'v' = \overline{[v(t + 24h) - v(t)]^2}.$$

Здесь $v(t)$ и $v(t+24h)$ означают соответственно текущий и следующий шаг по времени, а линия над правой частью – осреднение по периоду времени, обычно за месяц или сезон. Величина $v'v'$ представляет собой вихревую кинетическую энергию, которая передается от вихрей к зональному течению.

Тенденции изменения интенсивности ШТ определялись как разница между средними за 20-летние периоды значениями $v'v'$. Для исторического сценария для анализа были выбраны периоды 1970-1990 гг. и 1994-2014 гг. Для климатических сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5 рассматривались более разнесенные во времени периоды: 2015-2035 гг. и 2080-2100 гг. Были рассчитаны разницы между конечным и начальным периодами. Оценивались тенденции изменения амплитуды ШТ в условиях задаваемых сце-

нарядами будущих климатических изменений при сопоставлении с тенденциями, характерными для исторического сценария.

Оценка вариации широтно-долготного положения областей активности ШТ осуществлялась на основе средних за зимний сезон (декабрь, январь и февраль) значений $v'v'$. Получена заметная чувствительность ШТ СП к состоянию климатической системы. Для условий исторического сценария, отражающего реальное состояние климатической системы, ослабление ШТ в центре области его максимальной интенсивности и усиление на периферии, что указывает на расширение области его влияния (Рисунок 1 а). При этом СТ продемонстрировал существенно большие изменения, чем СА.

В условиях умеренного климатического сценария SSP2-4.5 к концу 21 века получено заметное смещение обоих ШТ к Северному полюсу без существенного изменения их интенсивности (Рисунок 1 б). Более агрессивный сценарий SSP5-4.5 создает условия не только для смещения ШТ СП к полюсу, но и для усиления их амплитуды (Рисунок 1 в).

Более подробный анализ отклика ШТ на современные и будущие климатические изменения для каждого месяца в отдельности для периода с октября по март показал сдвиг, равный одному месяцу, в проявлении изменений у рассматриваемых ШТ (Рисунок 2). Так для СТ в условиях исторического и умеренного сценариев наиболее заметные изменения проявляются в период с ноября по январь. В условиях же агрессивного сценария SSP5-8.5 этот период продлевается на один месяц (с ноября по февраль). Наибольшая изменчивость СА в условиях всех трех климатических сценариев проявляется с декабря по февраль. Однако, характер изменения ШТ в разных условиях различен. В условиях исторического сценария оба ШТ претерпевают расширение по широте с ослаблением амплитуды в центре ШТ. В условиях, задаваемых умеренным сценарием SSP2-4.5, оба ШТ демонстрируют заметный сдвиг к северу, тогда как в условиях агрессивного сценария SSP5-8.5 сдвиг к полюсу предваряется усилением амплитуды ШТ.

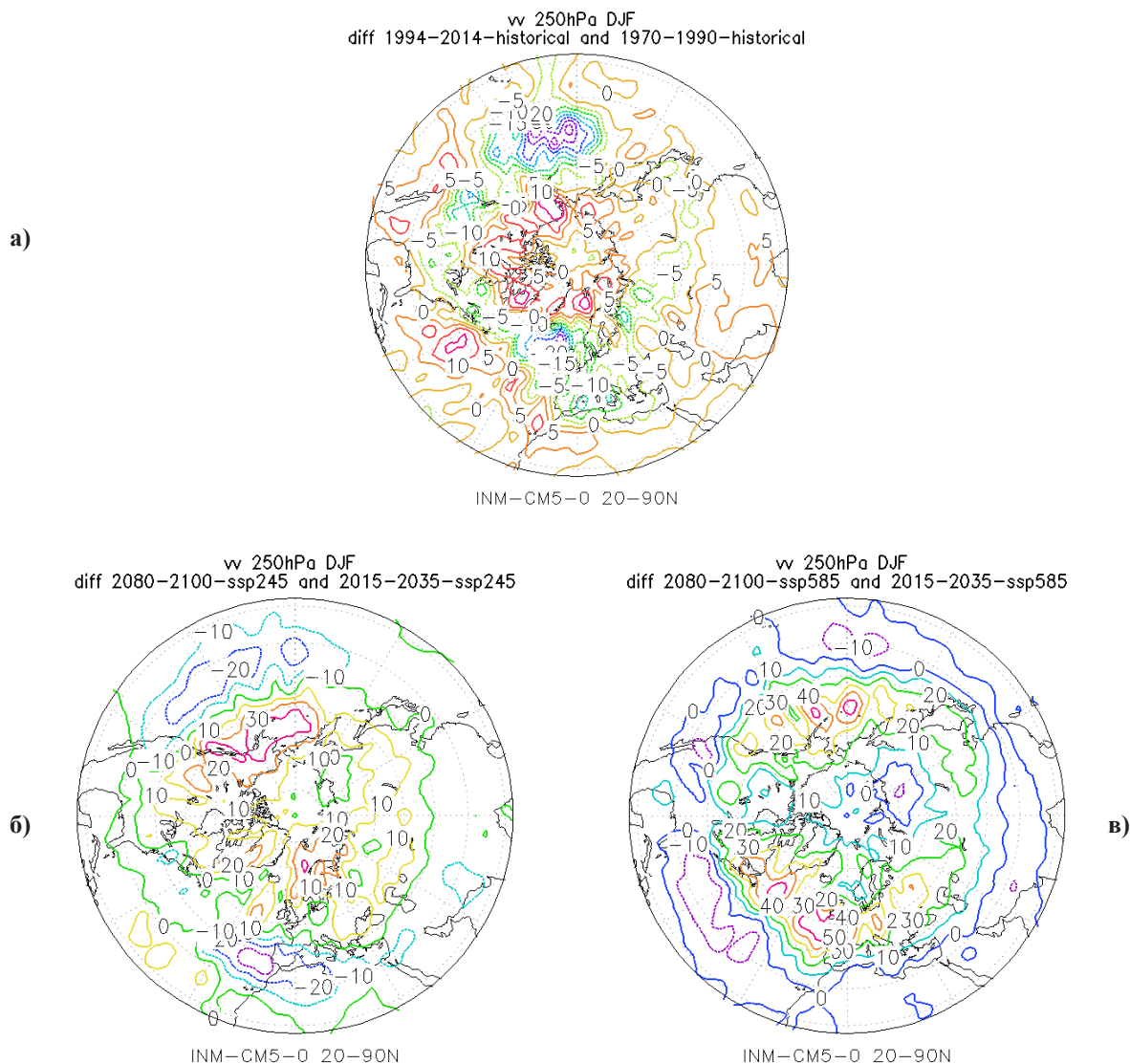
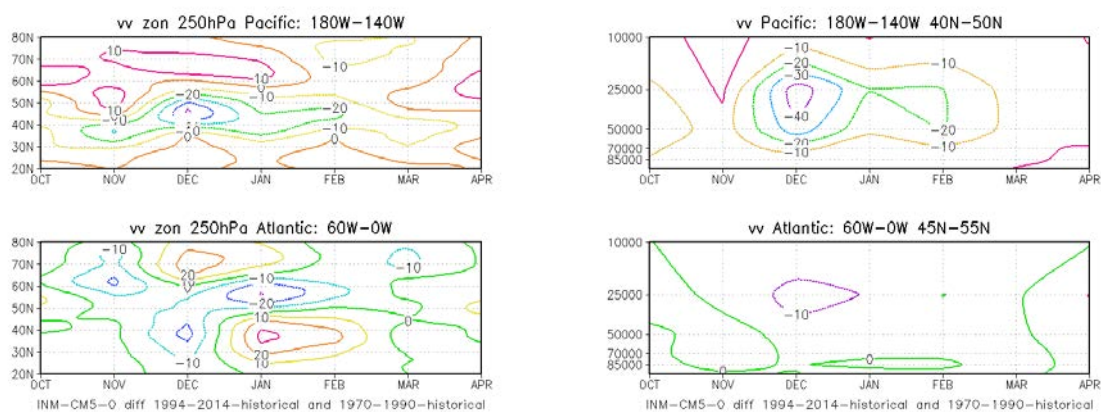


Рис. 1. Разница средне сезонных (DJF) средних по периоду значений $v'v'$ для сценариев Historical (а), SSP2-4.5 (б) и SSP5-8.5 (в).

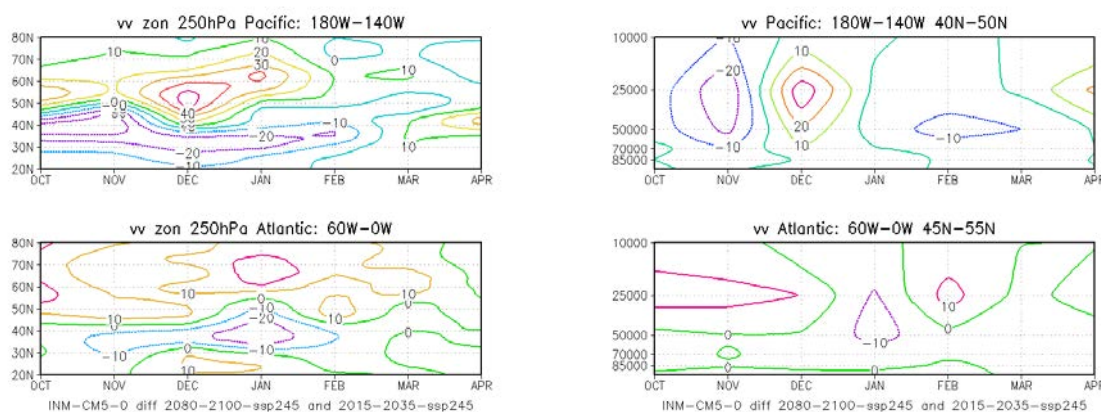
Изменчивость ШТ проявляется так же по высоте (Рисунок 2 справа). Для условий исторического сценария получено существенное уменьшение области проявления СТ в декабре и феврале, при том, что для СА область проявления со временем по высоте почти не меняется. Аналогичное поведение СА демонстрирует и для умеренного сценария SSP2-4.5, тогда как для СТ получено его ослабление по высоте в ноябре и феврале, и усиление в декабре. Более агрессивные климатические условия сценария SSP5-8.5 провоцируют существенные высотно-временные изменения рассматриваемых ШТ. Оба ШТ существенно усиливаются и расширяются по высоте в декабре и ослабевают в марте.

Важно подчеркнуть, что во времени наибольшие изменения активности ШТ происходят не в месяцы их максимальной активности, а позднее – тогда, когда их амплитуда начинает уменьшаться.

Historical



SSP2-4.5



SSP5-8.5

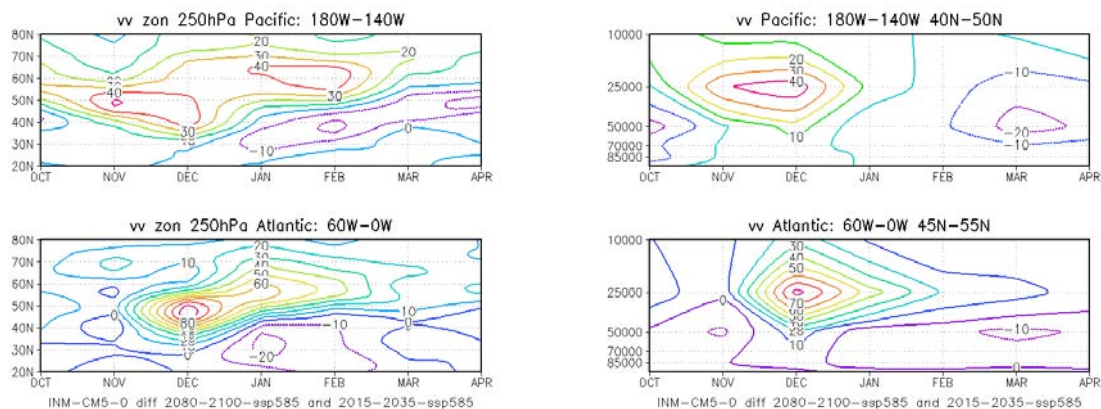


Рис. 2. Широтно-временные (слева) и высотно-временные (справа) диаграммы разницы среднемесячных значений $v'v'$ для Тихоокеанского и Атлантического шторм треков для сценариев Historical, SSP2-4.5 и SSP5-8.5.

Климатические сценарии задают условия глобальных климатических изменений, определяя в итоге радиационный форсинг и уровень потепления, в целом для планеты. В результате происходит изменение и перераспределение, в частности, региональных вертикальных и горизонтальных градиентов температуры. Эти изменения наиболее сильно проявляются в умеренных и Арктических широтах. В свою очередь, это может оказывать существенное влияние на расположение и интенсивность ШТ СП. В работе были получены существенные различия между поведением СТ и СА в разных климатических условиях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-05-00370).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Chang E., Lee S., Swanson K. Storm Track Dynamics. *J. Climate*, 2002, V. 15, P. 2163–2182.
2. Chang E., Guo Y., Xia X., Zheng M. Storm-Track Activity in IPCC AR4/CMIP3 Model Simulations. *J. Climate*, 2013, V. 26, P. 246–260.
3. Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В., Галин В.Я., Лысков В.Н., Гришун А.С., Дианский Н.А., Гусев А.В., Яковлев Н.Г. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2017, Т. 53, № 2, С. 164–178.
4. Володин Е.М., Гришун А.С. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5 // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2020. Т. 56, №3. С. 1-12
5. <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>
6. O'Neill B.C., Tebaldi C., van Vuuren D.P., Eyring V., Friedlingstein P., Hurtt G., Knutti R., Kriegler E., Lamarque J.-F., Lowe J., Meehl G.A., Moss R., Riahi K., Sanderson B.M. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // *Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9. P. 3461–3482.
7. Варгин П.Н., Мартынова Ю.В., Володин Е.М., Кострыкин С.В. Исследование шторм-треков Северного полушария // *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*, 2019, Том 1, №. 4, С. 145-152.
8. Wallace J., Lim G., Blackmon M. Relationship between cyclone tracks, anticyclone tracks and baroclinic waveguides. *J. Atmos. Sci.*, 1988, V. 45, P. 439–462.

First results of the research of thermal comfort conditions in the largest administrative centers of the Russian Federation

¹Kakovkina A., ^{1,2}Konstantinov P.

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

²RUDN University, Laboratory of smart technologies for sustainable development of urban environment under global changes, Moscow, Russia

E-mail: Anna.kakovkina@mail.ru, kostadini@mail.ru

Nowadays, people have long learned how to regulate the microclimate conditions at home and at work using air conditioning, ventilation, heating systems and various construction methods. However, going out into the street, a person is faced with conditions that are much less amenable to his control. In residential areas associated with a long stay and rest of the population, a more comfortable thermal state is achieved by architectural and urban planning methods.

In 2019, the share of the urban population in Russia amounted to 75.6%, and administrative centers are the main centralization centers of population the most regions of the county (Rosstat, 2019), where the presence of not only a tense, and sometimes critical, environmental situation affects the health of the population (Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, 1992), but also urban heat islands. This indicates that the climate assessment of thermal comfort in administrative centers is an urgent issue for bioclimatology.

The objects of this study were selected administrative centers of the constituent entities of the Russian Federation. **The subject** of the study is the bioclimatic comfort index UTCI.

To study the comfort of cities using bioclimatic indices, we took data from a reanalysis of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information - MDC (Meteo.ru), for the period from January 1, 2009 to December 31, 2018, according to the 4 largest administrative centers in Russia. This study examined Moscow, St. Petersburg, Volgograd and Tyumen, as they are the most representative examples.

The following meteorological parameters were used from the database:

- Air temperature (°C),
- Soil temperature (°C),
- Wind speed (m/s),
- Moisture content of air (%),
- Cloud cover (in octants).

The data on the geographical coordinates of cities and their average height above sea level were also introduced to account for radiation flows. Modeling was performed in the RayMan software package to obtain the bioclimatic index UTCI.

Comparing the graphs of changes in winter and summer average seasonal values of the UTCI index for the period 2010-2019 in 4 selected cities, it can be seen that Moscow is the most comfortable city in both winter and summer, where only comfortable conditions (lack of stress) are observed during the summer for 10 years, and in winter it does not fall below moderate cold stress.

In St. Petersburg, indicators are very close to similar of Moscow, but still lower due to increased wind speeds, which affect the perception of cold by a person. In Volgograd, the smallest amplitude of summer temperatures is observed, in contrast to other cities. It is also one of the hottest cities in Russia in the summer, but due to its location in a temperate continental climate, there is a more pronounced difference between winter and summer. Tyumen is located in the sharply continental climate zone, where during the winter period all 10 years there is strong cold stress, and in summer temperatures are on the verge between the absence of stress and weak cold stress.

Первые результаты исследования условий термического комфорта в крупнейших административных центрах РФ

¹Каковкина А.Г., ^{1,2}Константинов П.И.

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

²Научный центр «Смарт технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений» РУДН, Москва, Россия

E-mail: Anna.kakovkina@mail.ru, kostadini@mail.ru

В наше время человек уже давно научился регулировать условия микроклимата дома и на работе с помощью кондиционирования, вентиляции, отопительных систем и разных строительных методов. Однако выходя на улицу, человек сталкивается с условиями, которые намного меньше поддаются его контролю. На территориях жилой застройки, связанных с длительным пребыванием и отдыхом населения, более комфортное тепловое состояние достигается архитектурно-градостроительными методами.

На территории России на 2019 год доля городского населения составляла 75,6%, а административные центры являются главными очагами централизации населения в большинстве регионов страны (Росстат, 2019), где сказывается на здоровье населения наличие не только напряжённой, а иногда и критической, экологической обстановки (Министерство природных ресурсов РФ, 1992), но и городских островов тепла. Это указывает на то, что климатическая оценка термического комфорта в административных центрах является актуальным вопросом для биоклиматологии.

Объектами данного исследования были выбраны административные центры субъектов Российской Федерации. Предметом исследования являются биоклиматический индекс комфортности UTCI.

Для изучения комфортности городов с использованием биоклиматических индексов, были взяты данные реанализа Всероссийского Научно - Исследовательского Института Гидрометеорологической Информации – МЦД (Meteo.ru), за период с 1 января 2009 года по 31 декабря 2018 года по 4 крупнейшим по площади в России административным центрам. В данной работе рассмотрены Москва, Санкт-Петербург, Волгоград и Тюмень, так как они являются максимально репрезентативными примерами.

Из базы данных были использованы следующие метеорологические параметры:

- Температуры воздуха (°C),
- Температура почвы (°C),
- Скорость ветра (м/с),
- Влажность воздуха (%),
- Облачность (в октантах).

Также были внесены данные географических координат городов и их средняя высота над уровнем моря для учёта потоков радиации. Далее, для получения биоклиматических индекса UTCI, было произведено моделирование в программном комплексе RayMan.

Индекс UTCI определяется как температура воздуха эталонного условия, вызывающая тот же отклик модели, что и фактические условия. UTCI был разработан в 2009 году благодаря международному сотрудничеству между ведущими экспертами в области термофизиологии человека, физиологического моделирования, метеорологии и климатологии (Oke, 2017, Błażejczyk, Jendritzky, 2013). Сегодня доступны различные биоклиматические модели, но они имеют ограниченную силу из-за узкого диапазона условий окружающей среды. Общая идея относительно результатов UTCI заключалась в том, чтобы заполнить имеющиеся пробелы и составить индекс, отражающий полную картину комфортности. UTCI корректирует одежду (значение clo) в зависимости от существующих условий на открытом воздухе.

Таблица 1. Градации индекса UTCI (Błażejczyk, Jendritzky, 2013).

Значение индекса UTCI (°C)	Класс физиологического воздействия
$UTCi \leq -40$	экстремальный холодный стресс
$-40 \leq UTCi < -27$	очень сильный холодный стресс
$-27 \leq UTCi < -13$	сильный холодный стресс
$-13 \leq UTCi < 0$	умеренный холодный стресс
$0 \leq UTCi < +9$	слабый холодный стресс
$+9 \leq UTCi < +26$	отсутствие стресса (комфортное состояние)
$+26 \leq UTCi < +32$	умеренный тепловой стресс
$+32 \leq UTCi < +38$	сильный тепловой стресс
$+38 \leq UTCi < +46$	очень сильный тепловой стресс
$+46 \leq UTCi$	экстремальный тепловой стресс

Произведя расчёты по 4 выбранным городам, были построены следующие графики (рис. 1 – 4):

Среднесезонные значения индекса UTCI в Москве



Рис. 1. График изменения зимних и летних среднесезонных значений индекса UTCI за период 2010-2019 гг. в Москве.

Среднесезонные значения индекса UTCI в Санкт-Петербурге

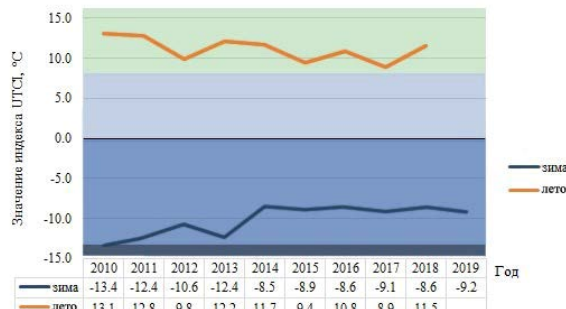


Рис. 2. График изменения зимних и летних среднесезонных значений индекса UTCI за период 2010-2019 гг. в Санкт-Петербурге.

Среднесезонные значения индекса UTCI в Волгограде



Рис. 3. График изменения зимних и летних среднесезонных значений индекса UTCI за период 2010-2019 гг. в Волгограде.

Среднесезонные значения индекса UTCI в Тюмени

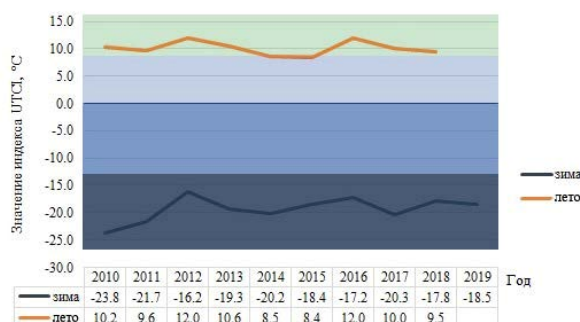


Рис. 4. График изменения зимних и летних среднесезонных значений индекса UTCI за период 2010-2019 гг. в Тюмени.

Сравнив графики изменения зимних и летних среднесезонных значений индекса UTCI за период 2010-2019 гг. в 4 городах, видно, что наиболее комфортным городом и в зимний, и в летний периоды является Москва, где в летний период в течение 10 лет наблюдаются только комфортные условия (отсутствие стресса), а в зимнее не опускается ниже значений умеренного холодового стресса.

В Санкт-Петербурге очень близкие показатели к показателям Москве, но всё же ниже из-за повышенных скоростей ветра, которые влияют на восприятие холода человеком.

В Волгограде наблюдается наименьшая амплитуда летних температур, в отличие от остальных городов. Также он является одним из самых жарких городов России в летний период, но из-за расположения в умеренно-континентальном климате, наблюдается более выраженная разница между зимними и летними показателями. Такими образом в период 2010-2012 гг. и в 2017 г. среднегодовые значения опустились до сильного холодового стресса, а в период 2013-2016 гг. и 2018-2019 гг. – до умеренного холодового стресса.

Тюмень находится в резко-континентальной климатической зоне, что и проявляется на рис. 4, где в зимний период все 10 лет наблюдается сильный холодовой стресс, а летом температуры находятся на грани между отсутствием стресса и слабым холодовым стрессом.

Впоследствии планируется рассчитать полную статистику индексов PET и UTCI по всем административным центрам РФ и таким образом получить впервые полную климатологию условий термического комфорта за последние 10 лет на территории России.

Исследование было выполнено при поддержке проектов РФФИ №19-29-05187 и 18-35-20052

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Oke T. R., Mills G. *Urban Climates*. Cambridge University Press – 2017. p. 546
2. Błażejczyk K., Jendritzky G., Bröde P., Fiala D. *An introduction to the universal thermal climate index (UTCI)* // *Geographia Polonica Volume 86, Issue 1*, Польша, Варшава, 2013. pp. 5-10
3. *Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. Приказ Минприроды России. От 30.11.1992.* <http://docs.cntd.ru/document/901797511> (дата обращения: 09.04.2020)
4. *Росстат, численность населения России по категориям* https://gks.ru/bgd/regl/b19_111/Main.htm (дата обращения: 09.04.2020)

**Weather and Climatic
Extremes:
Data, Analysis and Impact**

September 8•10

**WCEDAI
2020**

8•10 сентября



**Климатические
и погодные
экстремальные
явления:
данные, анализ
и воздействие**



Windthrows in the pine forests of the Tsagan-Daban ridge (central part of the Selenginsky high mountains)

Chernykh V.N., Alymbaeva Zh.B., Andreev S.G., Ayurzhanayev A.A., Tsydyapov B.Z.

Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia
E-mail: geosibir@yandex.ru

Siberian cedar pine (*Pinus sibirica*), or cedar is a particularly valuable tree species. Cedar forests grow in the Republic of Buryatia on the Khamar-Daban and East Sayan ridges, in the Barguzinsky and Ikatsky ridges, in the taiga of the Ulan-Burgas, Tsagan-Daban, Kurbinsky, Khudansky, Malkhan, Yablonovy ridges, etc. Despite its vast geography, the share of cedar forests in forest plantations in Buryatia, according to the Republican Forestry Agency, is only 8.9%. In the taiga of the Tsagan-Daban ridge, pine forests occupy small territories that play an important role as areas for the collection of pine nuts and many other species of wild plants.

The presence of large-scale windthrows in the pine forests of the Tsagan-Daban ridge was established in the fall of 2018. In June 2019, a damaged stand was inspected at the watershed between the basins of the Kuitunka and Bryanka rivers. As a result of inspection of the taiga area, significant damage to the pine forests by a storm wind was revealed over an area of about 4 km².

To study windfalls, an integrated approach was used, based on the use of Landsat 8 data, surveys from UAVs and materials of field route descriptions. The forest mask with the identification of dark coniferous taiga as the distribution border of cedar forests was created from images of 2017 using the ISODATA uncontrolled classification. The contours of the windfalls were distinguished from the pictures of 2019 using the SWVI index. For a more accurate assessment, satellite imagery data was combined with orthophoto from UAV camera. Verification of the results with an assessment of the extent of damage to the stand was carried out in the area of Omulevaya Mount.

The study revealed discreteness in damage to the stand. Some areas of damaged pine forests in the taiga of Tsagan-Daban, ranging from 1 to 5 ha, are replaced by areas with intact coniferous-small-leaved vegetation. It is established that the total area of windfalls is 324.6 ha. Similar windfalls in the taiga of Tsagan-Daban were not previously recorded.

This work was supported by the state assignment of BIP SB RAS and RFBR grant No. 19-55-53026.

Extreme climate events as an influence factor on the Volga delta ecological systems

Valov M.V., Barmin A.N., Tatarintsev S.A., Kolchin E.A.

Astrakhan State University, Astrakhan, Russia
E-mail: m.v.valov@mail.ru, abarmin60@mail.ru, tatarintsev86@yandex.ru, eakol4in@rambler.ru

The Volga delta is an intrazonal territory located within the desert zone, therefore inter-relations of heat resources and moisture belong to the most important factors of ecosystems dynamics and functioning.

Region climate specific features are in abrupt continentality, high degree of aridity, temperature and precipitation amount considerable variability as to separate seasons as generally on an annual basis. Average precipitation amount is 180-200 mm per year, and fall, mainly, in warm period. Substantial lack of precipitations occurs under the annual 1177 mm evaporation.

Landscape-ecological investigations were carried out to reveal the main involved dynamics tendencies in the process of landscape components natural management - soils and vegetation- under the contrast changes of moisture conditions on 137 model platforms in the Volga delta according to the standard methods in the years with contrast water availability conditions.

Performed investigations of climate conditions showed that two time periods with different conditions of heat and water availability, complicated by the river hydrological regime control, the Caspian level fluctuations, land-use pattern and anthropogenic impact degree are distinguished in the period since 1978 till 2016 such as moisty-warm period 1978-2005 and warm-dry phase 2006-2016 in the last years (2017-2020), increasing aridity degree is softened by increased volumes of spring-summer floodings.

It is revealed that multidirectional hydrothermal conditions extreme values influence negatively on quick territory soil-vegetation cover characterization changes.

The delta water availability decrease in combination with extreme high temperature rates has an impact on abrupt salinity degree increase and landscape natural boundary soil cover toxic level of all levels. Transition to more toxic sulfate-chloride type is fixed under general multiyear salinity chloride-sulfate type of low and mild levels deltoid territories in dry years. Salinity soil type conversion in this direction is explained geochemically by exudative hydrological regime predomination over percolative in the delta under proximity to highly mineralized subsoil waters day surface.

The deltoid territories siccation and salinity have an impact on changes in vegetation cover: general vegetation biomass decreases, hygro and mesophytes fall from grass stand and their substitution occurs by types with more xerophile orientation.

Changes of temperature and precipitation extremes in the south of Russia associated with El Niño events

Vyshkvarkova E., Sukhonos O.

Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia

E-mail: aveiro_7@mail.ru, kovalenko_olga89@mail.ru

The temperature and precipitation behavior has significantly changed during past centuries. This also applies to the extreme events of temperature and precipitation. El Niño has a significant influence on weather and climate extratropical regions of the Earth. Thus, the aim is to investigate the spatial-temporal distribution of extreme temperature and precipitation in the South of Russia over 1950–2018 and manifestation of different El Niño types.

Daily observational data of precipitation totals, daily minimum and maximum temperatures from meteorological stations for period 1950–2018 in the South of Russia were using. The indices of temperature and precipitation extremes in the study were selected from the list of climate change indices recommended by the World Meteorological Organization–Commission for Climatology (WMO–CCL) and the Research Programme on Climate Variability and Predictability (CLIVAR) Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices (ETCCDMI). Selected indices represent frequency of extreme temperature and intensity of extreme precipitation (TN10p – Cool night, TX90p – Warm days, Rx1day and Rx5day). Time series for selected extreme climate indices for each station on annual and monthly scale were calculated. In this study the El Niño classification by Lubkov et al. (2017) was used. According to this classification, two types of events are distinguished: spring-summer eastern and autumn central types. Manifestation of different types of El-Niño was estimated by composite analysis.

Analyzed distribution of temperature and precipitation extremes in the South of Russia and their long-term changes for period 1950–2018 showed significant changes in behavior of climate extremes during the studied period. Significant linear trends of cool nights and warm days indicate a warming in the region. Distribution of extreme precipitation trends is characterized by much stronger temporal and spatial variability than temperature extremes. The analysis of long-term precipitation changes generally showed insignificant increase to wetter conditions.

Quantitative estimates and features of the manifestation of events of El Niño of various types in extreme temperatures and precipitation were identified. Obtained results demonstrate the importance of examining the different El Niño types in the study of El-Niño regional manifestations.

The reported study was funded by RFBR and Sevastopol, project numbers 18-45-920063 and 20-45-920015.

REFERENCE:

1. Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V. Objective classification of El Niño phenomena // *Use and protection of natural resources in Russia*. 2017. №1 (149). P: 41 – 44. [in Russian]

Geoecological analysis of the influence of climate factors on the formation of technogenic danger of arid territories

Tatarintsev S.A., Valov M.V., Barmin A.N., Kolchin E.A.

Astrakhan State University, Astrakhan, Russia

E-mail: tatarintsev86@yandex.ru, m.v.valov@mail.ru, abarmin60@mail.ru, eakol4in@rambler.ru

At the turn of the XX-XXI centuries, the complex influence of external (natural) and internal (man-made) factors leads to the emergence of hazards in the territories with the possibility of their further spread. Currently, the trend of climate variability, coupled with increasing anthropogenic impact on the territories (increasing the area of built-up areas, increasing traffic load, the development of various industries, industries and services), form a favorable environment for the occurrence of industrial accidents and, consequently, increase the level of technological risk.

A characteristic feature of arid territories is the fragility and instability of their landscape and the entire ecological balance, their susceptibility to further degradation towards desertification. In the process of transformation of an arid territory, the totality of sources of anthropogenic impacts changes all components of its natural geosystems. This leads to the need for a comprehensive study of the technogenic impact on the components of the natural complex and the identification of adverse geoecological situations in these territories. Of particular importance is also the development of science-based approaches to the creation of systems for geo-ecological monitoring of the environment of these territories using geoinformation technologies and thematic geo-ecological mapping as important tools for territorial planning and ensuring sustainable development of the environment.

The Astrakhan region is a striking example of an arid area that is subject to man-made stress due to the influence of climate factors. The climate features of the region are sharp continentality, a high degree of aridity, and significant variability in temperature and precipitation, both in individual seasons and on an annual basis in General. The average amount of precipitation is 180-200 mm per year and falls mainly during the warm period. Strong winds of mainly easterly direction with a speed of 25 m / s, typical for this region. Thus, climate-forming factors (wind load, temperature regime, precipitation) directly affect the state of technogenic danger of the territory.

In order to develop a complex of measures aimed at prevention of possible negative situations related to the impact of climatic factors influencing technogenic danger arid areas held geoecological analysis of their impact on the territory and the proposed method of assessing their impact on the state of technogenic danger arid areas. The method is based on a systematic approach based on the application of fuzzy set theory.

Mapping of hazardous hydrological events in the Russian part of Selenga river basin

¹Garmaev E.Zh., ¹Tsydypov B.Z., ¹Ayurzhanayev A.A., ¹Sodnomov B.V., ²Pyankov S.V.,

²Shikhov A.N., ²Abdullin R.K.

¹ Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia

² Perm State University, Perm, Russia

E-mail: bz61@binm.ru, gis@psu.ru

The Selenga River is the main tributary of the Lake Baikal. Its basin is characterized by a fairly high degree of economic activity. The Russian part of the Selenga river basin accounts for 27 % of the territory of the Republic of Buryatia, but about 85 % of its population and more than 75 % of the regional product. Floods in the Selenga river basin are one of the most hazardous natural phenomena, which cause a threat to people's lives and enormous damage for settlements and infrastructure.

In this study, we compiled the three-level GIS database of hazardous hydrological events in the Selenga river basin from the start of observation. The database structure is developed according to the scheme (Napolitano et al., 2018). The first level (phenomenon) represents the flood event reported by hydrological gauges of Russian hydro-meteorological service, and also in any settlement or other location (e.g. flooding of infrastructure facility). The second level (flood event) is the ensemble of the flood reports occurred along any river in a limited period. The flood events are related to "triggers", that are weather events causing flood (e.g. heavy rainfall or intense snowmelt). The observed precipitation amount and short description of synoptic-scale environments will be provided for each weather event triggering flood.

Rivers and flooded settlements are two basic GIS layers for the database. For 60 settlements which have high or moderate flood risk, the flood zones are estimated and uploaded as additional information source in the database. The flooded areas in the settlements were delineated using various methods, namely hydro-morphological surveys, leveling of sections along the riverbed and floodplain (in total 151 profiles), as well as hydrodynamic modeling of flooding processes using the HEC-RAS program developed by U.S. Army Corps of Engineers. The flood zones are simulated for maximum water levels with 100, 33 and 20-years frequency. In particular, the total flooded area within the city of Ulan-Ude for maximum water level of 100-years frequency is estimated as 38 km² (10 % of the city's area). The lists of economic facilities located in the flooded areas are formed for each settlement.

The maps of flooded areas are compiled for each of 60 flooded settlements, and the database users will have access to these maps. In the future, the compiled flood database will be published on the online web map service «Hydro-ecological safety in the Selenga river basin».

The reported study was funded by the Russian Scientific Foundation Project No 20-17-00207.

REFERENCE:

1. Napolitano, E., Marchesini, I., Salvati, P., Donnini, M., Bianchi, C., Guzzetti, F. *LAND-deFeND – An innovative database structure for landslides and floods and their consequences. Journal of Environmental Management*, 2018. Vol. 207, pp. 203–218.

Assessment and forecast of regional risks and medical and social consequences in conditions of climate change

¹Efimova N.V., ²Gornov A.Yu., ²Zarodnyuk T.S., ²Anikin A.S.

¹ East Siberian Institute of Medical and Environmental Research, Angarsk, Russia

² Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory SB RAS, Irkutsk, Russia

E-mail: medecolab@inbox.ru, gornov@icc.ru, tz@icc.ru, htower@icc.ru

Given that in the past decade, the climate change is considered one of the most important problems facing humanity, we can expect that under these conditions there will be a violation of previously identified patterns in existing systems, including biotic and abiotic elements. The purpose of the work is a qualitative and quantitative assessment of the results of short- and medium-term forecasting of the child population morbidity when changing natural and anthropogenic environmental factors. The studies were carried out on the example of Bratsk, as it is characterized by severe climatic conditions and high air pollution.

Using the experience gained earlier, a methodology has been developed to establish the functional dependence of the morbidity on environmental and social factors, which includes: the statement of the parametric identification problem with the functional, which is the minimum of the deviations from existing experimental data; its solution using the PARABOL program based on the method for the global extremum search of the minimized functional.

A mathematical formalization of the dependence of the population morbidity on the main most influential factors is proposed: the average annual air temperature, the availability of the doctors, the average annual wind speed, air pollution, and social conditions. The model used observations for the period from 1995 to 2006. The unknown coefficients were calculated using the least squares method: the minimum of the sum of the differences squares between the calculated and experimental data was found. To assess the accuracy of forecasts, the indicated data for 2009 and 2018 were used.

It was shown that in the case of extremely high atmospheric air pollution, one conditional unit of this indicator “accounts for” 43 cases of diseases, and if the indicator decreases to a moderate level, with a general reduction in the requests number for medical help, one unit of the atmospheric air pollution indicator will determine 92 cases. The contribution of natural factors (air temperature, wind speed), was relatively low (0.6-2%).

It was established that in 1990–1999, the average annual air temperature fluctuated within close limits. The forecast of the morbidity rate for 2009 and 2018 in the child subpopulation had the good accuracy (82–83%). In the group of teens, the accuracy of the forecast of the morbidity in 2018 was low – only 20%. In connection with the above, it is necessary to continue the study of the model and consider other approaches to predicting the behavior of the complex medical-ecological-social systems. Testing the simulation using the artificial neural network method according to the parameters of 2018 showed the following. The accuracy of the prediction of adolescents was 87 %, which makes it possible to use this alternative approach to study optimization problems of the considerable type.

Thus, the obtained dependencies allowed to develop the prognosis of the morbidity for the various population groups based on the possible change in environmental conditions. In addition, the analysis of forecast uncertainties determines the further areas of the research: the expansion of the factors number included in the model; the use of the models, in one of which it is necessary to study the laws governing the formation of chemical air pollution when changing weather conditions and the composition of industrial emissions; the use of deep machine learning models and fractional rational functions approximating the initial data in order to increase the accuracy of the obtained solutions and form short-term and medium-term forecasts.

This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 18-07-00587.

Estimated influence of extreme climate events in 21st century on radial growth of pine in Povolzhie region (European Russia)

Matskovsky V., Semenyak N., Morozova P., Kuznetsova V., Solomina O.

Institute of Geography RAS, Moscow, Russia
E-mail: matskovsky@igras.ru

Climate change projected for the 21st century is expected to affect different forest ecosystems with corresponding ecological, economic, and social impacts. Modeling is extensively used to estimate the impacts of climate change on tree species distributions, as well as for tree growth projections based on climate change scenarios. Here we use a process-based forward model of tree growth, VS-Lite, calibrated and independently validated on tree-ring data and forced by climate projections according to different greenhouse gases emissions scenarios. We estimate ensemble radial tree growth of pine for five selected sites in Povolzhie region in the 21st century. We further statistically estimate how projected changes of distributions of climatic extremes affect extremes in projected radial tree growth. The results of this study are crucial for the strategies of development of Povolzhie region in the near and remote future.

Negative impact of dangerous hydrometeorological phenomena on the processes of recreation and tourism in the Astrakhan region

Kolchin E.A., Barmin A.N., Valov M.V., Tatarintsev S.A.

Astrakhan State University, Astrakhan, Russia
E-mail: eakol4in@rambler.ru, abarmin60@mail.ru, m.v.valov@mail.ru, tatarintsev86@yandex.ru

Strong interest to the tourism is noticed in the regions with natural and cultural-historical requisites in the last years. Such interest in Astrakhan region is mainly due to uniqueness and landscape conditions variety. Climate- recreational potential in the region, in general, has high value, that provides functioning and development of this activity type wide range.

Period from August till mid of October is the most favourable, comfort season for tourism, because in this period exhausting summer heat decreases, air humidity increases little bit, at the same time there is adequate sun and light. In another time, limiting factors of hydrometeorological events occurrence have an impact on the process of recreational-resources potential use in the region.

It is possible to distinguish air temperature regime extreme values among meteorological events. Dry weather and exhausting heat are noticed in the mid and at the end of summer. Air temperature in the Volga delta in this period reaches 41-43°C. In such conditions, human's body is in stress state, working muscles blood supply is worsen, quick dehydration and excessive heat of the whole organism occurs, there is a great chance to get heat-stroke.

The other limiting factor is a little amount of precipitations in summer season, values of which can reach merely 55 mm. Evaporation for vegetative season is 900-1000mm. Such difference between evaporation and amount of falling precipitations in the summer season tells about moisture lack (air humidity in summer period is 30% and lower) and arid climate. Skin overdrying and mucosa occurs and organism water depletion in general in such conditions.

Strong winds mainly of eastern direction with the 25m/s speed, which are peculiar to this region, are deterrent effect for tourism and recreation and dust-storms are contributing factor. In this period, fine sand dust when breath penetrates in lungs and on nose and eye mucosa, causing not only mechanical irritation, but allergic reactions. Nontypical viruses for the region move on the least sand particles.

It is necessary to distinguish period of flooding in Volga-Akhtubinsk alluvial land and the Volga delta among hydrological and them contributing factor, when the great part of the territory is covered with water and make it difficult to go to coast line. Seasonal black fly emergence are noticed, that makes discomfort for summer recreation.

In spite of different dangerous hydrometeorological events, Astrakhan region climate-recreational potential, in general, has a high value, that that provides functioning and development of this activity type wide range.

Estimates of potential damages in monetary terms from dangerous and adverse meteorological phenomena on the territory of the Russian Federation

¹Sterin A.M., ²Oganesyan V.V.

¹ FSBE "RIHMI-WDC", Obninsk, Russia

² Hydrometeorological Research Center of Russian Federation – FSBE "Hydrometcenter of Russia", Moscow, Russia

E-mail: sterin@meteo.ru, vog@mecom.ru

The paper contains estimations of potential damage in monetary expression from some natural hazards and unfavorable meteorological events (strong wind, summer precipitation, winter precipitation, severe frosts), for several important weather-sensitive sectors of economy, such as transportation, agriculture, housing and utilities, fuel and energy complex, communication. The calculations are made by use of the methodology of the Hydrometeorological Centre of Russian Federation on the basis of meteorological observations from more than 1400 stations on the territory of Russia. The estimations for the period 1987-2019 have been analyzed, the results of the analysis are presented both for separate years, separate phenomena, separate sectors of economy, territories of separate Regional Offices for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (ROHEMs), and for different options of generalization. Estimations of potential damage in monetary terms from meteorological phenomena are being compared with climate records of anomalies of the relevant meteorological parameters in the same period. A high level of agreement between them is observed.

The macro economical estimates of potential damage from the natural hazards of meteorological origin as fraction of GDP are estimated for a year 2017 which was selected as a reference year. It is demonstrated that the macro economical estimates, on one hand, and summarized (by main phenomena and by main sectors of economy) estimates of potential damages for the territory of Russian Federation, that were obtained by our calculations, on the other hand, both being expressed in comparable monetary way, well correspond to each other.

Accuracy assessment of heavy rainfall forecasting in the Krasnodar territory with the use of ICON-EU regional atmospheric model

¹Shikhov A.N., ²Belyakova P.A., ³Perminov S.I., ⁴Moreido V.M.

¹Perm State University, Perm, Russia

²Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia

³SCANEX Group, Moscow, Russia

⁴Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia

E-mail: and3131@inbox.ru, perminovsi@yandex.ru, moreido@mail.ru

The mountain part of the Krasnodar territory in Russia is regularly affected by heavy rainfall which induce destructive floods. It is important to figure out precipitation forecasts accuracy as it is crucial input for any rainfall-runoff model used for hydrological forecasting.

In this study, we assessed the accuracy of short-term (27-h) precipitation forecasts of ICON-EU regional NWP model operated by the Weather Service of Germany. The model provides numerical forecasts with 6.5 km grid size and 1-h time step twice a day (from 00 h UTC and 12 h UTC). The spatial resolution of the ICON-EU outputs is higher than any other free-available data of global atmospheric models. Quantitative precipitation forecasts (QPF) were compared with the observed precipitation amount from 54 weather stations of the Russian hydro-meteorological service. The precipitation forecasts were interpolated to meteorological stations coordinates using bilinear interpolation method.

During the study period (from January 1, 2019 to March 31, 2020), 160 heavy rainfall reports (≥ 30 mm/12 h) were obtained from the weather stations. Heavy rains were reported for 54 different days during all months of the year except April, and the maximum number of events (25) was reported in August. We compared the forecast and observed precipitation amount for all days when heavy rainfall event was reported by any weather station.

The forecast skill was estimated with two indices such as Threat Score (TS) and Extreme Dependency Score (EDI, Kiktev et al., 2017). Both indices were calculated based on the contingency table of observed and forecast precipitation. We found out that the forecast skill in a cold season (October-March) is substantially higher than in a warm season (April-September). In a warm season, the number of false negative forecasts (FN) is 3-6 times higher than the number of true positive (TP) and false positive (FP) ones. The similar result was obtained while assessing the accuracy of COSMO-Ru2 precipitation forecasts for warm and cold seasons (Rivin et al., 2017).

Most of local (reported by 1-2 weather stations) heavy rainfall events in summer are not reproduced by the ICON-EU model. Moreover, if the event was reported by several weather stations (i.e. covered a large area), the model underestimated precipitation two to three times. Consequently, the EDI values in the warm season are 0.47 and 0.36 respectively for forecasts from 00 and 12 h UTC. On the contrary, in the cold seasons the heavy rainfall events were well-reproduced by the model, that caused high EDI values (0.76 and 0.78 respectively for forecasts obtained from 00 and 12 h UTC). The number of FP in the cold seasons was 2.5 times higher than the number of FN, which indicated the slight overestimation of forecast precipitation.

The obtained results indicate that the ICON-EU model precipitation forecasts should be used separately for warm and cold seasons in goals of hydrological forecasting. Hourly precipitation forecasts will be used as input for event-based rainfall-runoff KW-GIUH model (Lee&Yen, 1997) and for continuous hydrological modeling based on machine learning methods. Precipitation input for warm season hydrological forecasting should also include radar precipitation nowcasting.

The reported study was funded by RFBR and the Krasnodar Territory, Research Project № 19-45-233007.

REFERENCES:

1. Kiktev D., Joe P., Isaac G.A., Montani A., Frogner I.-L., Nurmi P., Bica B., Milbrandt J., Tsyrlunikov M., Astakhova E., Bundel A., Bélair S., Pyle M., Muravyev A., Rivin G., Rozinkina I., Paccagnella T., Wang Y., Reid J., Nipen T., Ahn K.-D. *FROST-2014: The Sochi winter olympics international project // Bulletin of the American Meteorological Society. 2017. Vol. 98(9), P. 1908–1929.*
2. Rivin G.S., Rozinkina I.A., Bagrov A.N., Blinov D.V., Kirsanov A.A., Kuzmina E.V., Shatunova M.V., Chumakov M.M., Alferov D.Yu., Bundel A.Yu., Zaichenko M.Yu., Nikitin M.A. *Mesoscale model COSMO-Ru2 and results of its operational tests // Informational Digest 44. 2017. P.25–55. (In Russian)*
3. Lee K.T., Yen B.C. *Geomorphology and kinematic-wave based hydrograph deviation // J. Hydraul. Eng. 1997. Vol.123. P.73–80.*

Features in spatial distribution of higher order cumulants of meteorological anomalies in the Northern Hemisphere

¹Loginov S.V., ^{2,3}Eliseev A.V., ¹Kharyutkina E.V.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

E-mail: kh_ev@imces.ru

The goal of the work is to assess the frequency of extreme weather events formation and to identify areas with a significant contribution of nonlinear interactions to the general dynamics of arising atmospheric instability. The solution of this goal will help to answer the question of how unprecedented the current increase in the frequency of extreme weather events is.

A statistical model of the frequency of extreme weather events formation was used. It based on the cumulative expansion of the probability distribution function. The spatial distributions in the characteristics of fluctuations variability (cumulants - asymmetry and excess) of air humidity (Q), temperature (T), geopotential height (Z) and components of the wind velocity (zonal (U), meridional (V) and vertical (W) in isobaric coordinates) were calculated based on CMIP6 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 6).

Atmospheric (meteorological) variability is subdivided into components corresponding to different time scales: a) synoptic (SV, 2-7 days) and low-frequency (LV, 10-30 days). The calculations were carried out for warm and cold seasons over the Northern Hemisphere. Samples, constructed for each value, took into account the scale of variability and the season of the year. Model calculations were carried out for three 50-year time intervals: the historical time interval (Historical), the interval with a constant atmospheric carbon dioxide concentration (PiControl) and the period, started since 2016 - numerical experiment under anthropogenic impact scenario (SSP5-8.5).

Thus, from the analysis of the spatial distribution maps in asymmetry, it follows that under anthropogenic warming in cold season, the probability of Q anomalies occurrence decreases (for SV in high latitudes and in the energy active zones of the Pacific and the Atlantic oceans, and in the oceans over the equator and the tropics). The probability of the anomalies development increases for T and W (for LV over Siberia) and decreases for U. Moreover, from the analysis of the spatial distribution in excess, it follows that the amplitude range of W disturbances increases in the equatorial and tropical zones of the oceans.

Thus, it was found that in climatic projections the intensity of nonlinear horizontal processes decreases, while an increase in the intensity of the vertical air flows was revealed under the anthropogenic warming.

The study was supported by the state budget theme No. AAAA-A17-117013050031-8 and by the RFBR project No. 18-05-00087 a.

High-resolution wind speed and waves modeling, and an assessment of mesoscale peculiarities caused by coastline parameters and relief at near-shore Kara Sea regions

Platonov V.S., Kislov A.V., Myslenkov S.A.

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

E-mail: vplatonov86@gmail.com, avkisllov@mail.ru, stasocan@gmail.com

Complex shorelines and coastal relief influence strongly on the wind speed and, including bathymetry, on the wave regime of seas. Forecast of severe hydrometeorological events in Arctic coastal zones is crucial for port infrastructures, marine operations, icing conditions, etc. These extreme events have in most cases a mesoscale nature, that limits its predictability significantly. Since the Arctic is poorly covered by ground observations, one of the most reasonable approaches to investigate these events is hydrodynamical high-resolution modeling.

In this work we are applying the COSMO-CLM [Rockel, 2008] and WaveWatchIII [Tolman, 2014] models to reproduce of wind and waves fields and characteristics in different rugged shore conditions. Some model

experiments designed with the regional climate non-hydrostatic atmospheric model COSMO-CLM investigated the best configuration to reproduce mesoscale circulations in the Arctic coastal zones considering different relief conditions. A good testbed for such experiments is the Kara Sea, because there are different conditions of coastline, relief peculiarities, islands of various scales, etc. Some mid-term experiments (three months timespan: Aug-Oct 2012 and Jul-Sep 2014) were conducted over the Arctic domain and specially over the Kara Sea region using the downscaling approach with ~ 12 and ~ 3 km horizontal resolutions. After that, the WaveWatchIII model was applied to reproduce wave conditions in the Kara Sea using different wind forcing – global NCEP-CFSv2 reanalysis data (0.20 res.) and COSMO-CLM of 12 and 3 km res. Considering periods were characterized by some storm events.

The main focus of these experiments was to reproduce surface wind and wave characteristics the best way, especially near the shorelines during storm events. Different experiments' options were applied to reveal the best COSMO-CLM model configuration, e.g. "spectral nudging technique", changing time step, nested domain area. Special unstructured high-resolution grid was prepared in WaveWatchIII model for Kara Sea (from 10 km in open sea to 0.7 km in coastal areas).

Verification of wind speed was performed on 12 coastal meteorological stations of Kara Sea and surroundings based on the near-neighbor method and showed the best configuration of COSMO-CLM with the "spectral nudging" technique and reducing the model time step. Compared with global reanalysis data this configuration didn't show any significant improvement having RMSE ~ 2 m/s and bias ~ 0.2 m/s.

However, verification and detailed investigation of model runs raise a question about the quality of this verification, and how relevant are wind station data in different coastline and relief conditions. Therefore, an additional scale analysis of case studies carried out from synoptic overview to influence of coastline configuration on different mesoscales and for different regions. Malye Karmakuly (Novaya Zemlya island), Belyi island, Dikson island, Marresale and some other sites were considered as different examples to study wind and waves regime. Experiments with different resolutions, options were compared and analyzed for mesoscale atmospheric circulations and waves characteristics dynamics. Wind shadows, channel winds, atmospheric waves propagation were revealed using spatial coastlines scale analysis, vorticity analysis. Quantitative estimations of mesoscale circulations features compared to theoretical relations showed significant influence of shore, relief and bathymetry conditions on mesoscale wind and wave characteristics near the coastline. This analysis demonstrated also an important open question about reliability of coastal wind observations depending on local geographical conditions, shown a need to investigate these circulations using numerical modelling to predict it and following waves better.

The reported study was supported by RFBR, research project №18-05-60147.

REFERENCES:

1. Rockel B, Will A, Hense A (eds) (2008) *Special issue: regional climate modelling with COSMO-CLM (CCLM)*, 4, vol 17. Meteorol Z.
2. Tolman, H.: *The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III version 4.18*, (2014). Tech. Note 316, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 2014, available at: <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v4.18.pdf> (last access: 23 June 2018), 2014.

A new detailed long-term hydrometeorological dataset: first results of extreme characteristics estimations over the Russia Arctic seas

Platonov V.S., Varentsov M.I.

Moscow State University, Moscow, Russia

Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: vplatonov86@gmail.com, mvar91@gmail.com

Detailed long-term hydrometeorological dataset for Russian Arctic seas was created using hydrodynamic modelling via regional nonhydrostatic atmospheric model COSMO-CLM [Rockel, Hense, 2008] for a period of 1980 – 2016. In this work we present results of many test experiments, an optimal model configuration choice, long-term experiments evaluation techniques and primary analysis of obtained dataset. The scheme of proposed runs based on 2-step downscaling from global reanalysis data to ~ 12 km grid domain and then to ~ 3 km grid domains over Barents, Kara and Laptev seas. Presently, the base domain (~ 12 km) experiments are completed only, therefore the following results are only concerned to it.

Experiments were conducted for model domain including Barents, Kara and Laptev seas, with ~12 km grid. Many test experiments with different model options for periods August-September 2015 (summertime) and December-January 2012-2013 (wintertime) were evaluated to determine the best model configuration. More than 400 meteorological stations data used for experiments verification. As a result, model errors in a new model version 5.06 reduced compared to version 5.0 due to refined turbulence parameterizations, as well using the “spectral nudging” technique. Also, there are no significant differences between ERA-Interim and new detailed ERA5 reanalyses as driving conditions, therefore the final experiments were conducted using ERA-Interim reanalysis [Platonov, Varentsov, 2019].

Scheme of an additional “assimilation” of soil properties from ERA-Interim global reanalysis data was suggested to avoid possible errors increment, particularly due to soil draining in the model. This technique was used worldwide for long-term experiments aimed to create hydrometeorological datasets. We have started our experiments every month using reanalysis soil data as initial and boundary conditions, i.e. reinitialized model every month. Final long-term consequent experiments over the base domain were simulated on MSU Supercomputer Complex “Lomonosov” during about 6 months, using 144 nodes and become more than 120 Tb data volume excluding many side files.

Next, we have estimated obtained dataset comparing it with some well-known archives and reanalyses covering Russian Arctic including ERA-Interim, ERA5, ASR, satellite data. Primary assessment was calculated for surface wind and temperature characteristics. It was shown that wind speed climatology based on COSMO-CLM experiments is very close to the ERA-Interim pattern, besides many details of wind speed distribution at different Arctic regions is observed in COSMO-CLM data. There are well appeared sites, where some meso-scale details were reproduced by COSMO-CLM dataset compared with ERA-Interim, including east of Svalbard, Severnaya Zemlya islands, and the western coast of northern Novaya Zemlya island. The last most bright feature is associated, supposedly, with manifestation of the well-known local bora, downslope winds of meso-scale nature. At the same time, high wind speed frequencies based on COSMO-CLM data are increased compared to ERA-Interim, especially over Barents Sea, Arctic islands (Novaya Zemlya) and some seacoasts and mainland areas. Regional details are manifested in wind speed increase and marked well for large lakes (Ladoga, Onega), orography (Taymyr and Kola peninsulas, Nether-polar Ural, Eastern Siberia highlands), as well over polar region (up to 0.5 – 1 m/s). At the same time, there are mesoscale wind speed decreasing compared to ERA-Interim data over Pechora and Laptev Sea coasts, New Siberian islands.

Analysis of wind speed frequencies above 17.2 and 20.8 m/s has shown that differences mentioned for average wind speed get more significant, especially over Svalbard, Severnaya Zemlya, Putorana plateau and Tiksi bay. Comparison of two periods (1980 – 1990 and 2010 – 2016) has shown that spatial distributions of high wind speed frequencies are very similar, but there are some detailed differences. Wind speed frequencies above 17.2 and 20.8 m/s has been decreased in the last decade over the Novaya Zemlya, southwest from Svalbard and northern Atlantic, middle Siberia continent; at the same time, it has been increased over between Franz Josef Land and Severnaya Zemlya, and in polar regions. These results could be interpreted as justifying manifestations of climate changes in Arctic region with some limitations.

Preliminary assessment of modeling results revealed that it is promising for analysis of regional wind speed regime and severe wind speed risks estimations. The next step of this work is to run simulations at 3 km grid and collaborate with scientific community to use this dataset sufficiently. Obtained dataset could provide new, more thorough, and justified estimates of the current regional climate changes, as well as extreme weather events. The data can be used for environmental studies and the modern environmental changes researches and scientific applications, such as forcing to modeling the ocean's characteristics (wind waves and dynamics), coastal ecosystems (turbulent heat and moisture fluxes, greenhouse gases), experiments on more detailed research of individual phenomena on nested domains (extreme situations, hazardous weather events, etc.), analysis of trends in the frequency of occurrence of extreme events and features of their spatial distribution, climatology and tracking of polar mesocyclones, etc.

The reported study was supported by RFBR, research project № 18-35-00604.

REFERENCES:

1. Rockel B, Will A, Hense A (eds) (2008) *Special issue: regional climate modelling with COSMO-CLM (CCLM)*, 4, vol 17. Meteorol Z.
2. Platonov V., Varentsov M. *Creation of the long-term high-resolution hydrometeorological archive for Russian arctic: methodology and first results // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2019. — Vol. 386, no. 012.

On the long period trend estimates for the upper-air extreme and sub-extreme temperatures by use of quantile regression

Sterin A.M., Lavrov A.S.

FSBE "RIHMI-WDC", Obninsk, Russia
E-mail: sterin@meteo.ru

Among the most essential manifestations of climate change and global warming processes, of especial interest are changes in climate extremes and sub-extremes, long period changes in climate variability, and changes in frequency and intensity of natural hazards related to meteorology and climate. All these issues are of growing interest to various categories of customers because of their severe negative societal, economic, and ecological impacts.

The traditional studies of climate trends as of instrument that is used to assess the above changes, are based on estimation of climate trends in average values of climate variables (such as monthly or seasonal average values of temperature, air pressure, precipitation, wind speed, etc.). However, these estimates do not provide detailed information on changes in distributions, rather than in average values only. Thus, they are not sufficient to answer the questions about changes in distribution's left and right "tails", in extremes and near extreme values, as well as in measures of variability. To provide effective climate services, a more detailed study of evolutionary changes in whole distributions of climate variables is needed. In other words, it is essential to study a mostly detailed structure of climate trends.

We have certain experience in use of quantile regression (QR) as an instrument for performing such study. Unlike traditional regression methods that are based on Ordinary Least Squares (OLS) methodology and in climate applications provide information about climate trends in average values of meteorological parameters only, the QR is able to provide detailed information about structure of climate trends for the whole range of values, i.e. including extremal and sub-extremal values. This problem is vital for understanding the tendencies of change in frequencies and magnitudes of meteorological hazards, their relationship to climate change processes. It is also vital for evaluation of numerous applied climate indexes that are based on quantiles of the observed meteorological variables: the question is if some of these indexes should be revised because of manifested low frequency climate change.

Our previous studies of QR trends in extremes and sub-extremes are related to surface meteorological variables, namely, they are concentrated on extremes and sub-extremes of surface air temperature. At the same time, it is essential to make similar QR-based studies of the trends for upper-air temperature.

The paper contains the results of such analysis for the upper-air temperature based on the collection of radiosonde data for more than 30 years of observation, that was used as input. We are providing the calculations for several regions of the northern hemisphere. We discuss the typical patterns of detailed structure of the climate trends for upper-air temperature in the troposphere and in the lower stratosphere.

The difficulties to obtain realistic results in such study are shown to be related to various kind of gaps in radiosonde data, so the data quality requirements for such upper-air studies are vital.

Methodological aspects of orographic winds analysis and modelling in the Arctic

¹Shestakova A.A., ^{2,3}Toropov P.A., ¹Repina I.A.

¹ Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

² Geography Faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

E-mail: shestakova.aa.92@gmail.com, tormet@inbox.ru

Spatial resolution of model/reanalysis plays a key role in forecasting/analysis of spatial structure and intensity of orographic winds. Comparison of reanalysis datasets and simulations with mesoscale model WRF-ARW with different resolution with the satellite measurements from Synthetic Aperture Radars (SAR) for several cases of strong wind allowed us to estimate the influence of spatial resolution on reproducibility of orographic winds. It was found that almost any spatial resolution is suitable for tasks where the average spatial and temporal values of wind speed are required. At the same time, it is necessary to use a grid spacing 3-5 km or smaller for tasks related to the analysis of the fine structure of orographic winds (such as compiling a detailed regional climatology, analyzing extreme values, and assessing the risks of such dangerous phe-

nomena as clear air turbulence or dangerous sea waves). Therefore, the use of reanalysis for such tasks is impossible. However, improved resolution often leads to poor simulation results when compared with observational data. We found that the reason of wind underestimation in numerical experiments with the WRF-ARW model is the unrealistically high surface roughness used in the model, which causes the so-called separation of the boundary layer. The correction of the roughness length was carried out in accordance with the observational data on the meteorological mast installed in Tiksi, where strong downslope windstorms are observed. The use of the observed roughness length in the model leads to a 2–3-fold reduction in the wind speed error.

This work was funded by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-05-80065) and the Russian Science Foundation (project No. 18-47-06203).

Variability of characteristics and conditions leading to the formation of extreme precipitation events in the south of Western Siberia

¹Volkova M.A., ²Cheredko N.N.

¹ Tomsk State University, Tomsk, Russia

² Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: mv2101@mail.ru, atnik3@rambler.ru

Against the background of the socio-technical development of territories there is a growth of the damages in economic and social spheres caused by increasing frequency of hazardous events' occurrence. Global warming is happening now, and the changes in the statistics of extreme events are diagnosed in various regions of the Earth. Humidification conditions relate to the most essential indicator of both global and regional climate. Indicators of humidification regime variability, which also includes hazardous events in the precipitation regime, vary significantly in different regions. In this context, taking into consideration ongoing climate changes, it is relevant to elaborate on a regional approach to assessing the availability of moisture resources and possible risks in connection with extreme events in the rainfall regime.

In the present study, we used the term-hours data taken from 54 weather stations of Tomsk, Kemerovo, Novosibirsk regions and Altai Krai for the period 1966–2018. The following cases with the hazardous event (HE) have been chosen: “heavy rain” which defined as rainfall greater than 35 mm in 12 hours and “severe rain” (significant liquid or mixed precipitation, namely rain, rain shower, sleet, wet snow greater than 50 mm in 12 hours). For each foregoing event, a number of days, repeatability and maximum duration has been computed and analyzed. In addition, the potential of using satellite remote sensing data for their analysis was investigated.

During the 50 years considered, periods without precipitation are twice exceeded the number of periods with precipitation and predominately more extended. Withal, there is a decrease in short-term periods (1–5 days in duration) and an increase in longer ones (6–10 days), both for cases with/without precipitation. The maximum continuous dry periods generally lasts longer than the duration of periods with precipitation and in most of the territory of the region goes up by a rate of 0.8 days per decade (Sredny Vasyugan station). At several stations, mostly in Altai Krai, the maximum duration of the period with precipitation declines at a rate of -0.6 days per decade (Aleksandrovskeye station, Tomsk region).

In the period under consideration the largest number of cases with “heavy rain” (19) was observed at Berezovka weather station located in Tomsk region. The mean number of “heavy rain” cases varies spatially from 9 in Novosibirsk region and Altai Krai to 11 in Tomsk and Kemerovo regions. On average, “severe rain” has been reported two times over the territory. The largest number of cases with “severe rain” (6) was registered at Kuzedeevo station in Kemerovo region.

It has been found that during the period of accelerated global warming the frequency of extreme precipitation remained almost unchanged within the study area.

Throughout the year, precipitation regime is determined by synoptic patterns peculiar to Western Siberia. An increased cyclonic activity in some years (once every 15–20 years) provides conditions that are conducive to excess moisture in the summer.

To analyze the conditions for the formation of areas affected by extreme precipitation we used satellite-based sensing data along with WAREP (warning reports). Thirty cases were considered (15 – severe rain and 15 – heavy rain) closest to the time of the satellite pass and the beginning of the anomaly, i.e. no more than 12 hours. The satellite information allow identifying the type of cloud systems, optical thickness, cloud top height and cloud liquid water content. Heavy rain in 8 out of 15 cases relate to mesoscale convective systems (MCSs);

in four cases, the hazard was associated with the passage of cold fronts, and in three cases – with mesovortices. Severe rain mostly observed during MCSs (8) and cold fronts passing (4); in two cases, precipitation was caused by cyclonic cloud system with a trail and one – by mesovortex clouds.

The study was funded by RFBR and Tomsk Region Administration according to the research projects №18-47-700005p_a (Cheredko N.N.) and №18-45-700010p_a (Volkova M.A.)

The effect of atmospheric circulation in the Northern Hemisphere on hydrothermal extremes in Siberia

^{1,2}Voropay N.N., ¹Ryazanova A.A.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

²V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

Atmospheric circulation over Siberia is a part of the planetary circulation of the Northern Hemisphere. Its main features are the dominance of the west-east transfer; intense transformation of air masses in the warm season; presence of high-altitude planetary frontal zone over 60° N where the intersection of the paths of the northwest and southwest cyclones occurs and meridional air exchange associated with the flatness of the territory and its openness from the North and the South.

Macrocirculation processes are an important factors in the development of droughts and floods phenomena. Changes in atmospheric circulation regimes associated with changes in the global and regional climate affect the frequency and intensity of climatic extremes, which in turn have a significant impact on land ecosystems. Drought is a consequence of the complex physical interaction of factors that can be divided into external and internal. External factors include the restructuring of atmospheric circulation schemes [Trenberth, Guillemot, 1996], which determines the transport of air masses that affect the occurrence of aridity or humidity and temperature fluctuations.

The features of the orography and the difference in the thermal conditions of the continent and the ocean determine the formation of stable meridional flows in the troposphere over the Asian territory of Russia. In this regard, the zonal flow in the troposphere over this territory is much more perturbed than over other areas. The baric field for the summer period is mainly determined by the position of the high pressure ridge, oriented from Northeast China to the eastern regions of Yakutia and the Magadan region. Two depressions are situated on both sides of these regions: one is directed from the polar basin to the Bering Sea, and the second is from Taimyr to Transbaikalia. The speed of cyclones propagation in summer over the continent is slower than over the sea due to the thermal conditions of the underlying surface. Near the coast the speed of cyclones increases [Arkhangelsky, 1956].

Areas of extreme droughts / over moistening conditions coincide with the centers of baric formations (anticyclones / cyclones) [Utkuzova et al., 2015a], and are well described and correlate with the typification of atmospheric circulation according to Katz [Katz, 1960] and with the Dzerdzeevsky classification [Dzerdzeevsky et al., 1946].

This study was funded by the Russian Foundation for Basic Research and the Tomsk Region Administration under grant no. 18-45-700015 and the basic research program.

Variability of planetary high-altitude frontal zones in the Northern Hemisphere from 1991 to 2019 in the summer and their location during extreme weather events

Durneva E.

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow; Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia
E-mail: eadurneva@aari.ru

Since the beginning of the XXI century in the Northern Hemisphere there has been an increase in extreme weather events that have broken records for many years (WMO 2018). Particularly dangerous in summer are continuously heat waves, droughts and fires as was noted in Central Europe in 2003, in the European part of Russia in 2010, in Northern Europe and northern regions of the European part of Russia in 2018 which was consequences the blocking regime in the atmosphere (Black, Blackburn et al. 2004, Mokhov 2011, Kornhuber, Osprey et al. 2019). A lot of works are devoted to the assumption that the formation of blocking or high-amplitude slowly moving planetary waves in the middle and upper troposphere is caused by the influence of the Arctic amplification (significant warming in high latitudes of the Northern Hemisphere in relation to mid-latitudes and reduction of ice in the Arctic seas)(Francis and Vavrus 2012, Screen and Simmonds 2014). The main mechanism of action is the weakening of the temperature gradient in the lower troposphere between the equator and North Pole, which contributes to the weakening of the zonal component of wind, increasing the meridional and as a result the formation of a strongly meandering weak stream in the troposphere and high-altitude jet stream (Francis and Vavrus 2015). Another effect is observed with an increase in the height of the isobaric surface by 500 hPa at high latitudes compared to mid-latitudes, which also occurs as a result of warming in the Arctic region leading to the spread of high ridges far to the north (Francis and Vavrus 2012). But the anomalous in mid-latitudes cannot be associated only with the influence of Arctic amplification, but represent a complex set of many interactions. Also in another works are highlighted the increase in the meridional deviations of planetary waves of the middle and upper troposphere, observed since 1980 in the summer and autumn, but no decrease in phase velocity in all seasons, except for the autumn period (Barnes 2013).

This paper presents an analysis of the average monthly position of the high-altitude frontal zones of the isobaric surface of 500 hPa in mid and high latitudes in summer (JJA) of 1991-2019 over Euro-Atlantic sector. These zones are essential for the development of atmospheric processes, since they are characterized by large baric and temperature gradients, large shifts of horizontal and vertical winds and have a structural relation with high-altitude jet stream (Vorobiev 1960). The maximum displacements of the frontal zones in the north direction were revealed during the propagation of high-altitude ridges in years with the formation of blocking and extreme events at the earth's surface in June over North Atlantic and in July and August over West Eurasia.

This investigation was supported by the Russian Science Foundation (project No. 19-17-00248).

Analysis of extreme weather events in the conditions of modern climate change in the Northern regions

Kuznetsova V.

Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia
E-mail: nvsu@nvsu.ru

Recently, there has been an almost universal increase in the frequency of extreme weather events caused by climate change. Modern warming at a rate much higher than the global average, leads to an increase of the speed of mean annual air temperature, especially in the Northern regions, including Khanty-Mansiysk Autonomous Area-Yugra. The issue of climate change and its impact on the nature of natural processes, which result in an increase in the number of dangerous hydrometeorological phenomena, is very relevant. In this regard, it is important to study adverse and dangerous hydrometeorological phenomena that pose a threat to the natural environment, economy, life and health of the population, which can lead to environmental and economic damage.

Modern climate change is accompanied by an increase in the growth of dangerous hydrometeorological phenomena, including floods, strong winds, torrential rains, hail, droughts, which cause serious damage to the economy and the life of the population, which is also noted on the territory of the Yugra.

The reaction of the natural environment to climate change is accompanied by the occurrence of dangerous hydrometeorological phenomena in the Northern region. Adverse and dangerous hydrometeorological phenomena are observed on the territory of the district, including those caused by modern climate change, including the spring-summer flood, which leads to flooding of low-lying areas. For example, the last of the large-scale floods in the region was also affected by a large stock of snow in the winter of 2014-2015, as well as intense rainfall in the summer of 2015. High water levels cause serious damage to the environment, residential areas, transport and engineering infrastructure, as a result of which the established boundaries of flood zones and settlements are being revised. Features of meteorological conditions determine the functioning of natural complexes and economic activities of the population. The temperature regime, the distribution of precipitation, the timing of snow removal and establishment, water levels in rivers and reservoirs, have a significant impact on the development of the fire season, as happened, for example, in 2012 on the territory of the region.

In addition, climate change is accompanied by dangerous hydrometeorological phenomena that are not typical for the physical and geographical conditions of the territory of the Yugra. For example, in recent years, tornadoes have been observed in the vicinity of the cities of Nefteyugansk (summer 2010), Khanty-Mansiysk (June 2012) and Surgut (July 2016). In the city of Nizhnevartovsk, on February 28, 2017, a snow storm was observed – a rare natural phenomenon that has never been previously recorded in Yugra.

As a result of the observed climate changes, there is an increase in the frequency of extreme and catastrophic natural phenomena in 2007-2020 on the territory of the Yugra. Many of the most important characteristics of the climate such as frost-free period, the timing of snow cover, the occurrence of first and last frost and rainfall distribution, the timing of the onset of phenological periods have become more variable and change the local climate is most severe in the transitional seasons – spring and fall. In vulnerable Northern regions, it is necessary to continue research on adverse and dangerous hydrometeorological phenomena that pose a threat to the natural environment, economy, life and health of the population and lead to environmental as well as economic damage.

Correlation of lightning frequency and convective thermodynamic parameters of the atmosphere over of Western Siberia

¹Nechepurenko O.E., ^{1,2}Pustovalov K.N., ¹Gorbatenko V.P.

¹ Tomsk State University, Tomsk, Russia

² Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: o.e.nechepurenko@gmail.com, vpgor@tpu.ru, const.pv@yandex.ru

Currently, lightning activity parametrizations are being introduced into climate models, which relate the frequency of lightning discharges to the characteristics of convective cloudiness. Many studies were aimed to find the ratio between lightning parameters (eg, frequency, polarity) with hazardous phenomena associated with convective clouds [1], which results can be used to improve forecasts of convective phenomena, especially in territories where there are no weather radar network and / or lightning detection systems.

We studied the spatial correlation of atmospheric instability parameter over the southeast of Western Siberia and lightning discharge density recorded by OTD (Optical Transient Detector) aboard the Microlab-1 satellite (NASA) [2] during the summer seasons of 1995–1999. The estimation of atmospheric instability is based on the average spatial pattern of KIND index [3] according to the ERA5 reanalysis, for the days when the centers of lightning activity were located over different regions of study area. The values of lightning discharge density and KIND index are determined for a square of $1 \times 1^\circ$ in the range of 50–64 N and 61–90 E (total 420 squares).

To check relationship between the two samples, the Fechner correlation coefficient and Pearson's chi-squared test were used. The Fechner coefficient signed a potential direct correlation between the lightning discharge density and KIND values ($F = 0.17$). Based on the Pearson's chi-squared test, longitude groups were determined where a significant positive correlation (> 0.4) was observed at a confidence level of 95%: 69–71 E (Ob-Irtysh interfluvium, Siberian ridges, Ishim plain, Kazakh small hills) and 82–88 E (southeastern part of the West Siberian Plain, Vasyugan, Salair Ridge, Kuznetsk Alatau and Altai-Sayan Mountain System).

The study was funded by RFBR and Tomsk Region Administration according to the research projects №18-45-700010p_a.

REFERENCES:

1. Eliseev A.V., Ploskov A.N., Chernokulsky A.V., Mokhov I.I. A correlation between lightning flash frequencies and the statistical characteristics of convective activity in the atmosphere // *Doklady Earth Sciences*. 2019. Vol. 485, Part 1. P. 273–278.
2. Konstantinova D.A., Gorbatenko V.P., Polyakov D.V. Spatial distribution of the thunderstorm activity characteristics for the territory of Western Siberia // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2017. Vol. 10466. P. 1–7.
3. Nechepurenko O.E., Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A., Sevastyanov V.V. Instability indices and their thresholds for the forecast of thunderstorms over Siberia // *Hydrometeorological Research and Forecasting*. 2018. Vol. 2. P. 44–59. [In Russian].

Extreme cyclones over the Ural region

^{1,2}Pischalnikova E.V., ²Babushkin I.M.

¹Perm center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Perm, Russia

²Perm State University, Perm, Russia

E-Mail: sinoptik.perm@yandex.ru, meteo@psu.ru

Atmospheric circulation is a single mechanism. It consists of separate circulation structures of various spatial and temporal scales. They affect the variability of weather and climate in different regions. The main factor in the variability of weather conditions is the frequency of atmospheric vortices: cyclones, which usually bring precipitation with them, and anticyclones, which provide long dry periods. The features of regional circulation can be detected by the characteristics of cyclonic and anticyclonic activity, including by observing the variability of the trajectories of movement of baric formations over the study area.

This paper presents an analysis of extreme cyclones that determined the weather conditions in the Ural region in the period 1998–2019. The research material was an electronic archive of synoptic maps, Katz index values, monthly, weather reviews, and CFS / NCEP reanalysis data.

In general, the influence of cyclonic systems on the territory of the Urals gradually decreased. 1411 cyclones, of which 11 are extreme baric formations, influenced the territory of the Urals for the period 1998–2019. The frequency of extreme cyclones is less than 1% of the total number of cyclones. Extremely low pressure cyclones in the center are rare and not regular. The greatest number of extreme cyclones was observed in 2008; their repeatability is 27% of the total number of extreme cyclones over the Urals. The pressure in their center varies from 980 to 985 hPa.

Air masses shifting from the west have the highest repeatability throughout the year. The prevailing cyclones along the displacement trajectory are Scandinavian cyclones. These cyclones, approaching the Urals, are at the stage of maximum development, some of them reach the stage of filling. Cyclones displace at an average speed of 42 km/h; they contain four closed isobars with a minimum pressure in the center of 982 hPa. The cyclone from the western direction corresponds to the highest average displacement rate; the southern type cyclone has the largest number of closed isobars and the greatest depth. For cyclones of the northwestern type, maximum repeatability is observed.

To determine the direction of air mass transfer in extreme cyclone systems, the Katz index was used. Its minimum value is observed in October 2008 and amounts to 0.65, the maximum value of the indicator is observed in February 2012 (-1.58). In general, the meridional type of atmospheric circulation predominates.

Most of the extreme cyclones during their operation on the territory of the Urals were at the filling stage, while the overall indicator corresponded to the zonal type, or was close to the value of the transition to the zonal type of large-scale circulation. A small part of the extreme cyclones were at the stage of maximum development against the background of high values of the general indicator (more than 0.75), which indicated the meridional type of large-scale circulation.

A daily analysis of extreme pressure formations according to the reanalysis of the CFS model and synoptic maps showed that the greatest pressure difference in the center (up to 20 hPa) is observed in Scandinavian cyclones. The difference in pressure is observed throughout the entire period of action of baric formations on the region, which can partially be explained by differences in the methodology for conducting isobars. The mean absolute pressure error in the center of the cyclones was -1.6 hPa, and the relative error was -0.002. The average distance between the centers of extreme pressure formations on the synoptic and reanalysis maps was 326 km. Analysis of the location of extreme pressure formations revealed that the largest number (36%) of cyclone centers on maps according to the CFS model are located north than their centers on synoptic maps. Centers of extreme pressure formations coincide in only 1.3% of cases.

According to the results of a comparison of baric formations and their characteristics according to electronic bulletins of synoptic maps and maps constructed using reanalysis, it was found that, despite some quantitative differences, at a qualitative level, reanalysis reflects quite well the real picture of their temporal variability.

The comparison of lightning activity registered by different lightning detection systems in the south-east of Western Siberia

^{1,2}Pustovalov K.N., ¹Gorbatenko V.P., ¹Konstantinova D.A., ¹Nechepurenko O.E.

¹Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: vpgor@tpu.ru, const.py@yandex.ru

In the second half of XX – early XXI centuries, an increase in the proportion of convective clouds has been noted in Northern Eurasia [1]. Under continued foregoing trend, according to [2], the frequency of Cumulonimbus occurrence and related to them hazardous phenomena will become more frequent. Therefore, an operational identification of convective hazardous phenomena, in particular, thunderstorms, has essential meaning. The aim of this work is to compare the results of lightning registration in the southeast of Western Siberia using different lightning detection systems.

The single-point lightning detector (LD-250) by Boltek installed on account of training laboratory at the Department of Meteorology and Climatology, Geology and Geography Faculty, Tomsk State University (56.46° N, 84.93° E). LD-250 allows detecting lightning discharges within radius of up to 480 km in a fully automatic mode. The data processing carry out in the RimDataLightning author tool, the output file contains information on the polarity and time of the discharge and the coordinates of the lightning strike point [3]. Since the beginning of the XXI century the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) is actively elaborating, providing information on the coordinates of discharges over the entire globe through received electromagnetic signals of thunderstorm sources in the VLF band (3–30 kHz) [4].

For comparison, we used the period July 1 to 25, 2019, when numerous thunderstorms were observed over the study area. The coordinates of lightning discharges in one day were mapping with markers superimposed on each other, corresponding to LD-250 and the WWLLN. An analysis of the results showed good qualitative agreement between the positions of the thunderstorm centers. The correlation coefficient between the daily number of lightning discharges detected by LD-250 (the CG, IC and CC lightning) and the WWLLN is 0.89 for the study period. However, the number of lightning discharges by LD-250 is on average 3.3 times higher than captured by the WWLLN.

REFERENCES:

1. Mokhov I.I., Akperov M.G. Tropospheric lapse rate and its relation to surface temperature from re-analysis data // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2006. V. 42. № 4. P. 430–438.
2. Chernokulsky A.V., Bulygina O.N., Mokhov I. I. Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations // *Environmental Research*. 2011. V. 6. № 3. P. 035202.
3. Konstantinova D.A., Gorbatenko V.P. The results of the registration of lightning over the southeastern territory of Western Siberia // *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2011. V. 54, № 11/3. P. 156–162 [In Russian].
4. World Wide Lightning Location Network. – URL: <https://wwlln.net/>.

Variability of extreme values of bioclimatic indices in the Crimean resorts

Stefanovich A.A., Voskresenskaya E.N., Lubkov A.S.

Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia

E-mail: amazurenko@mail.ru

Some of the dangerous meteorological phenomena for the resorts of the Crimean peninsula are extreme values of air temperature, high humidity and strong winds. An analysis of the variability of extreme values of bioclimatic indicators (indicators of comfort of weather conditions) will help to warn of the likely effects of weather and climate factors and increase the effectiveness of climatotherapy.

In this work the NCEP / NCAR R1 reanalysis data and the reconstruction observation data of E-OBS (v17.0) for the period 1950-2017 were used for the calculation of bioclimatic indices for Yevpatoria, Sevastopol, Yalta, Feodosia, Kerch. To mitigate data distortions, they were refined using available station observations for the period 2005 - 2017. For this, the data of the arrays used were interpolated to the station points by the spline surface method of the "thin plate" type.

The extreme values of bioclimatic indices for the period 1950 - 2017 were calculated for all the resort towns under study, the number of days in each month was below 5 and above the 95th percentile, and the coefficients of linear trends of the frequency of extreme values were calculated. The following bioclimatic indices were used: equivalent effective temperature (EET), weight content of oxygen in the air (partial oxygen density) (pO_2), wind cooling index (Hw).

The relative method (5th and 95th percentiles) was used to highlight extreme values in the work. For each indicator, different extremes and periods are taken. For EET in the warm period of the year (April-September), the frequency is calculated for values above the 95th percentile, and for the cold period (October-March) - below the 5th percentile. For pO_2 , extreme values below the 5th percentile were considered only for the warm period (May - September), and for the Hw index only during the cold period (October - March), they were above the 95th.

The lowest frequency values of extreme EET values below the 5th percentile are typical for Yalta (from 2.3 days in December to 2.9 days in November). The maximum values of the frequency of extreme values of EET were noted on the eastern coast of the peninsula (4 days/year). The maximum values of the extreme values of EET above the 95th percentile are Yalta (up to 7.5 days in July). In August, the frequency of extremes above the 95th percentile is highest at all resorts. Trend analysis showed negative trends in the frequency of extreme EET values below the 5th percentile and positive for values above the 95th percentile. The increase in the frequency of extrema in July-August is statistically significant at a 95% significance level. The results obtained are consistent with the general trend of an increase in air temperature in the Crimean region, and, accordingly, an increase in EET values.

The highest frequency of pO_2 values below the 5th percentile is typical for Yalta (in July, up to 6.4 days). For other cities, the frequency of extremely low values is 3-4 days. The linear trends of pO_2 extrema for the warm half-year have positive trends and are mainly statistically significant for all resorts. The results are consistent with an increase in air temperature, which in turn leads to an increase in days with "stuffy" weather. The frequency of extremely high Hw values for all months of the cold period is about 3 days for all resorts except Yalta, where the frequency is slightly lower - an average of 2.5 days. The linear trends of the extreme values of the Hw indices are significant and have a negative tendency for all stations.

In general, an analysis of the extreme values of the considered bioclimatic indices indicates an improvement in bioclimatic conditions in the cold season and in the end-winter-early spring in the resorts of Crimea. The likelihood of an earlier start of the holiday season, as well as increased risks for recreational activities in the open in the second half of the summer is confirmed. Significant improvements in bioclimatic conditions in the winter months and early spring are also noticeable. This also confirms the fact of the expansion of the temporal boundaries of the warm season with comfortable values.

The reported study was funded partly by RFBR according to the research project № 18-45-920063.

Changes of extreme air temperature in the Black sea region

Sukhonos O.Yu., Voskresenskaya E.N.

Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia

E-mail: ipts-sevastopol@mail.ru

The air temperature extremes are an important characteristic of climate change. Observed changes of climate extremes, including air temperature extremes, during the 20th century have a significant impact on the environmental conditions and all fields of human life (health, economic activity, environmental quality, technical systems and others). So the investigation of such air temperature anomalies is relevant.

The aim of this study is to analyze long-term changes and interannual-decadal variability of air temperature extremes in the Black Sea region in all seasons from 1950 to 2018. Daily air temperature data from 13 meteorological stations of the considered region are used. The 5th and 95th percentiles of intra-seasonal daily air temperature anomalies, the number of days with air temperatures below the 5th and above the 95th percentile are calculated. Temperature anomalies are received as deviations from the smoothed annual change. According to the obtained time series of air temperature anomalies, the 5th and 95th percentiles per each calendar season are identified. The calculation of number of days with air temperatures below the 5th and above the 95th percentile is carried out on methodology developed by the group of experts on the extremes of the IPCC. Standard statistical methods (linear regression, composite analysis) were used to estimate long-term changes and interannual-decadal variability of air temperature extremes. Statistical significance of the linear trend and difference of composites at 95% confidence level was estimated using Student's t-test.

The 5th and the 95th percentiles of intra-seasonal air temperature anomalies are found to increase throughout the period of modern warming (since 1976) in all seasons except winter. In winter, trends of both signs are observed with the prevalence of positive ones. However, trends of 5th and the 95th percentiles of intra-seasonal air temperature anomalies for winter are statistically insignificant.

Trends in the number of winter days with extreme air temperatures are also statistically insignificant. For other seasons, the number of days with extremely low air temperatures decreases significantly, while the number of days with extremely high air temperatures increases.

Characteristics of the air temperature extremes in the Black Sea region show strong interannual-decadal variability against the background of the long-term changes. In the ocean-atmosphere system, the principal large-scale processes of the interannual-decadal scale are the North Atlantic Oscillation (NAO), El Nino types (EN), Pacific decadal oscillation (PDO), the Atlantic multidecadal oscillation (AMO).

It is found that these climatic modes are most clearly manifested in the low air temperature extremes in the autumn-winter period. Against the negative NAO phase, the positive NAO phase is accompanied by increased frequency and intensity of extremely cold weather conditions in the autumn, while in the winter both characteristics decrease. Frequency of warm air temperature extremes is greater in the negative NAO phase in all seasons.

A seasonal cycle of the 5th percentile of intra-seasonal daily air temperature anomalies in years with El Nino of any type is characterized by earlier (by 2 – 3 months depending on El Nino type) minimum. However, responses to different El Nino types also demonstrate significant differences.

The extreme winter air temperature anomalies are increased by about 2 °C during the positive PDO phase and the negative AMO phase. The winter frequency of extreme low air temperature is decreased by two times during the positive PDO phase and the negative AMO phase. The summer changes of extreme air temperature characteristics, associated with the PDO and AMO phases, are insignificant.

The reported study was partially funded by RFBR and government of Sevastopol, project number 20-45-920015.

Extreme rates of the temperature according to weather stations in the Northern Hemisphere

Tartakovsky V.A., Cheredko N.N., Maximov V.G.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia
E-mail: trtk@list.ru, atnik3@rambler.ru

The annual temperature gains were calculated according to the data of 927 weather stations in the Northern Hemisphere for the period 1956-2016, and their extreme values were analyzed. The distribution of the time distance between the opposite extrema can be considered as an analog of the spectral density, and the distance itself can be considered as a period of fluctuations of the extreme temperature rates at weather stations. The most probable time distance between the opposite rate extrema, maxima and minima, at the concrete station is equal to the duration of the annual orbital cycle. Such a period is realized at 19.6% of weather stations. At many other stations, characteristic periods of 19 and 15 years, known in scientific studies of space-terrestrial connections, were also found. It can be assumed that in the Northern hemisphere of the Earth during the study period there are some balancing mechanisms of positive and negative increases in average annual temperatures. Quasi-regular processes in the climate system are considered one of the possible sources of increasing climate predictability. Also, the symmetry of the trends of the opposite extreme temperature rates was revealed, which persists when dividing the initial series of observations into adjacent 30-year periods: 1956-1984 and 1985-2016. Latitudinal trends of extrema of the temperature rates and its rms in the period 1956-1984. exceeded those in 1985-2015. Thus, the range of interannual temperature fluctuations has narrowed to date.

This work was carried out as part of the state task of IMCES SB RAS.

Influence of extreme weather conditions and snow accumulation regime on ground freezing depth in Russia in winter period 2019/2020

Frolov D.M.

Lomonosov Moscow State University, Geographical Faculty, Moscow, Russia
E-mail: denisfrolov@mail.ru

As a reason of anomalous warm winter 2019/2020 in Russia, as well as in Europe and USA along with the global warming is considered a non-typical situation in Arctic, where the extremely stable area of low pressure in the vicinity of North Pole was present during long time period and which does not let the cold air masses to move away from its borders. Such situation lead to the consequence, that on the most of the territory of Russia, USA, Northern Europe and Eastern Canada the temperature of winter months was on a few degrees more than usual.

In our study, according to the VDNKh weather station data the air temperature in Moscow in November of the winter period 2019/2020 was 1.8°C, compare with an average norm for 1981-2010 value -1.2°C. In December, it was 0.8°C (with an average norm value -5.2°C), in January 0.1°C (with an average norm value -6.5°C), in February -0.3°C (with -6.7°C) and in March 3.8°C (with -1.0°C). So the exceeding of the average norm values for 1981-2010 were 3°C in November, 6°C in December, 6.6°C in January, 6.4°C in February, 4.8°C in March.

The amount of precipitation according to the VDNKh weather station in Moscow in the winter season (November-March) of 2019/2020 was slightly less than the norm (1981-2010). In November 2019 it was 35 mm of precipitation with an average norm for 1981-2010 55 mm. In December it was 33 mm with an average norm of 52 mm, in January 55 mm with an average norm of 52 mm, in February 40 mm with an average norm of 41 mm and in March 45 mm with the norm of 35 mm.

Due to extremely warm weather conditions the onset of snow cover, in particular in Moscow and the Moscow Region in the winter season 2019/2020 finally occurred only on January 23 (although it was also temporary present from December 30 to January 18), and it was constantly exposed to thaws, and its thickness did not exceed 11 cm. These values are record-breaking, since only in the winter of 2006/2007, according to the data of the VDNKh weather station, the onset of snow cover was only on January 21 and in the winter of 2013/14 the maximum snow cover thickness for the season reached only 15 cm.

Despite of such extremely warm weather conditions (almost all months had positive monthly averaged temperature), ground freezing in Moscow region in winter period 2019/2020 also developed although a bit weaker than comparatively to the other years. This happened because of presence of extremely thin isolating snow cover and some cold days. This was verified by constructed calculating scheme for the ground freezing depth.

Due to the mild winter months' 2019/2020 temperature, largely increasing in recent decades amount of snow and snow cover thickness and hot May 2020 weather in Siberia the winter ground freezing was not very intensive and active layer thickness was rather high at the beginning of the summer. This led to the oil tank construction damage in Norilsk on 29 May 2020 due to the instability of the basement and catastrophic oil spill into the river happened.

The study was conducted in a frame of state topic «Mapping, modeling and assessment of risk of Hazardous natural processes» AAAA-A16-116032810093-2 and partly supported by RFBR research grant 15-05-04461.

REFERENCES:

1. Frolov D.M. *Winter regime of temperature and snow accumulation as a factor of ground freezing depth variations* // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 163, no. 01005. DOI: 10.1051/e3s-conf/202016301005;
2. Frolov D. *Peculiarities of weather and snow accumulation conditions in Moscow region in winter period 2019/2020* // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164, no. 01018. DOI: 10.1051/e3s-conf/202016401018;
3. Frolov D. *Influence of air temperature and snow cover accumulation regimes on ground freezing depth variations in Moscow region* // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164, no. 01017. DOI: 10.1051/e3s-conf/202016401017;
4. Frolov D. *Calculating scheme of ground freezing depth on the basis of data on seasonal snowfall deposition, snow cover accumulation and temperature variation* // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 386. P. 1–7. DOI: 10.1088/1755-1315/386/1/012033

Modelling of extreme concentrations of atmospheric pollutants, their forecast and practical applications in Russia

Genikhovich E., Kirillova V., Nikolaev V., Yakovleva E., Rumyantsev D., Vylitok N.

Voeikov Main Geophysical Observatory, St. Petersburg, Russia

E-mail: ego@main.mgo.rssi.ru

Due to the influence of atmospheric turbulence, concentrations of anthropogenic atmospheric pollutants emitted from local sources are characterized by the very high level of their variability. This variability is determined primarily by local turbulent fluctuations in the wind direction, which are manifested in the meandering of pollutant plumes. Such a plume is usually narrow, and, due to the plume meandering, the concentration values measured at receptor points vary from their maximum values registered for the plume centerline colliding with the receptor to zero corresponding to the plume passing outside the receptor. The technique developed at the Voeikov Main Geophysical Observatory (MGO) and called the Majorant Filtration (MF) allows for filtering out the noise in measured concentrations resulting from the plume meandering. It is based on the idea that at each receptor point the monitoring data should be stratified into subsets corresponding to certain gradations of the governing meteorological parameters (e.g. wind speed, wind direction, Richardson number, etc.) measured at the representative meteorological station. Then one should determine the extreme concentrations in these subsets (actually, upper percentiles, which, from practical reasons, are set at 98%) as functions of the governing parameters, and validate dispersion models upon these empirical functional dependencies where the level of noise is significantly reduced.

For the last 50+ years regulatory dispersion models in use in the former USSR and then in Russia and other NIS countries were aimed to evaluate C98, i.e., 98th upper percentiles of PDF of short-term averaged concentrations estimated with account for all operating emission sources (a similar approach was reproduced in the USA where such models were called SCREEN). Correspondently, the emission standards (ES) for the stationary emission sources are set subject to the condition that the concentrations should not exceed the Ambient Air Quality Standards (AAQSs). Over 2% of the year, however, compliance with ES could not guarantee that extreme concentrations would not exceed AAQS. According to the Russian environmental protection laws, the so-called unfavorable meteorological conditions (UMC), when these exceedances could take place, should be

forecasted and enterprises should be warned in advance. During UMC the enterprises have to take additional emission control measures leading to emission reductions.

Regional and local offices of the Russian Hydrometeorological Service provide operational forecasts of UMC and expected extreme concentrations for about 400 Russian major cities and industrial centers. The MGO is responsible for development of corresponding techniques and guidelines as well as for the methodological guidance and annual reviewing of these works. The UMC forecasts at the local offices are mainly produced using stochastic models, but the new generation of the forecasting models has been developed at MGO and intended to predictions of both UMC and concentrations. They also include MF and are based on the combined use of deterministic and stochastic modelling of the air pollution as well as fusion of the modeled and measured data. Here, deterministic modelling is based on application of the chemical transport model (CTM) and stochastic modelling includes several sub-models implementing statistical procedures, which provide statistical pattern recognition. All these models and sub-models in use have been developed at MGO but the general methodology is actually model-independent. When applied to real cities, the models perform reasonably well. In particular, the results obtained indicate that the slope of the regression of predictions on observations is close to 1.0 and the correlation coefficient is usually above 0.7.

Mercury emissions from fires in Siberia (case study of the Tomsk Region)

¹Lyapina E., ^{1,2}Voropay N.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological System SB RAS, Tomsk, Russia

²V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

E-mail: post@imces.ru, postman@irigs.irk.ru

Forest fires are a powerful factor in the transformation of nature, because affect all components of the environment: atmosphere, hydrosphere, pedosphere, climate, abundance and diversity of flora and fauna. The Siberian forest occupies 80% of the area of Russia covered by forest. The number of fires that have increased in recent years and the vast areas of forests covered by fire have created new sources of entry and redistribution of various toxicants, heavy metals and artificial radionuclides. Mercury is an active migrant released because of a fire and involved in atmospheric migration. An informative indicator of pollutant intake from the atmosphere is the needles, which show an increase in Hg content in areas in the area of the smoke plume from the fire. Moreover, by the mercury content in the needles, one can estimate the amount of the element that can enter the environment because of a fire. When any type of fire occurs, up to 50% of mercury accumulated in the forest is released into the atmosphere. Most of it is involved in atmospheric transport and increases the average content in the areas adjacent to the fire from the leeward side. The quantitative characteristics of the pollutant intake depend on meteorological parameters (wind speed and direction).

The paper estimates the mercury emission in aerosol and dust emissions of forest fires in the Siberian region, and the pollutant reserves in forest combustible materials (needles, moss, forest litter, wood) are calculated. A study was made of changes in the fire hazard situation in the Tomsk Region since 2000 based on the calculation of the aridity index (Pedy index) and fire hazard (Nesterov index) during the summer periods (May-September).

Variation of atmospheric instability characteristics against the background of regional surface thermodynamic conditions during fall-winter season

^{1,5}Martynova Yu., ^{2,3,5}Krupchatnikov V., ^{3,5}Gochakov A., ⁴Antokhina O.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

³Siberian Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk, Russia

⁴V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

⁵A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

E-mail: FoxyJ13@gmail.com

Surface thermodynamic processes can contribute significantly to atmospheric instability. Planetary waves have an essential quasi-stationary component, which is why they are rather forced waves than arose from the flow instability. Their structure is consistent with tropospheric sources, such as large-scale topography, heat sources and sinks (e.g., radiation sources associated with albedo variation), and synoptic-scale eddies.

Due to climatic features, an extensive snow cover is formed in the Siberian part of Eurasia, which causes significant radiation cooling at the territory. From year to year, the snow cover area, and consequently, the radiation cooling intensity, can vary significantly. It can affect the interaction of the troposphere and the lower stratosphere of middle and Arctic latitudes, not only during the snow cover establishment but also in the following winter. The studies of some aspects of the interseasonal interaction under consideration have a long history. However, a conclusion about its manifestation patterns has not yet been formulated.

In this study, we examine the influence of surface thermodynamic disturbances caused by snow cover establishment in Siberia on the atmospheric instability in the Northern Hemisphere.

We made and compared two time-composites. The first composite includes years with sharp and intense snow cover formation, which occurred mainly during one week in October (OCTMAX). The second one consisted of years with a smooth and gradual formation, in which the week with the highest intensity of snow area increase was observed later than October (OCTMIN). As instability characteristics, we consider the fields of the baroclinicity index (BI) and its components separately, and the Eliassen-Palm flux (EP flux). The BI shows the degree of baroclinic instability. It was determined at various vertical levels up to 200 hPa. The EP flux indicates the atmospheric wave propagation in the vertical and meridional directions. It was determined by up to 200 hPa. Oscillation indices (in particular, Arctic Oscillation Index) and spatial patterns of atmospheric variability for various isobaric levels were also considered. Also, the statistics of Rossby waves breaking (RWB) events at various surfaces of equal potential vorticity were considered.

We considered snow cover extend (SCE) from the NOAA satellite data archive (GSL, Rutgers University Snow Cover Laboratory, <https://climate.rutgers.edu/snowcover/>), and calculated atmospheric instability characteristics using ERA-Interim reanalysis.

The results obtained showed significant differences between the composites for the BI, EP flux and statistics of RWB events during the fall-winter season. Moreover, the differences begin to manifest at least a month before the formation of snow cover. The field-integrated estimates of the EP flux intensity suggest that EP flux variation is caused by dynamic processes occurring in the middle and upper troposphere, not by near-surface radiative disturbances. It is important to note that we could not find a direct relationship between the near-surface perturbations and the oscillation indices at different heights.

The results obtained favor the fact that the Western Siberian snow cover establishment's anomalies can contribute to the dynamic state variation of the troposphere and lower stratosphere, however, they are not determining.

This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 19-17-00248.

Extreme precipitation and features of their precipitation in the territory of Perm region

Sivkov B.A.

Perm State National Research University, Perm, Russia
E-mail: sivkovbogdan@yandex.ru

This paper is devoted to the study of the formation of extreme precipitation in Perm region. Attention is paid to the spatial and temporal features of the distribution of cases with heavy precipitation, vertical motions of the atmosphere, synoptic situation, as well as the thermodynamic state of the atmosphere during heavy precipitation. The study was based on the use of information about the dates when extreme precipitation was observed in the period from 1979 to 2018, data from the reanalysis of the CFS model (Climate Forecasting System) at the time of 0, 6, 12, 18 hours of UTC, the archive of synoptic maps in the software complex «GIS Meteo» and data from weather stations about the observed phenomena and their duration.

Analysis of the temporal distribution of the number of cases with heavy rains revealed some periodicity. Currently, there is a tendency to reduce the number of cases with heavy precipitation or to keep them at a low level.

Analysis of the spatial distribution of cases with extreme precipitation on the territory of the Perm region showed that it has a meridional character. Moreover, the frequency of cases with heavy precipitation increases from west to east. The Ural Mountains play a special role in the distribution of heavy precipitation. As a natural barrier, they delay cyclones and their fronts over the Perm region, which contributes to longer and more intense precipitation.

The study of vertical motions showed that the most intense upward motions are observed with heavy precipitation associated with the frontal sections. At the same time, the difference between the speed of updrafts on different fronts is insignificant. Intra-mass precipitation is formed at a lower speed of vertical motions.

The intensity of vertical motions depends on the stage of development of cyclones. The highest speed values are observed at the stage of a young cyclone. The lowest values of the speed of vertical motions are observed when heavy precipitation is not associated with cyclonic activity.

An important issue is the identification of synoptic conditions under which heavy precipitation occurs. In addition, the state of the atmosphere during heavy precipitation is of interest. For this, instability indices are used, which characterize the temperature and humidity state of the atmosphere. Most cases of extreme precipitation in Perm region are associated with the passage of cold fronts and occlusion fronts. Less often, heavy precipitation is formed on warm fronts. At the same time, cold fronts are characterized by higher values of instability indices than occlusion fronts.

Heavy precipitation, which have reached the criterion of a dangerous phenomenon are mainly of a storm-water and mixed type. The percentage of widespread precipitation is very small. Storm rains are most often formed on cold fronts and during intramass processes, while widespread and mixed rains are mainly associated with occlusion fronts. For different types of precipitation, differences in the values of instability indices are observed. This difference is most evident in the indices that characterize the instability of the atmosphere, and to a lesser extent is characteristic of the indices that characterize the conditions of humidification, which indicates that the formation of heavy precipitation of stormwater, widespread and mixed types is characterized by almost identical temperature and humidity characteristics.

Extreme rains most often have a duration of precipitation from 4 to 6 hours. For widespread rains, the duration of precipitation is 10-12 hours. At the same time, there is a fairly strong feedback between the duration of precipitation and the values of instability indices. The higher the values of the instability indices, the shorter the duration is observed.

Role of atmospheric circulation in the formation of anomaly warm and anomaly cold winters in the Asian territory of Russia

Trukhanov A.E., Kochugova E.A.

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

E-mail: antontr.meteo.97@gmail.com, kochugovae@mail.ru

A review of scientific studies performed on the example of the Asian Russia and its adjacent territories allows us to note an increase in the number of weather and temperature anomalies in the Asian territory of Russia [1]. Another feature of changes in the temperature regime in this region is the tendency toward cooling observed in winter over the past few years (up to $-0.6^{\circ}\text{C}/10$ years) [2]. The likely cause of these changes is atmospheric circulation.

The study analyzed the dynamics of winter temperatures on the example of 92 climate stations. The work is based on the use of the average daily air temperature of the winter calendar months from 1947 to 2016. To determine the dependencies between atmospheric circulation and the distribution of air temperature anomalies, we used a calendar of successive changes in elementary circulation of the Northern Hemisphere according to B. Dzerdzhevsky [3].

As part of the standard deviation (σ) was selected as a criterion of anomalousness winter season. The spatial distribution of the total number of cases with negative and positive air temperature anomalies (-2σ , 2σ) is shown in Fig. 1 (a, b) and Fig. 2 (a, b).

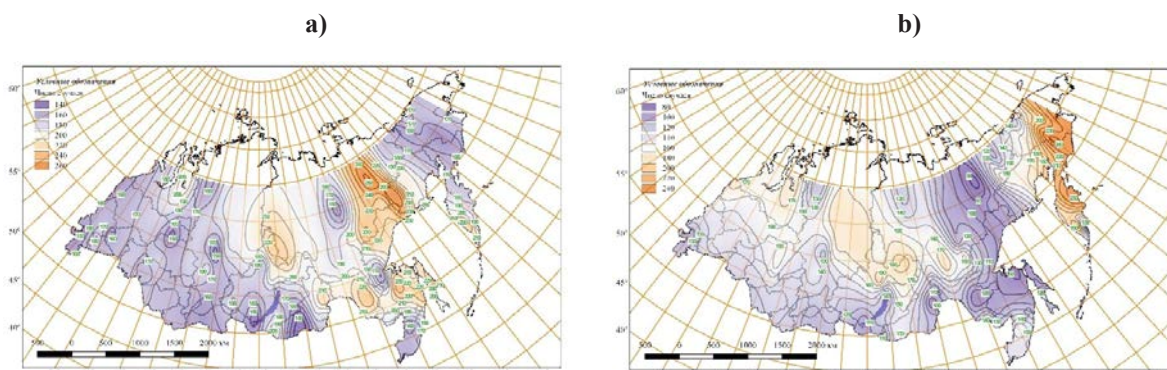


Fig. 1. Spatial distribution of the total number of cases with negative anomalies in January. a) 1947-1981 b) 1982-2016.

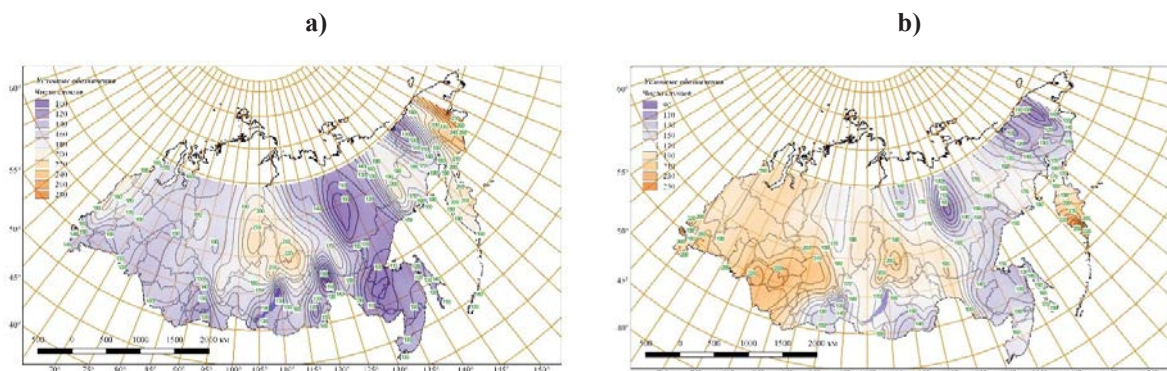


Fig. 2. Spatial distribution of the total number of cases with positive anomalies in January. a) 1947-1981 b) 1982-2016.

An analysis of the circulation mechanisms showed that in the studied region in winter the temperature regime forms 26 elementary circulation mechanisms, combined into seven groups. Almost 75% of cases in the winter months there longitude northern circulation and latitudinal circulation repeatability does not exceed 15%. It was revealed that abnormally warm and cold winters are characterized by a predominance of the meridional northern circulation group and groups of zoning disturbances, as well as combined groups, including

longitude northern and latitudinal eastern elementary circulation mechanisms. These elementary circulation mechanisms are characterized by blocking processes and breakthroughs of southern cyclones into the study area. In winter, in the Siberian sector, the main baric formation near the surface of the earth is the Asian anticyclone, therefore in the longitudinal and latitudinal circulation groups there is a second component - a stationary position.

Empiric approach to forecast hot extremes for energy modeling

Fedotova E.V., Klimenko V.V.

Moscow Power Engineering Institut, Moscow Russia
E-mail: e.v.kasilova@gmail.com

Power systems around the world are facing nowadays increasing risks associated with rising frequency and intensity of hot weather episodes. Arising need for quantification and predicting of these effects determines some specific requirements towards approaches to project air temperature extremes keeping in mind implementation of such estimations in the energy modeling workflow. Particularly, both the upper quantiles and the median part of the air temperature probability distribution should be represented quite accurate and with high spatial resolution. That means certain difficulties in application of the classical bias correction approaches and motivates development of more robust methods.

Evolution of the extreme temperatures and heat waves may be interpreted in terms of the means and variability changes while the open question remains which of these factors has a major contribution [1, 2]. This challenge should be primary linked to difficulties faced by the general atmospheric circulation models in reproducibility of the daily air temperature probability distribution [3]. Empirical approaches seem to be of high interest to improve accuracy of the air temperature forecast estimations.

The presented work is aimed to utilize Roshydromet observation records [4] to study evolution of the daily air temperature probability distribution across Russia since the middle of 20 century. It has been shown that the variability of the daily temperature remained stable or even demonstrated a tendency to a decrease for all considered meteorological stations. This conclusion is quite consistent with the results of the recent work [5] and means that the parameters of the standardized air temperature distribution may be considered more stable as it is often believed.

Non-parametrical statistical goodness-of-fit tests (Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises, Anderson-Darling) were applied to the daily temperature in a moving multi-annual window for the cold and warm seasons. It has been shown that the distribution of the standardized temperature in many cases may be assumed as quite stable in terms of statistic distribution. Approximation of the temperature distribution with the skew-normal model [6] has given a generally satisfactory result which provides an opportunity for construction of semi-empirical forecast estimations of the daily temperature probability distribution.

The project was supported by RFBR (grant 20-08-00320 A).

REFERENCES:

1. Lewis S C, King A D, Perkins-Kirkpatrick S E, Mitchell D M *Regional hotspots of temperature extremes under 1.5C and 2C of global mean warming* 2019 *Weather and Climate Extremes* 26
2. Argueso D, Di Luca A, Perkins-Kirkpatrick S E, Evans J P *Seasonal mean temperature changes control future heat waves* 2016 *Geophysical Research Letters* 43 14 7653-7660
3. Lewis S C, King A D *Evolution of mean, variance and extremes in 21st century temperatures* 2017 *Weather and Climate Extremes* 15 1-10
4. Bulygina O N, Razuvaev V N, Aleksandrova T M *Description of the daily temperature and precipitation amount at the Russian Weather Stations and former USSR (TTTR) Database* N2014620942
5. Babina E D, Semenov V A *Intramonthly Variability of Daily Surface Air Temperature in Russia in 1970-2015* 2019 *Russian Meteorology and Hydrology* 44 8 513-522
6. A. Azzalini, A. Capitanio *The Skew-Normal and Related Families* // Cambridge University Press, 2014

Extreme atmospheric precipitation in Western Siberia based on different databases

¹Kharyutkina E.V., ¹Loginov S.V., ^{1,2}Martynova Yu.V., ³Kakurkina O.Yu.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

²Siberian research hydrometeorological institute of Roshydromet, Novosibirsk, Russia

³Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: kh_ev@imces.ru

The aim of the work is to study changes in extreme precipitation in Western Siberia (50-70N, 60-90E) from 1979 to 2019 based on various databases, and to carry out their comparative analysis.

The following databases were used: observational data at 57 meteorological stations (RIHMI-WDC, 1979-2019), GPCC (1979-2016), APHRODITE-2 (1979-2007), and ERA5 (1979-2019) and NCEP (1979-2019) reanalysis data. To identify the dynamics in extreme precipitation, a comparison of estimates for two time intervals was made: 1979-1998 and 1999-2019 (until 2007 for APHRODITE-2 and until 2016 for GPCC). The median of the sample probability distribution function was derived as the average characteristic for the territory. The extreme values of climate values were determined by its threshold quantiles (1% and 5% and 95% and 99%) for warm and cold seasons of the year.

To provide comparative analysis several types of data interpolation into station coordinates were applied. In addition, to eliminate the influence of spatial heterogeneity of meteorological stations location spatial interpolation of calculated monthly and annual average precipitation values on a $1^\circ \times 1^\circ$ grid was carried out based on observational data using the kriging algorithm. The magnitude of the relationship between values was determined using linear correlation coefficient.

The spatial distribution analysis revealed a significant discrepancy between reanalysis and observational data in the southern part of Western Siberia (Kosh-Agach station and Neozhidanny), which is due to the mountainous landscape. It was found that, in general, the time variability of average annual precipitation according to all databases is similar. However, values are overestimated in the ERA5 and NCEP reanalysis data. Correlation analysis showed that the greatest agreement with the observational data was revealed with GPCC data ($r > 0.95$), and the least - for the NCEP reanalysis data ($r = 0.65-0.77$). A sufficiently high degree of relationship was derived for ERA5 and APHRODITE – $r = 0.79-0.90$.

Based on analysis of extreme precipitation from observational data, it was found that more precipitation occurred at the southern stations than at the northern ones in the XXI century. Correlation analysis showed that the greatest agreement between extreme values was revealed with GPCC and the least - for the NCEP reanalysis data.

Thus, the precipitation data presented in the reanalysis databases depend on data assimilation method used and on the grid resolution. It was found that, the average estimates of precipitation obtained from observational and reanalysis data are in better agreement with each other than their extreme values.

An empirical method for predicting extreme low winter sea ice extent in the Russian Arctic in the 21st century under global warming (on the example of the Barents Sea)

¹Cherenkova E.A., ^{1,2}Semenov V.A., ¹Titkova T.B.

¹Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

E-mail: cherenkova@igras.ru, vasemenov@ifaran.ru, titkova@yandex.ru

The late decades of the 20th century and early 21st century were characterized by significant global warming. The most dramatic changes occurred in the northern high latitudes in a wintertime. Higher rates of warming in the Arctic relative to temperature changes in the middle and low latitudes, called Arctic amplification (e.g., [Bekryaev et al., 2010]), can lead to a transformation of atmospheric circulation regimes with an increased probability of stationary weather regimes [Francis et al., 2012; Semenov and Latif, 2015] leading to weather extremes. Along with the increase in global temperature, there was a rapid reduction of the Arctic sea ice extent, which accelerated at the beginning of the 21st century [Ivanov et al., 2013; Semenov et al., 2015]. The strongest sea ice retreat is observed in September, whereas winter sea ice decrease is

about three time slower. However, winter sea ice changes result, due to huge temperature and humidity contrasts and stronger wind speed, in much large ocean-atmosphere heat flux anomalies that strongly impact atmosphere circulation [Petoukhov and Semenov, 2010]. The greatest loss of winter ice extent was observed in the Barents Sea [Matveeva et al., 2020; Onarheim et al., 2015]. The extrapolation the current ice trends in the Barents Sea into the future implies the ice-free conditions already in 2023 and 2036 for quadratic and linear trends, respectively [Onarheim and Årthun, 2017].

The sea ice in numerical experiments with climatic models is linked to the sea surface temperature. At the same time, climate models do not always realistically reproduce processes in the ocean and, in particular, the multidecadal variability of sea surface temperature in the North Atlantic [Ba et al., 2014]. In addition, the uncertainty in the results of model estimates of the ice coverage is due to significant intermodel spread. For example, ice-free conditions in the Barents Sea “are projected to occur for the first time in 2028 in GFDL CM3, 2061 in MPI-ESM-MR, and 2063 in NorESM1-M” [Onarheim and Arthun, 2017]. Researchers have noted that “the Barents Sea is currently almost ice free in summer, while the models in average simulate such conditions by the end of the 21st century or around 2050 in the CMIP3 and CMIP5 ensembles, respectively” [Semenov et al., 2015]. The overestimation of sea ice can be associated with an underestimation of the ocean heat transport to the Barents Sea in CMIP5 models [Li et al., 2017]. The importance of the prediction of the sea ice cover extent in the Barents Sea is rising because it is one of the major regions of the offshore oil and gas exploration and an important part of the marine sea routes.

The purpose of this study is to predict the timing of the ice free conditions in the Russian Arctic seas using statistical methods based on the observed relationship between sea ice concentration and surface air temperature over vast part of the Northern Hemisphere.

The method of linear singular decomposition of covariance matrices (SVD, Singular Value Decomposition) [Bretherton, 1992] was used to determine the areas of the most significant correlation between the leading modes of joint variability of the sea ice concentration (SIC) in January-March and the surface air temperature (SAT) of the Northern hemisphere north to 30N in the autumn, winter and spring months in the 1979-2019 period. An analysis of the structure of this linkage showed its robustness for SIC in the Barents Sea. The system of the relationships between the studied parameters changed in the late 1990s in other Seas of the Russian Arctic. It was revealed that average January-March SIC in the north of the Barents Sea was strongly correlated with average November-January SAT in Scandinavia and over the Barents Sea (correlation coefficient is -0.8). Thus, an increase/decrease in November-January SAT in Scandinavia and over the Barents Sea in 70% of the study period resulted in a subsequent decrease/increase in January-March SIC in the north of the Barents Sea in the period 1979-2019. Using the link between SIC and SAT in key areas, independent SIC estimates have been obtained in the shelf zone in the north of the Barents Sea in the 21st century according to an ensemble of 30 CMIP5 GCMs. It was found that the RCP 4.5 scenario results in a reduction of the ice coverage in the north of the Barents Sea by 2041-2050 to values where year-round navigation is possible in the region. At the same time, the complete disappearance of sea ice is not expected until the end of the century. According to the aggressive scenario RCP 8.5, year-round navigation in the region will already be possible in 2031–2040, and almost free-ice Barents Sea should be expected by the middle of the 21st century.

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project № 18-05-60216).

REFERENCES:

1. Ba J., Keenlyside N.S., Latif M., Park W., Ding H., Lohmann K., Mignot Juliette, Menary M., Ottera O.H., Wouters B., Melia D.S. Y., Oka A., Bellucci A., Volodin E. // *Climate Dyn.* 2014. V. 43. P. 2333–2348.
2. Bretherton C.S., Smith C., and Wallace J.M. (1992) *An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data* // *J. Clim.* 5. 541-560.
3. Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. (2010) *Role of Polar Amplification in Long-term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming* // *J. Climate*, V. 23. Pp. 3888-3906.
4. Francis J.A. and Vavrus S.J., (2012) *Evidence Linking Arctic Amplification to Extreme Weather in Mid-latitudes* // *Geophys. Res. Lett.*, 39. L06801.
5. Ivanov V.V., Alekseev V.A., Alekseeva T.A., et al. (2013) *Does Arctic Ocean Ice Cover Become Seasonal?* // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. № 4, Pp. 50-65.
6. Lenssen N., Schmidt G., Hansen J., Menne M., Persin A., Ruedy R., Zyss D. (2019) *Improvements in the GISTEMP uncertainty model* // *J. Geophys. Res. Atmos.* 124 no. 12. 6307-6326.
7. Rayner N. A., Parker D. E., Horton E. B., Folland C. K., Alexander L. V., Rowell D. P., Kent E. C., and Kaplan A. (2003) *Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century* // *J. Geophys. Res.* V. 108. №. D14, 4407.
8. Matveeva T.A., Semenov V.A., Astafyeva E.S. (2020) *Arctic sea ice coverage and its relation to the surface air temperature in the Northern Hemisphere* // *Led i sneg*. V.60. 1. Pp. 134-148.

9. Onarheim I.H., Eldevik T., Årthun M., Ingvaldsen R.B., Smedsrud L.H. (2015) Skillful prediction of Barents Sea ice cover // *Geophys. Res. Lett.* 42. 5364–5371.
10. Onarheim I. H. and Årthun M. (2017) Toward an ice-free Barents Sea, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 8387–8395.
11. Petoukhov, V., and Semenov, V.A. (2010) A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. *J. Geophys. Res. - Atmospheres*, 115, D21111.
12. Semenov V. A. and Latif M. (2015) Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966-2012 // *Environ. Res. Lett.* V. 10. 054020.
13. Semenov V. A., Martin T., Behrens L. K., and Latif M. (2015) Arctic sea ice area in CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles -variability and change // *The Cryosphere Discuss. V. 9. Pp. 1077-1131.*

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1	МОНИТОРИНГ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ
SESSION 1	MONITORING OF CLIMATE CHANGES OVER NORTHERN EURASIA

Convective potential of the atmosphere of Western Siberia in a changing climate Gorbatenko V.P., Pustovalov K.N., Konstantinova D.A.	3
Конвективный потенциал атмосферы Западной Сибири в условиях меняющегося климата Горбатенко В.П., Пустовалов К.Н., Константинова Д.А.	4
The influence of Arctic sea ice loss on winter cooling in Northern Eurasia Zuev V.V., Savelyeva E.	7
Влияние уменьшения площади арктического морского льда на зимнее похолодание в Северной Евразии Зуев В.В., Савельева Е.С.	8
On climatology of storm cyclones entering European region of Russia Viazilova N.A., Viazilov A.E.	12
The structure of the climatic classes of Eurasia during periods of different thermal regimes in the North Atlantic Volkov Yu.V., Cheredko N.N., Tartakovsky V.A.	15
Структура климатических классов Евразии в периоды разных термических режимов в Северной Атлантике Волков Ю.В., Чередыко Н.Н., Тартаковский В.А.	16
Comparison of the anticyclone characteristics in the Black Sea region using to the NCEP / NCAR reanalysis and surface synoptic maps Zhuravsky V.Yu., Sukhonos O.Yu., Voskresenskaya E.N.	18
Сравнение характеристик антициклонов в Черноморском регионе по данным реанализа NCEP/NCAR и сборно-кинематическим картам Журавский В.Ю., Сухонос О.Ю., Воскресенская Е.Н.	19
Assessment of the influence of the steering current velocity on anomalous weather phenomena in the troposphere of the northern hemisphere in modern climate conditions Loginov S.V., Kharyutkina E.V., Moraru E.I., Zolotov S.Yu., Podnebesnykh N.V., Smirnov S.V.	21
Влияние ведущего потока на аномальные явления погоды в тропосфере северного полушария в условиях современного климата Логоinov С.В., Харюткина Е.В., Морару Е.И., Золотов С.Ю., Поднеbesных Н.В., Смирнов С.В.	22
Climate and weather extremes in the Volga Federal District Perevedentsev Yu.P., Sherstukov B.G., Guryanov V.V., Shantalinskii K.M., Auhadeev T.R.	25
Климатические и погодные экстремальные явления в Приволжском федеральном округе Переведенцев Ю.П., Шерстюков Б.Г., Гурьянов В.В., Шанталинский К.М., Аухадеев Т.Р.	26
Climatic conditions of the arctic tundra in the estuary zone of the Yenisei river: measurements at the atmospheric carbon observation station Dikson Sidenko N.V., Panov A.V.	29
Климатические условия арктической тундры в эстуарной зоне р. Енисей: результаты мониторинга на станции «Диксон» Сиденко Н.В., Панов А.В.	29
Emergent properties of climatic system according to weather stations' data in the Northern Hemisphere Tartakovsky V.A., Cheredko N.N., Maximov V.G.	32
Эмерджентные свойства климатической системы по данным метеостанций Северного полушария Тартаковский В.А., Чередыко Н.Н., Максимов В.Г.	32
Monitoring cumulus clouds using global horizontal irradiance data Zuev S.V., Krasnenko N.P.	35
Мониторинг кучевой облачности по данным суммарной радиации Зуев С.В., Красненко Н.П.	36
Long-term variations of total cloud cover in the south of Eastern Siberia Devyatova E.V.	39
Долговременная изменчивость облачности на юге Восточной Сибири Девятова Е.В.	39
Variations of meteorological and atmospheric electric quantities under the influence of mesoscale convective systems using the example of the city of Tomsk Zhukov D.F., Pustovalov K.N., Koshikova T.S., Oglezneva M.V., Nagorskiy P.M.	43

Вариации метеорологических и атмосферно-электрических величин под воздействием мезомасштабных конвективных систем на примере г. Томска Жуков Д.Ф., Пустовалов К.Н., Кошикова Т.С., Оглезнева М.В., Нагорский П.М.	44
Relief influence on the distribution of the precipitation at the Tunkinskie Goltsy mountain range Korotchenko M.M., Voropay N.N.	47
Влияние рельефа на распределение сумм атмосферных осадков на примере Тункинских Гольцов Коротченко М.М., Воропай Н.Н.	48
Spatial distribution and features of genesis of mesoscale convective complexes over the south-east of Western Siberia Koshikova T.S., Zhukova V.A., Pustovalov K.N., Kuzhevskaya I.V., Nagorskiy P.M.	51
Пространственное распределение и особенности генезиса мезомасштабных конвективных комплексов над юго-востоком Западной Сибири Кошикова Т.С., Жукова В.А., Пустовалов К.Н., Кужевская И.В., Нагорский П.М.	52
Special aspects of snow cover formation in Siberia Martynova Yu.	55
Особенности формирования снежного покрова в Сибири Мартынова Ю.В.	56
Long-term dynamics of snow cover in the Baikal region Matyukhina A.A., Voropay N.N.	58
Многолетняя динамика снежного покрова на территории Прибайкалья Матюхина А.А., Воропай Н.Н.	58
Development Perspectives of the Channel Processes in the Sylva River Basin in the 21st Century (Kama basin) Nazarov N.N., Frolova I.V.	61
Перспективы развития русловых процессов в бассейне р. Сылва в XXI веке (бассейн Камы) Назаров Н.Н., Фролова И.В.	62
The dynamics of the polar electrical conductivity of air in the surface layer of the atmosphere during the shower rain of various genesis (on the example of Tomsk) Oglezneva M.V., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Nagorskiy P.M., Pustovalov K.N.	65
Динамика полярных электропроводностей воздуха в приземном слое атмосферы при выпадении ливневых осадков различного генезиса (на примере г. Томска) Оглезнева М.В., Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Нагорский П.М., Пустовалов К.Н.	66
The electric field of the undisturbed atmosphere, its diurnal and seasonal variations in the southeast of Western Siberia: a case study on Tomsk city Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M., Oglezneva M.V., Sazonov Ya.S.	68
Электрическое поле невозмущенной атмосферы, а также его суточные и сезонные изменения на юго-востоке Западной Сибири на примере г. Томска Пустовалов К.Н., Нагорский П.М., Оглезнева М.В., Сазонов Я.С.	69
Relationship between ultraviolet radiation and total ozone content, cloudiness, aerosol optical depth and albedo of the underlying surface derived from the data of long-term measurements carried out in Tomsk Sklyadneva T.K., Belan B.D., Ivlev G. A.	72
Взаимосвязь вариаций ультрафиолетовой радиации с изменением общего содержания озона, облачности, аэрозольной оптической толщи и альbedo подстилающей поверхности по данным многолетних измерений в Томске Скляднева Т.К., Белан Б.Д., Ивлева Г.А.	73
The results of long-term ground-based measurements of the total solar radiation in West Siberia Sklyadneva T.K., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D. K., Fofonov A.V.	76
Результаты многолетних наземных измерений суммарной солнечной радиации на территории Западной Сибири Скляднева Т.К., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Фофанов А.В.	77
Latitudinal trends of small-scale wildfires in Eastern Siberia observed by long-term satellite data Tomshin O.A., Solovyev V.S.	80
Широтные особенности трендов мелкомасштабных пожаров в Восточной Сибири по данным многолетних спутниковых наблюдений Томшин О.А., Соловьев В.С.	81

Energy of mesoscale eddies in the marginal seas of the Arctic Ocean: results of numerical simulation Platov G.A., Golubeva E.N.	85
Энергетика мезомасштабных вихрей окраинных морей Северного Ледовитого океана: результаты численного моделирования. Платов Г.А., Голубева Е.Н.	86
Methods for determining turbulent fluxes in the atmospheric surface layer: measurement and parameterization Repina I.A.	90
Методы определения турбулентных потоков в приземном (приводном) слое атмосферы – измерения и параметризации Репина И.А.	90
Modeling temperature and humidity conditions of mineral soils in the active layer model, taking into account changes in the thermodynamic properties of the soil in depth Bogomolov V., Dyukarev E., Stepanenko V.	92
Моделирование температурного и влажностного режима болотных и минеральных почв в модели деятельного слоя с учетом изменения термодинамических свойств почвы по глубине Богомолов В.Ю., Дюкарев Е., Степаненко В.М.	93
Численное моделирование процессов турбулентного перемешивания и переноса биохимических примесей во внутренних водоемах Гладских Д.С., Мортиков Е.В., Степаненко В.М.	96
Numerical simulation of turbulent mixing and transport of biochemical substances in inland waters Gladskikh D.S., Mortikov E.V., Stepanenko V.M.	97
Simulation of the episodic near-bottom water warming in the Laptev Sea Golubeva E., Kraineva M., Platov G.	100
О формировании аномалий тепла в придонном слое моря Лаптевых Голубева Е.Н., Крайнева М.В., Платов Г.А.	100
Анализ развития ранней стадии относительно устойчивых крупномасштабных погодных систем и связанных с ними фаз Арктических Колебаний при потеплении климата Крупчатников В.Н., Боровко И.В., Голубева Е.Н., Платов Г.А.	103
Analysis of the development of the early stage of relatively stable large-scale weather systems and related phases of Arctic Oscillations under climate warming Krupchatnikov V.N., Borovko I.V., Golubeva E.N., Platov G.A.	104
Параметризация скорости диссипации кинетической энергии турбулентности в моделях пограничного слоя атмосферы и океана Мортиков Е.В., Глазунов А.В., Дебольский А.В., Каданцев Е.В., Лыкосов В.Н., Зилитинкевич С.С.	105
Parameterization of the dissipation rate of turbulent kinetic energy in atmospheric and oceanic boundary layer models Mortikov E.V., Glazunov A.V., Debolskiy A.V., Kadantsev E.V., Lykosov V.N., Zilitinkevich S.S.	106
The main modes of the Arctic Ocean circulation and the relationship of their trends with the Atlantic water heat content Platov G.A., Kraineva M.V., Golubeva E.N.	108
Основные моды циркуляции Северного Ледовитого океана и связь их тенденций с теплосодержанием Атлантических вод Платов Г.А., Крайнева М.В., Голубева Е.Н.	109
Представление гидрологических объектов суши в математических моделях Земной системы Степаненко В.М., Медведев А.И., Дебольский А.В., Гладских Д.С., Мортиков Е.В., Гусева С.П., Богомолов В.Ю., Репина И.А., Лыкосов В.Н.	112
Representation of land water objects in the Earth system models Stepanenko V.M., Medvedev A.I., Debolskiy A.V., Gladskikh D.S., Mortikov E.V., Guseva S.P., Bogomolov V.Yu., Repina I.A., Lykosov V.N.	114
Исследование степенных зависимостей затухания кинетической энергии турбулентности в моделях атмосферного пограничного слоя Ткаченко Е.В., Дебольский А.В., Мортиков Е.В.	116
The analysis of the turbulent kinetic energy decay power law in atmospheric boundary layer models Tkachenko E.V., Debolskiy A.V., Mortikov E.V.	116
Parameterization of wetlands water level in land surface model Bogomolov V., Dyukarev E., Stepanenko V.	119
Параметризация уровня болотных вод в рамках модели деятельного слоя суши Богомолов В.Ю., Дюкарев Е., Степаненко В.М.	120

Assessment of the influence of various tree species and their parameters on the behavior of wind flows in urban environments (on the example of the RUDN University campus, Moscow)	
Bukin S.S., Konstantinov P.I., Riccardo Valentini, Vasenev V.I.	122
Оценка влияния различных пород деревьев и их параметров на поведение ветровых потоков в условиях городской среды (на примере кампуса РУДН, Москва)	
Букин С.С., Константинов П.И., Рикардо Валентини, Васенев В.И.	122
Numerical simulation of particle transport in urban boundary layer	
Varentsov A.I., Stepanenko V.M., Mortikov E.V., Konstantinov P.I.	126
Численное моделирование переноса взвешенных частиц в пограничном слое атмосферы над урбанизированной территорией	
Варенцов А.И., Степаненко В.М., Мортиков Е.В., Константинов П.И.	127
Research of surface-based temperature inversions in Nadym according direct measurement and simulation	
Vorotilova P., Konstantinov P.	130
Исследование пространственно-временных характеристик приземных инверсий г. Надым (ЯНАО) по данным прямых измерений и данным моделирования	
Воротилова П.Г., Константинов П.И.	130
Time series analysis and forecasting using SSA	
Doktorov M.G., Botygin I.A.	133
Анализ и прогнозирование временных рядов с использованием SSA	
Докторов М.Г., Ботыгин И.А.	133
Parameterization of the thermal conductivity of soil in the active land layer block of the INM RAS-MSU model	
Drozдов E.D., Stepanenko V.M., Voropay N.N., Dyukarev E.A., Kokoreva A.A., Cherkashina A.A.	137
Параметризация коэффициента теплопроводности почвы в блоке деятельного слоя суши модели ИВМ РАН-МГУ	
Дроздов Е.Д., Степаненко В.М., Воропай Н.Н., Дюкарев Е.А., Кокорева А.А., Черкашина А.А.	138
Parameterization of snow accumulation processes under a canopy vegetation in the land model of the INM RAS – MSU	
Marchuk E.A., Stepanenko V.M.	141
Параметризация процессов снегонакопления под пологом растительности в модели суши ИВМ РАН – МГУ	
Марчук Е.А., Степаненко В.М.	141
The influence of the outer parameters on river runoff value in the land surface model INM – MSU (on the case of Severnaya Dvina)	
Medvedev A., Stepanenko V.	144
Влияние внешних параметров на величину речного стока в модели деятельного слоя суши ИВМ – МГУ (на примере р. Северная Двина)	
Медведев А.И., Степаненко В.М.	145
Microscale simulation of wind speed in urban areas during extreme weather events	
Nikolaeva E., Kospanov A., Bukin S., Konstantinov P.	148
Микромасштабное моделирование скорости ветра в городской застройке во время экстремальных погодных событий	
Николаева Е.В., Коспанов А.А., Букин С.С., Константинов П.И.	149
Accuracy assessment of short-range forecast of heavy precipitations over the Kama river basin in 2019 with ICON and GFS atmospheric models	
Shikhov A.N., Abdullin R.K.	152
Оценка достоверности краткосрочного прогноза сильных осадков в 2019 г. в бассейне р. Камы по моделям ICON и GFS	
Шихов А.Н., Абдуллин Р.К.	153
Environments and modelling of two destructive squalls (derechoes) in the European Russia in summer 2010	
Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Sherstyukov B.G., Kurgansky M.A., Kalinin N.A., Bykov A.V.	155
Условия возникновения и моделирование двух разрушительных шквалов (деречо) в Европейской России летом 2010 г.	
Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Шерстюков Б.Г., Курганский М.А., Калинин Н.А., Быков А.В.	156
Numerical simulation of intense precipitation in the Moscow region: a case study of heavy rainfall event on 30th June 2017	
Yarinich Yu.I., Varentsov M.I., Platonov V.S., Stepanenko V.M.	159
Численное моделирование интенсивных осадков в Московском регионе на примере случая 30 июня 2017 года	
Ярынич Ю.И., Варенцов М.И., Платонов В.С., Степаненко В.М.	160

СЕКЦИЯ	3	ОТКЛИК НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ
SESSION	3	RESPONSE OF TERRESTRIAL ECOSYSTEMS OF NORTHERN EURASIA TO CLIMATE CHANGE

Floristic diversity of vascular plants in the closed forests at the lower forest belt line of the Severo-Chuisky Range (Russian Altai)	
Belova M.N., Timoshok E.E., Timoshok E.N., Rayskaya Yu.G.	165
Флористическое разнообразие сосудистых растений в сомкнутых пограничных лесах нижней части лесного пояса Северо-Чуйского хребта (Русский Алтай)	
Белова М.Н., Тимошок Е.Е., Тимошок Е.Н., Райская Ю.Г.	166
Dynamics of vegetation cover and quantitative paleoclimate reconstructions in Western Sayan mountains from Late Glacial to the present time according to palynological study of Yuzhno-Buybinskoe mire	
Blyakharchuk T.A.	169
Динамика растительного покрова и количественные реконструкции палеоклимата гор Западного Саяна с позднеледникового до современности по данным палинологического изучения болота Южно-Буйбинское	
Бляхарчук Т.А.	170
Transformation of vegetable of bogs at different stages of pyrogen succession	
Gashkova L.P.	173
Трансформация растительного покрова болот на разных стадиях пирогенной сукцессии	
Гашкова Л.П.	174
Assessment of emission and accumulation of greenhouse gases by peatland ecosystems in Nefteyugansky District in Khanty-Mansi Autonomous Okrug, Russia	
Dyukarev E.A., Sabrekov A.Z., Glagolev M.V., Kiselev M.V., Filippov I.V., Lapshina E.D.	177
Оценка эмиссии и поглощения парниковых газов болотными экосистемами Нefтeгyгaнскoгo рaйoнa Xaнты-Мaнсийскoгo Aвтoнoмнoгo Oкpyгa	
Дюкарев Е.А., Сабреков А.З., Глаголев М.В., Киселев М.В., Филиппов И.В., Лапшина Е.Д.	178
Features of NDVI changes in the West Siberian Plain in the context of climate change	
Korotkova E.M., Zuev V.V.	180
Особенности изменений NDVI на территории Западно-Сибирской равнины в условиях изменения климата	
Короткова Е.М., Зуев В.В.	181
Analysis of the surface wetness changes in mire Maly Labysh in the south of West Siberia during the last two millennia	
Kurina I.V., Blyakharchuk T.A.	185
Анализ уровня обводненности болота Малый Лабыш на юге Западной Сибири в течение двух последних тысячелетий	
Курьина И.В., Бляхарчук Т.А.	186
Energy, H₂O and CO₂ fluxes at a recently clear-cut and an undisturbed spruce forest in the southern taiga of European Russia	
Mamkin V.V., Varlagin A.V., Kurbatova J.A.	188
Потоки тепла, H₂O и CO₂ на свежей сплошной вырубке и в ненарушенном неморальном ельнике в условиях южной тайги Европейской территории России	
Мамкин В.В., Варлагин А.В., Курбатова Ю.А.	189
Dendroindication of hazardous natural events in the Severo-Chuisky Range (the Altai Mountains) for 300 years before the present	
Nikolaeva S.A., Savchuk D.A.	192
Дендроиндикация опасных природных событий на Северо-Чуйском хребте (Горный Алтай) за последние 300 лет	
Николаева С.А., Савчук Д.А.	193
Consistency of Iksinsky bog dynamics with extreme the Holocene climate events	
Preis Yu.I., Krutikov V.A., Polishchuk V.Yu.	196
Согласованность динамики болота Иксинское с экстремальными событиями климата голоцена	
Прейс Ю.И., Крутиков В.А., Полищук В.Ю.	197
Ecological peculiarities of Cyripedium calceolus L. in the Southern Evenkia ('Tungusky' reserve)	
Raiskaya Yu.G.	200
Экологические особенности Cyripedium calceolus L. в Южной Эвенкии (Заповедник Тунгусский)	
Райская Ю.Г.	201
Инструментальные измерения радиального роста и стволового сокодвижения у трех видов хвойных деревьев в Сибири	
Рубцов А.В., Арсак А., Кнорре А.А., Шашкин А.В., Бенькова В.Е., Ваганов Е.А.	203

Instrumental measurements of stem growth and stem sap flow rates of three conifer tree species in Siberia	
Rubtsov A.V., Arzac A., Knorre A.A., Shashkin A.V., Benkova V.E., Vaganov E.A.	204
Plant colonization of the young glaciofluvial deposits of the Severo-Chuiskiy glaciation center (Russian Altai) during the modern climate warming	
Timoshok E.N., Timoshok E.E., Raikaya Yu.G.	207
Заселение растений на молодых водно-ледниковых отложениях в период современного потепления климата в Северо-Чуйском центре оледенения (Русский Алтай)	
Тимошок Е.Н., Тимошок Е.Е., Райская Ю.Г.	208
Meteorological factors of Caucasus and Altai mountains's deglaciation	
Toropov P.A., Aleshina M.A., Nosenko G.A., Popovnin V.V.	211
Метеорологические факторы деградации горного оледенения Кавказа и Алтая.	
Торопов П.А., Алешина М.А., Носенко Г.А., Поповнин В.В.	212
Study of deciduous needle-leaved forests phenology changes in Siberia	
Varlamova E.V., Solovyev V.S.	215
Исследование изменений фенологических характеристик хвойных листопадных лесов Сибири	
Варламова Е.В., Соловьев В.С.	215
Methane flux dynamics in a valley reservoir according to the results of the field observations	
Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M., Repina I.	219
Динамика потоков метана в долинном водохранилище по результатам натурных наблюдений	
Ломов В.А., Степаненко В.М., Гречушникова М.Г., Репина И.А.	220
Particular features of long-term variations of $\delta^{13}\text{C}$ in cellulose of tree rings in closed canopy stands of the Ob-Tom interfluv	
Markelova A.N., Simonova G.V., Kalashnikova D.A., Volkov Yu.V.	223
Особенности многолетних вариаций $\delta^{13}\text{C}$ в целлюлозе годовичных колец в сомкнутых древостоях Обь-Томского междуречья	
Маркелова А.Н., Симонова Г.В., Калашникова Д.А., Волков Ю.В.	224
Estimate of the decomposition rate of peat-forming plants in drained and pyrogenic peatlands	
Nikonova L.G., Golovatskaya E.A.	227
Оценка скорости разложения растений-торфообразователей в осушенных и пирогенных торфяниках	
Никонова Л.Г., Головацкая Е.А.	227
Features of carbon photoassimilation by dominant species of mosses and lichens in pine forests of Central Siberia	
Polosukhina D.A., Prokushkin A.S., Masyagina O.V.	231
Особенности фотоассимиляции углерода доминантными видами мхов и лишайников в сосновых лесах Средней Сибири	
Полосухина Д.А., Прокушкин А.С., Масыгина О.В.	232
Influence of vegetation cover on temperature dynamics of sandy soil	
Shuklina E.S., Voropay N.N.	235
Влияние растительного покрова на динамику температуры песчаной почвы	
Шуклина Е.С., Воропай Н.Н.	236

СЕКЦИЯ	4	СОСТАВ АТМОСФЕРЫ, ПЕРЕНОС ЗАГРЯЗНЕНИЙ И ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА
SESSION	4	AIR COMPOSITION, POLLUTION TRANSPORT AND CLIMATE CHANGE

Algorithms based on sensitivity operators for analyzing and solving inverse modeling problems of transport and transformation of atmospheric pollutants	
Penenko A., Gochakov A., Penenko V.	239
Алгоритмы на основе операторов чувствительности для анализа и решения задач обратного моделирования переноса и трансформации примесей в атмосфере	
Пененко А.В., Гочаков А.В., Пененко В.В.	240
Inverse modeling for forecasting and environmental quality control	
Penenko V., Penenko A.	243
Обратное моделирование для прогнозирования и контроля качества окружающей среды	
Пененко В.В., Пененко А.В.	243
Numerical study of the gases and aerosol composition in the background and urban location of Western Siberia: a case study for the record-breaking hot April 2020	
Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Kozlov A.V., Savkin D.E., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.	246

Численное исследование газового и аэрозольного состава атмосферы в фоновых и городских условиях Западной Сибири для аномально теплого апреля 2020	
Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.	246
Pollen in winter precipitation in the south of Western Siberia	
Kuryatnikova N.A., Malygina N.S., Mitrofanova E.Yu.	250
Пыльцевые зерна в зимних атмосферных осадках юга Западной Сибири	
Курятникова Н.А., Малыгина Н.С., Митрофанова Е.Ю.	250
Microplastic in snow cover of south Western Siberia	
Malygina N.S., Biryukov R.Yu., Zolotov D.V., Kuryatnikova N.A., Mitrofanova E.Yu., Pershin D.K., Chernykh D.V.	254
Микропластик в снежном покрове юга Западной Сибири	
Малыгина Н.С., Бирюков Р.Ю., Золотов Д.В., Курятникова Н.А., Митрофанова Е.Ю., Першин Д.К., Черных Д.В.	254
Study of fast methane variations on the Arctic coast during summer-autumn period on ground-based and satellite measurements	
Starodubtsev V.S., Solovyev V.S.	257
Исследование быстрых вариаций метана на арктическом побережье в летне-осенний период по наземным и спутниковым данным	
Стародубцев В.С., Соловьев В.С.	257
The role of weather and terrain in air pollution of Krasnoyarsk (Russia)	
Tokarev A.V., Shaparev N.Ya., Yakubailik O.E.	261
Роль метеоусловий и рельефа местности в загрязнении атмосферы города Красноярска (Россия)	
Токарев А.В., Шапарев Н.Я., Якубайлик О.Э.	262
Анализ газового и аэрозольного состава атмосферы в фоновых и городских условиях Западной Сибири для аномально теплого апреля 2020	
Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.	265
The formation of the gases and aerosol composition in the background and urban location of Western Siberia: a case study for the record-breaking hot April 2020	
Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Kozlov A.V., Savkin D.E., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.	265
Distribution of low stratiform clouds and its long-term changes over the Siberia territory	
Lomakina N.Ya., Lavrinenko A.V.	269
Распределение нижней слоистообразной облачности и ее долговременные изменения над территорией Сибири	
Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В.	270
Distribution of precipitation and their long-term changes over the territory of Siberia	
Lomakina N.Ya., Lavrinenko A.V.	273
Распределение осадков и их долговременные изменения над территорией Сибири	
Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В.	274

СЕКЦИЯ	5	ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, РЕГИОНАЛЬНЫЕ РИСКИ И СОЦИО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ
SESSION	5	EXTREME CLIMATIC EVENTS, REGIONAL RISKS AND SOCIO-ECONOMIC IMPACTS

Методы изучения и прогноз штормовых ветров на территории России	
Глебов В.В., Аникина Е.В., Шевцов В.В.	279
Methods of study and forecast of storm winds on the territory of Russia	
Glebov V.V., Anikina E.V., Shevtsov V.V.	280
Ice rains in the Urals according to radiosonding	
Kalinin N.A., Sviyazov E.M., Pomortseva A.A., Pischalnikova E.V.	283
Ледяной дождь на Среднем Урале по данным радиозондирования	
Калинин Н.А., Свиязов Е.М., Поморцева А.А., Пищальникова Е.В.	284
Mapping changes of stress-strain state of a landslide slope using Earth's natural pulsed electromagnetic field method	
Malyshkov S.Yu., Gordeev V.F., Polivach V.I.	286
Картирование изменений напряженно-деформированного состояния оползневого склона методом естественного импульсного электромагнитного поля Земли	
Малышков С.Ю., Гордеев В.Ф., Поливач В.И.	287

Radar characteristics of ice rains in the Urals and adjacent areas Pomortseva A.A.	290
Радиолокационные характеристики ледяных дождей на Урале и прилегающих территориях Поморцева А.А.	290
The selection of Scots pine seedlings' growth stimulants in extreme conditions of the Northern Kazakhstan steppe zone Kabanova S.A., Musoni W., Zenkova Z.N., Danchenko M.A.	293
Обоснование подбора стимуляторов роста сеянцев сосны обыкновенной в экстремальных условиях степных районов Северного Казахстана Кабанова С.А., Мусони У., Зенкова Ж.Н., Данченко М.А.	294
Assessment of the use of reanalyses for the diagnosis of avalanche hazard in the Caucasus mountains Kuksova N.E., Toropov P.A., Oleinikov A.D., Surkova G.V.	296
Оценка использования реанализов для диагностики лавинной опасности в горах Кавказа Куксова Н.Е., Торопов П.А., Олейников А.Д., Суркова Г.В.	297
Assessment of conditions of aridity and humidity of the growing season on the territory of the Samara region Mirsaeva N.A.	300
Оценка условий засушливости и увлажненности вегетационного периода на территории Самарской области Мирсаева Н.А.	301

СЕКЦИЯ	6	ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА РЕГИОНАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
SESSION	6	INSTRUMENTAL AND INFORMATION AND MEASURING INFRASTRUCTURE OF A REGIONAL ENVIRONMENTAL STUDY

Automatic weather station ArcticMeteo. First field test results Korolkov V.A., Kobzev A.A., Tikhomirov A.A., Telminov A.E., Pustovalov K.N., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V., Kurakov S.A.	305
Автоматическая метеостанция АрктикМетео. Первые результаты натурных испытаний Корольков В.А., Кобзев А.А., Тихомиров А.А., Тельминов А.Е., Пустовалов К.Н., Богушевич А.Я., Кальчихин В.В., Кураков С.А.	306
Использование современных методик изучения гидрометеорологических измерительных систем Сабирова М.В., Баканин А.С., Короткова Н.В.	309
The use of the modern methodologies for the study of hydrometeorological measuring systems Sabirova M.V., Bakanin A.S., Korotkova N.V.	310
Software tool for the study of turbulence of the atmospheric boundary layer according to measurements with AMK-03 Ivanov E.A., Botygin I.A.	313
Программный инструмент для исследования турбулентности приземного слоя атмосферы по измерениям с АМК-03 Иванов Е.А., Ботыгин И.А.	314
Lidar technologies for studying the vertical structure of the optical-physical parameters of the atmosphere over the territory of Siberia Nasonov S.V., Balin Yu.S., Klemasheva M.G., Kokhanenko G.P., Novoselov M.M., Penner I.E.	317
Лидарные технологии для исследования вертикальной структуры оптико-физических параметров атмосферы над территорией Сибири Насонов С.В., Балин Ю.С., Клемашева М.Г., Коханенко Г.П., Новоселов М.М., Пеннер И.Э.	318

СЕКЦИЯ	7	ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА РЕГИОНАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
SESSION	7	INFORMATION COMPUTATIONAL INFRASTRUCTURE OF A REGIONAL ENVIRONMENTAL STUDY

Standardization of forms and tools for inter-machine interaction in the exchange of hydrometeorological data Vyazilov E.D., Melnikov D.A., Mikhhev A.S.	321
Data assimilation methods for nonlinear geophysical models based on ensemble approach Klimova E.G.	324
Методы усвоения данных для нелинейных геофизических задач, основанные на ансамблевом подходе Климова Е.Г.	325

An approach to digital environmental monitoring of forest resources of the Baikal natural territory Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Popova A.K.	328
Подход к организации цифрового экологического мониторинга лесных ресурсов на примере Байкальской природной территории Бычков И.В., Ружников Г.М., Фёдоров Р.К., Попова А.К.	329
Application of Netatmo personal weather stations data for urban climate research, monitoring and mapping of meteorological conditions and thermal comfort in the Moscow megacity Varentsov M.I., Samsonov T.E., Kargashin P.E., Korosteleva P.A., Varentsov A.I., Perkhurova A.A., Konstantinov P.I.	332
Применение данных персональных метеостанций Netatmo для исследования городского климата, мониторинга и картографирования метеорологических условий и термического комфорта Московском мегаполисе Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Каргашин П.Е., Коростелева П.А., Варенцов А.И., Перхурова А.А., Константинов П.И.	333
The structure and content of the GIS 'Hydrological and environmental safety of the Selenga River basin' Garmaev E.Zh., Pyankov S.V., Tsydypov B.Z., Shikhov A.N., Ayurzhanayev A.A., Sodnomov B.V., Abdullin R.K.	336
Структура и информационное наполнение ГИС «Гидроэкологическая безопасность бассейна р. Селенги» Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В., Цыдыпов Б.З., Шихов А.Н., Аюржанаев А.А., Содномов Б.В., Абдуллин Р.К.	337
Aircraft Icing Nowcasting Technique Mordus D.P., Zuev V.V., Pavlinskii A.V.	339
Методика сверхкраткосрочного прогноза обледенения воздушных судов Мордус Д.П., Зуев В.В., Павлинский А.В.	340
Local climate zoning and urban heat island in Nur-Sultan Berlessova A., Konstantinov P.	343
Локальное климатическое районирование и городской остров тепла г. Нур-Султан Берлессова А.А., Константинов П.И.	343
Computing core of the software package for 'cloud' analysis of climate change and the environment Okladnikov I.G.	346
Вычислительное ядро программного комплекса для «облачного» анализа климатических изменений и окружающей среды Окладников И.Г.	347
Development real-time system for thermal comfort conditions monitoring in Moscow metropolis Perkhurova A.A., Konstantinov P.I., Varentsov M.I., Samsonov T.E., Kargashin P.E.	352
Разработка системы мониторинга условий термического комфорта для населения Московского мегаполиса в режиме реального времени Перхурова А.А., Константинов П.И., Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Каргашин П.Е.	353

СЕКЦИЯ	8	FUTURE EARTH PROGRAM AND NORTHERN EURASIA FUTURE INITIATIVE
SESSION	8	FUTURE EARTH PROGRAM AND NORTHERN EURASIA FUTURE INITIATIVE

Variability of Northern Hemisphere storm-tracks under future climate conditions in INM-CM5 climate model output Martynova Yu.V., Vargin P.N., Volodin E.M.	357
Изменчивость шторм-треков Северного полушария в условиях будущего климата по расчетам климатической модели INM-CM5 Мартынова Ю.В., Варгин П.Н., Володин Е.М.	358
First results of the research of thermal comfort conditions in the largest administrative centers of the Russian Federation Kakovkina A., Konstantinov P.	361
Первые результаты исследования условий термического комфорта в крупнейших административных центрах РФ Каковкина А.Г., Константинов П.И.	362

WORKSHOP WCEDAI

WEATHER AND CLIMATIC WORKSHOP EXTREMES: DATA, ANALYSIS AND IMPACT

Windthrows in the pine forests of the Tsagan-Daban ridge (central part of the Selenginsky high mountains) Chernykh V.N., Alymbaeva Zh.B., Andreev S.G., Ayurzhanayev A.A., Tsydygov B.Z.	366
Extreme climate events as an influence factor on the Volga delta ecological systems Valov M.V., Barmin A.N., Tatarintsev S.A., Kolchin E.A.	366
Changes of temperature and precipitation extremes in the south of Russia associated with El Niño events Vyshkvarkova E., Sukhonos O.	367
Geoeological analysis of the influence of climate factors on the formation of technogenic danger of arid territories Tatarintsev S.A., Valov M.V., Barmin A.N., Kolchin E.A.	368
Mapping of hazardous hydrological events in the Russian part of Selenga river basin Garmaev E.Zh., Tsydygov B.Z., Ayurzhanayev A.A., Sodnomov B.V., Pyankov S.V., Shikhov A.N., Abdullin R.K.	368
Assessment and forecast of regional risks and medical and social consequences in conditions of climate change Efimova N.V., Gornov A.Yu., Zarodnyuk T.S., Anikin A.S.	369
Estimated influence of extreme climate events in 21st century on radial growth of pine in Povolzhie region (European Russia) Matskovsky V., Semenyak N., Morozova P., Kuznetsova V., Solomina O.	370
Negative impact of dangerous hydrometeorological phenomena on the processes of recreation and tourism in the Astrakhan region Kolchin E.A., Barmin A.N., Valov M.V., Tatarintsev S.A.	370
Estimates of potential damages in monetary terms from dangerous and adverse meteorological phenomena on the territory of the Russian Federation Sterin A.M., Oganessian V.V.	371
Accuracy assessment of heavy rainfall forecasting in the Krasnodar territory with the use of ICON-EU regional atmospheric model Shikhov A.N., Belyakova P.A., Perminov S.I., Moreido V.M.	372
Features in spatial distribution of higher order cumulants of meteorological anomalies in the Northern Hemisphere Loginov S.V., Eliseev A.V., Kharyutkina E.V.	373
High-resolution wind speed and waves modeling, and an assessment of mesoscale peculiarities caused by coastline parameters and relief at near-shore Kara Sea regions Platonov V.S., Kislov A.V., Myslenkov S.A.	373
A new detailed long-term hydrometeorological dataset: first results of extreme characteristics estimations over the Russia Arctic seas Platonov V.S., Varentsov M.I.	374
On the long period trend estimates for the upper-air extreme and sub-extreme temperatures by use of quantile regression Sterin A.M., Lavrov A.S.	376
Methodological aspects of orographic winds analysis and modelling in the Arctic Shestakova A.A., Toropov P.A., Repina I.A.	376
Variability of characteristics and conditions leading to the formation of extreme precipitation events in the south of Western Siberia Volkova M.A., Cheredko N.N.	377
The effect of atmospheric circulation in the Northern Hemisphere on hydrothermal extremes in Siberia Voropay N.N., Ryazanova A.A.	378
Variability of planetary high-altitude frontal zones in the Northern Hemisphere from 1991 to 2019 in the summer and their location during extreme weather events Durneva E.	379
Analysis of extreme weather events in the conditions of modern climate change in the Northern regions Kuznetsova V.	379
Correlation of lightning frequency and convective thermodynamic parameters of the atmosphere over of Western Siberia Nechepurenko O.E., Pustovalov K.N., Gorbatenko V.P.	380
Extreme cyclones over the Ural region Pischalnikova E.V., Babushkin I.M.	381

The comparison of lightning activity registered by different lightning detection systems in the south-east of Western Siberia	
Pustovalov K.N., Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A., Nechepurenko O.E.	382
Variability of extreme values of bioclimatic indices in the Crimean resorts	
Stefanovich A.A., Voskresenskaya E.N., Lubkov A.S.	383
Changes of extreme air temperature in the Black sea region	
Sukhonos O.Yu., Voskresenskaya E.N.	384
Extreme rates of the temperature according to weather stations in the Northern Hemisphere	
Tartakovsky V.A., Cheredko N.N., Maximov V.G.	385
Influence of extreme weather conditions and snow accumulation regime on ground freezing depth in Russia in winter period 2019/2020	
Frolov D.M.	385
Modelling of extreme concentrations of atmospheric pollutants, their forecast and practical applications in Russia	
Genikhovich E., Kirillova V., Nikolaev V., Yakovleva E., Rumyantsev D., Vylitok N.	386
Mercury emissions from fires in Siberia (case study of the Tomsk Region)	
Lyapina E., Voropay N.	387
Variation of atmospheric instability characteristics against the background of regional surface thermodynamic conditions during fall-winter season	
Martynova Yu., Krupchatnikov V., Gochakov A., Antokhina O.	388
Extreme precipitation and features of their precipitation in the territory of Perm region	
Sivkov B.A.	389
Role of atmospheric circulation in the formation of anomaly warm and anomaly cold winters in the Asian territory of Russia	
Trukhanov A.E., Kochugova E.A.	390
Empiric approach to forecast hot extremes for energy modeling	
Fedotova E.V., Klimenko V.V.	391
Extreme atmospheric precipitation in Western Siberia based on different databases	
Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Martynova Yu.V., Kakurkina O.Yu.	392
An empirical method for predicting extreme low winter sea ice extent in the Russian Arctic in the 21st century under global warming (on the example of the Barents Sea)	
Cherenkova E.A., Semenov V.A., Titkova T.B.	392

