

INTERNATIONAL YOUNG SCIENTISTS SCHOOL
AND CONFERENCE ON COMPUTATIONAL INFORMATION
TECHNOLOGIES FOR ENVIRONMENTAL SCIENCES
IN COMMEMORATION OF RAS CORRESPONDING MEMBER
VASILY LYKOSOV

CITES '2021

22 – 26 NOVEMBER 2021
MOSCOW, RUSSIA



МЕЖДУНАРОДНАЯ МОЛОДЕЖНАЯ ШКОЛА И КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-ИНФОРМАЦИОННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ
ДЛЯ НАУК ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ,
ПОСВЯЩЕННЫЕ ПАМЯТИ ЧЛЕНА-КОРРЕСПОНДЕНТА РАН
ВАСИЛИЯ НИКОЛАЕВИЧА ЛЫКОСОВА

CITES '2021

22 – 26 НОЯБРЯ 2021
МОСКВА, РОССИЯ

Организаторы CITES' 2021

Институт вычислительной математики
им. Г.И. Марчука РАН

Институт мониторинга климатических
и экологических систем СО РАН

Научно-исследовательский вычислительный
центр МГУ

Московский центр фундаментальной
и прикладной математики

Гидрометцентр России

БЛАГОДАРНОСТИ ЗА ПОДДЕРЖКУ

Мероприятие проведено при поддержке
проекта РФФ 21-71-30023.

CITES' 2021 organizers

G.I. Marchuk Institute of Numerical Mathematics
RAS

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological
Systems SB RAS

Research Computing Center of Moscow State
University

Moscow Center of Fundamental and Applied
Mathematics

Hydrometeorological Center of Russia

THANKS

The event is supported by the Russian Science
Foundation, project 21-71-30023.

СОДЕРЖАНИЕ / CONTENTS

SESSION I

SUBSEASONAL AND LONG-TERM WEATHER AND CLIMATE FORECASTS

СЕКЦИЯ I

СУБСЕЗОННЫЕ И ДОЛГОСРОЧНЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ

Research on the INM RAS climate model skill in summer seasonal hindcasts Vorobyeva V.V., Volodin E.M.	10
Исследование качества летних сезонных ретроспективных прогнозов, выполненных на основе климатической модели ИВМ РАН Воробьева В.В., Володин Е.М.	11
Medium range ensemble prediction system of Hydrometcentre of Russia based on SL-AV model: First results Mizyak V., Tolstykh M., Rogutov V., Alipova K., Goyman G.	15
Система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды Гидрометцентра России на основе модели ПЛАВ: Первые результаты Мизяк В.Г., Толстых М.А., Рогутов В.С., Алипова К.А., Гойман Г.С.	15
Spatial verification of regional ensemble forecast at the Hydrometcentre of Russia Olkhovaya E., Bundel A., Astakhova E., Alferov D.	18
Пространственная верификация регионального ансамблевого прогноза ФГБУ «Гидрометцентр России» Ольховая Е.Д., Бундель А.Ю., Астахова Е.Д., Алферов Д.Ю.	19
Global Atmospheric Oscillation and El Niño long-term forecast Serykh I.V., Sonechkin D.M.	20
Глобальная атмосферная осцилляция и долгосрочный прогноз Эль-Ниньо Серых И.В., Сонечкин Д.М.	21
Investigation of the NAO index predictability reasons in seasonal hindcasts of the INM RAS climate model for the 2009–2010 winter season Tarasevich M.A., Volodin E.M.	24
Исследование причин предсказуемости индекса северо-атлантического колебания по данным ретроспективных сезонных прогнозов климатической модели ИВМ РАН для зимы 2009–2010 Тарасевич М.А., Володин Е.М.	25

SESSION II

MODELING AND ANALYSIS OF GLOBAL AND REGIONAL CLIMATE AND RELATED ATMOSPHERIC PROCESSES

СЕКЦИЯ II

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ГЛОБАЛЬНОГО И РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА И ФОРМИРУЮЩИХ ЕГО АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Climatic changes in the tropo-stratosphere on the territory of Russia in the XX-XXI centuries Perevedentsev Yu.P., Sherstyukov B.G., Shantalinskii K.M., Guryanov V.V.	28
Климатические изменения в тропо-стратосфере на территории России в XX-XXI веках Переведенцев Ю.П., Шерстюков Б.Г., Шанталинский К.М., Гурьянов В.В.	29

Non-saltation emission of aerosol: parameterization and modeling Vazaeva N., Chkhetiani O.	32
Несальтационная эмиссия аэрозоля: параметризация и моделирование Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г.	33
Верификация вертикального профиля температур моделей COSMO и ICON по данным доступных наблюдений Гочаков А.В., Токарев В.М., Колкер А.Б.	35
Verification of vertical temperature profile of COSMO and ICON models with available observation data Gochakov A.V., Tokarev V.M., Kolker A.B.	36
Масштабируемость и аспекты реализации численных моделей турбулентности и лагранжевого переноса частиц Дебольский А.В., Мортиков Е.В., Степаненко В.М.	39
Implementation aspects of DNS-LES model and Lagrangian particle transport on different architectures Debolskiy A.V., Mortikov E.V., Stepanenko V.M.	40
Statistical properties of atmospheric turbulence in urban conditions using measurements on the micrometeorological mast of MSU Drozd I., Gavrikov A., Stepanenko V., Repina I., Artamonov A., Pashkin A.	42
Статистические характеристики турбулентности в условиях городской застройки по данным микрометеорологической мачты МГУ Дрозд И.Д., Гавриков А.В., Степаненко В.М., Репина И.А., Артамонов А.Ю., Пашкин А.Д.	43
The influence of the surface parameters of St. Petersburg on the atmosphere circulation above it Ladokhina E.M., Rubinshtein K.G.	44
Влияние параметров поверхности Санкт-Петербурга на циркуляцию атмосферы над ним Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г.	45
Investigation of Northern Hemispheric storm tracks under future climate conditions in INM-CM5 model output Martynova Yu.V., Vargin P.N., Volodin E.M.	47
Исследование шторм-треков Северного полушария для условий будущего климата по расчётам модели ИВМ РАН CM5 Мартынова Ю.В., Варгин П.Н., Володин Е.М.	48
Relationship between snow cover onset rate in Western Siberia and atmospheric dynamics anomalies in the Northern Hemisphere for the fall-winter season Martynova Yu.V., Krupchatnikov V.N., Gochakov A.V., Antokhina O.Yu.	50
Связь интенсивности формирования снежного покрова в Западной Сибири с особенностями динамики атмосферы Северного полушария в осенне-зимний сезон Мартынова Ю.В., Крупчатников В.Н., Гочаков А.В., Антохина О.Ю.	51
Analysis of the aeropalino logical monitoring results in Perm and determination of the main directions of pollen grains transfer Novoselova L.V., Shvarts K.G., Shklyayev V.A.	53
Анализ результатов аэропалинологического мониторинга в г. Перми и определение основных направлений переноса пыльцевых зерен Новоселова Л.В., Шварц К.Г., Шкляев В.А.	54
Исследование турбулентных замыканий в задаче о разрушающейся двумерной турбулентности Пережогин П.А.	58
An investigation of turbulence closures in decaying 2D turbulence Perezhogin P.A.	61

Моделирование реакции атмосферы на сокращение арктического льда Платов Г., Градов В., Боровко И., Володин Е., Крупчатников В.	62
Modelled atmospheric response to Arctic ice reduction Platov G., Gradov V., Borovko I., Volodin E., Krupchatnikov V.	62
Hydrodynamic modeling of the transport of heavy aerosols of various origins in the boundary layer of the atmosphere Varentsov A.I., Stepanenko V.M., Mortikov E.V.	63
Гидродинамическое моделирование переноса тяжёлых аэрозолей различного генезиса в пограничном слое атмосферы Варенцов А.И., Степаненко В.М., Мортиков Е.В.	64
Microclimatic features of Moscow city centre and the influence of green infrastructure: a case study of the 2010 heatwave Kospanov A.A., Konstantinov P.I.	67
Микроклиматические особенности центра города Москва и влияние зеленой инфраструктуры на примере волны жары 2010 года Коспанов А.А., Константинов П.И.	68
Evaluation of ventilation conditions and bioclimatic comfort conditions in Moscow at the microclimatic level, depending on different types of the buildings structure Perkhurova A.A., Samsonov T.E., Varentsov M.I., Kospanov A.A., Konstantinov P.I.	70
Оценка условий вентилирования и биоклиматической комфортности в Москве на микроклиматическом уровне в зависимости от структуры застройки Перхурова А.А., Самсонов Т.Е., Варенцов М.И., Коспанов А.А., Константинов П.И.	72
Diurnal variability of ultrafine fraction aerosol in the atmosphere of southeastern coast of Lake Baikal (Boyarsk st.) in summer 2020 Tsydyrov V.V., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Dementeva A.L., Balzhanov T.S.	75
Суточный ход микродисперсной фракции аэрозоля в атмосфере юго-восточного побережья оз. Байкал (стационар «Боярский») летом 2020 г. Цыдыпов В.В., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Дементьева А.Л., Бальжанов Т.С.	75
Extratropical cyclones over North Atlantic based on ERA-5 and NCEP–NCAR reanalysis for 1979–2020 Viazilova N., Viazilov A.	78
Внетропические циклоны Северной Атлантики по данным реанализов NCEP -NCAR и ERA-5 за период 1979-2020 Вязилова Н.А., Вязилов А.Е.	79
Analysis of the vertical structure of atmosphere during the coldest days in Norilsk and Salekhard according to numerical simulation Vorotilova P., Timazhev A., Konstantinov P.	82
Исследование вертикальной структуры атмосферы в течение наиболее холодных дней в Норильске и Салехарде по данным моделирования Воротилова П.Г., Тимажев А.В., Константинов П.И.	83
Quality assessment of surface wind speed reproduction by the new detailed model COSMO-CLM hindcast in the Russian Arctic Boiko A., Platonov V.	84
Оценка качества воспроизведения приземной скорости ветра в Российской Арктике на основе данных нового детализированного модельного архива COSMO-CLM Бойко А.П., Платонов В.С.	85
Quality assessment of surface temperature reproduction by the new detailed COSMO-CLM hindcast based on station data in the Russian Arctic Duntsev S., Platonov V.	89
Оценка качества воспроизведения приземной температуры новым детализированным модельным архивом COSMO-CLM по станционным данным в Российской Арктике Дунцев С.А., Платонов В.С.	90

SESSION III

DEVELOPMENT OF EARTH SYSTEM MODEL COMPONENTS

СЕКЦИЯ III

РАЗРАБОТКА КОМПОНЕНТ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ

Stochastic perturbation of parameters in SL-AV model

Alipova K.A., Tolstykh M.A., Goyman G.S. 95

Стохастическое возмущение параметров в модели ПЛАВ

АЛИПОВА К.А., ТОЛСТЫХ М.А. ГОЙМАН Г.С. 96

Comparative computational performance of two different techniques for calculation of the sea surface height in a climate ocean model

Blagodatskih D., Onoprienko V., Mortikov E., Iakovlev N. 98

Сравнение вычислительной эффективности двух методик расчета уровня океана в климатической модели

Благодатских Д.В., Оноприенко В.А., Мортиков Е.В., Яковлев Н.Г. 99

Choosing a horizontal grid for numerical simulation of equatorial dynamics with ocean model

Onoprienko V., Blagodatskih D., Mortikov E., Iakovlev N. 101

Выбор горизонтальной сетки для воспроизведения экваториальной динамики численной моделью океана

Оноприенко В.А., Благодатских Д.В., Мортиков Е.В., Яковлев Н.Г. 102

Значительное сокращение площади морского льда в Арктике как фактор обильных апрельских снегопадов на территории Европы

Фролов Д.М. 104

Considerable Arctic Sea ice loss as a factor of heavy April snowfalls in Europe

Frolov D.M. 104

Modification of the soil-snow block of the climatic model of the INM RAS

Chernenkov A.Yu., Kostrykin S.V., Volodin E.M. 107

Модификация почвенно-снежного блока климатической модели ИВМ РАН

Черненко А.Ю., Кострыкин С.В., Володин Е.М. 107

Development of dynamical core for the perspective global atmospheric circulation model

Shashkin V., Goyman G. 110

Разработка динамического ядра для перспективной модели общей циркуляции атмосферы

Шашкин В.В., Гойман Г.С. 111

SESSION IV

LAND SURFACE PROCESSES: OBSERVATIONS, MODELS,

DATA ASSIMILATION

СЕКЦИЯ IV

ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ СУШИ: НАБЛЮДЕНИЯ,
МОДЕЛИ И УСВОЕНИЕ ДАННЫХ**Numerical simulation of the processes of emission and interaction of gases in inland waters**

Gladskikh D.S., Mortikov E.V., Stepanenko V.M. 115

Численное моделирование процессов эмиссии и взаимодействия газов во внутренних водоемах

Гладских Д.С., Мортиков Е.В., Степаненко В.М. 116

Валидация приземной температуры воздуха реанализа ERA5 наблюдениями на метеорологических вышках в Сибири

Горбатенко В., Чурсин В., Аршинов М., Белан Б., Давыдов Д., Фофонов А., Мотоки Сасакава, Тошинобу Мачида, Беликов Д.	119
Validation of the near-surface air temperature from the ERA5 reanalysis using tower observations in Siberia	
Gorbatenko V., Chursin V., Arshinov M., Belan B., Davydov D., Fofonov A., Motoki Sasakawa, Toshinobu Machida, Belikov D.	120
Selection of temperature response function for soil respiration	
Dyukarev E.A., Kurakov S.A.	123
Выбор функции отклика почвенного дыхания на изменения температуры	
Дюкарев Е.А., Курков С.А.	123
On considering the annual cycle of air temperature in climate trend analysis based on quantile regression methodology	
Lavrov A.S., Sterin A.M.	125
Об учете годового хода температуры воздуха при анализе ее климатических трендов методом квантильной регрессии	
Лавров А.С., Стерин А.М.	125
Numerical modeling of severe rime accretion in the Far North of Russia	
Leonov I.I., Sokolikhina N.N.	128
Численное моделирование опасных изморозевых отложений на территории Крайнего Севера России	
Леонов И.И., Соколихина Н.Н.	128
Evaluation of the global atmospheric model SL-AV's soil analysis at warm season	
Travova S.V., Tolstykh M.A.	131
Оценка воспроизведения влажности и температуры почвы в летний сезон глобальной моделью атмосферы ПЛАВ	
Травова С.В., Толстых М.А.	132
Variability of dates of snow cover formation in Siberia for 1970–2020 according to various datasets	
Matyukhina A.A., Voropay N.N., Martynova Yu.V.	135
Изменчивость дат образования снежного покрова Сибири по разным наборам данных в период 1970–2020 гг.	
Матюхина А.А., Воропай Н.Н., Мартынова Ю.В.	136
Finding of optimal predictors for the forecast of ice based on the WRF-ARW model	
Pischalnikova E.V., Kalinin N.A., Sviyazov E.M., Bykov A.V.	138
Поиск оптимальных предикторов для прогноза возникновения гололеда на основе модели WRF-ARW	
Пищальникова Е.В., Калинин Н.А., Связов Е.М., Быков А.В.	139
Modeling of heat and moisture transfer in the active layer of land using various parameterizations of the moisture potential of the hydraulic flow and the moisture conductivity coefficient, taking into account various pedotransfer functions and discretization of the organic and mineral composition in depth	
Ryazanova A.A., Bogomolov V.Yu., Dyukarev E.A., Stepanenko V.M.	142
Моделирование тепловлагодпереноса в деятельном слое суши с использованием различных параметризаций потенциала влаги гидравлического потока и коэффициента влагопроводности с учетом различных педотрансферных функций и дискретизации органического и минерального состава по глубине	
Рязанова А.А., Богомолов В.Ю., Дюкарев Е.А., Степаненко В.М.	143
Numerical simulation of methane fluxes from Mozhaysk reservoir by LAKE 2.3 model	
Lomov V.M., Stepanenko V.M.	145
Численное воспроизведение потоков метана с поверхности Можайского водохранилища с помощью модели LAKE 2.3	
Ломов В.А., Степаненко В.М.	146

SESSION V

COMPUTATIONAL AND INFORMATIONAL TECHNOLOGIES FOR EARTH SCIENCES

СЕКЦИЯ V

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ НАУК О ЗЕМЛЕ**Digital transformation of hydrometeorological support – the basis for improving the safety of the population and enterprises**

Viazilov E.D. 150

Цифровая трансформация гидрометеорологического обеспечения потребителей – основа повышения безопасности населения и предприятий

Вязилов Е.Д. 151

Вариационные методы для систем природоохранного прогнозирования и усвоения данных измерений

Пененко В.В., Пененко А.В. 154

Variational methods for environmental forecasting systems and assimilation of measurement data

Penenko V., Penenko A. 155

Data Analysis and Scientific Applications with new Tree Ring web-Integrated System for Hydrology (TRISH)

Shiklomanov A., Prusevich A., Glidden S. 156

High-order approximation schemes for the staggered reduced lat-lon grid

Goyman G.S., Shashkin V.V. 157

Схемы высокого порядка для дискретизации уравнений на редуцированной широтно-долготной сетке с разнесением переменных

Гойман Г.С., Шашкин В.В. 157

Air quality inverse modeling algorithms for heterogeneous measurement data

Penenko A., Penenko V., Tsvetova E., Gochakov A., Pyanova E., Konopleva V. 159

Алгоритмы обратного моделирования качества воздуха для работы с гетерогенными данными измеренийПененко А.В., Пененко В.В., Цветова Е.А., Гочаков А.В., Пьянова Э.А.,
Коноплева В.С. 160**The reciprocal conversion of environmental data for customer information support**

Peretyatko L.O., Sterin A.M., Koftan Yu.R. 162

О взаимной конвертации данных об окружающей среде для информационного обслуживания потребителей

Перетятко Л.О., Стерин А.М., Кофтан Ю.Р. 163

Diagnostics of the presence of deep convection and dangerous atmospheric phenomena using satellite data

Badanov A. Yu. , Yusupov Yu.I. 165

Диагностика наличия глубокой конвекции и опасных атмосферных явлений с использованием спутниковых данных

Баданов А.Ю. , Юсупов Ю.И. 166

Creation of a prototype system for forecasting dangerous wind speed events for the territory of Moscow State University

Nikolaeva E., Konstantinov P. 170

Создание прототипа системы прогноза опасных скоростей ветра для территории МГУ имени М.В.Ломоносова

Николаева Е.В., Константинов П.И. 171

Lambda architecture as a basis for a digital twin of a regional climate system	
Okladnikov I.G.	174
Лямбда-архитектура как основа цифрового двойника региональной климатической системы	
Окладников И.Г.	174
Comparison of Taylor-Galerkin type schemes for transport equation on sphere	
Petrov S.	175
Сравнение схем Тейлора-Галеркина для решения уравнения переноса на сфере	
Петров С.С.	176
Safe city – GIS Meteo subsystem	
Tikhonenko N.D., Yusupov Yu.I.	179
Безопасный город – подсистема ГИС Метео	
Тихоненко Н.Д., Юсупов Ю.И.	179
Использование программного обеспечения с открытым кодом в прикладных климатических исследованиях: интеграция метеонаблюдений для территории России	
Федотова Е.В.	182
Open source approach towards integration of the meteorological records across Russia into a climate impact modeling workflow	
Fedotova E.	183
Применение нейронных сетей для идентификации дифференциальных уравнений в частных производных на примере блока деятельного слоя суши модели Земной системы ИВМ РАН	
Чернышев Р.В., Криницкий М.А., Степаненко В.М.	186
Neural networks for identifying partial differential equations in the land surface scheme of the INMCM Earth System model	
Chernyshev R., Krinitskiy M., Stepanenko V.	186
SESSION VI	
FUTURE EARTH PROGRAM AND NORTHERN EURASIA FUTURE INITIATIVE	
СЕКЦИЯ VI	
«БУДУЩАЯ ЗЕМЛЯ» И ИНИЦИАТИВА «БУДУЩЕЕ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ»	
Northern Eurasia Future Initiative (NEFI), Update	
Groisman P., Grebenets V., Tchebakova N., Vova O.	190
Межгосударственное информационное взаимодействие в Северной Азии	
Бешенцев А.Н.	191
Interstate information cooperation in North Asia	
Beshentsev A.N.	192
Assessment of the tourist attractiveness of the southeastern part of the Irkutsk region	
Mirsaeva N.A., Ivanova A.A.	195
Оценка туристической привлекательности юго-восточной части Иркутской области	
Мирсаева Н.А., Иванова А.А.	195

SESSION I SUBSEASONAL AND LONG-TERM WEATHER AND CLIMATE FORECASTS

СЕКЦИЯ I СУБСЕЗОННЫЕ И ДОЛГОСРОЧНЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ

Research on the INM RAS climate model skill in summer seasonal hindcasts

^{1,2}Vorobyeva V.V., ²Volodin E.M.

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia

² Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: VVorobyeva@yandex.ru, volodinev@gmail.com

The INMCM-5-0 climate model was originally developed and used for multiannual climate predictions only. An attempt to carry out a series of winter seasonal hindcasts showed the possibility of using the INM RAS climate model for prediction of the Pacific North American and the North Atlantic oscillation indices on a seasonal time scale [16]. In summer seasonal forecasts, mechanisms of natural climate variability differ from those that make the greatest contribution in winter seasons. In this regard, an urgent task is to study weather predictability using the INMCM-5-0 climate model for summer seasons.

In this study, we use the model configuration in the atmospheric block with the resolution $2^\circ \times 1.5^\circ$ in longitude and latitude, 73 vertical levels with a model top at 0.2 hPa. The resolution in the general ocean circulation block is $0.5^\circ \times 1.5^\circ$ in longitude and latitude and 40 vertical sigma levels. In terms of various characteristics, the model is in a good agreement with the natural system, which is substantiated in [17].

The initial data for the forecasts were compiled using a method similar to that used for winter seasonal forecasts in [16]. The difference is that the data of the oceanic reanalysis Simple Ocean Data Assimilation (SODA) 3.4.2 for May 1 of considered year in 1980–2014 were calculated as the arithmetic average of monthly means for April and May, and the ERA-Interim reanalysis data for 00:00 May 1 1980–2014 years were used as atmospheric reanalysis data. On the basis of the compiled set of initial data, an ensemble of hindcasts for the summer seasons of 1980–2014 for the INM RAS climate model is presented.

The INMCM-5-0 seasonal 5-month re-forecast consists of 10 ensemble members initialized on the May 1 for each year over the 35-yr period 1980–2014. Small initial condition perturbations are applied to air temperature and wind speed to represent uncertainty in the initial state and increase ensemble spread.

According to the forecast skill indicators similar to those used in [18], calculated for numerical models used for routine seasonal forecasts - semi-Lagrangian global finite-difference SLAV model of the general atmospheric circulation of the Federal State Budgetary Institution (FSBI) “Hydrometeorological Center of Russia” [19] and the model of the general circulation of the atmosphere of the FSBI “Voeikov Main Geophysical Observatory”(MGO) [20], as well as the estimates used in the Standardised Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF), which allow to evaluate skill levels measured according to a common standard [21], the quality of summer retrospective forecasts for the INMCM-5-0 climate model was assessed.

The correlation coefficients for multiyear mean (1980–2014) JJA-averaged fields of 2-m air temperature anomalies, anomalies of air temperature at 850 hPa, geopotential anomalies of the isobaric surfaces 200 hPa and 500 hPa, anomalies of precipitation rate, sea-level pressure anomalies were calculated for four regions: globally, in the tropics (20°S – 20°N), Northern extratropics (20°N – 90°N) and Southern extratropics (90°S – 20°S). Predictive anomalies were calculated as deviations of the expected monthly and seasonal mean values of meteorological parameters from the corresponding long-term mean values (“model climate”) obtained from the results of retrospective forecasts. Correlation coefficients were calculated using the GPCP v.2.3 reanalysis

monthly mean precipitation rate and ERA – Interim reanalysis data for all other weather fields interpolated to the model grid.

After that, the model bias BIAS, the Root Mean Square Error RMSE [18] (analogous to the Mean Squared Error in [21]) for the full fields of meteorological parameters and for field anomalies, the MSSS indicator (Mean Squared Skill Score, forecasting mastery versus climate), and the ROC indicator (Relative Operating Characteristics) were also calculated.

- This study was performed at Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences and supported by Russian Fund for Basic Research (project № 20-05-00673) and Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics (agreement with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-15-2019-1624).

Исследование качества летних сезонных ретроспективных прогнозов, выполненных на основе климатической модели ИВМ РАН

^{1,2}Воробьева В.В., ²Володин Е.М.

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

² Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской РАН, Москва, Россия

E-mail: VVorobyeva@yandex.ru, volodinev@gmail.com

Под термином "погода" принято понимать "непрерывно меняющееся состояние атмосферы", характеризующее "совокупностью значений метеорологических элементов" [1]. Вследствие непредсказуемого характера атмосферной синоптической изменчивости начальное состояние атмосферы быстро "забывается" математической моделью, и прогноз перестает зависеть от начального состояния атмосферы. Данная причина ограничивает максимальный срок, на который возможно выполнить прогноз погоды, пятнадцатью днями, например, [6,7]. Однако из-за того, что характерная скорость течений в океане значительно меньше, чем скорость ветра в атмосфере, океанические процессы развиваются медленнее и позволяют расширить срок заблаговременности прогноза. Наилучшая предсказуемость на субсезонном-годовом временном масштабе наблюдается в тропическом регионе, подверженном влиянию явления Эль-Ниньо-Южного колебания. В средних же широтах, в том числе в Европе, большая доля атмосферной изменчивости на сезонном временном масштабе связана с непредсказуемой внутренней изменчивостью атмосферы, чем с форсингом от граничных условий [5]. Тем не менее, аномалии характеристик поверхности могут приводить к возникновению крупномасштабного отклика в атмосфере, к созданию так называемых "дальних связей". А также существуют такие важные процессы и компоненты, как верхний перемешанный слой и глубина океана, морской лед [2], снег, характеристики поверхности суши и почвы [3], стратосферные процессы [4], взаимодействие тропосферы и стратосферы, крупномасштабные моды с низкочастотной изменчивостью (Северо-Атлантическое колебание, Арктическое колебание, Тихоокеанско-Североамериканское колебание, осциляция Маддена-Джулиана, квазидвухлетнее колебание, Тихоокеанская декадная осциляция и т.д.), 11-летний цикл солнечной активности, которые являются источниками долгосрочной предсказуемости. Учет указанных компонентов и их взаимосвязей позволяет делать прогнозы на субсезонном (от двух недель до трех месяцев), сезонном и даже климатическом (многолетнем) временном масштабе.

Качественный прогноз температуры поверхности океана (ТПО) является необходимым условием для хорошего прогноза климата на один-два сезона вперед [8]. Тем не менее, сезонные прогнозы ТПО подвержены различным типам ошибок [9]. Во-первых, синоптическая изменчивость атмосферы может влиять на поле ТПО через парадигму интегрированного шума в средних широтах [10] и посредством порывов западного ветра, например, в случае явления Эль-Ниньо [11]. Поэтому непредсказуемый характер атмосферной синоптической изменчивости может вносить неопределенность в прогноз ТПО. Во-вторых, ошибка в начальных условиях океана, которая присутствует всегда, может быть усилена крупномасштабной динамикой совместной модели атмосферы-океана [12]. Третьим фактором ошибки прогноза является модельная ошибка совместной системы атмосфера-океан, состоящая из систематического смещения модели (model bias) и ошибки в изменчивости на различных временных масштабах. Для того, чтобы минимизировать ошибки прогноза, применяют ансамблевое прогнозирование [13], подразумевающее проведение серии прогнозов, стартующих с начальных данных, в которые были внесены небольшие возмущения. Тогда разброс прогнозов будет покрывать неопределенность, связанную с ошибкой прогноза. Кроме того, жизнеспособной стратегией разрешения неопределенностей прогнозов

признано создание мультимодельных ансамблей [14,15]. Данный метод позволяет улучшить средний по ансамблю прогноз, увеличить разброс ансамбля и уменьшить модельные ошибки, но вопрос того, насколько хорошо неточности, связанные с ошибкой модели, могут быть представлены мультимодельным ансамблем, ещё недостаточно изучен в научном сообществе [9].

Климатическая модель INMCM-5-0 изначально разрабатывалась и использовалась для климатических прогнозов. Попытка проведения серии зимних сезонных прогнозов показала возможность использования климатической модели ИВМ РАН для предсказания индексов Тихоокеанско-Североамериканского колебания и Северо-Атлантического колебания на сезонном временном масштабе [16]. В летних сезонных прогнозах большее значение имеют механизмы естественной изменчивости климата, отличные от тех, что вносят наибольший вклад в зимнем сезоне. В связи с этим актуальной задачей является исследование предсказуемости погоды с помощью климатической модели INMCM-5-0 на летний сезон.

В данном исследовании используется версия климатической модели ИВМ РАН с разрешением в атмосферном блоке $2^\circ \times 1.5^\circ$ по широте и долготе, 73 уровнями сигма-координаты по вертикали от поверхности Земли до 0.2 гПа и океанической сеткой $0.5^\circ \times 1.5^\circ$ по горизонтали, 40 уровнями по вертикали. По различным характеристикам модель близка к природной системе, что обосновано в [17].

Начальные данные для прогнозов составлены по методу, аналогичному тому, что был использован для зимних сезонных прогнозов в [16]. Отличие состоит в том, что данные океанического реанализа Simple Ocean Data Assimilation (SODA) 3.4.2 на 1 мая 1980-2014гг. вычислялись как среднее арифметическое среднемесячных данных за апрель и май, а в качестве данных атмосферного реанализа ERA-Interim использовались данные за 00:00 1 мая 1980-2014гг.

Далее на основе составленного набора начальных данных представлен ансамблевый ретроспективный прогноз на летний сезон для климатической модели ИВМ РАН. Проведены серии из 10 модельных экспериментов для каждого летнего сезона, принадлежащего временному интервалу май 1980 – сентябрь 2014 г. Каждый эксперимент начинался 1 мая и имел продолжительность 5 месяцев. Ансамбль результатов для каждого года получен небольшим отклонением начальных данных температуры воздуха и скорости ветра от исходного значения. Поскольку в первый расчетный месяц отличие в получаемых результатах существенное, то величина отклонения может быть выбрана произвольно.

По показателям успешности прогнозов, аналогичным используемым в [18], вычисленным для численных моделей, используемых для рутинных сезонных прогнозов - полулагранжевой глобальной конечноразностной модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ ФГБУ «Гидрометцентр России» [19] и модели общей циркуляции атмосферы ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» (ГГО) [20], а также оценкам, используемым в стандартизованной системе верификации долгосрочных метеорологических прогнозов (SVSLRF), позволяющей формулировать и использовать согласованные наборы показателей качества прогнозов [21], выполнена оценка качества составленного летнего ретроспективного прогноза для модели INMCM-5-0.

Были вычислены средние за летние сезоны (начиная с летнего сезона 1980г. по летний сезон 2014г. включительно) коэффициенты корреляции аномалий для шести метеополей: температуры на 2м, температуры на 850 гПа, геопотенциалов изобарических поверхностей 200 гПа и 500 гПа, осадков и давления на уровне моря. Прогностические аномалии вычислялись как отклонения ожидаемых средних месячных и сезонных значений метеорологических параметров от соответствующих средних многолетних значений («модельного климата»), полученных по результатам ретроспективных прогнозов. Коэффициенты корреляции аномалий рассматривались для четырех различных регионов: глобально по всему земному шару, в тропиках (20° ю.ш.– 20° с.ш.), Северных экстратропиках (20° с.ш.– 90° с.ш.) и Южных экстратропиках (90° ю.ш.– 20° ю.ш.). В вычислениях использовались среднемесячные данные осадков реанализа GPCP v.2.3 и реанализа ERA-Interim для всех остальных метеополей, предварительно проинтерполированные на сетку модели.

Далее вычисляются средняя квадратическая ошибка RMSE [18] (аналог среднего квадрата ошибки в [21]) для полных полей метеорологических параметров и для аномалий полей, показатель MSSS (мастерство прогноза по сравнению с климатом), показатель ROC (Relative Operating Characteristics). Также вычисляется величина модельного смещения BIAS.

Предположим, что x_{ijn} и f_{ijn} - средние за летний сезон (июнь, июль и август) временные ряды наблюдений и непрерывных детерминированных прогнозов для данных с долготой $i = 1, \dots, I$, широтой $j = 1, \dots, J$ в момент времени $n = 1, \dots, N$. Тогда их выборочные дисперсии равны соответственно

$$s_{x_{ij}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_{ijn} - \bar{x}_{ij})^2 \text{ и } s_{f_{ij}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_{ijn} - \bar{f}_{ij})^2,$$

где $\bar{x}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_{ijn}$ и $\bar{f}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f_{ijn}$ – средние по времени значения наблюдений и прогнозов в узле сетки с долготой i и широтой j .

Тогда величина модельного смещения BIAS в год n : $BIAS_n = \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (f_{ijn} - x_{ijn}) \cdot \cos(\theta_j)}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \cos(\theta_j)}$, где θ_j – угол широты.

Средняя квадратическая ошибка RMSE в год n :

$$RMSE_n = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (f_{ijn} - x_{ijn})^2 \cdot \cos(\theta_j)}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \cos(\theta_j)}}.$$

Средние по всем летним сезонам 1980-2014гг. значения величины модельного смещения BIAS и средней квадратической ошибки RMSE вычисляются как среднее арифметическое значение по всем годам $n = 1, \dots, N$.

Введем средний квадрат ошибки (mean squared error) прогноза $MSE_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_{ijn} - x_{ijn})^2$, а также средний квадрат ошибки "климатологического" прогноза $MSE_{cij} = \left(\frac{N}{N-1}\right)^2 s_{xij}^2$. Тогда показатель мастерства прогноза по сравнению с климатом MSSS:

$$MSSS = 1 - \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I MSE_{ij} \cdot \cos(\theta_j)}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I MSE_{cij} \cdot \cos(\theta_j)}.$$

Для отдельных метеополей строится таблица сопряженности:

		Наблюдения		
		Ниже нормы	Около нормы	Выше нормы
Прогноз	Ниже нормы	n_{11}	n_{12}	n_{13}
	Около нормы	n_{21}	n_{22}	n_{23}
	Выше нормы	n_{31}	n_{32}	n_{33}

Здесь n_{ij} – количество случаев, когда прогнозировалась категория i , а наблюдалась категория j . То есть, например, если аномалия метеорологической величины в среднем за летний сезон, вычисленная относительно климатологии за все летние сезоны, отрицательная по данным прогнозов и по модулю больше заданной границы области "около нормы", но положительная по наблюдениям и по модулю больше заданной границы области "около нормы", то этот случай учитывается в n_{13} . При этом суммирование в n_{ij} производится с учетом косинуса широты. Например, $n_{11} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I Y_{ijn} \cdot \cos(\theta_j)$, где $Y_{ijn} = 1$ в случае, если в год n на долготе i и широте j прогнозировалось попадание среднего за сезон метеопараметра в категорию "ниже нормы", и по наблюдениям средний за сезон метеопараметр относился к категории "ниже нормы"; в противном случае $Y_{ijn} = 0$. Аналогично заполняются другие ячейки таблицы. Данную таблицу можно представить в виде стандартной таблицы сопряженности для расчета показателя ROC в случае детерминированных прогнозов:

		Наблюдения	
		Да	Нет
Прогноз	Да	$O_1 = n_{11} + n_{22} + n_{33}$	$NO_1 = n_{12} + n_{13} + n_{21} + n_{23} + n_{31} + n_{32}$
	Нет	$O_2 = n_{21} + n_{31} + n_{12} + n_{32} + n_{13} + n_{23}$	$NO_2 = n_{22} + n_{23} + n_{32} + n_{33} + n_{11} + n_{13} + n_{31} + n_{33} + n_{11} + n_{12} + n_{21} + n_{22} = 2 \cdot O_1 + n_{23} + n_{32} + n_{13} + n_{31} + n_{12} + n_{21}$

Здесь, например, O_2 означает количество случаев, когда событие (категория "ниже нормы", "выше нормы", "около нормы") не прогнозировалась, но метеопараметр попал в неё по данным наблюдений. В данной таблице "да" и "нет" отвечают на вопрос: "Происходило/наблюдалось ли событие?".

Тогда долю попаданий (Hit Rate, HR) можно вычислить как: $HR = \frac{O_1}{O_1 + O_2} \in [0; 1]$. При $HR = 1$ все случившиеся (наблюдаемые) события верно предсказываются. Доля ложных тревог (False Alarm Rate, FAR): $FAR = \frac{NO_1}{NO_1 + NO_2} \in [0; 1]$. При $FAR = 0$ никакие неслучившиеся (ненаблюдаемые) события не предсказывались. Величину HR принято называть чувствительностью, а величину $1 - FAR$ – специфичностью.

Вычислим показатель Хансена-Куиперса [22]:

$$KS = HR - FAR = \frac{O_1 \cdot NO_2 - O_2 \cdot NO_1}{(O_1 + O_2) \cdot (NO_1 + NO_2)} \in [-1; +1]$$

При помощи преобразования $KS_{scaled} = \frac{KS + 1}{2}$ можно отмасштабировать показатель Хансена-Куиперса, так, что его величина будет меняться в пределах отрезка $[0; 1]$, где 1 будет соответствовать идеальному прогнозу. Параметр KS_{scaled} является аналогом известного параметра AUC (area under the curve) кривой ROC для вероятностных прогнозов, используемого для оценки качества прогностической модели. Площадь под графиком кривой ROC, отображающей зависимость доли точных попаданий от доли ложных тревог, принимает значения 0.5 для системы, совершенно не пригодной для прогнозирования, в то время как 1 соответствует идеальной прогностической системе.

- Работа выполнена в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 20-05-00673) и Московского центра фундаментальной и прикладной математики (соглашение с Минобрнауки России №075-15-2019-1624).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л., 1974.
2. Balmaseda, M. A., L. Ferranti, F. Molteni, and T. N. Palmer, 2010: Impact of 2007 and 2008 Arctic ice anomalies on the atmospheric circulation: Implications for long-range predictions. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 136, 1655–1664.
3. Koster, Randal D., and Coauthors, 2004: Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, 305, 1138–1140.
4. Ineson, S., and A. A. Scaife, 2009: The role of the stratosphere in the European climate response to El Niño. *Nat. Geosci.*, 2, 32–36.
5. Kumar, A., J. Bhaskar, Q. Zhang, and L. Bounoua, 2007: A new methodology for estimating the unpredictable component of seasonal atmospheric variability. *J. Climate*, 20, 3888–3901.
6. Lorenz EN (1963) Deterministic, non-periodic flow. *J Atmos Sci* 20(2):130–141. doi:10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2
7. Lorenz EN (1993) The essence of Chaos. University of Washington Press, Seattle, WA, p 227
8. Palmer, T. N., and D. L. T. Anderson, 1994: The prospects for seasonal forecasting—A review paper. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 120, 755–793.
9. J. Vialard et al., An ensemble generation method for seasonal forecasting with an ocean–atmosphere coupled model. *Mon. Weather Rev.* 133, 441–453 (2005)
10. Frankignoul, C., and K. Hasselmann, 1977: Stochastic climate models. Part 2: Application to sea surface temperature anomalies and thermocline variability. *Tellus*, 29, 289–305.
11. McPhaden, M. J., 1999: Genesis and evolution of the 1997–98 El Niño. *Science*, 283, 950–954.
12. Moore, A. M., and R. Kleeman, 1996: The dynamics of error growth and predictability in a coupled model of ENSO. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122, 1405–1446.
13. Palmer, T. N., 2000: Predicting uncertainty in forecasts of weather and climate. *Rep. Prog. Phys.*, 63, 71–116.
14. Kirtman B, Min D, Infanti J, Kinter J, Paolino D, Zhang Q, van den Dool H, Saha S, Mendez M, Becker E, Peng P, Tripp P, Huang J, DeWitt D, Tippet M, Barnston A, Li S, Rosati A, Schubert S, Rienecker M, Suarez M, Li Z, Marshak J, Lim Y, Tribbia J, Pegion K, Merryfield W, Denis B, Wood E (2014) The North American Multimodel ensemble: Phase-1 seasonal-to-interannual prediction; Phase-2 toward developing intraseasonal prediction. *B Am Meteorol Soc* 95:585–601. doi:10.1175/BAMS-D-12-00050.1
15. Palmer, T. N., and Coauthors, 2004: Development of a European multimodel ensemble system for seasonal to interannual prediction (DEMETER). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85, 853–872.
16. V. V. Vorobyeva and E. M. Volodin Analysis of the predictability of stratospheric variability and climate indices based on seasonal retrospective forecasts of the INM RAS climate model // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling* 2021; 36(2):117–126
17. E.M. Volodin, E.V. Mortikov, S.V. Kostykin, V.Ya. Galin, V.N. Lykossov, A.S. Gritsun, N.A. Diansky, A.V. Gusev, N.G. Yakovlev. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // *Clim. Dyn.*, 2017, v.49, №11–12, p.3715–3734.
18. Д.Б. Киктев, М.А. Толстых, Р.Б. Зарипов и др. Совместные испытания технологий глобального сезонного прогноза на основе моделей Гидрометцентра России и ГГО // *Инф. сб.* №38. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов / под ред. к.г.н. Г.К. Веселовой. – М.: Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2011, 117 с.;
19. М.А. Толстых. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. – М.: Обнинск: ОАО ФОР, 2010, 111 с.;
20. Б.Е. Шнееров, В.П. Мелешко и др. Современная версия глобальной модели общей циркуляции атмосферы ГГО (Версия MGO-2) // *Труды ГГО*, 2001, вып.550, с.3–43;
21. Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF) // *New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-No. 485)*, 2002, vol. I.
22. Hanssen A. J. and W. J. Kuipers, 1965: On the relationship between the frequency of rain and various meteorological parameters. *Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut Meded. Verhand.* 81–2–15.

Medium range ensemble prediction system of Hydrometcentre of Russia based on SL-AV model: First results

¹Mizyak V., ^{1,2}Tolstykh M., ¹Rogutov V., ^{1,2}Alipova K., ^{1,2}Goyman G.

¹Hydrometeorological Research Centre of Russia, Moscow, Russia

²Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: vmizyak@mecom.ru

The need of development of proprietary medium-range ensemble weather prediction system arises due to rapid development of ensemble methods widely used at all the world's leading forecast centers. Such systems are able to evaluate the uncertainty of initial data on the state of the atmosphere, as well as the uncertainty of the description of subgrid-scale processes in the NWP model. Ensemble systems also allow estimating the intervals of variation of the model parameters.

The core part of the ensemble prediction system described here is the global SLAV model (0.9°x0.72° horizontal resolution and 96 vertical levels version) [1], which is used to obtain an ensemble of forecasts. The first version of our system used static perturbation of subgrid-scale parametrizations values in various members of the ensemble. The new version contains a description of the evolution of random fields at the sphere using AR (1) process,

The ensemble of initial data required to start the model is generated by the data assimilation system based on the Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) [2]. It assimilates the following types of observations to produce the initial data: radiosondes at 32 vertical levels, surface and ship observations, aircraft observations, some satellite observations. In order account for the model error, the additive inflation of the analysis fields is used in assimilation scheme. The value of additive inflation is controlled by the function that allows to change its value depending on the level and the latitude of the model grid point for various model variables. Compared to the initial version of the described ensemble system, this function has been significantly redesigned. Now the value of parameter is calculated using the bilinear interpolation between the given base points in the latitude-level space.

Recent changes of the ensemble system described here allowed to improve forecast ensemble spread, which is most notable in the Tropics region. Currently, the selection of the parameter values (out of 31 in total) which are responsible for the value of the spread and forecast errors in the system, is being carried out in order to reduce the mismatch between the spread and errors of the ensemble forecast.

Система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды Гидрометцентра России на основе модели ПЛАВ: Первые результаты

¹Мизяк В.Г., ^{1,2}Толстых М.А., ¹Рогутов В.С., ^{1,2}Алипова К.А., ^{1,2}Гойман Г.С.

¹Гидрометцентр России, Москва, Россия

²Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской РАН, Москва, Россия

E-mail: vmizyak@mecom.ru

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость разработки собственной системы ансамблевого среднесрочного прогноза погоды обусловлена бурным развитием ансамблевых методов и широким применением этих методов во всех ведущих мировых прогностических центрах. Такие системы способны учесть неопределённость начальных данных о состоянии атмосферы, а также неопределённость в описании процессов подсеточно-го масштаба в прогностической модели. Ансамблевые системы также позволяют оценить интервалы изменения параметров модели.

В отличие от детерминированного прогноза, ансамблевый прогноз основывается на получении и анализе целого набора численных прогнозов на одну и ту же дату, называемого ансамблем прогнозов. В данной работе для получения такого набора применяется глобальная оперативная модель атмосферы ПЛАВ [1], использующая в качестве стартовых полей ансамбль начальных данных, который получается в ходе работы ансамблевой системы усвоения данных, основанной на алгоритме локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля [LETKF, 2, 3].

ГЛОБАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АТМОСФЕРЫ ПЛАВ

Ядром описываемой системы является глобальная модель атмосферы ПЛАВ [1], которая была разработана в Институте вычислительной математики РАН и в Гидрометцентре России, где используется в качестве оперативной модели среднесрочных численных прогнозов погоды. Она состоит из оригинального динамического ядра [4] и параметризаций процессов подсеточного масштаба, которые в основном были разработаны в консорциуме ALADIN / LACE [5].

В данной работе используется версия, которая имеет горизонтальное разрешение $0,9 \times 0,72$ градуса по долготе и широте соответственно и 96 уровней по вертикали с использованием гибридной вертикальной координаты. Для контроля за разбросом ансамбля используются возмущения параметров, управляющих параметризациями подсеточного масштаба, такими как глубокая конвекция, планетарный пограничный слой, параметризация микрофизических процессов в облаках.

Первая версия данной системы использовала статическое возмущение данных параметров в различных участниках ансамбля. Однако в таком случае поля возмущений каждого из участников ансамбля не являются случайными и не отражают неопределенности описания соответствующих процессов подсеточного масштаба. Новая версия разрабатываемой системы ансамблевого прогноза содержит описание эволюции случайных полей на сфере с помощью AR(1) процесса. Подробнее данная версия модели представлена в настоящем сборнике в работе Алиповой с соавторами.

ЛОКАЛЬНЫЙ АНСАМБЛЕВЫЙ ФИЛЬТР КАЛМАНА С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ АНСАМБЛЯ (LETKF)

В качестве начальных данных для численной модели используется ансамбль начальных данных, получаемый в ходе работы ансамблевой системы усвоения [3] на основе LETKF [2]. Используется 60 членов ансамбля. В качестве полей первого приближения применяются 6-часовые прогнозы модели ПЛАВ. Для борьбы с эффектами, возникающими вследствие недооценки ковариаций ошибок анализа, используется мультипликативная инфляция ковариаций ошибок первого приближения. Для более точного учёта ошибки модели используется аддитивная инфляция полей анализа. Величина аддитивной инфляции управляется функцией, позволяющей изменять её значение в зависимости от высоты уровня и географической широты точки модельной сетки для различных прогностических переменных. По сравнению с начальной версией ансамблевой системы данная функция была значительно переработана. Теперь изменение происходит между заданными базовыми точками в пространстве широта-высота на основе применения билинейной интерполяции.

Уменьшение негативного влияния пространственной корреляции ошибок наблюдений и некоторое увеличение «эффективного размера» ансамбля достигается путём применения локализации наблюдений вокруг точек модельной сетки с заданным радиусом, что приводит к независимым вычислениям значений полей анализа. Локализация позволяет эффективно запускать реализующую LETKF программу на массивно-параллельных вычислительных системах. Вычисления в фильтре выполняются в режиме гибридного распараллеливания с помощью технологий MPI и OpenMP.

Для ансамблевого усвоения использовались следующие виды данных наблюдений:

- радиозонды TEMP (температура, относительная влажность и компоненты скорости ветра на 16 стандартных уровнях от 1000 гПа до 10 гПа, около 650 наблюдений на каждом уровне в 00h UTC и в 12h UTC);
- наземные и корабельные наблюдения SYNOP, SHIP (приземное давление, температура и относительная влажность на уровне 2 м, порядка 10000 наблюдений в 00h UTC и в 12h UTC);
- самолетные наблюдения AIREP (температура и компоненты скорости ветра, порядка 10000 наблюдений в 00h UTC и в 12h UTC);
- спутниковые наблюдения ветра SATOB и AMV (компоненты скорости ветра, до 800000 наблюдений в день);
- спутниковые наблюдения ASCAT скорости ветра над поверхностью моря (400000–700000 наблюдений в сутки).

МЕТОДИКА ВЕРИФИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для верификации полученных результатов были использованы процедуры и метрики, рекомендованные Ведущим центром по верификации ансамблевых прогнозов (<http://epsv.kishou.go.jp/EPSv/>). Система верификации способна рассчитывать оценки успешности ансамблевых прогнозов по данным оперативного анализа ГМЦ. Рассчитываются следующие показатели успешности ансамблевых прогнозов: среднеквадратическая ошибка контрольного (среднего по ансамблю) прогноза RMS; разброс (стандартное отклонение) значений прогнозов ансамбля в точках модельной сетки SPRD; абсолютная ошибка контрольного (среднего по ансамблю) прогноза ABS; показатель упорядоченной вероятности CRPS.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

В настоящее время описываемая система работает в квазиоперативном режиме в Гидрометцентре России четыре раза в сутки. Используется 60 участников ансамбля. Прогнозы с заблаговременностью 10 суток запускаются в срок 00 часов ВСВ. В остальное время (06, 12 и 18 UTC) модель рассчитывает только прогнозы на 6 часов, необходимые системе усвоения для использования в качестве полей первого приближения.

Расчёты производятся на 992 ядрах вычислительной системы Cray XC40-LC Главного вычислительного центра Росгидромета.

Далее представлены результаты сравнения разброса и среднеквадратической ошибки среднего по ансамблю прогноза по отношению объективному анализу для начальной версии ансамблевой системы и системы, использующей стохастические возмущения каждого из возмущаемых параметров параметризаций процессов подсеточного масштаба.

Используемая в начальной версии статическая схема возмущения параметров, управляющих параметризациями подсеточного масштаба, не всегда могла обеспечить необходимый уровень соответствия между разбросом ансамбля и среднеквадратической ошибкой среднего по ансамблю прогноза. В идеальном ансамблевом прогнозе кривые ошибки и разброса должны быть близки. Новая схема в сочетании с переработанной функцией генерации величины аддитивной инфляции позволила несколько приблизить кривые ошибки и разброса друг к другу, хотя полного соответствия пока добиться не удалось.

На представленных ниже рисунках показаны зависимости от заблаговременности прогноза среднеквадратической ошибки среднего по ансамблю прогноза (красная кривая – предыдущая версия ансамблевой системы, оранжевая кривая – описываемая система) и разброса ансамбля (синяя кривая – предыдущая версия ансамблевой системы, зелёная кривая – описываемая система), осреднённых по разным регионам земного шара.

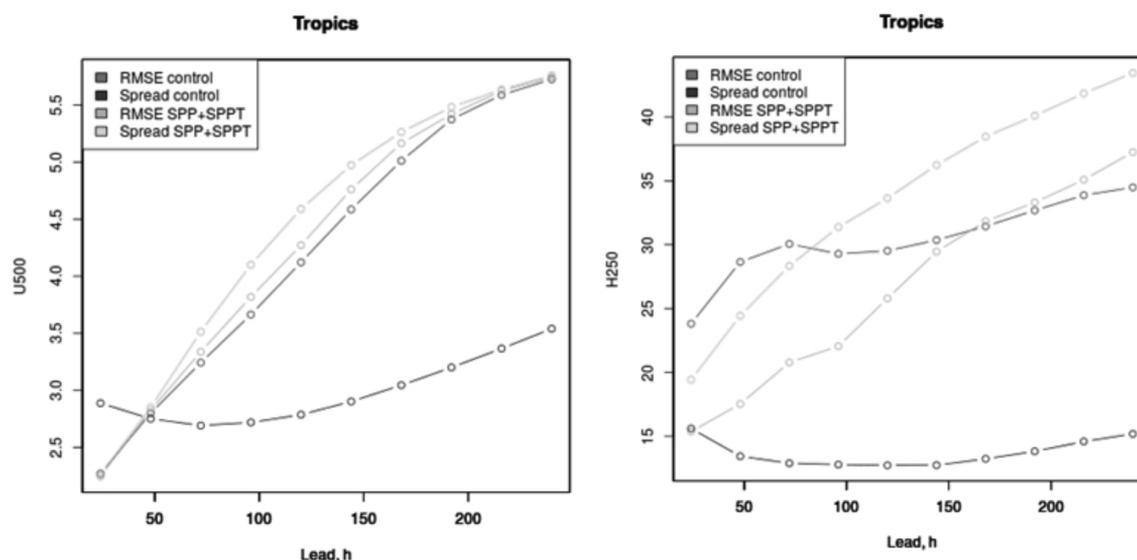


Рис. 1. Разброс (sprd) и среднеквадратическая ошибка (rms) в зависимости от заблаговременности прогноза (в часах) для различных переменных в разных регионах.

ВЫВОДЫ

За последнее время в описываемой системе удалось улучшить такую важнейшую для ансамблевой системы характеристику, как разброс ансамбля. Этому удалось достичь в основном за счёт применения в модели стохастических возмущений каждого из возмущаемых параметров в описании процессов подсеточного масштаба. Также свой вклад внесло и применение новой функции генерации аддитивной инфляции полей анализа. Наибольшее улучшение можно заметить для переменных в тропических регионах. В настоящее время осуществляется подбор значений параметров (всего из 31), отвечающих за величину разброса и ошибки прогнозов в системе для достижения более полного соответствия разброса и ошибок ансамблевого прогноза.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Толстых М.А., Желен Ж.-Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Красюк Т.В., Кострыкин С.В., Мизян В.Г., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Шляева А.В., Эзау И.Н., Юрова А.Ю. Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ. — Метеорология и гидрология, 2015. №6 стр. 25-35.
2. B. R. Hunt, E. J. Kostelich, and I. Szunyogh. Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 230(1-2):112–126, June 2007.
3. A.V. Shlyayeva, M.A.Tolstykh, V.G.Mizyak, V.S.Rogutov. Local ensemble transform Kalman filter data assimilation system for the global semi-Lagrangian atmospheric model. *Russ. J. Num. An. & Math. Mod.* 2013 V 28 N 4 P 419-441.
4. Tolstykh M. et al. Vorticity-divergence semi-Lagrangian global atmospheric model SL-AV20: dynamical core, *Geoscientific Model Development*, 10, 1961–1983. – 2017.
5. Termonia P. et al. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1 // *Geoscientific Model Development*. – 2018. – Т. 11. – №. 1. – С. 257-281.

Spatial verification of regional ensemble forecast at the Hydrometcentre of Russia

¹Olkhovaya E., ²Bundel A., ²Astakhova E., ²Alferov D.

¹ Russian Technological University, Moscow, Russia

² Hydrometeorological Research Centre of Russia, Moscow, Russia

E-mail: lizik_olkhovaya@mail.ru

Ensemble weather forecast is a necessary tool for assessing the probability of weather events, alternative scenarios of their development, and the forecast uncertainty. At the Hydrometcentre of Russia, a regional high-resolution ensemble system is under development with a grid mesh of 2.2 km for the Central and Southern region of Russia. The ensemble is based on the perturbation of model physical parameters and on the perturbation of initial data using the lagged initial conditions.

Consequently, developing a state-of-the-art ensemble verification system is of high priority. Such a system has to include both standard point-based verification and spatial methods [Gilleland E. et al. 2010]. At present, the spatial verification methods applied to ensemble forecast are being developed in the world [Johnson X.W. et al. 2020]. At the Hydrometcentre of Russia, The Sochi Olympics FROST-2014 project [Kiktev D. et al. 2017] gave an impetus to research in spatial verification, however, only limited attempts have been made up to now to apply spatial methods to ensembles [Bundel A., Muraviev A. 2017].

In this work, preliminary results of high-resolution ensemble verification system are given. The system includes both standard probability scores (the Brier Score, reliability diagram, ROC-curves, etc.) and the novel spatial scores from the neighborhood and object-based methods. The MODE, Method for Object-based Diagnostic Evaluation [Davis C. et al. 2006, Johnson X.W. et al. 2020] is used as a main object-based approach. The system is based on the free METplus verification package [<https://dtcenter.org/community-code/metplus>]. Examples of the scores are given.

Пространственная верификация регионального ансамблевого прогноза ФГБУ «Гидрометцентр России»

¹Ольховая Е.Д., ²Бундель А.Ю., ²Астахова Е.Д., ²Алферов Д.Ю.

¹ РТУ МИРЭА, Москва, Россия

² Гидрометцентр России, Москва, Россия

E-mail: lizik_olkhovaya@mail.ru

Ансамблевый прогноз погоды повсеместно признан необходимым инструментом для оценки вероятности погодных явлений, альтернативных сценариев их развития, а также для оценки степени неопределенности прогноза. В ФГБУ «Гидрометцентр России» разрабатывается региональный ансамбль высокого разрешения – с шагом сетки 2,2 км для Центрального федерального и Южного федерального округа. Ансамбль основан на возмущении физических параметров модели, а также на возмущении начальных данных с помощью сдвига по времени (лаговый метод).

Соответственно актуальной задачей является разработка современной системы верификации ансамблевого прогноза. Для моделей высокого разрешения такая система должна включать не только стандартные методы верификации, основанные на использовании точечных данных, но и так называемые пространственные методы [Gilleland E. et al. 2010]. В настоящее время пространственные методы верификации для ансамблевого прогноза находятся в стадии разработки [Johnson X.W. et al. 2020]. В ФГБУ «Гидрометцентр России» толчком к развитию пространственных методов стал проект метеобеспечения Сочинской олимпиады FROST-2014 [Kiktev D. et al. 2017], однако до сих пор имелись лишь ограниченные попытки применения пространственных методов к ансамблевому прогнозу [Bundel A., Muraviev A. 2017].

В данной работе представлены предварительные результаты разрабатываемой системы верификации ансамблевого прогноза высокого разрешения. Система позволяет рассчитывать как стандартные вероятностные оценки (оценка Брайера, диаграмма надежности, ROC-кривые и др.), так и пространственные оценки, получаемые с помощью окрестных методов, а также с помощью объектно-ориентированного подхода. В качестве объектно-ориентированного подхода взят метод MODE, The Method for Object-based Diagnostic Evaluation [Davis C. et al. 2006, Johnson X.W. et al. 2020]. При разработке системы использованы функции свободно распространяемого пакета верификации METplus [https://dtcenter.org/community-code/metplus]. Приведены примеры оценок качества ансамблевых прогнозов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Bundel A., A. Muraviev, The contiguous rain area (CRA) method application for the Caucasus and Alpine regions, Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC Working Group on Numerical Experimentation. Report No. 47. WCRP Report No.12/2017. E. Astakhova, ed. WMO, Geneva pp. 10-03 -10-04
2. Davis, C., B. Brown, and R. Bullock, 2006: Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 1772–1784.
3. Gilleland E., David A. Ahijevych, Barbara G. Brown, and Elizabeth E. Ebert, 2010: Verifying Forecasts Spatially. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 1365–1373. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2010BAMS2819.1>
4. Johnson, X. Wang, Neighborhood- and Object-Based Probabilistic Verification of the OU MAP Ensemble Forecasts during 2017 and 2018 Hazardous Weather Testbeds // *Weather and Forecasting*. 2020. №35.1. P. 169 – 191.
5. Kiktev, D., P. Joe, G.A. Isaac, A. Montani, I. Frogner, P. Nurmi, B. Bica, J. Milbrandt, M. Tsyrlunikov, E. Astakhova, A. Bundel, S. Bélair, M. Pyle, A. Muravyev, G. Rivin, I. Rozinkina, T. Paccagnella, Y. Wang, J. Reid, T. Nipen, and K. Ahn, 2017: FROST-2014: The Sochi Winter Olympics International Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98, 1908–1929, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00307.1>

Global Atmospheric Oscillation and El Niño long-term forecast

Serykh I.V., Sonechkin D.M.

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

E-mail: iserykh@ocean.ru

Careful computations of atmospheric power spectra are done. These computations reveal that these spectra are continuous in the range of timescales from two days to one year, and so they confirm that weather variations are chaotic. However, the continuity of a part of the atmospheric power spectra, corresponding to the periods from two years to one decade is questioned. This part is prominent by the existence of several narrow bands of increased spectral density centered at the subharmonics 2:1, 3:1, and 4:1 of the Chandler wobble in the Earth's pole motion (~ 1.2 years), the superharmonics 1:2, 1:3, and 1:4 of the Luni-Solar nutation of the Earth's rotation axis (~ 18.6 years) as well as the superharmonics 1:2, 1:3, and 1:4 of the 11-year cycle of the Sun spots. The existence of similar bands in the El Niño – Southern Oscillation (ENSO) power spectra was recognized many years ago. However, it turns out that the above spectral bands also are seen in spectra of the atmospheric characteristics outside of tropics. Moreover, the respective climatic variations are globally synchronized. The synchronization takes place because above-mentioned external periodicities must influence short-term climatic variations everywhere on the Earth. It is very probably that the periods of the external periodicities indicated are incommensurable with each other. Therefore, if these periodicities actually influence short-term climatic variations, they would have to do it discordantly. As a result, no resonances can exist which could make the affected climatic variations to be chaotic. A linear dependence of logarithms of serial numbers of the spectral bands on logarithms of the band magnitudes as well as a linear decrease of the accumulated sum of the squared autocorrelations of the respective atmospheric characteristics confirm that the dynamics of the interannual to decadal climatic variations are not chaotic.

Many researchers have recognized the long distance teleconnections between ENSO events and some other processes in the global climate system happening in areas often very far from the equatorial zone of the Pacific Ocean. We investigate similar links between ENSO and extratropical processes taken in their whole set. For this goal we compute differences between the sea-level pressure and the near-surface temperature global fields which correspond to either El Niño or La Niña events observed since the end of the XIX century and up to the beginning of the XXI century. As a result, we establish that integrity exists of ENSO and the extratropical teleconnections such as North Atlantic Oscillation (NAO), Arctic Oscillation (AO), Pacific – North American (PNA) pattern, and their analogs in the Southern Hemisphere in the interannual timescale. Named this integrity the Global Atmospheric Oscillation (GAO), we define two representative indices of GAO, and investigate the temporal dynamics of these indices. This investigation reveals that GAO's extratropical components may be real irrespective of ENSO while the latter accompanies GAO in all cases. Moreover, in view of a general eastward propagation of the GAO as a spatial structure, some its extratropical components show changes of their features prior the El Niño (La Niña) begins to form. Using these features as fingerprints of the forthcoming evolution of ENSO, we define another GAO index for the El Niño prediction. The cross-wavelet analysis between both of these indices and the Oceanic Niño Index (ONI) is performed. This analysis reveals a range of timescales within which the closest relationship between the GAO and ONI takes place. Using this relationship, it is possible to predict El Niño and La Niña with a lead-time of approximately 12 months. At last, we establish that some of the CMIP5-models reproduce GAO reasonably well.

Глобальная атмосферная осцилляция и долгосрочный прогноз Эль-Ниньо

Серых И.В., Сонечкин Д.М.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

E-mail: iserykh@ocean.ru

Для прогноза Эль-Ниньо и Ла-Нинья с заблаговременностью в 12 месяцев предложен индекс-предиктор основанный на западно-восточном распространении Глобальной атмосферной осцилляции. Выявлен диапазон временных масштабов, внутри которого имеют место их наиболее тесные взаимосвязи.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1-4] была подвергнута проверке та точка зрения, что в возникновении пиков в спектрах процессов Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК) повинны неравномерности вращения Земли. Проверка выполнена на доступных сейчас тщательно выверенных рядах инструментальных метеорологических наблюдений и их, так называемых, реанализах, т.е. рядах наблюдений, пропуски и внутренние несогласованности которых были исключены с помощью современных гидродинамических моделей общей циркуляции атмосферы. В результате все основные пики спектральной плотности в диапазоне временных масштабов от года до примерно десятилетия были соотнесены с тремя внешними периодическими воздействиями на климатическую систему: 1) Чандлеровским колебанием полюсов; 2) Лунно-солнечной нутацией; 3) Циклом солнечной активности. Главные периоды этих внешних воздействий составляют ~1.2, ~18.6 и ~11.5 года соответственно. По-видимому, они несоизмеримы друг с другом. Так что они воздействуют на климатическую систему, как бы, невпопад, и вместо хаоса порождают очень сложные, кажущиеся случайными вариации, среди которых наиболее известны «ритмы» ЭНЮК. Математической моделью такой нелинейной динамической системы является странный нехаотический аттрактор (СНА).

В [5-8] было доказано, что ритмичность ЭНЮК не является изолированным региональным явлением, а есть часть некоторого общепланетарного процесса, названного по этой причине Глобальной Атмосферной Осцилляцией (ГАО). Пространственная структура ГАО была определена как средняя разность в среднемесячных полях давления на уровне моря и приповерхностной температуры, имеющих место при событиях Эль-Ниньо и противоположных им событиях Ла-Нинья.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Как уже говорилось выше, одним из важных форсингов климатической системы является чандлеровское колебание полюсов Земли. Как было установлено еще во второй половине XX-го века, это колебание возбуждает в атмосфере и океанах приливные волны, распространяющиеся с запада на восток противофазно в умеренных широтах обоих полушарий. Континенты не являются непреодолимым препятствием для западно-восточного распространения атмосферных «полюсных» приливов. Поэтому можно ожидать, что в динамике внетропических компонент ГАО, коль скоро ГАО форсируется чандлеровским колебанием полюсов Земли, тоже будет наблюдаться западно-восточное смещение. При рассмотрении временных изменений пространственной структуры ГАО в полях давления на уровне моря и приповерхностной температуры такое смещение действительно было найдено [7]. После нескольких проб удалось определить индекс, величина которого наиболее четко представляет это смещение. Назовем этот индекс – Предиктор Глобальной Атмосферной Осцилляции (PGAО). Он вычисляется как алгебраическая сумма средних нормированных аномалий приземного давления (P) и температуры (T) в 15 географических районах: $PGAО = T(20^{\circ}-50^{\circ}\text{с.ш.}, 160^{\circ}-130^{\circ}\text{з.д.}) + T(35^{\circ}-25^{\circ}\text{ю.ш.}, 160^{\circ}-80^{\circ}\text{з.д.}) + T(65^{\circ}-45^{\circ}\text{ю.ш.}, 150^{\circ}\text{в.д.}-160^{\circ}\text{з.д.}) + T(65^{\circ}-45^{\circ}\text{ю.ш.}, 60^{\circ}\text{з.д.}-0^{\circ}) + T(40^{\circ}-70^{\circ}\text{с.ш.}, 90^{\circ}\text{в.д.}-180^{\circ}) - T(30^{\circ}\text{ю.ш.}-30^{\circ}\text{с.ш.}, 60^{\circ}\text{з.д.}-180^{\circ}) - T(60^{\circ}-31^{\circ}\text{ю.ш.}, 90^{\circ}-120^{\circ}\text{в.д.}) - T(31^{\circ}-60^{\circ}\text{с.ш.}, 100^{\circ}-40^{\circ}\text{з.д.}) + P(50^{\circ}-70^{\circ}\text{с.ш.}, 170^{\circ}\text{в.д.}-120^{\circ}\text{з.д.}) + P(70^{\circ}-50^{\circ}\text{ю.ш.}, 170^{\circ}\text{в.д.}-120^{\circ}\text{з.д.}) + P(60^{\circ}\text{ю.ш.}-20^{\circ}\text{с.ш.}, 40^{\circ}-80^{\circ}\text{в.д.}) + P(30^{\circ}\text{ю.ш.}-30^{\circ}\text{с.ш.}, 70^{\circ}-10^{\circ}\text{з.д.}) - P(0^{\circ}-40^{\circ}\text{с.ш.}, 120^{\circ}\text{в.д.}-120^{\circ}\text{з.д.}) - P(45^{\circ}-25^{\circ}\text{ю.ш.}, 120^{\circ}\text{в.д.}-60^{\circ}\text{з.д.}) - P(50^{\circ}-70^{\circ}\text{с.ш.}, 50^{\circ}-90^{\circ}\text{в.д.})$.

Используя индекс PGAО, основанный на западно-восточном распространении ГАО, мы далее продемонстрируем возможность прогноза событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья с заблаговременностью примерно в 12 месяцев, то есть с преодолением известного для традиционных прогнозов Эль-Ниньо весеннего предела предсказуемости.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для различных временных сдвигов были рассчитаны взаимные корреляции между PGOO и Расширенным Океаническим Индексом Эль-Ниньо (EONI) [7]. Основным максимум взаимных корреляций возникает, когда вариации PGOO предшествуют вариациям EONI примерно на 12 месяцев. Величина основного максимума взаимных корреляций очень велика (0.7). Используя это, можно предсказать значение EONI, то есть возникновение Эль-Ниньо или Ла-Нинья, с приблизительно годовой заблаговременностью. Часть объясненной общей изменчивости EONI при этом составляет почти 50%. Таким образом, этот прогноз может быть довольно успешным.

Чтобы определить, как связи между PGOO и EONI зависят от временного масштаба, мы использовали технику кросс-вейвлетного анализа между временными рядами PGOO и EONI [9, 10]. В верхней части Рис. 1 показаны временные ряды PGOO и EONI. Из них ясно видно, что почти все локальные максимумы и минимумы EONI запаздывают примерно на один год относительно максимумов и минимумов PGOO.

Кросс-вейвлетная диаграмма временных рядов PGOO и EONI, показанная на Рис. 1 внизу, соответствует временному сдвигу ряда PGOO на 12 месяцев вперед. На ней можно увидеть слабые связи между PGOO и EONI в диапазоне короткопериодных временных масштабов (менее 2 лет). Это неудивительно, поскольку ряд PGOO сдвинут на 12 месяцев вперед, и поэтому все короткопериодные экстремумы исследуемых рядов оказались разнесены по времени. Но при этом существуют довольно сильные связи на временных масштабах вейвлетов более 2 лет, особенно в диапазоне от 2 до 10 лет.

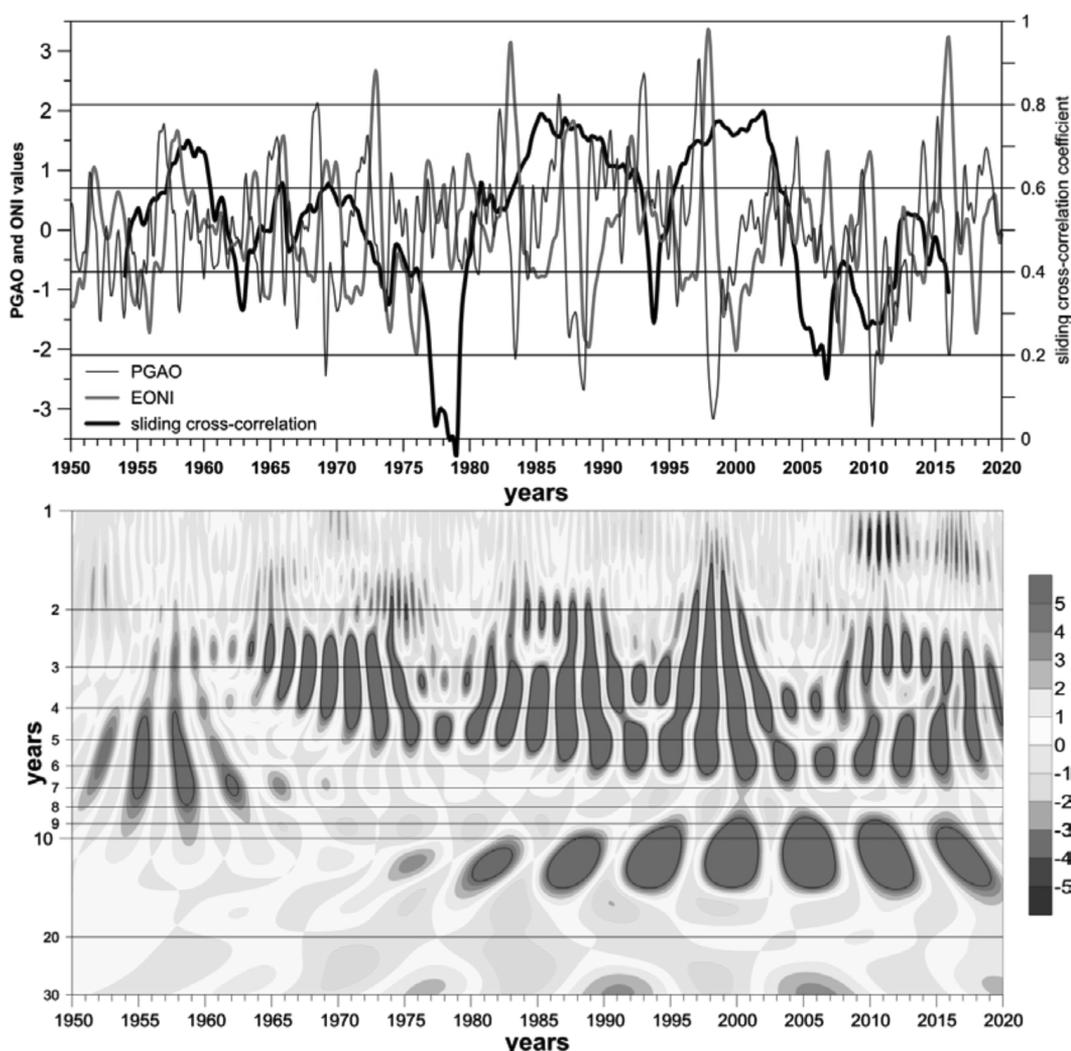


Рис. 1. Графики Расширенного Океанического Индекса Эль-Ниньо (EONI) (красный) и индекса-предиктора Глобальной Атмосферной Осцилляции (PGAO) (синий), сглаженные 5-месячным скользящим средним, детрендированные, центрированные и нормализованные на их стандартные отклонения за период 1950–2019 (вверху). Черная линия – значения скользящих взаимных корреляций этих индексов с окном 8 лет и PGOO смещенным вперед на 12 месяцев. Кросс-вейвлетная диаграмма этих индексов без фильтрации с PGOO смещенным вперед на 12 месяцев (внизу). Красные области диаграммы соответствуют синфазному поведению, а синие – противофазному поведению сопоставляемых вариаций.

Следовательно, изменения во временных рядах P_{GAO} и EONI на соответствующих временных масштабах находятся в фазе при условии, что временной ряд P_{GAO} опережает временной ряд EONI. Другими словами, предсказания значений ряда EONI, основанные на значениях ряда P_{GAO}, измеренных 12 месяцами ранее, были бы весьма успешными. Учитывая динамику ГАО и ЭНЮК как динамику странного нехаотического аттрактора (СНА), возможно дальнейшее увеличение времени прогноза до нескольких лет, по крайней мере, в принципе.

Единственными исключениями являются интервалы календарных лет 1975-1980, 1993-1994 и 2003-2008, в которых на кросс-вейвлетной диаграмме Рис. 1 преобладают слабые или даже отрицательные связи между P_{GAO} и EONI. Поэтому прогнозы, сделанные для этих интервалов, будут неудачными. К счастью, во все эти интервалы имели место только слабые события Эль-Ниньо и Ла-Нинья, а также нейтральные состояния. Таким образом, можно было бы ожидать, что предсказания сильных событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья всегда будут успешными.

Для конкретных прогнозов Эль-Ниньо и Ла-Нинья представляется полезным рассмотреть вопрос о том, насколько высоки значения скользящих кросс-корреляций между временным рядом P_{GAO} и временным рядом EONI, вычисленными как единое целое, то есть для всего диапазона временных масштабов. Такие скользящие кросс-корреляции временных рядов EONI и P_{GAO} (P_{GAO} сдвинут на 12 месяцев вперед) показаны на Рис. 1 вверху. Можно видеть, что скользящие кросс-корреляции довольно высокие (0.6-0.8) в периоды сильных событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Сильные события Эль-Ниньо 1957/58, 1965/66, 1968/69, 1972/73, 1982/83, 1986/87, 1997/98, 2009/10 и 2015/16 прогнозируются успешно. Также успешно прогнозируются сильные события Ла-Нинья 1970/71, 1988/89, 1998/99 и 2010/11. Однако скользящие кросс-корреляции являются низкими, когда процессы ЭНЮК близки к нейтральным. В этих случаях некоторые экстремумы EONI не прогнозируются. Таким образом, подтверждается, что экстремумы процессов ЭНЮК более предсказуемы, чем их около-нейтральные состояния.

ВЫВОДЫ

Пересмотрена общепринятая парадигма ограниченной предсказуемости изменений погоды и климата. Для этого используется предположение о странной нехаотичности короткопериодных (от одного года до одного десятилетия) климатических изменений. Это предположение уже использовалось ранее для анализа временных спектров Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК) [1-4].

В качестве основного сигнала короткопериодных климатических изменений рассмотрена недавно обнаруженная так называемая Глобальная Атмосферная Осцилляция (ГАО), которая включает в себя как процессы ЭНЮК, так и хорошо известные внетропические моды климатической изменчивости [5-8].

Определены индексы, характеризующие ГАО и ЭНЮК, в том числе индекс-предиктор ГАО (P_{GAO}), временная эволюция которого предшествует временной эволюции индекса Эль-Ниньо (EONI) [7]. Используя вейвлет-технику для анализа взаимных корреляций между временными рядами P_{GAO} и EONI, выявлены диапазоны временных масштабов, в которых существуют тесные связи между ГАО и ЭНЮК [9,10].

Как продемонстрировано в ряде ранее опубликованных работ [1-4], глобальная климатическая система на межгодовых периодах находится под влиянием нескольких внешних сил: 1) Чандлеровского колебания полюсов; 2) Лунно-солнечной нутации; 3) Цикла солнечной активности. Главные периоды этих внешних воздействий составляют ~1.2, ~18.6 и ~11.5 года соответственно. По-видимому, они несоизмеримы друг с другом.

Коль скоро это так, они воздействуют на климатическую систему, как бы, невольно, и вместо хаоса порождают очень сложные, кажущиеся случайными вариации, математическим образом которых является странный нехаотический аттрактор (СНА).

Принимая во внимание эти силы, а также западно-восточное распространение пространственной структуры ГАО, оказалось возможным предсказать значение EONI с заблаговременностью приблизительно 12 месяцев, то есть с преодолением весеннего предела предсказуемости Эль-Ниньо. Показана эффективность предсказаний Эль-Ниньо и Ла-Нинья с помощью P_{GAO} в качестве единственного предиктора.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Серых И.В., Сонечкин Д.М. Хаос и порядок в атмосферной динамике: Часть 1. Хаотические вариации погоды // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25. № 4. С. 4-22.
2. Серых И.В., Сонечкин Д.М. Хаос и порядок в атмосферной динамике. Часть 2. Междугодовые ритмы Эль-Ниньо – Южного колебания // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25. № 5. С. 5-25.
3. Серых И.В., Сонечкин Д.М. Сопоставление временных энергетических спектров индексов Эль-Ниньо – Южного колебания и глобальных полей температуры и атмосферного давления в приповерхностном слое // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 2. С. 144-155.

4. Serykh I.V., Sonechkin D.M. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin // *Theoretical and Applied Climatology*. 2019. Vol. 137. No. 3-4. pp 2639–2656.
5. Серых И.В. О динамике и структуре Глобальной атмосферной осцилляции в климатических моделях и реальности // *Океанологические исследования*. 2018. Т. 46. № 1. С. 14-28.
6. Серых И.В., Сонечкин Д.М., Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А. Global atmospheric oscillation in troposphere and lower stratosphere // *Системы контроля окружающей среды*. 2018. № 13 (33). С. 70-78.
7. Serykh I.V., Sonechkin D.M., Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A. Global Atmospheric Oscillation: An Integrity of ENSO and Extratropical Teleconnections // *Pure and Applied Geophysics*. 2019. Vol. 176. No. 8. pp 3737–3755.
8. Serykh I.V., Sonechkin D.M. Interrelations between temperature variations in oceanic depths and the Global atmospheric oscillation // *Pure and Applied Geophysics*. 2020. Vol. 177. No. 12. pp 5951–5967.
9. Вакуленко Н.В., Серых И.В., Сонечкин Д.М. Хаос и порядок в атмосферной динамике. Часть 3. Предсказуемость Эль-Ниньо // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. 2018. Т. 26. № 4. С. 75-94.
10. Serykh I.V., Sonechkin D.M. El Niño forecasting based on the global atmospheric oscillation // *International Journal of Climatology*. 2020. <https://doi.org/10.1002/joc.6488>.

Investigation of the NAO index predictability reasons in seasonal hindcasts of the INM RAS climate model for the 2009–2010 winter season

^{1,2}Tarasevich M.A., ²Volodin E.M.

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia

² Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: mashatarasevich@gmail.com

In this work we consider the influence of anomalies of the atmosphere and ocean initial states as a possible reason for the good predictability [5], [6] of the NAO index. For a detailed study of this factor the winter season of 2009–2010 was chosen, characterized by the minimum value of the North Atlantic Oscillation index for the entire observation period. According to the INM RAS climate model [1] hindcasts [5], the value of the NAO index for this season is also minimal, although several times lower in absolute value.

To study the influence of the initial states on the North Atlantic Oscillation index predictability for the INMCM5 the following experiments were carried out, each of them contains an ensemble of 60–120 forecasts for the 2009–2010 winter season:

- ATM – initial state anomalies are specified for the *atmosphere* (U, V, T, Q, PSURF) and the land surface (temperature and soil moisture, water-equivalent snow depth);
- ATM_ONLY – initial state anomalies are specified only for the *atmosphere*;
- ATM_TROP – initial data anomalies are specified only for the *troposphere*.

In all experiments, the initial state for the ocean are given as climate averaged [2].

Analysis of the ATMOC, ATM, ATM_ONLY experiments data shows that the anomalies of the ocean and the land surface initial states has no effect on the predictability of the NAO index. In the course of detailed studying the results of the ATM_ONLY, ATM_TROP and ATMOC experiments, it was found that the NAO index predictability of the INM RAS climate model for the 2009–2010 winter season is provided by anomalies of the U- and V- wind speed components and the air temperature T.

In the future a particular survey of the initial data anomalies in the stratosphere is planned to more accurately determine the source of the North Atlantic Oscillation index predictability. After that it will become possible to generalize the obtained result first to other winter seasons with a negative NAO phase observed and, if successful, to seasons characterized by a positive phase of the North Atlantic Oscillation.

- The research was carried out at the Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences and supported by the Russian Science Foundation (project No. 20-17-00190).

Исследование причин предсказуемости индекса северо-атлантического колебания по данным ретроспективных сезонных прогнозов климатической модели ИВМ РАН для зимы 2009–2010

^{1,2}Тарасевич М.А., ²Володин Е.М.

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

² Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской РАН, Москва, Россия

E-mail: mashatarasevich@gmail.com

В настоящее время ведущие метеорологические службы придерживаются концепции бесшовного прогноза, согласно которой и для прогноза погоды (от суток до сезона и десятилетия), и для моделирования климата на несколько десятков или сотен лет должна использоваться одна и та же модель. Поэтому для климатической модели ИВМ РАН (INMCM5) [1] была разработана схема подготовки начальных данных для проведения экспериментов на сезонном временном масштабе [2], заключающаяся в устранении смещения модельного климата по отношению к реальному с использованием данных реанализов ERA-Interim [3] и SODA 3.4.2 [4]. С подготовленными таким образом начальными данными был посчитан [2] ансамбль ретроспективных прогнозов на зимние сезоны 1981–2015 годов.

В работе [2] проведены интегральные оценки качества сделанных прогнозов. В [5] и [6] показано, что INMCM5 демонстрирует очень хорошую предсказуемость индексов северо-атлантического колебания (NAO) и тихоокеанско-североамериканского (PNA). Среди возможных факторов воспроизведения индекса NAO в работах [5], [6] рассматривались: аномалии температуры поверхности в северной части Тихого океана, аномалии площади снежного покрова в Евразии осенью и морского льда в Арктике, квазидвухлетнее колебание в экваториальной стратосфере, аномалии состояния Атлантического океана в тропических и средних широтах, но оказалось, что ни один из них не является определяющим предсказуемость северо-атлантического колебания. Так как NAO является главной модой, обеспечивающей изменчивость погоды и климата в северном полушарии, необходимо выяснить, что именно влияет на воспроизведение индекса северо-атлантического колебания климатической моделью ИВМ РАН.

В настоящей работе в качестве возможной причины хорошей предсказуемости индекса NAO рассматривается влияние аномалий состояния атмосферы и океана, задаваемых 1 ноября каждого года [2]. Для детального исследования этого фактора был выбран зимний сезон 2009–2010 гг., характеризующийся минимальным за весь период наблюдений значением индекса северо-атлантического колебания. По данным ретроспективных прогнозов INMCM5, представленным на Рис. 1, значение индекса NAO для этого сезона также является минимальным, хотя и в несколько раз меньшим по модулю.

Во время отрицательной фазы северо-атлантического колебания обычно наблюдается ослабление зонального переноса в северных экстратропиках. По данным реанализа ERA-Interim (см. Рис. 2) зимой 2009–2010 гг. зональный ветер был слабее обычного не только у поверхности, но и на высотах до 5 мбар, где аномалия достигала значения -10 м/с. Чтобы проверить, воспроизводится ли наблюдаемое ослабление зонального переноса климатической моделью ИВМ РАН, с тех же начальных состояний, что использовались в [2] для этого зимнего сезона, был посчитан ансамбль из 60 прогнозов INMCM5 (называемый далее «эксперимент АТМОС»). На Рис. 2 показано, что наблюдаемое ослабление скорости зонального ветра в эксперименте АТМОС хорошо воспроизводится в стратосфере, а в тропосфере оно получается значительно меньшим по амплитуде.

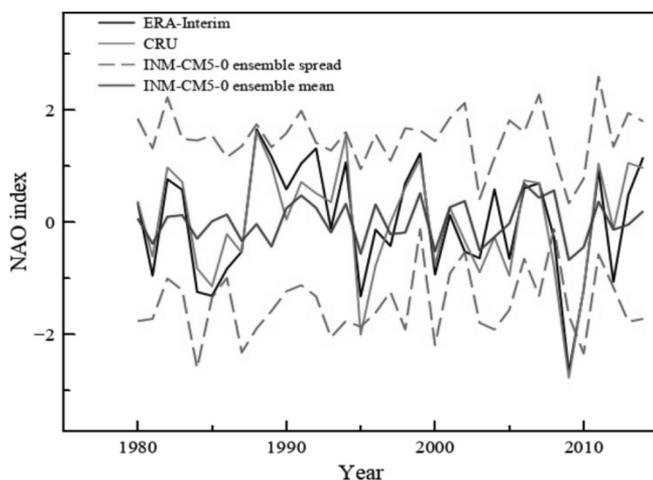


Рис. 1. Временной ряд из [5] для индекса NAO по декабрю–февралю. Максимум и минимум ансамбля INMCM5 показаны синими пунктирными линиями. Осреднённый по ансамблю INMCM5 индекс NAO показан красным цветом. Индекс NAO по данным реанализа ERA-Interim и инструментальным данным CRU [7] показан чёрным и зелёным цветом соответственно. На данном графике зиме 2009–2010 гг. соответствует точка 2009 г.

Для исследования влияния задаваемых начальных состояний на предсказуемость индекса NAO для климатической модели ИВМ РАН были проведены следующие эксперименты, каждый из которых содержит ансамбль из 60–120 прогнозов на зимний сезон 2009–2010 гг.:

- ATM – аномалии начальных данных заданы для атмосферы (U , V , T , Q , PSURF) и деятельного слоя суши (температура и влажность почвы, водно-эквивалентная толщина снежного покрова);
- ATM_ONLY – аномалии начальных данных заданы только для атмосферы;
- ATM_TROP – аномалии начальных данных заданы только для тропосферы.

Во всех экспериментах начальные данные для океана заданы среднеклиматическими [2].

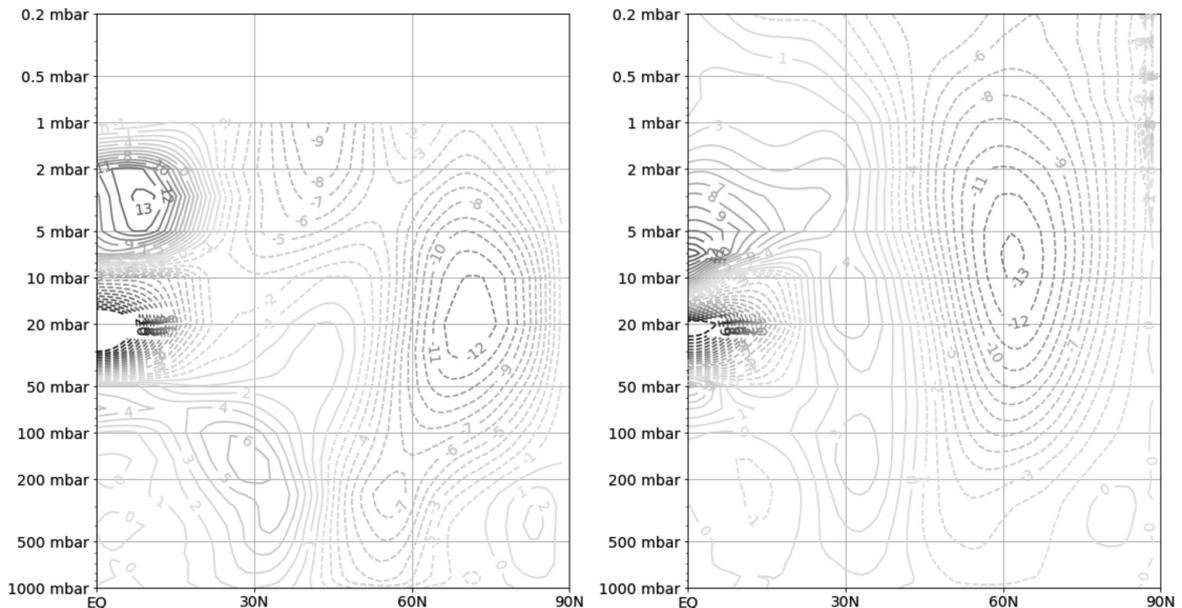


Рис. 2. Осреднённая по долготе аномалия скорости зонального ветра для декабря–февраля 2009–2010 гг. по данным реанализа ERA-Interim (слева) и эксперимента ATMOC (справа).

Статистически значимая разность аномалий скорости зонального ветра между экспериментами ATM, ATM_ONLY и ATMOC (различающимися начальными данными для океана), представленная слева и посередине на Рис. 3, показывает, что наиболее существенный вклад в воспроизведение ослабления зонального переноса вносят именно начальные данные, задаваемые для атмосферы. Отсутствие различий в аномалиях скорости зонального ветра между экспериментами ATM и ATM_ONLY практически всюду, кроме верхней стратосферы, дополнительно подтверждает вывод работ [5] и [6] о том, что в результатах сезонных прогнозов INMCM5 причинно-следственной связи между площадью и толщиной снежного покрова осенью и состоянием атмосферы последующей зимой нет. Представленная на Рис. 3 справа, разность аномалий скорости зонального ветра между экспериментами ATM_ONLY, ATM_TROP и ATMOC демонстрирует значительное влияние задаваемых в стратосфере начальных данных на воспроизведение ослабления зонального переноса, причём не только непосредственно в стратосфере, но и в тропосфере.

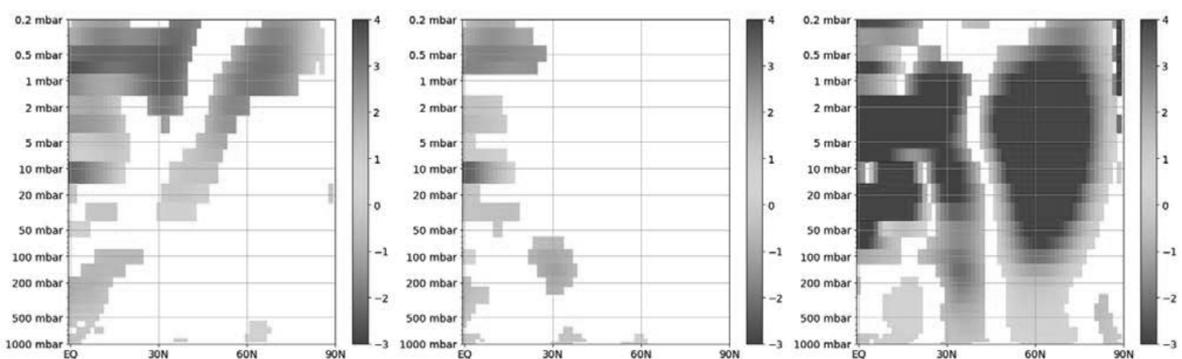


Рис. 3. Статистически значимые на уровне 5% отличия осреднённой по долготе аномалии скорости зонального ветра по данным экспериментов ATM (слева), ATM_ONLY (посередине) и ATM_TROP (справа) от ATMOC.

Представленные на Рис. 4 доверительные интервалы для индекса северо-атлантического колебания практически полностью совпадают для экспериментов ATMOC, ATM, ATM_ONLY, подтверждая

этим отсутствие влияния аномалий начальных данных, задаваемых для океана и деятельного слоя суши, на предсказуемость индекса NAO. При этом получившийся для эксперимента ATM_TROP доверительный интервал значимо смещён в положительную область и указывает на существенное влияние задаваемых в стратосфере аномалий начальных данных на индекс северо-атлантического колебания.

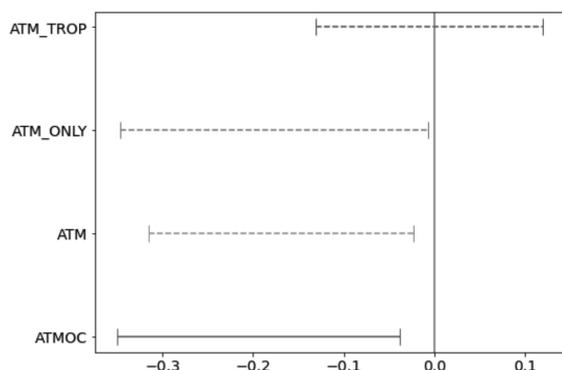


Рис. 4. 95% доверительный интервал для индекса NAO в различных экспериментах с INMCM5.

Таким образом, в ходе исследования установлено, что предсказуемость климатической моделью ИВМ РАН индекса NAO на зимний сезон 2009–2010 гг. обеспечивают задаваемые в стратосфере аномалии U- и V-компонент скорости ветра, а также температуры воздуха T. В дальнейшем планируется детальное исследование аномалий начальных данных в стратосфере для более точного определения источника предсказуемости индекса северо-атлантического колебания. После этого возможно обобщение полученного результата сначала на другие зимние сезоны, в которые наблюдалась отрицательная фаза NAO, и в случае успеха — на сезоны, характеризующиеся положительной фазой северо-атлантического колебания.

- Работа выполнена в Институте вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской Академии Наук при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 20-17-00190).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Volodin, E. M., Mortikov, E. V., Kostykin, S. V. et al. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5. *Clim. Dyn.*, 2017, V. 49, pp. 3715–3734.
2. В. В. Воробьева, Е. М. Володин Экспериментальные исследования сезонной предсказуемости погоды, выполненные на основе климатической модели ИВМ РАН, *Матем. Моделирование*, 2020, Т. 32, № 11, С. 47–58.
3. Dee, D. P., et al. The ERA–Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Quart. Journal. Roy. Meteorol. Soc.*, 2011, V. 137, pp. 553–597.
4. Carton, J. A., Chepurin, G. A., Chen, L. SODA3: A New Ocean Climate Reanalysis, *Journal of Climate*, 2018, V. 31, N. 17, pp. 6967–6983.
5. Vasilisa Vorobyeva, Evgeny Volodin Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2021, V. 73, N. 1, pp. 1–12.
6. Vorobyeva, V. V., Volodin, E. M. Analysis of the predictability of stratospheric variability and climate indices based on seasonal retrospective forecasts of the INM RAS climate model, *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, 2021, V. 36, N. 2, pp. 117–126.
7. Jones, P. D., Jonsson, T., Wheeler, D. Extension to the North Atlantic oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south–west Iceland, *Int. J. Climatol.*, 1997, V. 17, pp. 1433–1450.

SESSION II MODELING AND ANALYSIS OF GLOBAL AND REGIONAL CLIMATE AND RELATED ATMOSPHERIC PROCESSES

СЕКЦИЯ II МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ГЛОБАЛЬНОГО И РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА И ФОРМИРУЮЩИХ ЕГО АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Climatic changes in the tropo-stratosphere on the territory of Russia in the XX-XXI centuries

¹Perevedentsev Yu.P., ²Sherstyukov B.G., ¹Shantalinskii K.M., ¹Guryanov V.V.

¹ Kazan State University, Russia

² RIHMI-WDC, Obninsk, Russia

E-mail: Ypereved@kpfu.ru

The purpose of this article is to consider the space-time changes of the main climatic indicators in Russia during the modern period of global climate warming in the two periods 1976-2019 and 2001-2019. And to describe changes in air temperature (TA) from Earth level to 80 km high, interactions between layers of the atmosphere and the nature of the transition to summer conditions of the stratospheric circulation with ERA5 reanalysis data from 1979 to 2019. In this reanalysis, the TA and geopotential data in the layer in question are presented on 51 isobaric surfaces with a resolution of $1 \times 1^\circ$. The calculations were carried out using data from 1,251 weather stations located in Russia from the RIHMI-WDC Fund for 1976-2019. Multi-year series of raw data were statistically processed - there the mean climatic values, mean square deviations (MSD), air temperature and precipitation anomalies, linear trends of temperature and precipitation in Russia for periods 1976-2019 and 2001-2019 were found.

Air temperature trends were built for the central months of seasons and annual values for the entire Russian territory, according to data from 1,251 stations for 2 periods: 1976-2019 and 2001-2019. Trends in the mean annual temperature for 1976-2019 indicate a moderate warming of the climate almost throughout Russia. Most intensively it occurs on the Arctic coast of the Asian part of Russia and the surrounding islands. Thus, in the area of the Taimyr Peninsula, the linear trend slope coefficient (LTSC) reaches a value of 1.2 degrees Celsius/10 years. At the same time, in the central and northern parts of Siberia, warming is more pronounced than in the European part of Russia (EPR), where Karelia and the south-west of the Central Federal District (LTSC = 0.60-0.79°C/10 years) are allocated.

Trends, built on annual rainfall values, indicate an increase in precipitation in most of Russia. Thus, on the coast of Okhotsk Sea LTSC >25 mm/10 years are observed. Lower precipitation is observed in the center and in the south of the EPR, the North Caucasus, where the LTSC is -10-14 mm/year. Small pockets with decreased precipitation are observed on the o. Novaya Zemlya, south of Central Siberia, northeast of Chukotka.

Correlational analysis between atmospheric circulation indices and air temperature at individual stations revealed the degree of influence of atmospheric circulation on the thermal regime of the geographical regions of Russia.

The distribution of TA, MSD, LTSC values on 51 isobaric surfaces averaged throughout the Northern Hemisphere for the year, winter and summer is considered. In the troposphere TA with the height decreases, in the stratosphere there is its inversion and in the mesosphere it decreases again, which corresponds to known physical

representations. At all levels there is an annual amplitude of TA fluctuations and if the troposphere is experiencing an increase in temperature ($LTSC > 0$), the stratosphere is cooling ($LTSC < 0$). The largest inter-annual variability, according to the MSD distribution, is observed in the mesosphere, where summer temperatures are lower than winter temperatures. Thus, at the level of 0.01 hPa (80 km) in summer $TA \approx -92^\circ\text{C}$, and in winter -75°C . The trend of cooling at stratospheric levels is better expressed in summer than in winter, when dynamic processes are more active in the atmosphere (occurrence of SSW, wave interaction between layers, etc.).

Климатические изменения в тропо-стратосфере на территории России в XX-XXI веках

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

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

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

E-mail: Ypereved@kpfu.ru

Современные климатические вызовы широко обсуждаются в научных и общественно-политических кругах, в связи с их возможными последствиями негативного характера для природных и социально-экономических систем. С целью обезопасить государства от неблагоприятных климатических последствий и обеспечить их устойчивое развитие в декабре 2015 г. были подписаны Парижские соглашения, направленные на ограничение выбросов парниковых газов в атмосферу, с целью избежать прироста средней глобальной температуры на 2°C . В последующем эта планка была снижена до $1,5^\circ\text{C}$. В [3] обсуждаются последствия для природных и социально-экономических систем, которые могут возникнуть в мире в случае повышения средней глобальной температуры на $1,5^\circ\text{C}$. В России с пониманием относятся к проблеме глобального потепления, так как на её территории и особенно на Арктическом побережье темпы потепления более высокие, чем в других регионах мира. В 2009 г. была принята Климатическая доктрина РФ, а обобщение результатов современных климатических исследований полученных российскими учеными было представлено в [2]. Следует отметить, что природа современных и будущих климатических изменений не совсем понятна и существуют различные предположения на этот счет [4]. Возможно, что ожидаемая в 2022 г. публикация очередного Оценочного доклада по климату МГЭИК поможет выяснить ряд вопросов связанных с генезисом климатических изменений.

Цель настоящей статьи рассмотреть пространственно-временные изменения основных климатических показателей на территории России в современный период глобального потепления климата в два периода 1976-2019 и 2001-2019 гг., а также дать описание изменений температуры воздуха (ТВ) от уровня Земли до высоты 80 км, взаимосвязей между слоями атмосферы и характера весенних перестроек стратосферной циркуляции с привлечением данных более совершенного реанализа ERA5 в период 1979 – 2019 гг. В этом реанализе данные о ТВ и геопотенциале в рассматриваемом слое представлены на 51 изобарической поверхности с разрешением $1 \times 1^\circ$. Расчеты выполнялись с использованием данных 1251 метеорологических станций, расположенных на территории России из фонда ВНИИГМИ-МЦД за 1976-2019 гг. Многолетние ряды приземных исходных данных подвергались статистической обработке – находились средние величины, средние квадратические отклонения (СКО), аномалии температуры воздуха и атмосферных осадков, линейные тренды температуры и осадков на территории России для периодов 1976-2019 и 2001-2019 гг. На уровнях тропо- стратосферы были рассчитаны средние значения ТВ, средние квадратические отклонения (СКО), коэффициенты наклона линейного тренда (КНЛТ), коэффициенты детерминации линейного тренда как для всего Северного полушария в целом, так и его трех зон: полярной ($65 - 90^\circ$ с.ш.), умеренной ($30 - 65^\circ$ с.ш.), тропической ($0 - 30^\circ$ с.ш.). Для оценки степени взаимосвязанности процессов по вертикали рассчитывались коэффициенты корреляции между ТВ на различных уровнях, оценивалось также влияние арктической осцилляции на колебания ТВ. Определение дат весенних перестроек стратосферной циркуляции (смена западных потоков восточными) производилось с использованием рассчитанных на изобарической поверхности 10 гПа (31 км) в широтной зоне $30 - 90^\circ$ с.ш. индексов зональной циркуляции А.Л. Каца.

Были построены карты трендов температуры воздуха для центральных месяцев сезонов и годовых значений для всей территории России по данным 1251 станций для 2-х периодов: 1976-2019 и 2001-2019 гг. Рассмотрим вначале пространственное распределение трендов температуры за весь 44-летний период исследования (1976-2019 гг.). В январе наибольшая скорость потепления наблюдается в Средней Сибири, арктическом побережье с максимумом на полуострове Таймыр и арктических островах от Новой Земли до Новосибирских островов, где величина коэффициента наклона линейного тренда (КНЛТ) достигает $1,2^\circ\text{C}/10$ лет, значительный рост ТВ ($\text{КНЛТ}=0,80-0,99^\circ\text{C}/10$ лет) наблюдается на территории Хабаровского

края, в Европейской части России (ЕЧР) выделяется северо-запад, где КНЛТ в районе Архангельска достигает $0,80-0,99^{\circ}\text{C}/10$ лет. Остальная часть ЕЧР также испытывает потепление, но меньшей интенсивности (КНЛТ меняется в пределах $0,20-0,59^{\circ}\text{C}/10$ лет). Очаги похолодания сформировались на юге Западной Сибири, где КНЛТ <0 и меняется в пределах от $-0,40$ до $-0,79^{\circ}\text{C}/10$ лет и в Восточной Сибири (Магаданская область). В июле запад и юго-запад ЕЧР заняты достаточно интенсивной областью потепления (КНЛТ меняется от $0,60$ до $0,99^{\circ}\text{C}/10$ лет), на остальной части России за исключением средней полосы Западной Сибири, где потепление практически отсутствует, преобладает слабый рост ТВ со скоростью от $0,20$ до $0,59^{\circ}\text{C}/10$ лет. Тренды среднегодовой температуры свидетельствуют об умеренном потеплении климата практически на всей территории России. Наиболее интенсивно оно происходит на арктическом побережье Азиатской части России и прилегающих островах. Так, в районе полуострова Таймыр КНЛТ достигает значения $1,2^{\circ}\text{C}/10$ лет. При этом в центральной и северных частях Сибири потепление более выражено, чем на ЕЧР, где выделяется Карелия и юго-запад Центрального федерального округа (КНЛТ $=0,60-0,79^{\circ}\text{C}/10$ лет). Тренды ТВ, построенные по среднегодовым значениям 1251 станции за 2001-2019 гг., не выявляют значительных территориальных контрастов в изменениях температуры. Практически вся территория России за исключением достаточно узкой полосы юга Западной Сибири, где КНЛТ порядка $-0,20-0,49^{\circ}\text{C}/10$ лет, занята потеплением, более интенсивным на севере ЕЧР, Западной Сибири, побережье Арктики, в Чукотке, где скорость потепления может достигать $1,49^{\circ}\text{C}/10$ лет. Таким образом, распределение трендов среднегодовой температуры воздуха в период 2001-2019 гг. в отличие от всего периода 1976-2019 гг. выявляет заметное похолодание на юге Западной Сибири. Рассмотрим региональные особенности изменения режима атмосферных осадков в период 1976-2019 гг. на территории России. Пространственная картина распределения трендов осадков по территории России весьма неоднородная. Так, в январе на ЕЧР наблюдается рост осадков со скоростью $1,0-1,9$ мм/10 лет с максимумом на северо-западе, где КНЛТ $=2,0-2,9$ мм/10 лет. В центре и на юге Западной Сибири, в Алтае и на северо-востоке Восточной Сибири, включая Чукотку, отмечается снижение осадков (КНЛТ достигает $-2,0-2,9$ мм/10 лет). В то же время выделяется северный регион Западной и Средней Сибири от п-ва Таймыр до Новосибирских островов, где осадки увеличиваются со скоростью достигающей $2,0-2,9$ мм/10 лет. В июле практически вся ЕЧР за исключением северо-запада, западная часть Западной Сибири, арктическое побережье от Таймыра до Чукотки, Магаданская область и Камчатка, Предбайкалье и Забайкалье находятся в зоне уменьшения осадков, так КНЛТ <-4 мм/10 лет на ЕЧР и Камчатке, в то же время юг Восточной Сибири, Приамурье и Приморье располагаются в зоне роста осадков (КНЛТ >4 мм/10 лет). Тренды, построенные по годовым значениям сумм осадков, свидетельствуют об увеличении осадков на большей части территории России. Так, на побережье Охотского моря КНЛТ >25 мм/10 лет. Понижение сумм осадков наблюдается в центре и на юге ЕЧР, Северном Кавказе, где КНЛТ $\sim -10-14$ мм/год. Небольшие очаги с уменьшением осадков отмечаются на о. Новая Земля, юге Средней Сибири, северо-востоке Чукотки. Годовая картина трендов сумм осадков, построенная по данным 1251 станций в 2001-2019 гг. носит пестрый, контрастный характер. Северо-запад ЕЧР, Среднее Поволжье, п-ов Таймыр, восточные регионы России находятся в зоне роста осадков со скоростью 40 мм/10 лет. Наибольшее увеличение сумм осадков происходит в Приамурье и Приморье. Недобор осадков отмечается на юге ЕЧР, Северном Кавказе, на северо-востоке ЕЧР, в Средней Сибири и на арктическом побережье в районе Новосибирских островов. Так, в Причерноморье КНЛТ достигает -50 мм/10 лет. Для оценки влияния циркуляции атмосферы на термический режим ЕЧР рассчитывались коэффициенты корреляции r в период 1976 – 2019 гг. между временными рядами индексов атмосферной циркуляции (АО, NAO, ВАР, SCAND) и температурой воздуха на отдельных станциях. Всего использовалось 95 станций. Были построены карты изокоррелят для января и июля. Выявились следующие особенности. В январе с арктической осцилляцией (АО) связи более тесные на западе и в центре региона (в районе Пскова $r = 0,6$), в направлении с юго-запада на северо-восток происходит их ослабление и в Северном Предуралье ($r = 0,2$). В июле связи незначимы. С индексом североатлантического колебания (NAO) в январе также связи более тесные в западной и центральной части региона ($r = 0,7$), в восточном направлении происходит заметное ослабление влияния NAO, а на юго-востоке ЕЧР r уменьшается до $0,2$ и меньших значений (Оренбург). В июле значения коэффициентов корреляции незначительны $\sim 0,2$. Таким образом, арктическая осцилляция и североатлантическое колебание оказывают заметное воздействие на термический режим региона в зимний период и прежде всего на его западную и центральную часть. Это воздействие положительное, т.е. атмосферная циркуляция способствует потеплению региона в зимний период. Циркуляционная мода Восточная Атлантика-Западная Россия (EAWR) наибольшее влияние оказывает в летний период и в основном на центр и особенно восток региона, где величина $r = -0,7$, что свидетельствует об охлаждающем влиянии Северной Атлантики в этот период. Связь температуры воздуха с индексом SCAND в январе лучше выражена в южной половине ЕЧР и особенно на востоке территории (Урал, Оренбургье, Северной Кавказ), где r принимает отрицательное значение ($r = -0,6$). Таким образом, формирование блокирующего скандинавского антициклона заметно влияет на зимний термический режим востока ЕЧР и способствует понижению ТВ. В июле связь между компонентами выше на северо-западе ЕЧР ($r = +0,4$) и ослабевает в направлении юго-востока. Рассмотрено распределение ТВ, СКО, величины коэффициента наклонного тренда на 51 изобарической поверхности осредненных по всему Северному полу-

шарию для года, зимы и лета. В тропосфере ТВ с высотой понижается, в стратосфере наблюдается её инверсия и в мезосфере она вновь понижается, что соответствует физическим представлениям, изложенным в [5]. На всех уровнях отмечается годовая амплитуда колебаний ТВ и если в тропосфере происходит рост температуры (КНЛТ > 0), то в стратосфере наблюдается похолодание (КНЛТ < 0). Наибольшая межгодовая изменчивость, согласно распределению СКО, наблюдается в мезосфере, где летние температуры ниже зимних. Так, на уровне 0,01 гПа (80 км) летом ТВ \approx - 92°C, а зимой - 75°C. Тенденция похолодания на стратосферных уровнях лучше выражена летом, чем зимой, когда в атмосфере динамические процессы протекают более активно (возникновение ВСП, волновое взаимодействие между слоями и т.д.). При этом, как следует из особенностей вертикальных профилей КНЛТ ТВ для полярной и умеренной зон, в полярной зоне наблюдаются существенные различия между январским, июльским и годовым распределением, а в умеренной зоне эти расхождения заметны лишь с уровня 40 км. Анализ рассчитанных коэффициентов корреляции (r) между температурой различных изобарических поверхностей показывает, что связи наиболее тесные в тропосфере, они ослабевают и меняют знак при переходе через тропопаузу. При этом в стратосферной полярной зоне связи между соседними уровнями более тесные в январе, чем в июле, а в тропической зоне сезонные различия не столь выражены. Это особенно заметно при анализе карты распределения r в слое 20 – 10 гПа. Выше уровня 10 гПа особенно в январе вертикальные связи усиливаются. Влияние атмосферной циркуляции на температурный режим тропо-стратосферы оценивалось с помощью рассчитанных коэффициентов корреляции между колебаниями ТВ и индексом арктической осцилляции. Как известно, арктическая осцилляция в значительной степени является результатом взаимодействия тропосферы и стратосферы. Наиболее высокая корреляция обнаруживается зимой для полярной зоны на уровне 10 км (r = -0,60), в летний период связь ослабевает и на высотах 10 – 12 км значение r = 0,32. Действительно, в период положительной фазы арктической осцилляции усиливается зимний циркумполярный вихрь, что приводит к охлаждению стратосферы. Этим и объясняется отрицательный знак коэффициенты корреляции в зимнее время. В случае разрушения полярного вихря АО ослабевает, а ТВ растет, что также приводит к отрицательной связи между ними. Уставлена положительная корреляция (r = 0,70) между датами перестроек СЦ и солнечной активностью (числами Вольфа) для периода 1979 – 2004 гг. Выявляется также зависимость дат поздних перестроек СЦ от возникновения в зимней стратосфере сильных ВСП. В работе [1] приводятся сведения о больших ВСП. Сравнение данных о поздних перестройках с данными [1] показывает, что поздние перестройки происходят в годы с большими ВСП. Кроме того, в полярной зоне (90 – 70° с.ш.) в период 1986 – 2002 гг. наблюдалась тенденция запаздывания дат весенних перестроек СЦ со скоростью \sim 27 дней/10 лет, а в более поздний период (2002 – 2019 гг.), наоборот, весенние перестройки стали происходить раньше со скоростью – 18 дней/10 лет.

1. В среднем по СП зимой и летом КНЛТ температуры воздуха положителен в тропосфере, в стратосфере с изобарической поверхности 100 гПа до поверхности 0,5 гПа наблюдается ее выхолаживание особенно интенсивное в слое 35 – 45 км (КНЛТ < 0). В мезосфере вновь начинается потепление.
2. Коэффициенты корреляции, рассчитанные между ТВ на различных изобарических поверхностях, при переходе через тропопаузу становятся отрицательными. В зимний период на пространственную структуру распределения r в стратосфере оказывает влияние волновой механизм взаимодействия между тропосферой и стратосферой.
3. Наблюдается большой временной разброс (68 суток) в датах весенней перестройки стратосферной циркуляции от 7 марта до 14 мая. Обнаружена зависимость дат весенних перестроек СЦ от солнечной активности и возникновения внезапных стратосферных потеплений (после больших ВСП наблюдаются, как правило, поздние перестройки).

■ Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 20-55-00014).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Агеева В.Ю.; Груздев А.Н.; Елохов А.С.; Мохов И.И.; Зуева Н.Е. Внезапные стратосферные потепления: статические характеристики и влияние на общее содержание NO₂ и O₃ / Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2017. – Том 53, №5. – 545–555.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Научные руководители В.М. Катцов и С.М. Семенов. – Росгидромет. Москва, 2014. – 1009.
3. Гладильщикова А.А.; Дмитриева Т.М.; Семенов С.М. Специальный доклад межправительственной группы экспертов по изменению климата «Глобальное потепление на 1,5°C» / Фундаментальная и прикладная климатология. – 2018. – №4. – 5–18.
4. Логинов В.Ф.; Лысенко С.А. Современные изменения глобального и регионального климата – Белорусская наука. Минск, 2017 – 318.
5. Мохананумар К. Взаимодействие стратосферы и тропосферы. – Физматлит. М., 2011. – 452.

Non-saltation emission of aerosol: parameterization and modeling

^{1,2}Vazaeva N., ¹Chkhetiani O.

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

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: ifanatally@gmail.com, ochkheti@gmail.com

The results of complex observations of variations in aerosol particles with a diameter of $0.1\div 2\ \mu\text{m}$ in the surface layer of the atmosphere in arid and semi-arid landscapes of Kalmykia in 2002, 2003, 2004, 2007, 2009, 2010, 2011, 2013, 2014, 2016, 2018, 2020 have been analyzed [Gledzer et al, 2010; Chkhetiani et al., 2012, 2021]. Despite of the weak wind conditions (up to $3\div 4\ \text{m/s}$) during the daytime there is an intense emission of submicron aerosol from sand surface. This fact can lead to notable contribution to regional and global aerosol cycles. The flow of aerosol into the atmosphere in the absence of saltation was about $0.02\div 5\ \mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ [Vazaeva et al., 2017].

We use experimental data to create a new parameterization scheme of aerosol emission from arid areas. Based on the calculated results of this adapted WRF-Chem model, updated aerosol emission data were obtained. The concentration gradient of submicron aerosol increases according to a power law depending on the temperature gradient in the near-surface layer. As the wind velocity increases, the submicron aerosol flux decreases. Analyzing the cases of different wind and temperature conditions (see [Chkhetiani et al., 2012]) the concentration gradient of submicron aerosol for July 2007 is estimated: with a weak wind $\Delta c = 0,12\delta T^{0,5}$, with a strong wind $\Delta c = 4\delta T^{-1/3}$.

WRF-Chem model was chosen for calculations. An analysis of field measurements of various wind and temperature conditions showed dependence close to linear of the temperature gradient and the surface temperature (see [Chkhetiani et al., 2012]). In accordance with this dependence, the resulting concentration gradients can be written as:

$$\text{Weak winds } \Delta c = 0,12(0,64T_{\text{ноб}} - 20)^{0,5} \quad (1)$$

$$\text{Strong winds } \Delta c = 4(0,64T_{\text{ноб}} - 20)^{-1/3}$$

Since an underestimation of real data in the model by approximately 7° , the temperature correction has been carried out.

Adding a parameterization of the form (1) to the mesoscale atmospheric model WRF-ARW gives us an increase in the mass content of submicron particles (with a median size of up to $5\ \mu\text{m}$) from $0.495\ \mu\text{g}/\text{kg}$ to $1.4\ \mu\text{g}/\text{kg}$ of dry air (8UTC). This effect indicates an underestimation of the non-saltation emission of submicron aerosol, which occurs in arid areas during hot weather under conditions of weak and moderate winds in atmospheric models.

- This work was supported by Russian Science Foundation, project no. 20-17-00214.

REFERENCES:

1. Chkhetiani O. G., Gledzer E.B., Artamonova M.S., Iordanskii M.A. 2012. Dust resuspension under weak wind conditions: direct observations and model. *Atmos. Chem. Phys.* V. 12. No. 11. P. 5147-5162.
2. Chkhetiani O. G., Gledzer E. B., Vazaeva N. V. Measurements and Approximations for Submicron-Aerosol Size Distribution Functions //Earth and Space Science. 2021. V. 8. No. 6. P. e2020EA001616.
3. Gledzer E.B., Granberg I.G., Chkhetiani O.G. 2010. Air dynamics near the soil surface and convective emission of aerosol. *Izvestiya, Atm. and Oceanic Phys.* 46(1): 29-40.
4. Vazaeva N.V., Chkhetiani O.G., Gledzer E.B., Artamonova M.S., Iordanskii M.A., Kurgansky M.V., Lebedev V.A., Maximenkov L.O. and Obvintsev Y.I.. 2017. Aerosol emission in the arid zones of Southern Russia. Report Series In Aerosol Science № 201 (2017): Proceedings of the 3rd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and the 7th PEEX Meeting, Helsinki 2017, P. 518-520.

Несальтационная эмиссия аэрозоля: параметризация и моделирование

^{1,2}Вазаева Н.В., ¹Чхетиани О.Г.

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

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: ifanataly@gmail.com, ochkheti@gmail.com

Данные многолетних комплексных наблюдений вариаций массовой и счетной концентрации аэрозольных частиц с диапазоном размеров 0,15 - 2 мкм на юге России (Прикаспийская низменность, Калмыкия) в летний период 2002, 2003, 2004, 2007, 2009, 2010, 2011, 2013, 2014, 2016, 2018 и 2020 годов демонстрируют присутствие большого количества субмикронного аэрозоля в том числе и в условиях слабых ветров (до 3-4 м/с), когда отсутствует сальтация [Гледзер Е.Б. и др. 2010, Chkhetiani O. G. et al., 2012, 2021, Артамонова М.С. и др., 2016]. Вынос аэрозоля в таком случае связан с большим градиентом температуры воздуха над подстилающей поверхностью в сухую жаркую погоду – механизмом несальтационной эмиссии. Подробное описание физики несальтационных эмиссионных процессов дано в [Гледзер Е.Б. и др. 2010, Chkhetiani O.G. et al., 2012]. Подобный вынос субмикронного аэрозоля может происходить практически ежедневно в летнее время на аридных территориях и может внести значимый вклад в региональные и глобальные аэрозольные циклы, способствовать формированию аэрозольных слоев.

Экспериментальные данные лежат в основе параметризации процессов эмиссии аэрозоля в локальных и глобальных атмосферных моделях. Надо отметить территориальную зависимость коэффициентов параметризации (в большинстве своем полуэмпирических) для каждого характерного региона и одновременный недостаток полевых измерений. В данной работе параметризация несальтационной эмиссии разработана для летних месяцев на примере Калмыкии, скомпилирована и протестирована в атмосферной модели WRF-ARW.

Интенсивный конвективный подъем и вынос субмикронного аэрозоля с песчаных массивов и сухих суглинистых почв наблюдается в дневные часы. Массовые концентрации аэрозоля для различных периодов измерений варьируются от нескольких десятков до сотен мкг/м³ (см. Рис. 1). Поток аэрозоля в атмосферу при слабых ветрах и при отсутствии сальтации, рассчитанный с использованием методики [Gillette D. A. et al., 1972, 1997], изменяется от нескольких сотых до единиц мкг/м²с [Vazaeva et al., 2017, Chkhetiani O. G. et al., 2021]. Отмечается также связь эмиссии аэрозоля с параметрами статистической устойчивости атмосферного пограничного слоя (масштаб длины Монина-Обухова, турбулентный поток тепла).

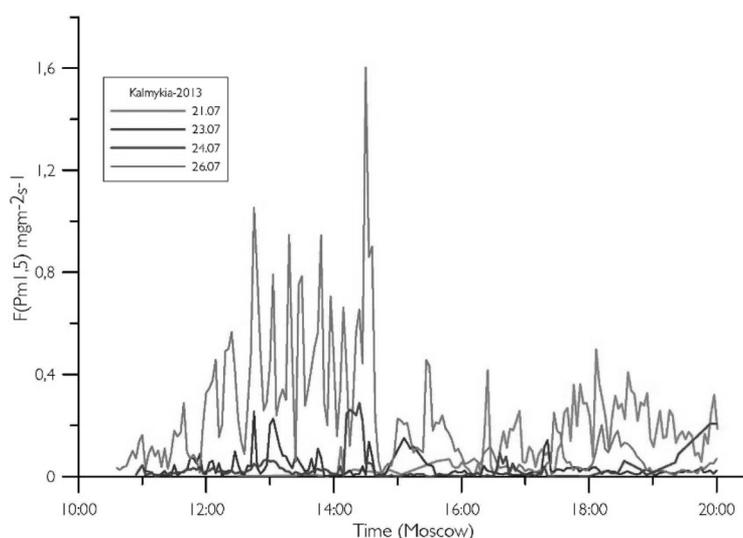


Рис. 1. Поток аэрозоля (Pm1.5), Калмыкия, 21,23,24,26 июня 2013. Преобладует несальтационная эмиссия.

Градиент концентраций субмикронного аэрозоля увеличивается по степенному закону в зависимости от градиента температуры в приповерхностном слое. При возрастании скорости ветра поток субмикронного аэрозоля уменьшается. Проанализировав случаи различных ветровых и температурных условий (см. [Chkhetiani, O.G. et al., 2012], например, рис. 2 для слабого ветра, $u^* < 0,3$ м/с; рис. 3 для сильного ветра, $0,3$ м/с $< u^* < 0,5$ м/с) градиент концентраций субмикронного аэрозоля для июля 2007 г. оценивается: при слабом ветре $\Delta c = 0,12\delta T^{0,5}$, при сильном ветре $\Delta c = 4\delta T^{-1/3}$.

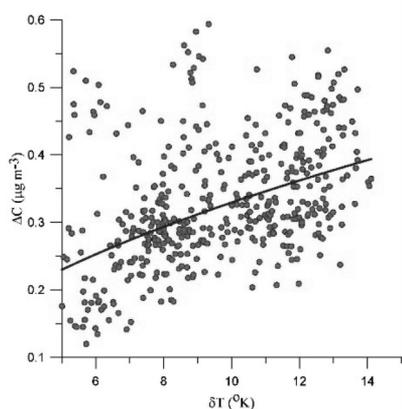


Рис. 2. Концентрации субмикронного аэрозоля в зависимости от градиента температуры, Калмыкия 28 июля 2007 г.

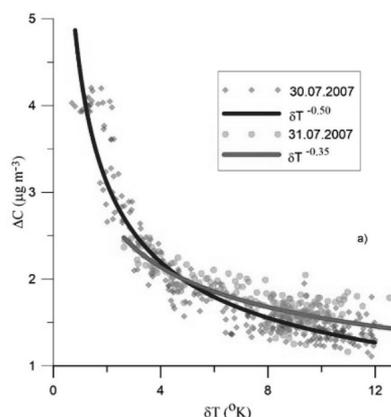


Рис. 3. Концентрации субмикронного аэрозоля в зависимости от градиента температуры, Калмыкия 30 и 31 июля 2007 г.

Анализ данных полевых измерений показывает зависимость градиента температуры от температуры поверхности, близкую к линейной. В соответствии с этой зависимостью, итоговые градиенты концентраций могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} \text{при слабом ветре } \Delta c &= 0,12(0,64T_{\text{пов}} - 20)^{0,5} \quad (1) \\ \text{при сильном ветре } \Delta c &= 4(0,64T_{\text{пов}} - 20)^{-1/3} \end{aligned}$$

Соответственно проведена корректировка температуры поверхности модели WRF-Chem (см. рис. 4). Отмечено занижение модельных данных примерно на 7°.



Рис. 4. Значения температуры поверхности в данных наблюдений, в модели WRF-Chem и разница этих температур для различных моментов времени днем 28 июля 2007 г.

Добавление параметризации вида (1) в мезомасштабную атмосферную модель WRF-ARW дает возрастание массового содержания субмикронных частиц (с медианным размером до 5 мкм) с 0,495 мкг/кг до 1,4 мкг/кг сухого воздуха (8UTC) (см. рис. 5). Подобный эффект указывает на недооценку несальтационного выноса субмикронного аэрозоля, происходящего на аридных территориях в жаркое время при условиях слабых и умеренных ветров в атмосферных моделях.

- Настоящее исследование выполнено при поддержке РФФ (проект № 20-17-00214).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Chkhetiani O.G. et al. Dust resuspension under weak wind conditions: direct observations and model // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2012. – Т. 12. – №. 11. – С. 5147-5162.
2. Chkhetiani O.G., Gledzer E.B., Vazaeva N.V. Measurements and Approximations for Submicron-Aerosol Size Distribution Functions // Earth and Space Science. – 2021. – Т. 8. – №. 6. – С. e2020EA001616.
3. Gillette D.A., Blifford Jr I. H., Fenster C. R. Measurements of aerosol size distributions and vertical fluxes of aerosols on land subject to wind erosion // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 1972. – Т. 11. – №. 6. – С. 977-987.
4. Gillette D.A. et al. Relation of vertical flux of particles smaller than 10 μm to total aeolian horizontal mass flux at Owens Lake // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 1997. – Т. 102. – №. D22. – С. 26009-26015.

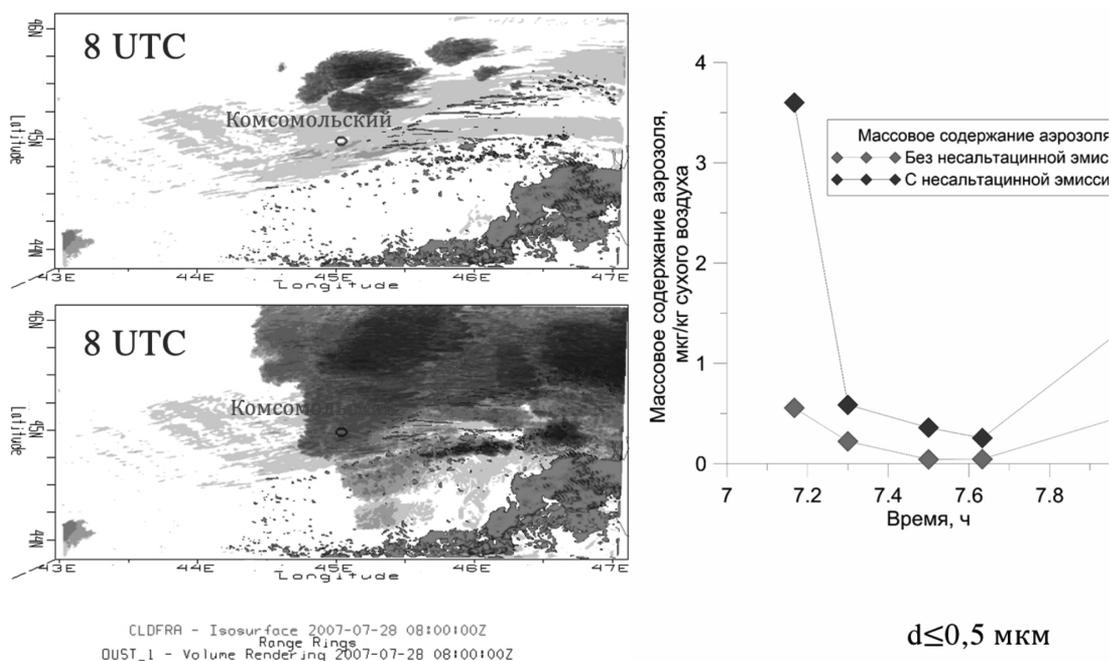


Рис. 5. Доля облачности (сиреневым цветом) и массовое содержание минерального аэрозоля (от синего к красному в порядке возрастания содержания) – для 8 UTC над районом измерений, вид сверху. Массовое содержание аэрозоля в зависимости от времени по результатам моделирования. Модель без учета параметризации несальтационной эмиссии и уточненная модель WRF-ARW, 28 июля 2007 г. Шаг сетки 540 м.

- Vazaeva N.V., Chkhetiani O.G., Gledzer E.B., Artamonova M.S., Iordanskii M.A., Kurgansky M.V., Lebedev V.A., Maximenkov L.O. and Obvintsev Y.I. Aerosol emission in the arid zones of Southern Russia // Report Series In Aerosol Science № 201 (2017): Proceedings of the 3rd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and the 7th PEEX Meeting, Helsinki 2017, P. 518-520.
- Артамонова М.С., Губанова Д.П., Иорданский М.А., Лебедев В.А., Максименков Л.О., Минашкин В.М., Обвинцев Ю.И., Чхетиани О.Г. Вариации массовой концентрации и состава приземного аэрозоля степной зоны юга России в летний период // Геофизические процессы и биосфера. – 2016. – Т. 15. – №. 1. – С. 5-24.
- Гледзер Е.Б., Гранберг И.Г., Чхетиани О.Г. Динамика воздуха вблизи поверхности почвы и конвективный вынос аэрозоля // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 46. – №. 1. – С. 35-47.

Верификация вертикального профиля температур моделей COSMO и ICON по данным доступных наблюдений

¹Гочаков А.В., ¹Токарев В.М., ^{1,2}Колкер А.Б.

¹ Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

E-mail: gochakov@sibnigmi.ru, vt@sibnigmi.ru, alexk@sibnigmi.ru

Проблема прогнозирования и верификации моделей в нижней части пограничного слоя атмосферы хорошо известна [1, 2]. Система верификации необходима для анализа качества численного прогноза погоды, а также для корректировки прогнозов с использованием методов предварительной или пост обработки. В данной работе предпринята попытка численной оценки модельных прогнозов вертикальных профилей температуры в пограничном слое. Достоверные синхронные данные наземных наблюдений, ультразвуковой профилометр и радиозонд были использованы для верификации модели ICON-LAM [3] и COSMO [4]. Средние ошибки, коэффициенты корреляции и среднеквадратичные ошибки были рассчитаны для двух сезонов - зимнего и переходного от весны к лету.

Были использованы данные моделей COSMO версии 5.03 и модели ICON в региональном режиме версии 2.5.0, установленные в Вычислительном центре Западно-Сибирского УГМС Росгидромета. Модель ICON и COSMO разработаны в рамках одного консорциума. В ближайшем будущем ICON должна заменить COSMO для расчета оперативных прогнозов погоды. Модели имеют различные динамические ядра и принцип построения горизонтальной сетки, различия в параметризации и принципах формирования и использования внешних данных, но общие основные параметризации.

Численные оценки и анализ результатов моделирования температурного профиля были выполнены с использованием данных наземных измерений в аэропортах METAR, данных ультразвукового профилометра типа МТР-5 и радиозонда типа АВК-MRZ. Анализ результатов выполненных модельных экспериментов и полученных оценок показывает особенности численного прогноза которые необходимо учитывать при интерпретации модельной продукции. Отметим, что в зимний период в приземном слое до 150 метров модели занижают температуру в окрестностях города. В летний период, по результатам измерений, существенный вклад в формирования вертикального профиля температуры слоя до 1 км и в горизонтальном масштабе города Новосибирска, вносит пространственная изменчивость. Отклик модели в этих масштабах воспроизводится очень слабо.

- Работа выполнена в рамках государственного задания по теме 1.1.3 плана НИТР Росгидромета на 2020-2024 гг. , регистрационный № НИОКТР АААА-А20-120020590012-2 ЕГИСУ.

Verification of vertical temperature profile of COSMO and ICON models with available observation data

¹Gochakov A.V., ¹Tokarev V.M., ^{1,2}Kolker A.B.

¹ Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

E-mail: gochakov@sibnigmi.ru, vt@sibnigmi.ru, alexk@sibnigmi.ru

The problem of forecasting and verification of the numerical weather prediction (NWP) models in the lower part of the atmospheric boundary layer is well known [1, 2]. Using a verification system could be helpful to analyze the quality of a numerical weather forecast, as well as to correct forecasts using pre- or post-processing methods. This work is devoted to numerical estimation of errors in model reconstruction of vertical temperature profiles in the boundary layer. Reliable synchronous data of ground-level observations, ultrasonic profiler and radiosonde was used for verification of the pilot-version of ICON-LAM model [3] and the results of the operational COSMO model [4]. The mean errors, correlation coefficients, and mean-square errors were calculated for two seasons - winter and transitional spring to summer.

Verification of the vertical profile parameters of numerical weather models in the lower part of the planetary boundary layer is a complicated task due to a number of factors such as low resolution of most measurement instruments (radiosondes, satellites, lidars, etc.) and various types of noise. On the other hand, the processes in the roughness layer and adjacent to it are of particular interest in view of the variety of physical processes that have a significant impact on the formation of weather conditions. The quality of regional mesoscale NWP models in the lower boundary layer depends on the model dynamic core, parameterizations of physical processes, and detailing external model data (i.e surface height, land use categories, water and terrain mask and types).

We have used the data of the COSMO model version 5.03 and the ICON model in the regional mode version 2.5.0 installed in the computing centre of the Novosibirsk hydrometeorological service. The ICON and COSMO model is being developed within the framework of one consortium and in the near future ICON is intended to replace COSMO for performing operational weather predictions. These models have different dynamic cores and a horizontal grid structure, differences in parameterizations and different principles for the formation and use of external data, but they have common basic features of parameterizations.

Numerical estimates and analysis of the results of modeling the temperature profile were achieved using surface measurement data at airports (METAR reports), data from the ultrasonic profiler of the MTP-5 type and a radiosonde of the AVK-MRZ type. The ultrasonic profiler and the radiosonde are installed in the vicinity of Novosibirsk at a distance of 20 km from each other, therefore, an attempt was made to analyze the spatial variability on the basis of these data. Measurement data was interpolated to the vertical model levels. The height determination error for MTP-5 is 25%. For AVK height is different per each measurement. Therefore interpolation to height in the range of 100 to 300 meters can be unreliable (gray points on the Figure 2).

Estimates were performed for May 2020 and January 2021. The May for Novosibirsk region is a transitional month from spring to summer with pronounced diurnal temperature variation. Temperature differences

in May 2020 jumped from 1 to 34. January is the month of winter inversion. Jan 2021 was the coldest month of the last 10 years and had dramatic temperature changes. The range of temperatures was between -40 to -3 degrees Celsius.

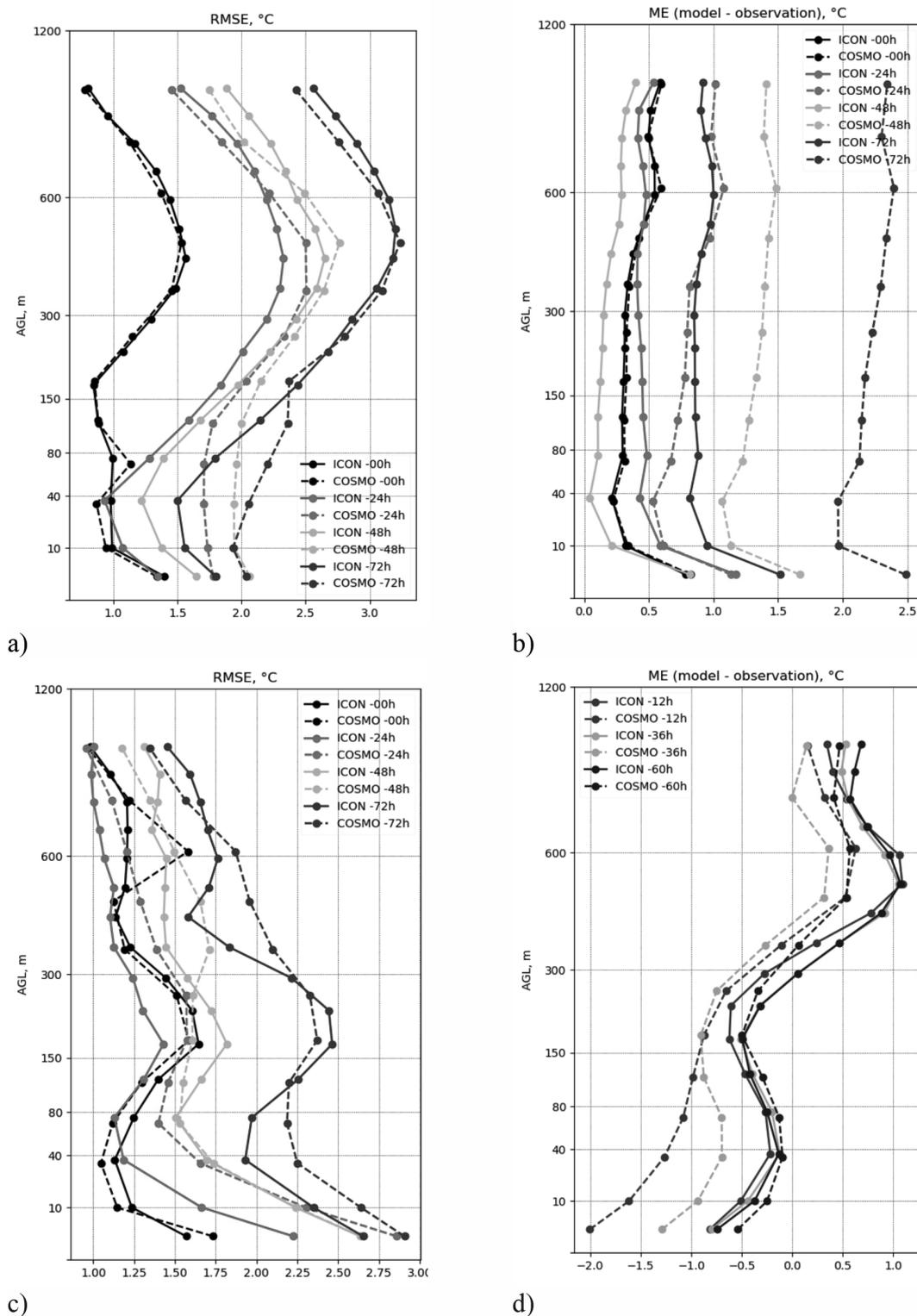


Figure 1. May 2020, January 2021 COSMO and ICON compared to ultrasonic data (MTP-5) a) May local morning, b) May local evening, c) January local morning, d) January local evening for measurement, but 00 UTC initial model data

The estimates were performed for each of model lead times with time step 12 hours for model initial time from 00 UTC and 12 UTC. Model data have been chosen according to measurement data for local morning (00 UTC) and local evening (12 UTC). So estimates show model accuracy depending from lead time, time of initial data and time of day. Below are only the graphs with the corresponding conclusions. The full set of graphs is available on <http://sibnigmi.ru/graphs/verification>

On the first graph series are shown the COSMO and ICON temperatures compared with ultrasonic measurements. On Figure 1 the dotted line is COSMO, the solid line is ICON. The colors show the model lead time related to measurement time (minus means the models initial data time shift from measurement time). Figure 1a shows RMSE 00h for May model initial data and 00h measurement data. For the ICON RMSE and the correlation for the lead times -24..-72h are noticeably better in the surface layer of 100m. Figure 1b shows ME 12h for May model initial data and 12h measurement data. The bias (ME) of ICON forecasts are small or unnoticeable. For the COSMO the bias is bigger and rises with increasing the lead time. Figure 1c shows RMSE 00h for January model initial data and 00h measurement data. RMSE and correlation for both COSMO and ICON have a significant error increase for -60 and -72 lead times. Moreover, this difference extends both to the radiosonde and to the ultrasonic (not shown). Figure 1d is ME for January model initial data and 00h measurement data 12h. By comparison to local morning biases (not shown), local evening biases (12h UTC) for all lead times show less scatter, especially for the ICON.

Second graph series is a comparison of the ICON model with ultrasonic and radiosonde (resources under link). The main conclusion is: the simulation results in the layer above 500m for May are closer to the radiosonde data (RMSE and correlation). For January, the noticeable error jumped by ultrasonic data at an altitude of 150-200 meters for all lead times.

Third graph series describes spatial variability interpreted by the ICON model simulating results and different measurement devices. The green dotted line represents the difference between measurements and the solid line - between model grid points nearest to appropriate measurements. In the boundary layer for May at the model initial time 00 (Figure 2a) compared to initial time 12h, the measurements show doubling (from 1.1 to 2.6) of the average temperature deviation and decreasing correlation (from 0.94 to 0.86). The physical explanation is night inversions and the influence of the surface. The difference between the model grid points is 0.5 degrees, regardless of the time of day. For January the difference between the model grid points shows half of the spatial variance from measurements (by RMSD both 00 - Figure 2b and 12), evenly for the entire layer. A high correlation between the grid points determine a smoothed field of the model temperatures.

The analysis of the results of the performed model experiments and the obtained estimates shows the features of the numerical forecast that must be taken into account when interpreting the model products. It should be noted that: in winter, in the surface layer up to 150 meters, the models underestimate the temperature in the vicinity of the city.

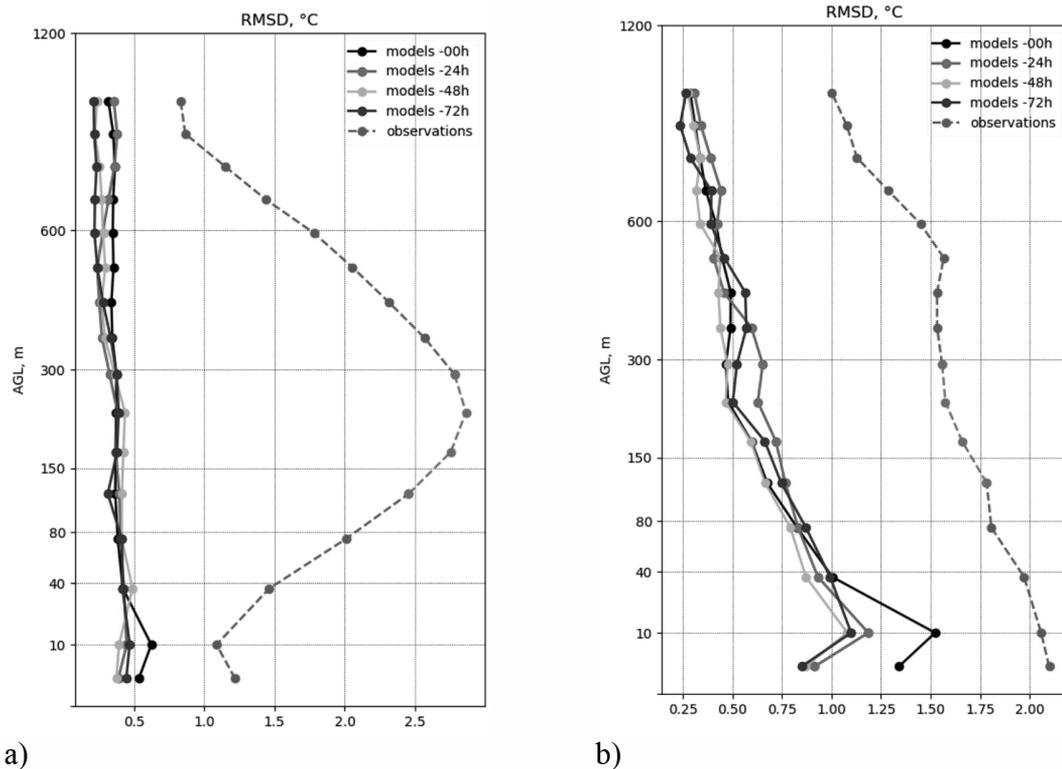


Figure 1. May 2020, January 2021 ICON spatial varians to ultrasonic data (MTP-5) a) May local morning, b) January local morning

In summer, according to the results of measurements, a significant contribution to the formation of the vertical profile of the temperature of the layer up to 1 km on the horizontal scale of the city of Novosibirsk is made by spatial variability. The model response at these scales is very weak reproduced.

- This work was supported by the state assignment on topic 1.1.3 of the research and technical work plan of Roshydromet for 2020-2024 AAAA-A20-120020590012-2.

REFERENCES:

1. Shakina N.P., Hydrodynamic Instability in the Atmosphere // Gidrometeoizdat, Leningrad, 1990 [in Russian].
2. I.T.Jolliffe and D.B.Stephenson, Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science, 2nd Edition // Wiley, 2011.
3. Z'angl, G., D. Reinert, P. Ripodas, and M. Baldauf: The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the nonhydrostatic dynamical core. // Q. J. R. Meteorol. Soc., 2015, 141, 563–579.
4. Baldauf M., Seifert A., Forstner J., Majewski D., Raschendorfer M., Reinhardt T. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities // Mon. Wea. Rev. 2011. Vol. 139. P. 3887–3905.

Масштабируемость и аспекты реализации численных моделей турбулентности и лагранжевого переноса частиц

^{1,2,3} Дебольский А.В., ^{1,3,4} Мортиков Е.В., ^{1,3} Степаненко В.М.

¹ Научно-Исследовательский Вычислительный Центр Московского Государственного Университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³ Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

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

E-mail: and.debol@srcc.msu.ru, evgeny.mortikov@gmail.com, vstepanenkomeister@gmail.com

Настоящее исследование посвящено анализу программной реализации и поиску возможных оптимизаций трехмерной гидродинамической модели турбулентности, разрабатываемой в НИВЦ МГУ на основе единого гидродинамического кода, объединяющего как RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), так и DNS- (Direct Numerical Simulation), LES- (Large-Eddy Simulation) подходы для расчета геофизических турбулентных течений при высоком пространственном и временном разрешении (см., например, [Mortikov et al., 2019, Tkachenko et al. 2021]).

Обсуждается масштабирование кода на параллельных архитектурах и возможность оптимизации алгоритмов для архитектур, представленных тремя различными платформами: x86_64 с процессорами Intel Xeon Gold или AMD Epyc и ARM (aarch64) с процессором Kunpeng 920-4826. Показано, что алгоритм решения уравнения Пуассона на основе многосеточного подхода ограничивает общее масштабирование модели. Это сигнализирует о том, что их оптимизация в наибольшей степени улучшит производительность кода. Результаты рефакторинга кода, позволяющего GCC автоматически векторизовать большинство циклов, показали, что оптимизация обеспечивает повышение общей производительности кода на 20% и до 50% в части уравнения переноса пассивного скаляра/примеси. Также было произведено исследование производительности подсеточных моделей LES, следуя [Tkachenko et al. 2021], и анализ вариантов реализации алгоритмов блока переноса лагранжевых частиц.

- Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №21-71-30003, портирование на платформу ARM и тестирование на процессорах Kunpeng-920 поддержано компанией Huawei (соглашение № ОАА20100800391587А).

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 J. of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2019. V. 34, № 2. P.1-14
2. Tkachenko E. V., Debolskiy A. V., Mortikov E. V. Intercomparison of subgrid scale models in large-eddy simulation of sunset atmospheric boundary layer turbulence: computational aspects // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2021. V. 42. No 7. P. 1580–159

Implementation aspects of DNS-LES model and Lagrangian particle transport on different architectures

^{1,2,3}Debolskiy A.V., ^{1,3,4}Mortikov E.V., ^{1,3}Stepanenko V.M.

¹Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia

²Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

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

⁴Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: and.debol@srcc.msu.ru, evgeny.mortikov@gmail.com, vstepanenkomeister@gmail.com

The study is devoted to implementation aspects of the code developed at the Research Computing Center of Lomonosov Moscow State University jointly with the G.I. Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, which solves a set of partial differential equations governing the dynamics of geophysical boundary layers, with focus on simulating atmospheric boundary layer structure and evolution. The code is especially suited for simulating the atmospheric flows over a complex terrain, e.g., an urbanized surface inter alia. It encompasses all known approaches to reproduce atmospheric turbulence, i.e. DNS, LES and RANS (see [Mortikov et al. 2019; Tkachenko et al., 2021]). It includes a submodule which tracks particles of various physical properties and nature in the air.

The DNS -, LES -, RANS - code implements a collection of finite-difference and finite-volume schemes, iterative and direct methods for solution of systems of linear equations, turbulence and subgrid closure procedures, particle transport and tracking submodule with different options of complexity. The code is written in C/C++ programming language. Note that the code doesn't depend on external libraries in implementation of numerical methods, except for the Fourier transforms of flow field in data post-processing stage. In its simplest form the algorithm for solving the particular discrete problem derived from Navier-Stokes equations and corresponds to a linear algebra problem with large sparse matrices, e.g. consists of matrix-vector/matrix multiplications, calculation of linear combinations of vectors, dot and cross products, solution of linear systems of equations etc. Matrix operations in the code are implemented in "matrix-free" form meaning that the matrix elements are not stored in memory and instead matrix-vector products are represented as functions corresponding to some discretization method. This allows to significantly decrease the number of memory access operations, which is a common bottleneck for these types of problems. We stress that the algorithm implies calculations involving sparse matrices and the benchmarks similar to HPCG [Dongarra et al., 2016] will be more representative of the code performance, compared with common benchmarks (e.g. HPL) oriented for dense matrix problems.

MPI library is used for 1D, 2D or 3D spatial decomposition of the computational grid among MPI-processes. Different algorithms for MPI exchanges are implemented as their efficiency is known to be dependent on the computational platform, in particular the ones based on MPI derived datatypes or manual packing and unpacking of messages, with blocking or nonblocking MPI primitives etc. Common optimizations for improving scaling on HPC systems include options for combining MPI data exchanges for a number of arrays (e.g. vector or tensor components) or increasing the width of the grid halo region (see, e.g. [Besnard et al., 2015]) for reducing latency of MPI communications. The latter allows to reduce the number of calls to MPI functions but at the cost of additional computational overhead, which may be negligible when the size of the problem on MPI-process is comparatively small. When the dispersed phase represented by Lagrangian particles is present in the flow each MPI-process calculates only the transport of particles located inside their local domain. If some particle moves outside the scope of MPI-process the data related to the particle (e.g., coordinates, velocity, density, size etc.) is transferred to the neighboring MPI-process. For large-scale simulations (where the grid may contain more than 10^8 cells) the code also makes use of parallel file I/O operations through MPI-IO interface. A hybrid MPI-OpenMP approach is supported, where the calculations on each MPI-process are performed by OpenMP threads. In this case only the thread support mode `MPI_THREAD_FUNNELED` is implemented, that is each MPI-process is multithreaded, but only the master thread performs calls to MPI communication functions. In parts of the code, where large MPI communication overhead is expected (e.g., iterative methods for solving linear systems), nonblocking MPI subroutines are used with overlapping computations and communications where possible. The implementation of MPI communications and computational functions makes use of the OpenMP "orphan" directives, which if necessary allows to decrease the number of implicit thread synchronization points by merging code parts in a single parallel region. The code is structured in a such a way as to separate the solution of high-level "numerical" and "physical" problems from the code related to parallelization or low-level algorithm optimization highly dependent on the computational architecture. This is consistent with recent approaches proposed for implementation of next generation Earth system models, see [Porter et al., 2018], for multi- and many-core heterogeneous HPC systems. The principal advantage of such separation of concern is ability to tune the code for different architectures without modifying the high-level and

problem specific part of the code. The separation of high- and low- level primitives in the DNS -, LES - and RANS - code is based on the C++ template specialization functionality and, in particular, is used for the implementation of code on GPU architecture within the CUDA programming framework.

We focus on scaling and possible optimizations for architectures represented by three different platforms: x86_64 with Intel Xeon Gold or AMD Epyc CPUs and ARM (aarch64) with Kunpeng 920-4826 CPU. Fig.1 and 2 shows scaling and component contribution to run time on 2x Kunpeng-920 node for 2 different resolutions and comparable amount of Lagrangian particles. It is shown that solution of Poisson and projection method are the parts that limit overall scaling of the code. This signals that optimizing them will improve the code performance the most. In fig. 3 the results of refactoring of the code to allow GCC to auto vectorize the majority of the loops. This optimization then provides for 20% of overall performance improvement of the code and up to 50% in heat equation part. Further we investigate LES subgrid scale models performance following [Tkachenko et al. 2021].

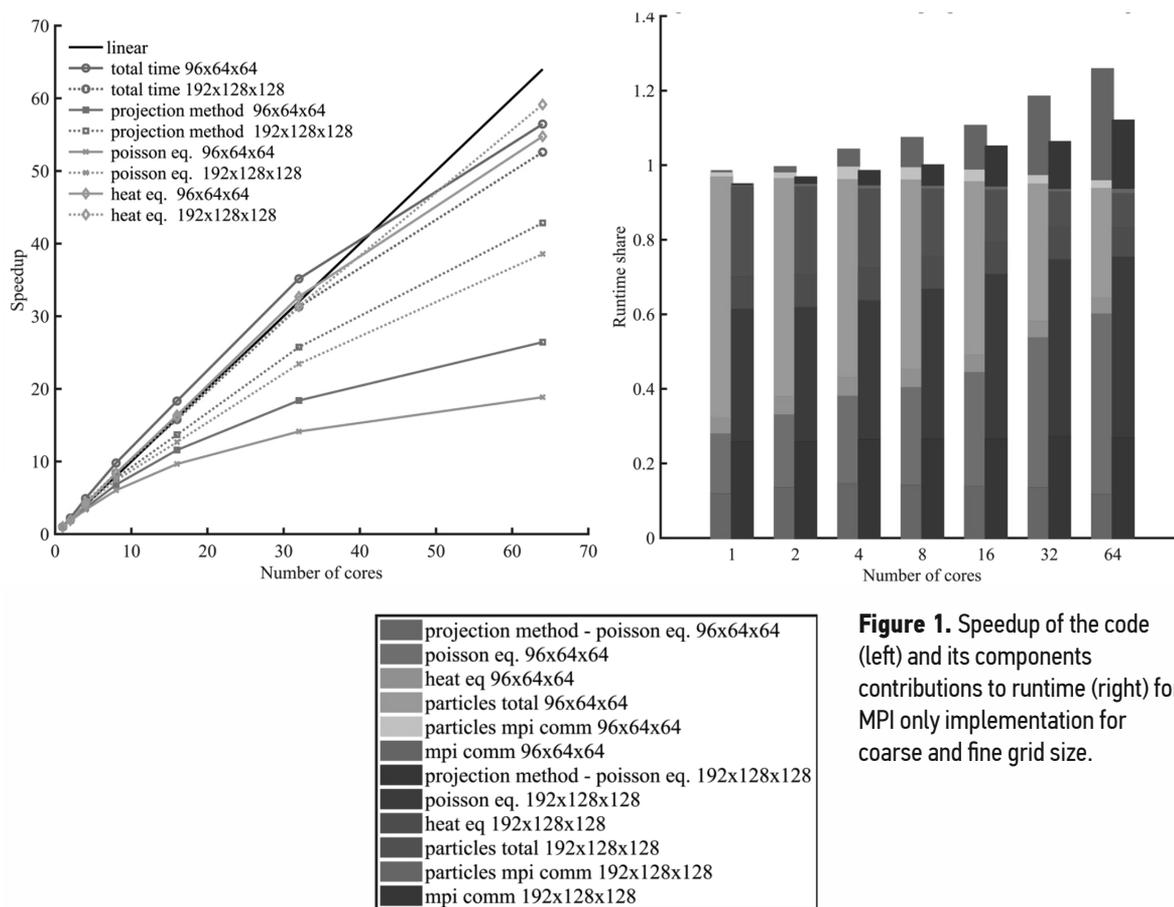


Figure 1. Speedup of the code (left) and its components contributions to runtime (right) for MPI only implementation for coarse and fine grid size.

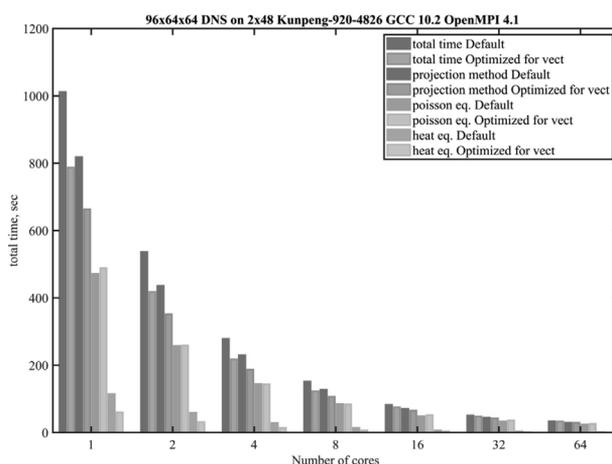


Figure 2. Runtime test difference for default version and optimized vectorization version of the code on Kunpeng-920.

- The work was supported by RSF grant №21-71-30003, by Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics (agreement with the Ministry of Science and Higher Education 075-15-2019-1621). The porting of the code to Kunpeng ARM-platform was supported by Huawei company, agreement №OAA20100800391587A.

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 J. of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2019. V. 34, № 2. P.1-14
2. Dongarra, J., Heroux, M. A., & Luszczek, P. A new metric for ranking high-performance computing systems. // National Science Review, 2016. V.3 №1 P. 30-35.
3. Besnard, J. B., Malony, A., Shende, S., Pérache, M., Carribault, P., & Jaeger, J. An MPI halo-cell implementation for zero-copy abstraction // In Proceedings of the 22Nd European MPI Users' Group Meeting 2015 (pp. 1-9).
4. Tkachenko E. V., Debolskiy A. V., Mortikov E. V. Intercomparison of subgrid scale models in large-eddy simulation of sunset atmospheric boundary layer turbulence: computational aspects // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2021. V. 42. No 7. P. 1580–159

Statistical properties of atmospheric turbulence in urban conditions using measurements on the micrometeorological mast of MSU

^{1,5}Drozd I., ^{2,5}Gavrikov A., ^{4,1,3,5}Stepanenko V., ^{5,3,4}Repina I., ⁵Artamonov A., ⁵Pashkin A.

¹ Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

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

⁴ Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁵ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

E-mail: drozdil.msu@gmail.com

Turbulent processes in the boundary layer of the atmosphere are the main mechanism for the exchange of energy and mass between the atmosphere and the surface. A modern atmospheric dynamics models use simplified schemes for calculating energy exchange with the surface, based on the Monin-Obukhov similarity theory (MOST), which assumes horizontal statistical uniformity of the underlying surface. This simplification reduces the accuracy of the forecast, especially in regions with complex (heterogeneous) orography, such as in urban conditions. The obtained regularities in the future may allow us to generalize the MOST for use in the geometrically complex surface of the city.

A new 21-meter eddy covariance tower is installed in the Meteorological observatory of Moscow State University in November 2019. It includes 3 levels with METEK sonic anemometers. The measurement data from November 2019 to May 2020 are processed. The micrometeorological mast is equipped with three measuring levels at altitudes of 2.2 m, 11.1 m and 18.8 m. At each level, acoustic anemometers manufactured by METEK are installed, at the two lower levels – uSonic-3 Scientific, at the upper – uSonic-3 class A. Acoustic anemometers with a frequency of 20 Hz record three components of wind speed with an accuracy of 0.1 m/s and acoustic temperature with an accuracy of 0.1 °C. This paper presents the result of the analysis of the data series obtained from the mast for the period from November 2019 to May 2020. For processing high-frequency data of the mast and calculating the static characteristics of turbulence, a set of programs was developed and implemented. Among other things, a new algorithm for filling gaps in data series was introduced based on the Gaussian distribution of the filled value before and after the gap, taking into account the correlation with other values.

Turbulent sensible heat flux and momentum flux are found to increase with height within 20 meters above the surface. The turbulent kinetic energy is proportional to the square of the averaged horizontal wind speed. The drag coefficient is determined by the type of footprint surface, with a value of 0.08 and 0.05 for urbanized and vegetated surfaces, respectively. One of fundamental questions regarding turbulent exchange between complex surface and the atmosphere is what is the contribution of organized turbulent structures in the total momentum, heat and mass fluxes in the surface layer. A new method for identification of coherent structures in the eddy-covariance time series has been applied in (Barskov et al., 2019), basing on approach first introduced in theoretical studies of convective boundary layer (Abdella and McFarlane, 1997; Zilitinkevich et al., 1999). This approach utilizes the fact that under dominance of large-scale coherent structures contribution to fluxes, second and third statistical moments are linked by algebraic relation, e.g. for the “flux of heat flux” we have:

$$\overline{w'w'c'} = C_T S_w (\overline{w'w'})^{1/2} (\overline{w'c'}),$$

where $C_T \sim 1$ is non-dimensional constant, and S_w is skewness of vertical velocity. This method was applied to the third moments $\overline{w'w'T'}$, $\overline{w'T'T'}$, $\overline{w'U'U'}$, $\overline{w'V'V'}$. From time series measured at mast in May 2020, we

found that this formula indeed explains much of third moment variability with $C=1.74$ at 11 m and $C=1.27$ at 18 m for W^3W^3T . This suggests the significance of coherent structures for vertical flux formation over geometrically complex surface, which is agrees with estimates found earlier in natural (Barskov et al., 2019) and urban landscapes (Pashkin et al., 2019).

- The work was partially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russia, contracts 075-15-2019-1621, 2020-220-08-5835. Statistical data processing was supported by the RSF grant 21-17-00249.

REFERENCES:

1. Abdella K., McFarlane N. A new second-order turbulence closure scheme for the planetary boundary layer // *Journal of the atmospheric sciences*. – 1997. – Т. 54. – №. 14. – С. 1850–1867.
2. Barskov K. V., Stepanenko V. M., Repina I. A., Artamonov A. Yu. and Gavrikov A. A. Two regimes of turbulent fluxes above a frozen small lake surrounded by forest // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2019. – Т. 173. – №. 3. – С. 311–320.
3. Pashkin A. D., Repina I. A., Stepanenko V. M., Bogomolov V. Yu., Smirnov S. V., and Telminov A. E. An experimental study of atmospheric turbulence characteristics in an urban canyon // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2019. – Т. 386. – №. 1. – С. 012035.
4. Zilitinkevich S.S., Gryanik V.M., Lykossov V.N., Mironov D.V. Third-order transport and nonlocal turbulence closures for convective boundary layers. – *J. Atmos. Sci.*, 1999. – V. 56. – P. 3463–3477.

Статистические характеристики турбулентности в условиях городской застройки по данным микрометеорологической мачты МГУ

^{1,5}Дрозд И.Д., ^{2,5}Гавриков А.В., ^{4,1,3,5}Степаненко В.М., ^{5,3,4}Репина И.А., ⁵Артамонов А.Ю., ⁵Пашкин А.Д.

¹ Географический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

³ Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

⁴ Научно-исследовательский вычислительный центр, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

E-mail: drozdil.msu@gmail.com

Турбулентные процессы в пограничном слое атмосферы являются основным механизмом обмена энергией и массой между атмосферой и поверхностью. Для описания данного обмена в численных моделях прогноза погоды используют упрощенные схемы расчета, основанные на теории подобия Монина-Обухова, предполагающей однородность подстилающей поверхности. Такое упрощение снижает точность прогноза в городских условиях, где подстилающая поверхность отличается резкой неоднородностью. Полученные в настоящей работе закономерности в перспективе могут позволить обобщить ТПМО для использования в условиях геометрически сложной поверхности города.

В работе используются данные, полученные с микрометеорологической мачты, установленной в метеорологической лаборатории МГУ в 2019 году, за период с ноября 2019 по май 2020. 21-метровая мачта имеет три измерительных уровня 2.2, 11.1, 18.8 м, на которых акустические анемометры компании МЕТЕК измеряют три компонента скорости ветра и акустическую температуру с частотой 20 Гц и точностью 0.1 м/с и 0.1 С, соответственно. Также в работе использовались данные часовых наблюдений влажности и давления на высоте 2 м над поверхностью, предоставленные метеорологической обсерваторией МГУ. Для обработки высокочастотных данных мачты и расчёта статических характеристик турбулентности был разработан и реализован комплекс программ. В том числе внедрен новый алгоритм заполнения пробелов в рядах данных на основе гауссова распределения заполняемой величины до и после пропуска с учетом корреляции с другими величинами.

В рамках работы был зафиксирован рост потоков явного тепла и импульса с высотой в условиях города, выявлена устойчивая квадратичная зависимость ТКЭ от модуля скорости ветра, были оценены коэффициенты сопротивления для урбанизированной и парковой территории, которые составили 0.08 и 0.05, соответственно. Центральное место в работе занимает анализ третьих моментов над различными подстилающими поверхностями. Метод идентификации когерентных структур, используемый в работе, впервые был предложен в теоретических исследованиях конвективного пограничного слоя (Abdella, McFarlane, 1997; Zilitinkevich, 1999). В этом подходе используется тот факт, что при преобладании вкла-

да в потоки крупномасштабных вихрей вторые и третьи турбулентные моменты связаны алгебраическим соотношением

$$\overline{w'w'c'} = C_T S_w (\overline{w'w'})^{1/2} (\overline{w'c'}),$$

где $S_w = \frac{w'w'w'}{w'w'^{3/2}}$ – коэффициент асимметрии, c – переносимая величина, а C_T – безразмерная постоянная. Применив рассмотренный метод для третьих моментов $\overline{W'W'T'}$, $\overline{W'T'T'}$, $\overline{W'U'U'}$, $\overline{W'V'V'}$, в числе прочего было установлено, что для $\overline{W'W'T'}$, данное соотношение хорошо описывает большую часть изменчивости третьего момента с $C=1.74$ на 11.1 м, и $C=1.27$ на 18.8 м по данным за май 2020 года. Это говорит о значении когерентных структур в формировании вертикальных потоков над геометрически сложной поверхностью, что согласуется с оценками, полученными ранее для природных (Barskov et al, 2019) и городских ландшафтов (Pashkin et al, 2019).

- Работа частично поддержана Министерством науки и высшего образования России, договоры 075-15-2019-1621, 2020-220-08-5835. Статистическая обработка данных поддержана грантом РНФ 21-17-00249.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Abdella K., McFarlane N. A new second-order turbulence closure scheme for the planetary boundary layer // *Journal of the atmospheric sciences*. – 1997. – Т. 54. – №. 14. – С. 1850-1867.
2. Barskov K. V., Stepanenko V. M., Repina I. A., Artamonov A. Yu. and Gavrikov A. A. Two regimes of turbulent fluxes above a frozen small lake surrounded by forest // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2019. – Т. 173. – №. 3. – С. 311-320.
3. Pashkin A. D., Repina I. A., Stepanenko V. M., Bogomolov V. Yu., Smirnov S. V., and Telminov A. E. An experimental study of atmospheric turbulence characteristics in an urban canyon // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2019. – Т. 386. – №. 1. – С. 012035.
4. Zilitinkevich S.S., Gryanik V.M., Lykossov V.N., Mironov D.V. Third-order transport and nonlocal turbulence closures for convective boundary layers. – *J. Atmos. Sci.*, 1999. – V. 56. – P. 3463–3477.

The influence of the surface parameters of St. Petersburg on the atmosphere circulation above it

¹Ladokhina E.M., ²Rubinshtein K.G.

¹ Northwest Administration on Hydrometeorology and Environmental Monitoring, St. Petersburg, 1Russia

² Hydrometcenter of the Russian Federation, Moscow, Russia

E-mail: ladokhina@meteo.nw.ru, k.g.rubin@googlemail.com

The development of numerical weather prediction models, an increase of computational power, an increase of the spatial resolution of topographic data allows to solve such tasks as weather forecast for a city. The city occupies a relatively small area, but it influences on the weather regime.

The WRF model implements several ways of the urban physics description. In any of them, it is assumed that the cell of the model grid or its part represents a homogeneous urban environment characterized by a set of coefficients (roughness length parameter, albedo, surface emissivity, surface volumetric heat capacity, moisture content). The optimal values of the parameterization coefficients are unique for each city. To determine these values for St. Petersburg, we need to understand what their effect on the meteorological fields is.

An urban heat island (UHI) is a positive near surface temperature anomaly in a city in comparison with a rural area. This is one of the most well-described effects of the city impact on the fields of meteorological elements. Preliminary results of numerical experiments are given for the period from June 14 to 22, 2015, when cases of strong UHI were observed in St. Petersburg according to the station data, reflecting the weather regime of the city [1]. The mean bias of the near surface temperature forecast (MB_{T_2}) and wind speed module ($MB_{W_{10}}$) was estimated for the neighborhood 10x10 km of the observation point. In the control experiment at night, the average temperature bias is negative, and is $MB_{T_2} = -2.2^\circ$, and the mean bias of the absolute wind speed is positive, $MB_{W_{10}} = 1.6$ m/s. During the day, MB_{T_2} is less than at night ($MB_{T_2} = 0.3^\circ$), and $MB_{W_{10}}$ is greater: 3.2 m/s.

In the new experiment, the albedo parameter was reduced from 0.15 to 0.07 to reduce the negative bias of the forecast near surface temperature. The mean bias between the forecast temperature values of control experiment and the values of the new experiment ($MB_{T_2}(\text{model})$) are positive during the day and at night, and are equal to 0.1° and 0.15° , respectively. In the new experiment, the wind speed increased during the day ($MB_{W_{10}} = 3.4$ m/s), and did not change at night.

One of the main factors of UHI forming is the absence of wind. Presumably, the overestimation of the forecast wind speed in the model (according to MBW10) caused the underestimation of the forecast near surface temperature in the control experiment and the weak sensitivity of the forecast near surface temperature to albedo changes in the new one.

To test this hypothesis, an experiment was calculated, where the roughness length parameter was increased from 0.5 to 1, and the albedo value did not change. Compared to the control experiment, the wind speed decreased: during the day $MB_{W10(model)} = -0.6$ m/s, and at night $MB_{W10(model)} = -0.2$ m/s. The surface temperature also increased: $MB_{T2(model)} = 0.1$ ° during the day, and $MB_{T2(model)} = 0.3$ ° at night. Consequently, the roughness length parameter affects both the surface wind forecast and the near surface temperature forecast. In the experiment with a joint correction of albedo and roughness length, (0.1 and 1, respectively), the predicted near surface temperature at night increased even more: $MB_{T2(model)} = 0.5$ °; $MB_{W10(model)} = -0.2$ m/s.

Thus, changing parameterization surface coefficients affects the forecast meteorological fields, and their correct selection helps to reduce forecast errors. According to the results of the last experiment, at night MB_{T2} decreased from -2.2 ° to -1.7 °, and MB_{W10} – from 1.6 m/s to 1.4 m/s. Experiments with a serial changing of surface coefficients will continue, and understanding the results of the impact of these coefficients on forecast meteorological elements will make it possible to move on to the task of numerical prediction with their complex correction.

REFERENCES:

1. E. M. Ladokhina, K. G. Rubinshtein, and V. Yu. Tsepelev, "Identification of periods with maximum heat island intensity in St. Petersburg for the validation of numerical weather forecasts," *Gidrometeorol. Issled. Prognozy*, No. 2, 109–125 (2020).

Влияние параметров поверхности Санкт-Петербурга на циркуляцию атмосферы над ним

¹Ладохина Е.М., ²Рубинштейн К.Г.

¹ ФГБУ «Северо-Западное УГМС», Санкт-Петербург, Россия

² Гидрометцентр РФ, Москва, Россия

E-mail: ladohina@meteow.nw.ru, k.g.rubin@googlemail.com

Развитие моделей численного прогноза погоды, увеличение вычислительных мощностей, увеличение пространственного разрешения топографических данных позволяет решать такие задачи как прогноз погоды для города. Город занимает относительно небольшую территорию, но вносит возмущения в погодный режим.

В модели WRF реализовано несколько способов описания физики городских процессов. В любом из них полагается, что ячейка модельной сетки или её часть представляет однородную городскую среду, характеризуемую набором коэффициентов. Оптимальные значения коэффициентов параметризации уникальны для каждого города. Чтобы определить эти значения для Санкт-Петербурга нужно понять, каково их влияние на поля метеоэлементов.

Согласно [1] чаще всего для представления процессов в почве и на поверхности в модели выбирается параметризация подстилающей поверхности Noah LSM. Для описания города эта параметризация используется в связке с однослойной моделью слоя навеса (SLUCM). В однослойной модели город представлен в виде уличных каньонов, которые параметризуются для получения температуры поверхности крыш, стен и дорог и потоков с них. Тем не менее, есть способ оценить чувствительность приземных метеоэлементов к изменению некоторых значимых [2] параметров городской поверхности без использования однослойной модели слоя навеса.

Наглядным представляется провести оценку чувствительности, используя 5-слойную схему температуропроводности, исторически именуемую SLAB, для параметризации поверхностного слоя в модели WRF. В модели SLAB поверхность города описывается путём коррекции **коэффициентов подстилающей поверхности** (параметра шероховатости, альбедо, излучательной способности поверхности, объёмной теплоёмкости поверхности, влагосодержания).

Согласно уравнению теплопроводности почвы изменение теплосодержания почвы за единицу времени эквивалентно притоку тепла к единичной массе почвы:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{C(\Theta)} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(-k_t(\Theta) C(\Theta) \frac{\partial T}{\partial \zeta} \right) \quad (1)$$

Здесь C – объёмная теплоёмкость почвы; $\lambda = k_t C$ – коэффициент теплопроводности почвы, зависящий от влагосодержания Θ ; T и ζ – температура и глубина слоя почвы соответственно.

Влагосодержание почвы зависит от глубины и меняется со временем. Но если принять, что поверхностный слой почвы однороден и одинаково увлажнён, то коэффициенты C и $k_{\text{в}}$ уравнения теплопроводности будут постоянными по пространству и времени. Уравнение (1) можно записать в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k_t \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1.1)$$

Коэффициент температуропроводности k_t будет определять, насколько быстро изменится температура при изменении величины притока тепла. В отличие от других параметризаций поверхностного слоя, в модели SLAB значение k_t фиксировано, мы можем влиять на величину скорости изменения температуры, используя коэффициент теплопроводности почвы, зависящий только от объёмной теплоёмкости почвы C . Коэффициент объёмной теплоёмкости используется в модели SLAB и в параметризации однослойной модели слоя навеса SLUCM, но не используются в модели поверхностного слоя Noah LSM.

Для расчёта температуры подстилающей поверхности используется уравнение теплового баланса:

$$R_N = Q_{\text{SH}} + Q_{\text{LH}} + Q_G \quad (2)$$

где R_N – радиационный баланс подстилающей поверхности, Q_{SH} и Q_{LH} – восходящие турбулентные потоки явного и скрытого тепла, соответственно, Q_G – поток тепла в почву.

Радиационный баланс подстилающей поверхности определяется величинами поглощательной и излучательной способности земной поверхности и противоишлучения атмосферы:

$$R_N = (1 - \alpha) R_s^{\downarrow} + \sigma \epsilon_a T_a^4 - \sigma \epsilon_s T_s^4, \quad (3)$$

Здесь σ – постоянная Стефана-Больцмана, ϵ_a и ϵ_s – коэффициенты излучательной способности атмосферы и поверхности соответственно.

Поглощательная способность земной поверхности зависит от величины приходящей прямой и рассеянной солнечной радиации (R_s^{\downarrow}) и отражательной способности поверхности (α). Как видно из формулы (3), увеличение альбедо способствует уменьшению температуры атмосферы T_a , и наоборот. Как правило, альбедо города ниже альбедо сельской местности за счёт использования характерных строительных материалов. В модели WRF изменение параметра землепользования альбедо широко используется для решения различных задач моделирования. Его значение варьируют как для лучшего соответствия прогностической приземной температуры фактической, так и анализа сценариев по увеличению альбедо городской поверхности для снижения интенсивности городского острова тепла (ГОТ) [3].

Второй параметр в модели SLAB, который входит в уравнение радиационного баланса поверхности – это коэффициент излучательной способности поверхности. Его увеличение согласно (3) приводит к уменьшению температуры атмосферы и увеличению температуры подстилающей поверхности T_s . Изменение значений альбедо и коэффициента излучательной способности будет также влиять на потоки явного и скрытого тепла, т.к. они, являясь составляющими радиационного баланса, входят в уравнение теплового баланса земной поверхности (2).

В правой части уравнения теплового баланса составляющие Q_{SH} и Q_{LH} описывают восходящие турбулентные потоки явного и скрытого тепла соответственно.

$$Q_{\text{SH}} = \rho_0 C_p C_t |V| (T_s - T_a) \quad (4)$$

$$Q_{\text{LH}} = \rho_0 C_h |V| (q_s - q_a) \quad (5)$$

Здесь V – скорость ветра, q_s и q_a – удельная влажность поверхности и приземного слоя воздуха соответственно, $\rho_0 C_p$ – объёмная теплоёмкость воздуха.

C_t и C_h в уравнениях (4), (5) – коэффициенты поверхностного обмена, обычно приравняются друг к другу ($C_t = C_h$) и характеризуют интенсивность взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью.

$$C_h = F(z_{0t}, z_{0m}, c_{0,1,2..n}) \quad (6)$$

Коэффициент поверхностного обмена наряду с другими параметрами, которые здесь записаны в общем виде ($c_{0,1,2..n}$ зависит от параметра шероховатости для импульса (z_{0m}), и для тепла и влаги (z_{0t}))

Значение параметра шероховатости для импульса можно корректировать в модели SLAB. Увеличение z_{0m} усиливает турбулентный обмен между атмосферой и подстилающей поверхностью. В ночные часы более тёплая подстилающая поверхность города будет интенсивней прогревать приземный слой атмосферы.

Таким образом, процессы, протекающие в почве и на поверхности, их взаимодействие с атмосферой сложны и тесно связаны. Поэтому однозначно предсказать результат комплексного изменения параметров городской поверхности на поля метеоэлементов, можно только проанализировав результаты численного моделирования.

Городским островом тепла называется положительная аномалия приземной температуры в городе по сравнению с сельской местностью. Это один из наиболее хорошо описанных в литературе эффектов воздействия города на поля метеоэлементов. Предварительные результаты численных экспериментов

приведены за период с 14 по 22 июня 2015 г., когда в Санкт-Петербурге наблюдались случаи интенсивного ГОТ по данным станции, отражающей погодный режим города[4]. Оценивалось среднее отклонение прогноза приземной температуры (CO_{T_2}) и модуля скорости ветра ($CO_{W_{10}}$) для окрестности точки наблюдений 10x10 км. В контрольном эксперименте ночью среднее отклонение температуры отрицательное, и составляет $CO_{T_2} = -2.2^\circ$, а среднее отклонение модуля скорости ветра – положительное, $CO_{W_{10}} = 1.6$ м/с. Днём CO_{T_2} меньше, чем ночью ($CO_{T_2} = 0.3^\circ$), а $CO_{W_{10}}$ – больше, и составляет 3.2 м/с.

В новом эксперименте параметр альbedo был уменьшен с 0.15 до 0.07, чтобы уменьшить отрицательное отклонение прогностической приземной температуры. Средние отклонения значений прогностической температуры контрольного эксперимента от значений нового эксперимента ($CO_{T_2(model)}$) днём и ночью положительные, и равны 0.1° и 0.15° соответственно. В новом эксперименте скорость ветра днём увеличилась ($CO_{W_{10}} = 3.4$ м/с), а ночью – не изменилась.

Одним из основных факторов образования ГОТ является отсутствие ветра. Предположительно, завышение прогностической скорости ветра в модели (согласно $CO_{W_{10}}$) способствовало занижению значений прогностической приземной температуры в контрольном эксперименте и слабой чувствительности прогностической приземной температуры к изменению альbedo в новом.

Для проверки этой гипотезы рассчитан эксперимент, где параметр шероховатости был увеличен с 0.5 до 1, а значение альbedo не менялось. По сравнению с контрольным экспериментом скорость ветра снизилась: днём $CO_{W_{10(model)}} = -0.6$ м/с, а ночью $CO_{W_{10(model)}} = -0.2$ м/с. Также увеличилась и приземная температура: $CO_{T_2(model)} = 0.1^\circ$ днём, и $CO_{T_2(model)} = 0.3^\circ$ ночью. Следовательно, параметр шероховатости оказывает влияние, как на прогноз приземного ветра, так и на прогноз приземной температуры. В эксперименте с совместным изменением альbedo и параметра шероховатости, (0.1 и 1 соответственно), прогностическая приземная температура ночью увеличилась ещё больше: $CO_{T_2(model)} = 0.5^\circ$; $CO_{W_{10(model)}} = -0.2$ м/с.

Таким образом, изменение параметров землепользования оказывает влияние на поля прогностических метеозаэментов, а их правильный подбор помогает уменьшить ошибки прогноза. Согласно результатам последнего эксперимента ночью CO_{T_2} уменьшилось с -2.2° до -1.7° , а $CO_{W_{10}}$ – с 1.6 м/с до 1.4 м/с. Эксперименты с последовательным изменением коэффициентов подстилающей поверхности будут продолжаться, а понимание результатов воздействия этих коэффициентов на прогностические метеозаэменты позволит перейти к задаче численного прогноза с их комплексной коррекцией.

ЛИТЕРАТУРА:

1. WRF Physics Use Survey, August 2015 [Электронный ресурс] // WRF Physics Suites URL: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/wrf_physics_survey.pdf (дата обращения: 31.03.2021)
2. Chen F. et al. The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems //International Journal of Climatology. – 2011. – Т. 31. – №. 2. – С. 273-288.
3. Jandaghian Z., Akbari H. The effect of increasing surface albedo on urban climate and air quality: A detailed study for Sacramento, Houston, and Chicago //Climate. – 2018. – Т. 6. – №. 2. – С. 19.
4. Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г., Цепелев В.Ю. Определение периодов максимальной интенсивности острова тепла в Санкт-Петербурге для валидации модели численных прогнозов погоды в городе // Гидрометеорол. исслед. и прогнозы. 2020. № 1. С. 190–206.

Investigation of Northern Hemispheric storm tracks under future climate conditions in INM-CM5 model output

¹Martynova Yu.V., ^{2,4}Vargin P.N., ³Volodin E.M.

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

² Central aerological observatory, Dolgoprudny, Russia

³ Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

⁴ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

E-mail: FoxyJ13@gmail.com, p_vargin@mail.ru, volodinev@gmail.com

Storm tracks (ST) are areas of strong baroclinicity. Here extratropical cyclones are formed, accompanied by strong winds and precipitation. STs are observed in mid-latitudes and carry large amounts of heat, momentum, and moisture to high latitudes. The shift or expansion of the ST leads to changes in the weather and precipitation regime in the neighboring regions.

The main parameters of the Northern Hemispheric ST and their response to the weakening/strengthening of the stratospheric polar vortex and the Arctic amplification are reproduced quite realistically for the present

climate by the INM climate model (INM-CM5). In this work, we assessed the response of STs to future climate change. The North Pacific (NP) and North Atlantic (NA) STs were considered separately.

The study was carried out using the INM-CM5 climate model output taken from the CMIP6 project database. Future climatic changes were specified when calculating using the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate scenarios.

We analyzed the ST intensity, obtained using the meridional wind speed component, v , to which the high-frequency bandpass filter was previously applied. Changes in the ST intensity were defined as the difference between its values averaged over 20-year periods of the beginning and end of the 21st century. We also considered the years with the strengthening (weakening) of the stratospheric polar vortex, accompanied by an increase (decrease) in temperature relative to the average value. The analysis was carried out by comparing two composites. They included years of strengthening and weakening the polar vortex with the propagation of the influence from the stratosphere to the troposphere. We obtained that, with a moderate anthropogenic load (SSP2-4.5), both STs significantly shift to the north by the end of the 21st century. There is also a slight increase of NP and a weakening of the NA. NP exhibits greater sensitivity to climatic changes than NA. In the aggressive climatic scenario (SSP5-8.5), on the contrary, NA is more sensitive. For both climatic scenarios considered, the change in intensity is not localized at the altitude of the ST determination (250 hPa) but propagates up and down from this level through the entire atmosphere.

The differences were also obtained in the behavior of the ST under different conditions in the stratosphere. Under the SSP2-4.5 conditions, a more southerly location of NP was obtained with a "colder" stratosphere and a more northerly - with a "warmer" one. NA shows a similar response but has the opposite sign of differences. Under more aggressive climatic conditions of the SSP5-8.5 scenario, the picture of the differences changes. Firstly, until the middle of winter, NP has a significantly higher intensity in a colder stratosphere than in a warmer stratosphere. Later, until mid-spring, the situation is reversed. Secondly, the NA response to stratospheric conditions has a kind of oscillatory character for its location and intensity.

- This research was supported by the Russian Found for Basic Research under the project (#19-05-00370) on "Investigation of stratosphere-Troposphere Dynamical Coupling in Present and Future Climate".

Исследование шторм-треков Северного полушария для условий будущего климата по расчётам модели ИВМ РАН CM5

¹Мартынова Ю.В., ^{2,4}Варгин П.Н., ³Володин Е.М.

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

² Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, Долгопрудный, Россия

³ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

⁴ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова 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. Смещение или расширение областей ШТ приводит к изменениям погоды и режима осадков в соседних регионах.

По результатам анализа данных реанализа и модельных расчётов показано, что на межгодовую изменчивость ШТ влияют климатические явления Эль-Ниньо/Южная осцилляция, квазидвух-летние колебаний зонального ветра в тропической стратосфере (КДК), а также изменения стратосферного полярного вихря в Арктике.

Учитывая, что основные параметры ШТ Северного полушария в расчётах модели ИВМ CM5, а также их отклик на ослабление/усиление стратосферного полярного вихря и на Арктическое усиление для условий настоящего климата воспроизводятся достаточно реалистично и согласуются с аналогичными параметрами, выявленными в данных реанализа NCEP2 и ERA-Interim [1], в настоящей работе проводится исследование отклика ШТ в условиях ожидаемых климатических изменений в течение XXI века. Были рассмотрены отдельно Северо-Тихоокеанский (СТ) и Северо-Атлантический (СА) ШТ.

Исследование было проведено с использованием расчётов климатической модели INM-CM5 [2, 3], взятых из архива данных проекта CMIP6 [4]. Пространственное разрешение модели ИВМ CM5 в атмосфере: $2^\circ \times 1.5^\circ$ по долготе и широте, по вертикали 73 уровня от поверхности до 0.2 гПа (~60 км). Про-

странственное разрешение в океане: $0.5^\circ \times 0.25^\circ$ и 40 вертикальных уровней. Возможные в будущем климатические изменения были заданы при расчёте с помощью сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5 [5].

Анализ проводился для характеристики интенсивности ШТ, полученной на основе меридиональной составляющей скорости ветра, v , к которой предварительно был применён высокочастотный фильтр [6, 7]:

$$v'v' = [\overline{v(t+24h) - v(t)}]^2.$$

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.

Тенденции изменения интенсивности ШТ определялись как разница между значениями $v'v'$, осреднёнными за 20-летние периоды начала и конца XXI века.

В рамках исследования так же были рассмотрены годы с усилением (ослаблением) стратосферного полярного вихря, сопровождаемые ростом (снижением) температуры относительно среднего состояния. Анализ проводился путём сравнения двух композитов, в которые вошли годы с усилением и ослаблением полярного вихря с распространением влияния из стратосферы в тропосферу.

В результате было показано, что при умеренной антропогенной нагрузке, задаваемой климатическим сценарием SSP2-4.5, к концу XXI века происходит существенный сдвиг обоих ШТ к северу. При этом отмечается небольшое усиление СТ и ослабление СА. СТ проявляет большую, чем СА, чувствительность к климатическим изменениям. При агрессивном климатическом сценарии SSP5-8.5, наоборот, большую чувствительность проявляет СА. Кроме того, отклик обоих ШТ проявляется в большей степени через их усиление и только в небольшой степени через сдвиг к северу. Для обоих рассмотренных климатических сценариев изменение интенсивности не локализуется исключительно на высоте определения ШТ (250 гПа), а распространяется вверх и вниз от этого уровня через всю атмосферу.

Получены также различия в поведении ШТ при разных условиях состояния стратосферы. Мы рассматривали температуру стратосферы за зимний сезон при осреднении за первые и последние 20 лет. В условиях обоих рассмотренных климатических сценариев температура стратосферы снижается. В рамках жёсткого сценария SSP5-8.5 она снижается сильнее, чем в рамках умеренного SSP2-4.5. В условиях умеренного климатического сценария SSP2-4.5 получено более южное расположение СТ при более «холодной» стратосфере, и более северное – при более «тёплой». СА проявляет схожий отклик, но имеет противоположный знак различий. При более агрессивных климатических условиях сценария SSP5-8.5 картина различий меняется. Во-первых, СТ до середины зимы в условиях более «холодной» стратосферы обладает существенно большей интенсивностью, чем при более «тёплой». Далее до середины весны ситуация меняется на противоположную. Во-вторых, отклик СА на стратосферные условия носит своего рода колебательный характер как для его расположения, так и для интенсивности.

■ Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-00370.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Варгин П. Н., Кострыкин С. В., Володин Е. М. Анализ воспроизведения динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы в расчётах климатической модели ИВМ РАН // Метеорология и гидрология, 2018, № 11, с. 100–109.
2. Володин Е. М., Мортиков Е. В., Кострыкин С. В., Галин В. Я., Лыкосов В. Н., Грицун 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.
3. Володин Е. М., Грицун 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
4. <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>
5. 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 Inter-comparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // Geosci. Model Dev. 2016. V. 9. P. 3461–3482.
6. 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.
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.

Relationship between snow cover onset rate in Western Siberia and atmospheric dynamics anomalies in the Northern Hemisphere for the fall-winter season

^{1,5}Martynova Yu.V., ^{2,5}Krupchatnikov V.N., ^{3,5}Gochakov A.V., ⁴Antokhina O.Yu.

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

² Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

³ Siberian Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk, Russia

⁴ V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

⁵ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

E-mail: FoxyJ13@gmail.com, vkrupchatnikov@yandex.ru, wandering@bk.ru, antokhina@iao.ru

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 Western 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 and calculated atmospheric instability characteristics using ERA-Interim reanalysis.

Summarizing all the results obtained, we can say that the anomalies in the snow cover formation are more likely a consequence of the anomalies of the atmospheric state on a global scale occurs by this time. At the same time, the anomalously rapid snow cover formation in Western Siberia may further contribute to the wave activity of the atmosphere according to the feedback principle. However, this impact is not lasting and does not cause new long-lived disturbances in the atmosphere.

- This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 19-17-00248.

Связь интенсивности формирования снежного покрова в Западной Сибири с особенностями динамики атмосферы Северного полушария в осенне-зимний сезон

^{1,5} Мартынова Ю.В., ^{2,5} Крупчатников В.Н., ^{3,5} Гочаков А.В., ⁴ Антохина О.Ю.

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

² Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

³ Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Новосибирск, Россия

⁴ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

⁵ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

E-mail: FoxyJ13@gmail.com, vkрупчатnikov@yandex.ru, wandering@bk.ru, antokhina@iao.ru

Термодинамические процессы, происходящие на поверхности территории, могут вносить существенный вклад в состояние неустойчивости атмосферы на различных высотах. Планетарные волны имеют большую квазистационарную компоненту, вследствие чего они являются скорее вынужденными, чем возникающими из-за неустойчивости потока. Их структура согласуется с тропосферными источниками, в качестве которых могут выступать крупномасштабная топография, источники и стоки тепла (например, радиационные источники, связанные с изменением альбедо) и статистические эффекты вихрей синоптического масштаба.

В силу климатических особенностей в Сибирской части Евразии формируется обширный снежный покров, вызывающий существенное радиационное выхолаживание на этой территории. Год от года площадь снежного покрова Сибири, а следовательно, и интенсивность радиационного выхолаживания, может существенно варьироваться, что может ощутимо влиять на взаимодействие тропосферы и нижних слоёв стратосферы средних и арктических широт не только в период установления снежного покрова, но и в последующий зимний сезон.

Вопрос о межсезонной связи снежного покрова и динамики атмосферы притягивает внимание исследователей уже около 40 лет. Для понимания эволюции исследований по этому направлению мы структурировали на наш взгляд наиболее значимые работы, сравнив их по таким характеристикам, как использованные наборы данных, рассматриваемые регионы, периоды времени и характер полученных результатов. Впервые гипотеза о наличии связи между аномалиями осеннего снежного покрова и термодинамическими условиями атмосферы последующей зимы была высказана в 1983 году [1]. В частности, исследователи показали для Евразии наличие значимой линейной связи между величиной осеннего снежного покрова и зимней температурой воздуха у поверхности.

Дальнейшие исследования, проведённые различными научными группами, показали неоднозначность рассматриваемой связи. В работах были использованы различные наборы станционных наблюдений, спутниковых данных, реанализов и данных климатического моделирования. Варьировался рассматриваемый временной период. Анализировалось влияние снежного покрова как всего Северного полушария целиком, так и отдельных континентов и регионов. Такое разнообразие начальных данных объясняется широким спектром критериев, которыми руководствовались авторы при их выборе.

С момента опубликования в 1983 году гипотезы о наличии межсезонного влияния снега на атмосферу вплоть до 2010 года результаты проводимых исследований подтверждали её (например, [2-4]). Кроме того, был предложен возможный физический механизм, посредством которого это влияние осуществляется [5]. Позже, с расширением спектра используемых для исследования данных, методик и регионов, наличие связи было поставлено под сомнение. Было показано, что модели при климатических расчётах в большинстве своём не воспроизводят межсезонное влияние аномалий осеннего снега на зимние атмосферные условия (например, [6-8]). При этом некоторые численные эксперименты направленные непосредственно на определение чувствительности зимней атмосферы к вариациям площади снега показывают наличие этой связи (например, [4, 9]). Другие исследования показали отсутствие или же очень слабое проявление чувствительности [10, 11]. Более того, в ряде работ показана нестационарность проявления рассматриваемого влияния во времени (например, [12, 13]). Если изначально речь шла о вариации снега в середине осени – в октябре, то в последние годы исследователи стали уделять больше внимания концу осени – ноябрю (например, [14]).

Таким образом, несмотря на длительную историю исследований, до сих пор не получено однозначного суждения не только о природе влияния, но и о его наличии как такового. Следовательно, и механизм все ещё также представляется загадочными [15].

Целью нашей работы является оценка влияния термодинамических возмущений, формирующихся у поверхности в течение периода формирования снежного покрова в Сибири, на характеристики неустойчивости тропосферы и нижней стратосферы Северного полушария.

Исследование было основано на сравнении двух композитов. В первый композит вошли годы с резким и интенсивным формированием снежного покрова, произошедшим в основном в течение одной недели в октябре (ОСТМАХ). Второй композит составили годы с плавным постепенным формированием снежного покрова, в которые неделя с наибольшей за сезон интенсивностью увеличения площади снега отмечалась позднее октября (ОСТМИН). В качестве характеристик неустойчивости атмосферы были рассмотрены поля индекса бароклинности и каждой из его компонент в отдельности, определенные на различных вертикальных уровнях вплоть до 200 гПа, поток Элиассена-Пальма (до 100 гПа), представляющий собой по сути суперпозицию потоков тепла и момента импульса и демонстрирующий распространение волн в вертикальном и меридиональном направлении. Кроме того, для каждого месяца была рассмотрена статистика событий обрушений волн Россби на различных поверхностях равной потенциальной завихренности.

Информация о площади снежного покрова была взята из архива спутниковых данных NOAA о площади снежного покрова Земного шара для периода 1979–2019 гг. [16]. Указанные характеристики неустойчивости атмосферы были вычислены на основе данных реанализа ERA-Interim [17].

Анализ показал наличие существенных различий между композитами для индекса бароклинности, потока Элиассена-Пальма и статистики событий обрушений волн Россби. Однако, получено, что эти различия уже присутствуют как минимум за месяц до начала формирования снежного покрова. Кроме того, интегральные по полю оценки интенсивности потока Элиассена-Пальма, дают основания предполагать, что их вариация вызвана в большей степени динамическими процессами, происходящими в средней тропосфере, а не возмущениями у поверхности, вызываемых в нашем случае аномалиями интенсивности формирования снежного покрова.

Анализ показал существенные различия в интенсивности центров действия атмосферы. Для условий композита ОСТМАХ по сравнению с ОСТМИН мы получили существенно большую внутрисезонную изменчивость Алеутского и Исландского минимумов. Более того, эти центры действия атмосферы в условиях ОСТМАХ от месяца к месяцу усиливаются/ослабевают асинхронно относительно друг друга. В ОСТМИН изменение их интенсивности происходит одновременно. Различия между композитами получены также и для Сибирского антициклона. В композите ОСТМАХ по сравнению с ОСТМИН Сибирский антициклон слабее в осенний период и существенно сильнее – в зимний. Формироваться в обоих композитах он начинает в октябре. Поле приземных температур также демонстрирует существенные различия. Получены более низкие температуры в декабре и феврале для всей Северной Евразии, в январе – для её южной части, а в ноябре – для её Сибирского региона.

Обобщая все полученные результаты, можно сказать, что аномалии формирования СП являются скорее следствием уже существующих к этому моменту аномалий состояния атмосферы в глобальном масштабе. При этом не исключено, что аномально быстрое формирование СП в WS может вносить в дальнейшем свой вклад в волновую активность атмосферы по принципу обратной связи. Однако, это воздействие не носит продолжительного характера и не вызывает новых долгоживущих возмущений в атмосфере. В контексте всего сказанного наши результаты и выводы хорошо согласуются с результатами других авторов, говорящими в пользу гипотезы об обратном порядке влияния.

■ Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 19-17-00248.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Foster J., Owe M. and Rango A. Snow cover and temperature relationships in North America and Eurasia // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1983. – V. 22. – P. 460-9.
2. Cohen, J. and Entekhabi, D. Eurasian snow cover variability and Northern Hemisphere climate predictability // *Geophysical Research Letters*, 1999. – V. 26, No. 3. – P. 345-348.
3. Allen R. J. and Zender C. S. D. Effects of continental-scale snow albedo anomalies on the wintertime Arctic oscillation // *Journal of Geophysical Research*, 2010. – V. 115. – D23105.
4. Мартынова Ю. В., Крупчатников В. Н. Исследование чувствительности приземной температуры Евразии в зимний период к аномалиям снежного покрова. Роль стратосферы // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*, 2010. – Т. 46, № 6. – С. 818-30.
5. Cohen J., Barlow M., Kushner P. J. and Saito K. Stratosphere-troposphere coupling and links with Eurasian land-surface variability // *Journal of Climate*, 2007. – V. 20. 2007 P. 5335-43.
6. Cohen J. L., Furtado J. C., Barlow M. A., Alexeev V. A. and Cherry J. E. Arctic warming, increasing snow cover and widespread boreal winter cooling // *Environmental Research Letters*, 2012. – V. 7, No. 1. – P. 014007.
7. Furtado J. C. et al. Eurasian snow cover variability and links to winter climate in the CMIP5 models // *Climate Dynamics*, 2015. – V. 45. – P. 2591-605.
8. Peings Y., Douville H., Colin J., Martin D.S. and Magnusdottir G. Snow-(N)AO teleconnection and its modulation by the Quasi-Biennial Oscillation // *Journal of Climate*, 2017. – V. 30, No. 24. – P. 10211-10235.

9. Peings Y. Influence de la couverture de neige de l'hémisphère nord sur la variabilité interannuelle du climat / Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2011.
10. Orsolini Y. J., Senan R., Vitart F., Balsamo G., Weisheimer A. and Doblas-Reyes F. J. Influence of the Eurasian snow on the negative North Atlantic Oscillation in subseasonal forecasts of the cold winter 2009/2010 // *Climate Dynamics*, 2016. – V. 47, No. 3-4. – P. 1325-34.
11. Tyrrell N. L., Karpechko A. Y. and Räisänen P. The influence of Eurasian snow extent on the northern extratropical stratosphere in a QBO resolving model // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018. – V. 123, No. 1. – P. 315-328.
12. Попова В. В., Ширяева А. В. and Морозова П. А. Сроки установления снежного покрова на севере Евразии: прямые и обратные связи с крупномасштабной атмосферной циркуляцией // *Лёд и снег*, 2014. – Т. 54, № 3. – С. 39-49.
13. Martynova Y. V. October snow cover and winter atmospheric conditions in Siberia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, November. – V. 386, No. 1. – P. 012001
14. Wegmann M., Rohrer M., Santolaria-Otín M. and Lohmann G. Eurasian autumn snow link to winter North Atlantic Oscillation is strongest for Arctic warming periods // *Earth system dynamics*, 2020. – V. 11, No. 2. – P. 509-524.
15. Henderson G. R., Peings Y., Furtado J. C. and Kushner P. J. Snow-atmosphere coupling in the Northern Hemisphere // *Nature Climate Change*, 2018. – V. 8, No. 11. – P. 954-963.
16. Estilow, T.W., Young, A.H. and Robinson, D.A., 2015. A long-term Northern Hemisphere snow cover extent data record for climate studies and monitoring. *Earth Syst. Sci. Data*, 7, pp. 137-142.
17. Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U. et al., 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656) pp. 553-597.

Analysis of the aeropalinological monitoring results in Perm and determination of the main directions of pollen grains transfer

Novoselova L.V., Shvarts K.G., Shklyayev V.A.

Perm State University, Perm, Russia

E-mail: novoselova@psu.ru, kosch@psu.ru, shklyayevl@yandex.ru

2010 to 2019 in the city of Perm, aeropalinological monitoring is carried out using a volumetric pollen catcher Burkard and then Lanzoni. The pollen trap is installed at a height of about 20 m, on the roof of one of the buildings of the Perm State National Research University. To identify the belonging of pollen grains, atlases, palynological manuals, and materials from the international palynological database (Pollen Databases) were used.

The number of pollen grains varies significantly, both over individual years and for different plant species. The analysis of the monitoring results revealed the most significant amount of pollen grains of birch, nettle, pine, poplar.

The mean square deviation for the number of birch pollen grains was 14197, with an average value of 17575. However, when using the coefficient of variation, it was found that the highest values of this characteristic are observed in the pollen grains of sorrel and plantain, respectively, 1.71 and 1.69. The smallest changes are typical for poplar pollen grains, the coefficient of variation is 0.52.

Considering the features of the number of pollen grains during the season, we can distinguish plants that bloom in April (alder, elm), pollen from which can be brought from the Perm Region. Next, a group of plants with the highest pollen emission observed in May are birch, maple, spruce, pine, poplar, oak and hazel. The next group consists of plants that bloom in the period from June to August. These are cereals, nettle, wormwood, sorrel, plantain. The transfer of ragweed to the territory of the Perm Region is insignificant and is not observed every season.

To identify the quantitative relationship between the content of pollen grains of individual species, a correlation matrix was calculated. Its analysis showed that the most closely related number of pollen grains of plantain and sorrel $r=0.99\pm 0.01$, cereals and wormwood $r=0.92\pm 0.07$, cereals and nettle $r=0.91\pm 0.08$, hazel and plantain $r=0.81\pm 0.12$. This is clearly seen in the resulting regression diagrams. The relationship between the number of pollen grains of spruce and alder, spruce and birch, poplar and maple will also be significant, but the latter will be negative.

The transfer of pollen grains is possible from various sources, which could be located both in the immediate vicinity of the monitoring point and at a great distance from it. In this regard, the height at which the wind

direction was determined should be higher than the surface layer and be at least several hundred meters, since the transfer of pollen grains occurs in the warm season. To account for the wind direction associated with bio-aerosol transport, daily radio sounding data for the period from April to August from 2010 to 2019 were used.

The wind direction was taken into account according to the radio sounding data for 12 hours of UTC (a day period corresponding to 17 hours of local time). It was assumed that the main transfer occurs in the daytime, and morning inversions can weaken this process, so the 00 h period was not used. As the main direction of transfer, the level of 925 hPa was chosen, this corresponded to altitudes from 500 to 900 m. In the future, studies will be conducted with another, higher level, for example, 850 hPa, which corresponds to an altitude of 1100-1700 m above sea level.

Due to the fact that according to the measurement data, the wind direction is determined in degrees, for all the selected cases, the direction was converted to points (8 points). The results of the calculations were correlated with the amount of pollen on that day. The grouped data corresponded to individual months combined for all 10 years of observations, or for individual years. The resulting "wind roses" were compared with the relative number of pollen grains of different species observed in possible wind directions, determined as a percentage of the total monthly amount. Thus, in addition to the "wind roses", "pollen quantity roses" were constructed, which made it possible to study in more detail the directions of pollen grain transfer.

The analysis of the above diagrams shows that the seasonal wind distribution and the direction of the main transport of pollen grains, as a rule, do not coincide. The exception is the number of elm pollen grains, which almost completely repeats the "wind rose" in April.

A more detailed understanding of the main directions of pollen grain transport can be obtained by analyzing the individual months of the study observation period. So, in some years with the highest concentration of birch pollen grains in May, the direction of the main transfer may change to the opposite. For example, in 2014, the main direction of the transfer was south-west, and in 2019 was north-east.

Thus, the number of pollen grains is affected by the specific weather conditions of the season, which should include not only consideration of possible transport trajectories, but also air temperature, precipitation and humidity.

Анализ результатов аэропалинологического мониторинга в г. Перми и определение основных направлений переноса пыльцевых зерен

Новоселова Л.В., Шварц К.Г., Шкляев В.А.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

E-mail: novoselova@psu.ru, kosch@psu.ru, shklyaevl@yandex.ru

Организация системы мониторинга. С 2010 по 2019 гг. в г. Перми проводится аэропалинологический мониторинг с помощью волюметрического пыльцеуловителя Буркарда, а затем Ланзони, принцип действия которых основан на принудительной подаче 14,4 м³/сутки объёма воздуха, что приблизительно соответствует интенсивности дыхания взрослого человека. Пыльцеуловитель установлен на высоте около 20 м, на крыше восьмизэтажного здания, расположенного на территории ПГНИУ. Улавливающая поверхность в пыльцеуловителе представлена прозрачной неклеякой лентой, на поверхность которой нанесена смесь, которая способствовала оседанию на ленте пыльцевых зёрен и других частиц, находящихся в воздухе. Каждый препарат просматривался при помощи светового микроскопа OLYMPUS DP51. Для идентификации принадлежности пыльцевых зёрен были использованы атласы, палинологические пособия и материалы международной палинологической базы данных (Pollen Databases).

Изменение сезонного количества пыльцевых зерен. Количество пыльцевых зерен изменяется в значительных пределах, как за отдельные годы, так и для различных видов растений. Анализ результатов мониторинга выявил наиболее существенное количество пыльцевых зерен березы (табл.1).

Таблица 1

Сезонное количество пыльцевых зерен

Растение	Год									
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Береза	19478	19764	4483	1057	37541	20314	37487	3024	5784	32094
Клен	1110	1775	264	0	25	233	1515	480	698	620

Растение	Год									
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Ольха	206	74	274	10	180	171	720	28	158	820
Вяз	23	9	2	441	811	586	2999	152	105	260
Ель	91	242	242	2	2084	12	1496	324	62	3182
Сосна	2177	5133	1390	20	4627	4935	1195	1286	1778	3466
Тополь	186	901	1287	1275	1827	2489	736	1894	692	1314
Злаки	446	861	1100	180	391	2147	238	766	916	522
Полынь	913	917	1483	575	662	3086	30	970	2000	206
Щавель	2176	2700	1240	48	154	399	101	90	80	0
Крапива	856	1150	11561	1864	7879	26879	494	5386	11308	2886
Дуб	180	53	3	9	375	192	2	132	72	8
Лещина	124	206	225	0	0	6	43	100	28	2
Подорожник	961	1319	625	125	16	71	18	10	136	6
Амброзия	20	4	20	2	6	4	4	0	14	22

Среднее квадратическое отклонение (σ) для количества пыльцевых зерен березы составило 14197, при среднем значении 17575 (табл. 2). Однако, при использовании коэффициента вариации, выявилось, что наибольшие значения этой характеристики наблюдаются у пыльцевых зерен щавеля и подорожника, соответственно 1,71 и 1,69. Наименьшие изменения характерны для пыльцевых зерен тополя, коэффициент вариации равен 0,52.

Таблица 2

Некоторые статистические характеристики результатов мониторинга пыльцевых зерен

Растение	σ	среднее значение	коэффициент вариации	Растение	σ	среднее значение	коэффициент вариации
Береза	14197	17575	0,81	Полынь	906	1084	0,84
Клен	614	622	0,99	Щавель	994	581	1,71
Ольха	280	271	1,03	Крапива	8134	7754	1,05
Вяз	906	627	1,44	Дуб	120	97	1,24
Ель	1103	875	1,26	Лещина	86	70	1,24
Сосна	1807	2564	0,71	Подорожник	473	280	1,69
Тополь	676	1309	0,52	Амброзия	8	8	1,00
Злаки	575	770	0,75				

Изменение количества пыльцевых зерен в течение сезона можно оценить по данным табл. 3.

Таблица 3

Среднее суточное количество пыльцевых зерен в отдельные месяцы сезона, 2010-2019г.

Растение	Месяц				
	апрель	май	июнь	июль	август
берёза	18	560	6	1	0,1
клен	2	19	0,2	1	0
ель	0,0	22	2	0,3	0,1
сосна	0,1	67	17	1	0,1
тополь	13	28	0,2	0	0
ольха	8	1	0,02	0,01	0
вяз	13	5	0,04	0,01	0
злаки	0	0,4	12	11	2
полынь	0	0	1	14	19

щавель	0	0,05	6	16	1
крапива	0	0,1	52	141	36
дуб	0,1	3	1	0,02	0
лещина	0,5	1	0,3	0,5	0,01
подорожник	0	0,03	4	6	1
амброзия	0	0	0	0,1	0,1

Выделяются растения, цветущие в апреле (ольха, вяз), пыльца от которых может приноситься из пределов Пермского края. Далее, группа растений, наибольшая эмиссия пыльцы от которых наблюдается в мае: береза, клен, ель, сосна, тополь, дуб, лещина. Следующую группу составляют растения, цветущие в период с июня по август. Это злаки, крапива, полынь, щавель, подорожник. Перенос амброзии на территорию Пермского края несущественен и наблюдается не каждый сезон.

Выявление количественной связи между отдельными видами пыльцы. Для выявления количественной связи между содержанием пыльцевых зерен отдельных видов рассчитывалась корреляционная матрица. Ее анализ показал, что наиболее тесным образом связано количество пыльцевых зерен подорожника и щавеля $r=0,99\pm 0,01$, злаков и полыни $r=0,92\pm 0,07$, злаков и крапивы $r=0,91\pm 0,08$, лещины и подорожника $r=0,81\pm 0,12$. Это хорошо прослеживается по рис. 1. Значимой также будет связь между количеством пыльцевых зерен ели и ольхи, ели и березы, тополя и клена, но последняя будет отрицательна.

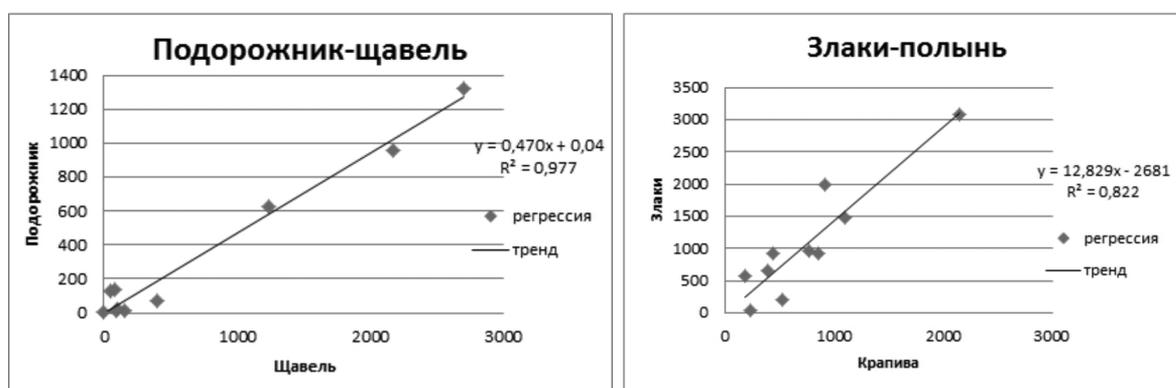


Рис. 1. Эмпирические точки и теоретическая линия регрессии для количества пыльцевых зерен различных растений

Анализ направления переноса и его влияния на количество пыльцевых зерен. Перенос пыльцевых зерен возможен от различных источников, которые могли располагаться как в непосредственной близости от точки мониторинга, так и на большом удалении от нее. В связи с этим, высота, на которой определялось направление ветра, должна быть выше приземного слоя и составлять не менее нескольких сотен метров, так как перенос пыльцевых зерен происходит в теплое время года. Для учета направления ветра, сопутствующего переносу биоаэрозоля, использовались ежедневные данные радиозондирования за период с апреля по август с 2010 по 2019 г.

Учитывалось направление ветра по данным радиозондирования за 12 ч ВСВ (дневной срок, соответствующий 17 ч местного времени). Предполагалось, что основной перенос происходит в дневное время, а утренние инверсии могут ослабить этот процесс, поэтому срок 00 ч не использовался. В качестве основного направления переноса выбирался уровень 925 гПа, который соответствовал высотам от 500 до 900 м. В дальнейшем будут проведены исследования с другим, более высоким уровнем, например 850 гПа, который соответствует высоте 1100-1700 м над уровнем моря.

В связи с тем, что по данным измерений направление ветра определяется в градусах, для всех выбранных случаев направление было переведено в румбы (8 румбов). Результаты полученных расчетов соотносились с количеством пыльцы в этот день. Сгруппированные данные соответствовали отдельным месяцам, объединенным за все 10 лет наблюдений, либо, за отдельные годы. Полученные «розы ветров» сравнивались с относительным количеством пыльцевых зерен разных видов, наблюдаемом при возможных направлениях ветра, определяемом в процентах от общего месячного количества. Таким образом, кроме «роз ветров» были построены «розы количества пыльцы», которые позволили более детально исследовать направления переноса пыльцевых зерен (рис. 2–4).

Анализ приведенных диаграмм показывает, что сезонное распределение ветра и направление основного переноса пыльцевых зерен, как правило, не совпадают. Исключение составляет количество пыльцевых зерен вяза, которое почти полностью повторяет «розу ветров» в апреле (рис. 3).

Более детальное представление об основных направлениях переноса пыльцевых зерен можно получить, если анализировать отдельные месяцы исследуемого периода наблюдений. Так, в отдельные

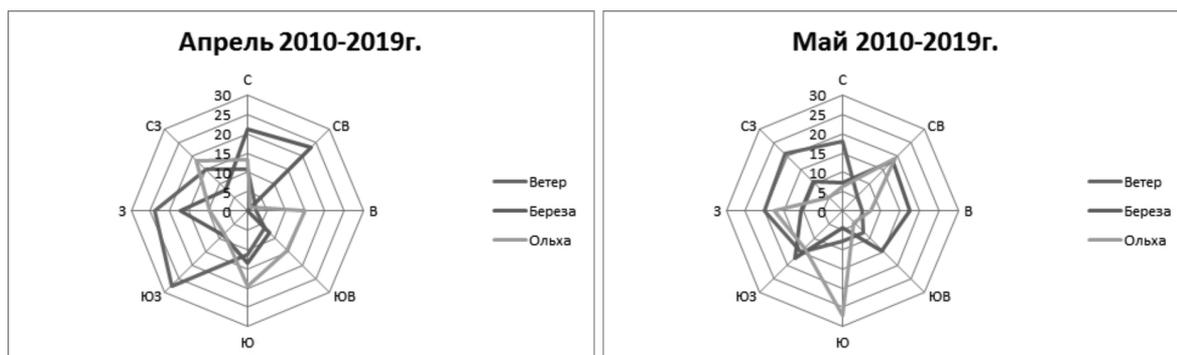


Рис.2. Распределение ветра по направлениям и относительного количества пыльцевых зерен березы и ольхи (апрель, май), %

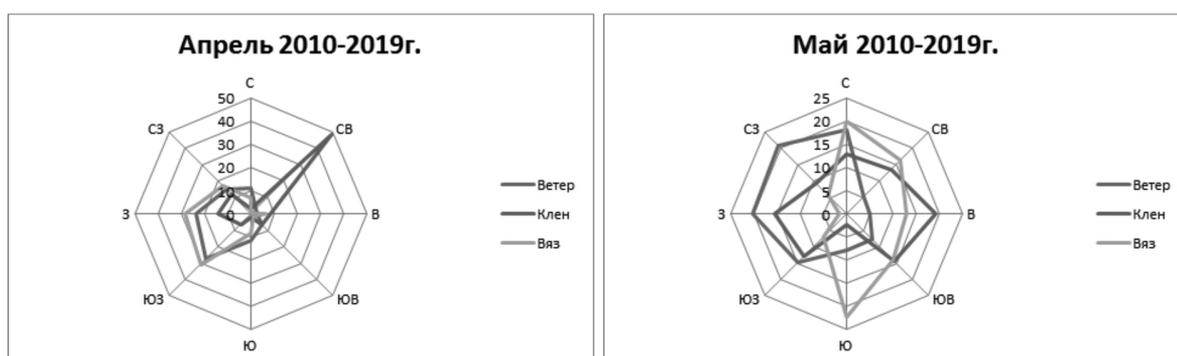


Рис.3. Распределение ветра по направлениям и относительного количества пыльцевых зерен клена и вяза (апрель, май), %

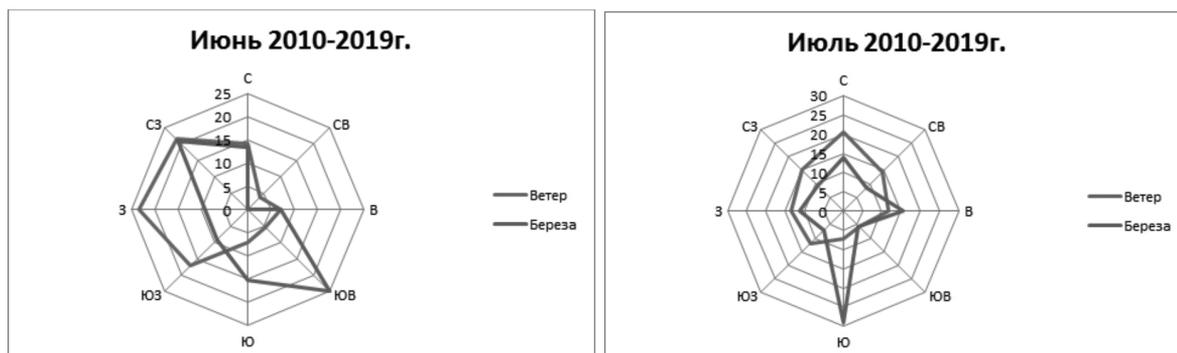


Рис.4. Распределение ветра по направлениям и относительного количества пыльцевых зерен березы (июнь, июль), %

годы с наибольшей концентрацией пыльцевых зерен березы в мае, направление основного переноса может изменяться на противоположное. Например, в 2014 г. основное направление переноса было юго-западным, а в 2019 г. – северо-восточным (рис. 5).

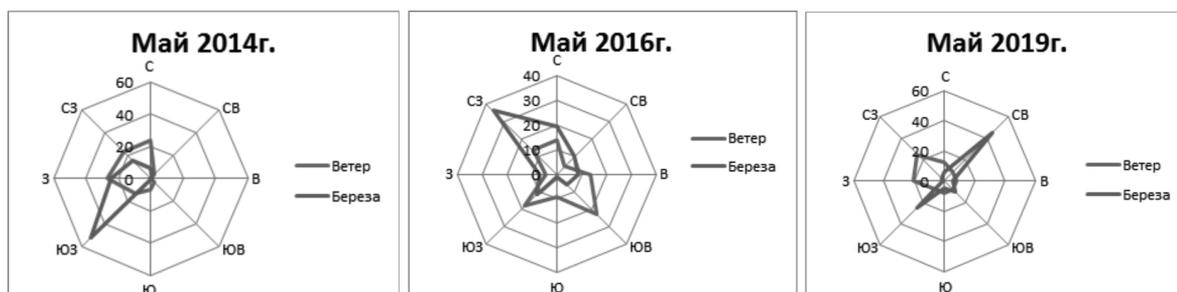


Рис.5. Распределение ветра по направлениям и относительного количества пыльцевых зерен березы в мае 2014г., 2016г. и 2019г., %

Таким образом, на количество пыльцевых зерен влияют особенности погодных условий сезона, которые должны включать не только учет возможных траекторий переноса, но и температуру воздуха, количество осадков и влажность воздуха. Эти исследования планируется провести в дальнейшем.

Исследование турбулентных замыканий в задаче о разрушающейся двумерной турбулентности

Пережогин П.А.

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

E-mail: pperezhogin@gmail.com

Данная работа посвящена построению подфильтровых моделей класса LES (Large eddy simulation) для двумерной затухающей турбулентности. Технология построения LES замыканий хорошо развита для случая трехмерной турбулентности [1], однако для двумерной турбулентности известно лишь небольшое число авторов, которые исследовали этот вопрос [2, 3]. Необходимость построения LES моделей для квазидвумерной турбулентности возникает при разработке динамических ядер моделей крупномасштабной циркуляции атмосферы и океана, которые частично разрешают на вычислительной сетке крупные вихри. Поскольку характерный пространственный масштаб мезомасштабных вихрей, определяемый по радиусу деформации Россби, значительно меньше в океане, чем в атмосфере [4], ожидается, что применение методов LES моделирования должно быть наиболее востребованным для океанических приложений. См., например, обзор [5].

В методе LES предполагается, что модель явно разрешает только крупномасштабные (отфильтрованные) турбулентные пульсации, а взаимодействие с неразрешаемыми флуктуациями должно быть параметризовано. Преимуществом LES подхода по сравнению с RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes) является тот факт, что даже при использовании относительно простого замыкания (например, модель Смагоринского [6]), при устремлении ширины фильтра к нулю, решения LES модели по своим статистическим характеристикам должны стремиться к решениям DNS (Direct numerical simulation) модели. Таким образом, от того, насколько качественно построено LES замыкание, зависит решение только при достаточно большой ширине фильтра, когда эта ширина сравнима с характерным размером когерентных структур, возникающих в течении, либо сравнима с характерными масштабами, задаваемыми геометрией расчетной области (например, пространственный масштаб обтекаемых объектов или ширина ламинарного погранслоя).

В трехмерной турбулентности, в том случае, когда масштаб фильтра попадает на инерционный интервал прямого каскада энергии, основной физической процесс, который должно воспроизвести LES замыкание – это перераспределение энергии из разрешаемых масштабов в подсеточные, т.е. диссипацию энергии. В качестве базовой модели турбулентности в трехмерном случае обычно используют модель Смагоринского. Для этой модели было обнаружено, что коэффициент Смагоринского должен зависеть от характеристик разрешаемого течения [1], а именно, от наличия сильного среднего сдвига, от расстояния до стенки, от наличия турбулентных флуктуаций в решении (например, при ламинарно-турбулентном переходе) и от числа Рейнольдса. В работе [7] была предложена динамическая модель, которая представляет из себя метод локальной оценки коэффициента Смагоринского на основе разрешаемого подсеточного напряжения (тензор Леонарда). Данный метод позволил производить расчеты турбулентных течений при большом диапазоне сеточных разрешений и без необходимости вводить поправки на коэффициент Смагоринского в пристеночной области, т.е. “damping functions” [8]. Успех динамической модели до сих пор не был адаптирован к двумерной и квазидвумерной турбулентности. В работах [2, 3] проведены расчеты в квазигеострофических уравнениях и в примитивных уравнениях океана, однако до сих пор остается неизвестным, почему динамическая модель не позволяет улучшить воспроизведение решения на грубой сетке и часто приводит к возникновению численного шума в решении. Поскольку динамическая процедура оценки вязкости представляет из себя строгую математическую процедуру, мы предполагаем, что проблема может заключаться в том, что базовая модель турбулентной вязкости не подходит для построения замыкания в двумерном случае. В частности, в океанических приложениях часто используют вместо стандартной модели Смагоринского, её модификацию, основанную на модели бигармонической диффузии [9]. По всей видимости, это связано с тем, что в отличие от трехмерного случая, в двумерной турбулентности подсеточное замыкание должно обеспечить правильный обмен с подсеточными масштабами не только для энергии, но и для энтропии, при этом поток энергии часто оказывается отрицательным (т.е. наблюдается “kinetic energy backscatter” [10]). Бигармоническая вязкость в данном случае выступает в качестве компромисса между диссипативными свойствами модели с точки зрения энтропии и энергии. Из приведенного обзора следует, что возможный путь развития LES параметризаций для двумерной и квазидвумерной турбулентности – это попытаться изменить базовую модель, и в этом случае динамическая процедура также может оказаться востребованной.

Для того чтобы разделить турбулентное поле на разрешаемое и неразрешаемое, применяются, в общем случае, два подхода. В первом подходе, который называется подходом с неявной фильтрацией, предполагается, что вычислительная сетка грубой модели служит неявным фильтром. Недостатком это-

го подхода является преобладание ошибок аппроксимации адвективного слагаемого над вкладом нелинейных взаимодействий с неразрешенными гармониками [11]. В свою очередь, в двумерной турбулентности ошибки аппроксимации влияют на то, как устроена диссипация энтропии в мелких масштабах и возвращение энергии на крупных масштабах за счет подсеточных сил [12]. Это обстоятельство усложняет построение базовой модели для двумерной турбулентности. По этой причине в данной работе мы используем подход явной фильтрации, когда ширина базового фильтра предполагается больше, чем шаг сетки. В этом случае становится возможным отделить влияние ошибок аппроксимации от неточностей подфильтровой модели [13].

Построение подфильтровой модели основано на разложении Германо 1986 года [14]:

$$\sigma_j = L_j + C_j + R_j,$$

где $\sigma_j = \overline{u_j \omega} - \overline{u_j} \overline{\omega}$ – подфильтровый поток завихренности, u_j – компоненты скорости, ω – завихренность, $(\overline{\bullet})$ – Гауссов фильтр с шириной Δ , а L_j , C_j , R_j – тензор Леонарда, перекрестное напряжение и тензор Рейнольдса, соответственно. В априорном анализе мы показали, что за диссипацию энтропии отвечают тензор Леонарда и перекрестное напряжение, а в перераспределении энергии в крупные масштабы участвуют все три тензора, см. рис. 1.

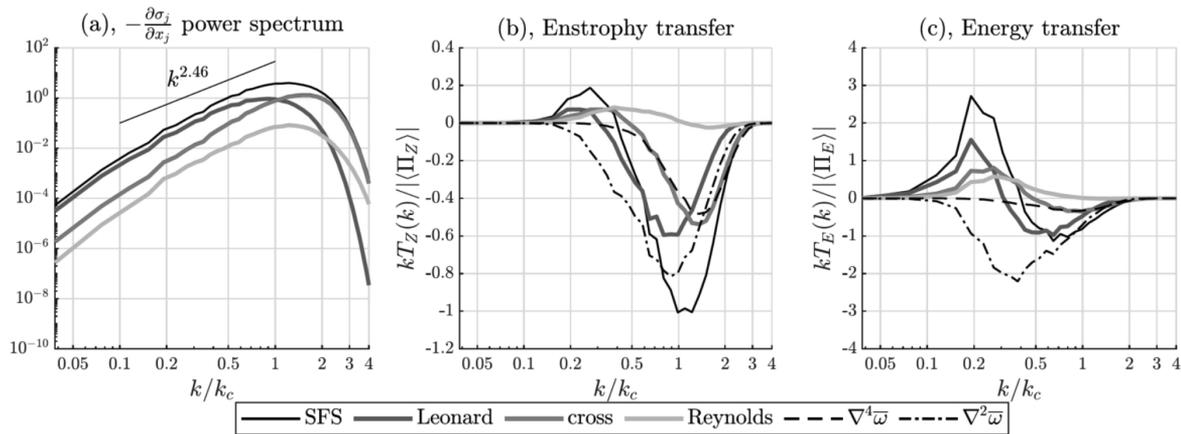


Рис. 1. Спектр мощности (а), генерация энтропии (b) и генерация энергии (c) для подфильтрового напряжения (SFS) и его компонент.

Для описания диссипации энтропии, связанной с перекрестным напряжением, хорошо подходит модель бигармонической вязкости по своему масштабу. Дополнительное распределение энергии в крупные масштабы можно описать с помощью AD (approximate deconvolution [15]) аппроксимации тензора Рейнольдса. Итоговая модель подфильтрового напряжения имеет следующий вид:

$$\sigma_j^{\text{mod}} = \overline{u_j \omega} - \overline{u_j} \overline{\omega} + (C_s \Delta)^4 |\overline{S}| \frac{\partial \nabla^2 \overline{\omega}}{\partial x_j} + C_{\text{back}} (\overline{u_j \omega''} - \overline{u_j'} \overline{\omega''}),$$

где $u_j' = \overline{u_j} - \overline{u_j}$ и $\omega'' = \overline{\omega} - \overline{\omega}$. Константа Смагоринского C_s вычисляется согласно динамической процедуре, а «амплитуда» слагаемого, отвечающего за генерацию энергии, C_{back} , находится исходя из соображений о балансе энергии и энтропии:

$$\langle \Pi_E \rangle = -\frac{\Delta}{12} \langle \Pi_Z \rangle,$$

где $\langle \Pi_E \rangle$ – средний по области поток энергии в подфильтровые масштабы и $\langle \Pi_Z \rangle$ – средний по области поток энтропии в подфильтровые масштабы.

Предложенная модель (ssm+bilap+keb) сравнивается в апостериорных экспериментах с более простыми моделями: модель Смагоринского с оператором типа Лапласа (lap), модель Смагоринского с оператором типа бигармонического оператора (bilap), смешанная модель с добавкой в виде модели подобия масштабов (ssm+bilap). Предложенная модель верно описывает коспектры энергии и энтропии, а также верно воспроизводит рост энергии разрешаемых течений, см. рис. 2.

Заключение. В данной работе мы предложили подфильтровую модель для двумерной турбулентности. Модель основана на априорном анализе подфильтрового напряжения. Модель относится к классу моделей с явно фильтрацией, поскольку не содержит явно шаг сетки. Модель верно описывает диссипацию энтропии и «бэкскеттер» энергии, и может быть использована совместно с динамической процедурой. С точки зрения воспроизведения спектра энергии в апостериорных экспериментах модель не обладает преимуществами по сравнению с бигармонической вязкостью в средних масштабах, которые соответствуют когерентным вихрям. Это обстоятельство означает, что для моделирования двумерной турбулентности на грубых сетках необходимо строить еще более качественную базовую модель турбулентности (бигармоническая вязкость не подходит).

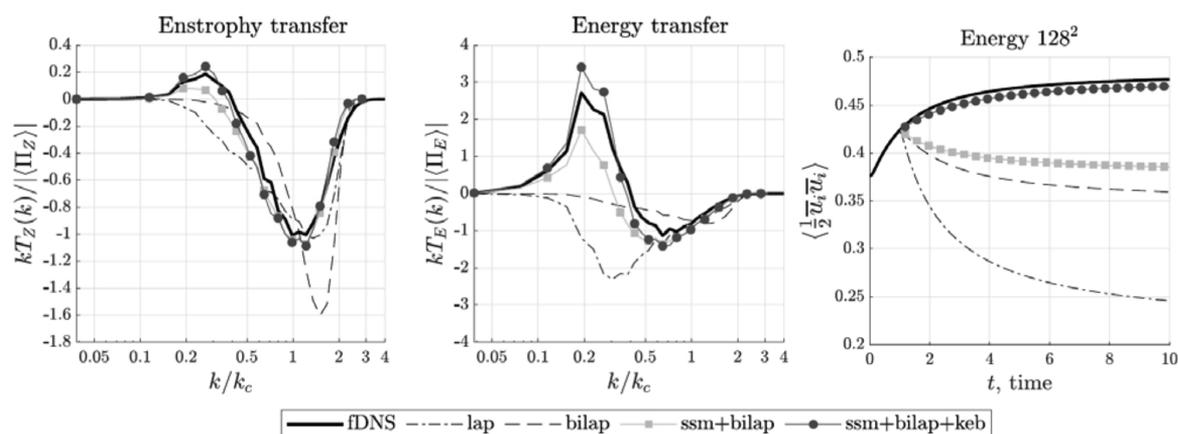


Рис. 2. Спектр генерации энтропии (слева), энергии (по центру) и эволюция разрешаемой энергии (справа) для LES моделей по сравнению с данными фильрованного DNS (fDNS).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Sagaut P. Large eddy simulation for incompressible flows: an introduction. – Springer Science & Business Media, 2006.
2. Bachman S. D., Fox-Kemper B., Pearson B. A scale-aware subgrid model for quasi-geostrophic turbulence //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2017. – Т. 122. – №. 2. – С. 1529-1554.
3. Maulik R., San O. A stable and scale-aware dynamic modeling framework for subgrid-scale parameterizations of two-dimensional turbulence //Computers & Fluids. – 2017. – Т. 158. – С. 11-38.
4. Vallis G. K. Atmospheric and oceanic fluid dynamics. – Cambridge University Press, 2017.
5. Fox-Kemper B., Menemenlis D. Can large eddy simulation techniques improve mesoscale rich ocean models //Ocean modeling in an eddying regime. – 2008. – Т. 177. – С. 319-337.
6. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment //Monthly weather review. – 1963. – Т. 91. – №. 3. – С. 99-164.
7. Germano M. et al. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model //Physics of Fluids A: Fluid Dynamics. – 1991. – Т. 3. – №. 7. – С. 1760-1765.
8. Moin P., Kim J. Numerical investigation of turbulent channel flow //Journal of fluid mechanics. – 1982. – Т. 118. – С. 341-377.
9. Griffies S. M., Hallberg R. W. Biharmonic friction with a Smagorinsky-like viscosity for use in large-scale eddy-permitting ocean models //Monthly Weather Review. – 2000. – Т. 128. – №. 8. – С. 2935-2946.
10. Jansen M. F., Held I. M. Parameterizing subgrid-scale eddy effects using energetically consistent backscatter //Ocean Modelling. – 2014. – Т. 80. – С. 36-48.
11. Ghosal S. An analysis of numerical errors in large-eddy simulations of turbulence //Journal of Computational Physics. – 1996. – Т. 125. – №. 1. – С. 187-206.
12. Thuburn J., Kent J., Wood N. Cascades, backscatter and conservation in numerical models of two-dimensional turbulence //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2014. – Т. 140. – №. 679. – С. 626-638.
13. Winckelmans G. S. et al. Explicit-filtering large-eddy simulation using the tensor-diffusivity model supplemented by a dynamic Smagorinsky term //Physics of Fluids. – 2001. – Т. 13. – №. 5. – С. 1385-1403.
14. Germano M. A proposal for a redefinition of the turbulent stresses in the filtered Navier–Stokes equations //The Physics of fluids. – 1986. – Т. 29. – №. 7. – С. 2323-2324.
15. Stolz S., Adams N. A. An approximate deconvolution procedure for large-eddy simulation //Physics of Fluids. – 1999. – Т. 11. – №. 7. – С. 1699-1701.

An investigation of turbulence closures in decaying 2D turbulence

Perezhogin P.A.

Marchuk institute of numerical mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: pperezhogin@gmail.com

This work is devoted to the construction of LES (Large eddy simulation) closures for two-dimensional decaying turbulence. Subfilter model is based on Germano 1986 decomposition

$$\sigma_j = L_j + C_j + R_j,$$

where $\sigma_j = \overline{u_j \omega} - \overline{u_j} \overline{\omega}$ – subfilter-scale (SFS) stress, u_j – velocity, ω – vorticity, $\overline{(\bullet)}$ – Gaussian filter with width $\overline{\Delta}$, and L_j , C_j , R_j – Leonard stress, cross stress and Reynolds stress, respectively. In a priori analysis we have shown that enstrophy dissipation is represented by Leonard and cross stresses, while all three stresses represent energy redistribution to large scale, see fig. 1.

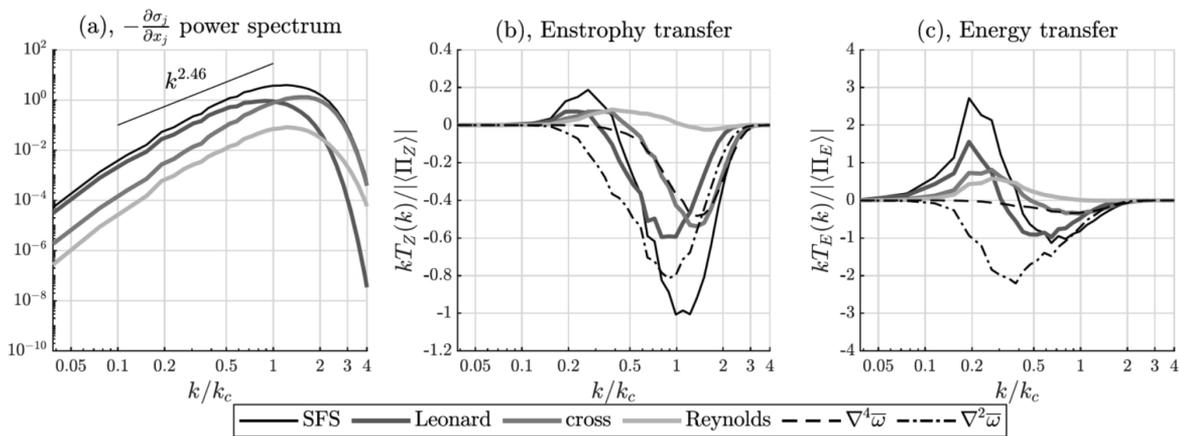


Fig. 1. Power spectrum (a), enstrophy generation spectrum (b) and energy generation spectrum (c) for SFS stress and its components.

Biharmonic friction fits spatial scale corresponding to cross stress. An additional kinetic energy backscatter can be introduced by the AD (approximate deconvolution) approximation to Reynolds stress. The proposed model is as follows:

$$\sigma_j^{\text{mod}} = \overline{u_j \omega} - \overline{u_j} \overline{\omega} + (C_s \overline{\Delta})^4 |\overline{S}| \frac{\partial \nabla^2 \overline{\omega}}{\partial x_j} + C_{\text{back}} (\overline{u_j \omega''} - \overline{u_j'} \overline{\omega''}),$$

where $u_j' = \overline{u_j} - \overline{u_j}$ and $\omega'' = \overline{\omega} - \overline{\omega}$. Smagorinsky constant C_s is determined from dynamic procedure and “backscatter amplitude” is determined from energy-enstrophy balance equation:

$$\langle \Pi_E \rangle = -\frac{\Delta}{12} \langle \Pi_Z \rangle,$$

where $\langle \Pi_E \rangle$ and $\langle \Pi_Z \rangle$ – average energy and enstrophy exchange with subfilter scales, respectively.

The proposed model is able to represent enstrophy and energy generation spectra and growth of resolved energy in a posteriori experiments.

Моделирование реакции атмосферы на сокращение арктического льда

^{1,2}Платов Г., ²Градов В., ¹Боровко И., ³Володин Е., ^{1,2}Крупчатников В.

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Институт вычислительной математики им. А.Н. Колмогорова РАН, Москва, Россия

E-mail: vkrupchatnikov@yandex.ru

Усиленное потепление Арктики - один из нескольких факторов, влияющих на динамику атмосферы. В данной работе рассматривается серия численных экспериментов, направленных на выявление непосредственной роли процесса сокращения морского льда в формировании климатических трендов в северном полушарии. В данном случае мы использовали два более или менее независимых механизма уменьшения льда. Первый традиционно связан с увеличением концентрации углекислого газа в атмосфере с исторического уровня 360 ppm до уровня, соответствующего максимальной концентрации при реализации самого мягкого сценария RCP 2.6 - 450 ppm. В результате этого роста средняя температура воздуха в Арктике увеличивается, и, следовательно, объем льда уменьшается. Второй механизм связан с уменьшением альбедо в результате сокращения океанического льда и снега. Количество поглощаемой солнечной радиации увеличивается, а объем льда уменьшается. Мы предполагаем, что сравнение результатов этих двух экспериментов позволяет судить о прямой роли уменьшения льда, независимо от причин, вызвавших это сокращение. Мы также рассматриваем, как режимы, такие как блокирующие и стационарные модели волновой активности Россби, могут изменяться при изменении климата. Недавно [2] предложили локальную волновую активность (LWA) как диагностику локальных волновых аномалий и блокирующих событий. LWA - это обобщение теории волновой активности конечной амплитуды [3] на ее локальный аналог, как функции широты и долготы, способное измерять региональные возмущения атмосферной циркуляции. В этой работе мы количественно оцениваем LWA с помощью Z500, который использовался для диагностики экстремальных погодных явлений в тропосфере, таких как блокирующие явления [4-6].

- В исследовании использовалась модель климатической системы INM-CM48 [1], разработанная в ИВМ РАН и учитывающая многие факторы изменения климата. Эти результаты получены в рамках проекта Российского научного фонда № 19-17-00154.

Modelled atmospheric response to Arctic ice reduction

^{1,2}Platov G., ²Gradov V., ¹Borovko I., ³Volodin E., ^{1,2}Krupchatnikov V.

¹ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³ Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: vkrupchatnikov@yandex.ru

The amplified Arctic warming is one of several factors influencing the atmospheric dynamics. In this work, a series of numerical experiments aimed at identifying the direct role of the sea ice reduction process in forming climatic trends in the northern hemisphere is considered. In this case, we used two more or less independent mechanisms of ice reduction. The first is traditionally associated with an increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere from the historic level of 360 ppm to the level corresponding to the maximum concentration in implementing the mildest scenario RCP 2.6 - 450 ppm. As a result of this growth, the average air temperature in the Arctic increases, and, by this, the ice volume decreases. The second mechanism is associated with a decrease in the albedo of ocean ice and snow. The amount of solar radiation absorbed by the ice increases, and the ice volume decreases. We assume that a comparison of the results of these two experiments allows us to judge the direct role of ice reduction, regardless of the reasons that caused this reduction. We also consider how regimes such as blocking and stationary Rossby wave activity patterns may be altered under climate change. Recently, [2] have proposed local wave activity (LWA) as a diagnostic of local wave anomalies and blocking events. LWA is a generalization of the finite-amplitude wave activity theory [3] into its local counterpart, quantifying waviness as a function of latitude and longitude, and is capable of measuring regional disturbances in the atmospheric circulation. In this work we quantify LWA using Z500, which has been used to diagnose weather extremes in the troposphere such as blocking events [4-6].

- The study used the INM-CM48 climate system model [1], developed at the INM RAS and taking into account many factors of climate change. These results were obtained within the framework of the project of the Russian Science Foundation No. 19-17-00154

REFERENCES:

1. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostrykin S.V., Galin V.Ya, Lykossov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G., Shestakova A.A., Emelina S.V. Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 33(6), 367–374 (2018).
2. Huang, C. S.-Y., and N. Nakamura, 2016: Local finite-amplitude wave activity as a diagnostic of anomalous weather events. *J. Atmos. Sci.*, 73, 211–229,
3. Nakamura, N., and D. Zhu, 2010: Finite-amplitude wave activity and diffusive flux of potential vorticity in eddy-mean flow interaction. *J. Atmos. Sci.*, 67, 2701–2716
4. Tibaldi, S., and F. Molteni, 1990: On the operational predictability of blocking. *Tellus*, 42A, 343–365, doi:10.3402/tellusa.v42i3.11882.
5. Tyrllis, E., and B. J. Hoskins, 2008: Aspects of a Northern Hemisphere atmospheric blocking climatology. *J. Atmos. Sci.*, 65, 1638–1652, doi:10.1175/2007JAS2337.1.
6. V. N. Krupchatnikov and I. V. Borovko 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 611 012015

Hydrodynamic modeling of the transport of heavy aerosols of various origins in the boundary layer of the atmosphere

^{1,3,2,4}Varentsov A.I., ^{3,1,2,4}Stepanenko V.M., ^{3,2}Mortikov E.V.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

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

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

⁴ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

E-mail: jdeadfox17@gmail.com, stepanen@srcc.msu.ru, evgeny.mortikov@gmail.com

The presented work is devoted to the development, verification and application in practical problems of the Lagrangian model of the transport of aerosol particles in the urban boundary layer of the atmosphere with a high spatial resolution. The subject of this work is atmospheric aerosol – solid and liquid particles suspended in the air. The range of densities and sizes that aerosol particles can have is extremely large, which is associated with differences in the genesis and composition. Thus, the masses of various particles can differ by many orders of magnitude. It is important to take this into account, since these parameters have a key influence on the transport of aerosols. In the case of the study of bioaerosols, an equally important parameter is the particle lifetime.

A well-known method for monitoring and forecasting aerosol pollution is modeling, which makes it possible to calculate the necessary parameters even inside the urban environment on the basis of physical and mathematical or statistical laws. At the moment, there are many types of aerosol propagation models, but among them there are two main approaches: Lagrangian and Eulerian. The Euler approach calculates the transfer and diffusion of particle concentration, for example, in the cells of the computational grid. The Lagrangian method is characterized by the fact that each investigated particle is tracked along its trajectory, the velocity and other parameters are calculated for it at each moment of time. This approach is more informative, since with known particle trajectories it is easy to calculate the concentration, while at a known concentration it is impossible to calculate the trajectories.

In this work, a first-order Lagrangian stochastic model has been developed to model the transport of aerosols. To calculate the trajectory of an aerosol particle, the equation of motion is used – it is based on the Newton's second law. The model also implements three different turbulent parameterizations: a simple Gaussian, a random walk model, and a random displacement model.

Previously, a comparison was made of the calculations of the Lagrangian model with the Eulerian analytical solutions for passive particles - small light particles for which the effects of inertia and gravitational settling can be neglected. A correspondence between the exact and numerical solutions was observed. Further, the model was verified on more complex analytical solutions, taking into account both the effect of the mass and size of particles on their transport, and the reverse effect of particle concentrations on the stratification of the atmosphere. The article [1], devoted to the speed of friction in a blizzard [1], was chosen as a theoretical basis. This article presents formulas describing the profile of the turbulent diffusion coefficient for a neutrally stratified boundary layer without the effect of particle concentration on stratification and taking into account this effect.

The results showed an almost perfect correspondence of the Lagrangian model and the analytical solution, which indicates the correct and accurate reproduction of the transport of heavy particles by the developed Lagrangian model, at least within the framework of this experiment, as well as the possibility of assessing the effect of particles on the stratification of the atmosphere from the data model calculations.

The presented work also compares the calculations of the model with the data on the concentrations of large sand particles measured under conditions of dust storms and high wind speeds. The developed model can be used in both scientific and applied problems. In this regard, the possibility of calculations was tested in conditions close to real urban development. Experiments were carried out to simulate the transport of aerosols in a series of urban canyons under various stratification conditions, and modeling of bioaerosols was tested using the example of SARS-CoV-2 coronavirus virions.

Thus, within the framework of one software package, a first-order Lagrangian stochastic model with a choice of turbulence parameterization is implemented. The model was verified using analytical solutions for both light and heavy particles. Also added is the ability to take into account the effect of large concentrations of particles on the stratification of the atmosphere in certain problems. Simulation of particle transport taking into account this function was also verified on the analytical solution.

- The work is partially supported by RSF grant 21-17-00249 and by Russian Ministry of Science and Higher Education, agreements No. 075-15-2019-1621, 2020-220-08-5835.

REFERENCES:

1. Wamser C., Lykossov V.N. On the friction velocity during blowing snow // Contributions to Atmospheric Physics. — 1995. — Vol. 68, no. 1. — P. 85–94.

Гидродинамическое моделирование переноса тяжёлых аэрозолей различного генезиса в пограничном слое атмосферы

^{1,3,2,4}Варенцов А.И., ^{3,1,2,4}Степаненко В.М., ^{3,2}Мортиков Е.В.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

² Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

⁴ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

E-mail: jdeadfox17@gmail.com, stepanen@srcc.msu.ru, evgeny.mortikov@gmail.com

Представленная работа посвящена развитию, верификации и применению в практических задачах лагранжевой модели переноса аэрозольных частиц в городском пограничном слое атмосферы с высоким пространственным разрешением.

Предметом исследования данной работы является атмосферный аэрозоль – взвешенные в воздухе твёрдые и жидкие частицы. Размер частиц аэрозоля варьируется примерно в пределах от 10^{-4} до 10^3 мкм. Диапазон плотностей, которые могут иметь аэрозольные частицы, крайне велик, что связано с различиями в химическом составе и фазовом состоянии аэрозолей. Таким образом, размеры и массы различных частиц могут отличаться на множество порядков. Это важно учитывать, так как данные параметры имеют ключевое влияние на перенос аэрозолей. В случае исследования биоаэрозолей не менее важным параметром является и время жизни частицы.

Известно, что аэрозоли участвуют в атмосферных химических реакциях и оказывают влияние на погоду и климат. Но не менее важно, что в условиях значительных концентраций взвешенные частицы могут оказывать негативное влияние на здоровье людей и окружающую среду. Такие условия редко встречаются в природе и более свойственны территориям с антропогенными источниками выбросов аэрозолей, в первую очередь, крупным городам и промышленным объектам. Доказано, что при попадании внутрь организма аэрозоли могут становиться причинами серьёзных заболеваний, зависящих от размера и состава частиц.

Методы измерений параметров аэрозольного загрязнения можно разделить на дистанционные и контактные. Наземные сети с контактными измерениями позволяют вести постоянные наблюдения в интересующих пунктах и обычно совмещены с автоматическими метеорологическими комплексами. Несмотря на такие достоинства, как непрерывность измерений, высокая точность и возможность измерений внутри городской застройки, такие системы наблюдения имеют и существенные недостатки, имеющие особенную важность в городских условиях. К ним относятся низкая плотность измеритель-

ных станций, разные условия установки относительно источников частиц. К дистанционным методам относятся спутниковые наблюдения, оптические и акустические наблюдения с поверхности. Основное преимущество таких методов – возможность покрытия большой территории и значительной части атмосферы, но для измерений необходимо отсутствие препятствий (зданий, деревьев, форм рельефа) на пути излучаемого и отражённого сигнала, что недостижимо внутри городской застройки.

Отличным от измерений способом мониторинга и прогноза аэрозольного загрязнения является моделирование, позволяющее рассчитывать необходимые параметры внутри городской застройки на основе физико-математических или статистических законов. На данный момент существует множество видов моделей распространения аэрозолей, но среди них выделяются два основных подхода: лагранжев и эйлеров. При эйлеровом подходе к моделированию рассчитываются перенос и диффузия концентрации частиц, например, в ячейках расчётной сетки. При введении таких ограничений возможно одновременное отслеживание неограниченного числа частиц в заданной области. Лагранжев метод характеризуется тем, что каждая исследуемая частица отслеживается вдоль своей траектории, для неё рассчитываются скорость и другие параметры в каждый момент времени. Такой подход используется для отслеживания ограниченного числа частиц, но позволяет явно учитывать силы, действующие на частицу. Также лагранжев подход является более информативным, так как при известных траекториях частиц несложно рассчитать концентрацию, в то время как при известной концентрации невозможно рассчитать траектории. Стоит отметить, что лагранжев подход обычно требует большего количества вычислений, чем эйлеров, поскольку для получения статистически значимых оценок концентрации необходимо вычислять движение достаточно большого количества частиц. Но и это число может быть достаточно небольшим, если в рамках конкретной задачи оно репрезентативно для более высоких концентраций.

В лагранжевых моделях влияние турбулентности может быть учтено в уравнении движения для частиц. Класс наиболее простых способов описания влияния турбулентности называется лагранжевой стохастической моделью нулевого порядка или моделью случайного смещения – в такой модели траектория частицы описывается последовательностью случайных изменений позиции. Более сложный подход – лагранжева стохастическая модель первого порядка (например, уравнение Ланжевена) – описывает траекторию частицы, интегрируя последовательность случайных затухающих приращений скорости.

В данной работе для моделирования переноса аэрозолей разработана лагранжева стохастическая модель первого порядка, лагранжев подход выбран в связи с информативностью и более явным учётом действующих сил относительно эйлерова подхода. Для расчёта траектории аэрозольной частицы используется уравнение движения:

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{\mathbf{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p), \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{x}_p}{dt} = \mathbf{u}_p, \quad (2)$$

где \mathbf{u}_p – скорость частицы, \mathbf{x}_p – её координата, t – время, \mathbf{g} – ускорение силы тяжести, ρ_p – плотность частицы, ρ – плотность окружающего воздуха, \mathbf{u} – его скорость, F_D – коэффициент силы сопротивления. Уравнения (1) и (2) численно решаются явным методом Эйлера 1-го порядка.

При описании турбулентных течений жидкости или газа скорость потока может быть представлена в виде суммы осреднённой скорости и пульсационной компоненты. Первая задаётся входными данными, а вторая рассчитывается отдельно при помощи турбулентных параметризаций. В данной модели реализовано три различных параметризации: простая гауссова, модель случайных блужданий и модель случайных смещений.

Турбулентные пульсации имеют место также в величине плотности воздуха, $\rho = \bar{\rho} + \rho'$, входящей в ускорение плавучести, однако они вносят пренебрежимо малый вклад в разность $\rho_p - \rho$ для «тяжёлых» частиц (со значительной плотностью), т.к. $\rho_p - \rho \approx \rho_p$.

В разработанной модели лагранжев подход применяется к частицам, при этом характеристики воздушной среды задаются эйлеровым методом, т.е. как трёхмерные поля на дискретной сетке. Эти поля (скорости и характеристик турбулентности) и их изменение со временем задаются входными данными, которые могут поступать от различных метеорологических моделей или же быть заданы аналитически.

Граничные условия для частиц при отсутствии твёрдой поверхности на границе расчётной области могут иметь вид прозрачной или периодической границы. Также описано взаимодействие частиц с твёрдыми поверхностями. При контакте происходит или прилипание частицы, или упругий отскок – выбор зависит от настроек для данной поверхности. Для моделирования биоаэрозолей с ограниченным временем жизни в модели реализован алгоритм полураспада частиц. Дополнительно для исследования явлений крайне высоких концентраций аэрозолей (метели, песчаные бури) в модели было реализовано обратное влияние частиц на стратификацию атмосферы.

Ранее было проведено сравнение расчётов лагранжевой модели с эйлеровыми аналитическими решениями для пассивных частиц – маленьких лёгких частиц, для которых эффектами инерции и гравитационного оседания можно пренебречь. В качестве точных решений были рассмотрены две конфигурации: нейтрально стратифицированный пограничный слой и течение Куэтта. В лагранжевой модели за-

давался соответствующий профиль коэффициента турбулентной диффузии. Сравнивались вертикальные профили концентраций. В обоих случаях наблюдалось соответствие точного и численного решений. Таким образом, была проведена верификация на аналитических решениях, но только для лёгких частиц.

Далее была проведена верификация модели на более сложных аналитических решениях, учитывающих как влияние массы и размера частиц на их перенос, так и обратное влияние концентраций частиц на стратификацию атмосферы. В качестве теоретической основы была выбрана статья [1], посвящённая скорости трения в условиях метели. В данной статье приведены формулы, описывающие профиль коэффициента турбулентной диффузии для нейтрально стратифицированного пограничного слоя без влияния концентраций частиц на стратификацию и с учётом этого обратного влияния. Решения искались для системы уравнений, имеющей следующий вид:

$$\begin{cases} K_s \frac{\partial s}{\partial z} + w_s s = -H \\ s(h) = S_h \end{cases}, (3)$$

где s – концентрация частиц, K_s – коэффициент турбулентной диффузии, w_s – скорость гравитационного оседания частиц, H – поток частиц с поверхности, S_h – концентрация на верхней границе $z = h$ (в лагранжевой модели и соответствующих аналитических решениях $S_h = 0$). При получении этой системы были использованы следующие упрощения: горизонтальная однородность течения и рассмотрение только вертикального профиля концентраций, стационарность, равенство источников и стоков. Благодаря этому была получена упрощённая система с граничными условиями, одинаковыми с условиями из лагранжевой модели: поток частиц на нижней границе и нулевая концентрация частиц на верхней.

Результаты расчётов и сравнения приведены на рисунках 1а и 1б. Заметно практически идеальное соответствие лагранжевой модели (чёрная кривая) и аналитического решения (красная кривая), что говорит о правильном и точном воспроизведении переноса тяжёлых частиц разработанной лагранжевой моделью как минимум в рамках данного эксперимента, а также о возможности оценки влияния частиц на стратификацию атмосферы по данным расчётов модели.

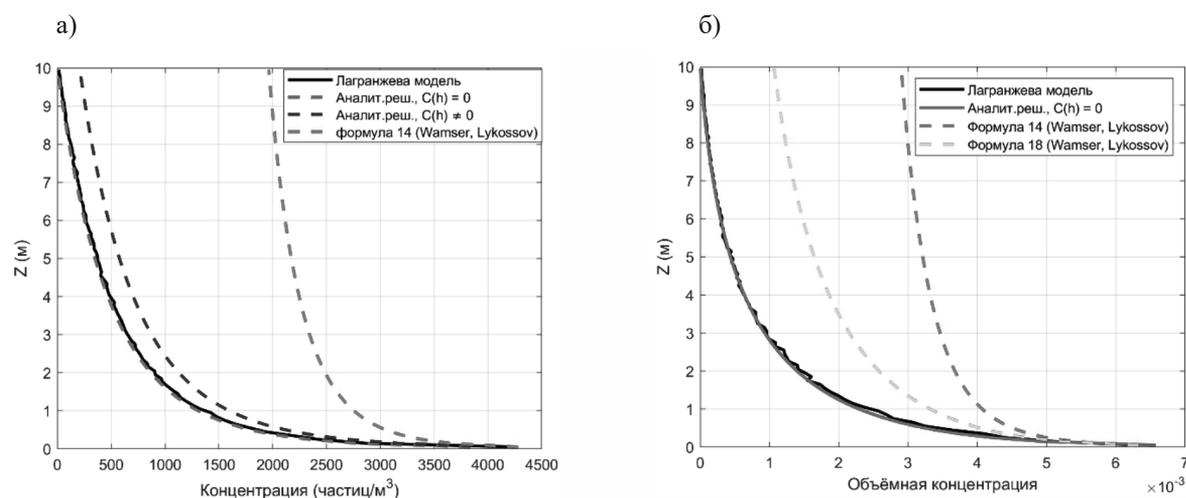


Рис. 1. Профили концентрации тяжёлых снежных частиц для условий пограничного слоя без учёта (а) и с учётом (б) влияния концентраций на стратификацию атмосферы.

В представленной работе также проводится сравнение расчётов модели с данными о концентрациях крупных песчаных частиц, измеренных в условиях пылевых бурь и высоких скоростей ветра.

Разработанная модель может быть использована как в научных, так и в прикладных задачах. В связи с этим была протестирована возможность расчётов в условиях, приближенных к реальной городской застройке. Были проведены эксперименты по моделированию переноса аэрозолей в серии городских каньонов в различных условиях стратификации, а также на примере вирионов коронавируса SARS-CoV-2 было протестировано моделирование биоаэрозолей.

Таким образом, в рамках одного программного комплекса реализована лагранжева стохастическая модель первого порядка с возможностью выбора параметризации турбулентности. Модель верифицирована на аналитических решениях как для лёгких, так и для тяжёлых частиц. Также добавлена возможность учёта влияния больших концентраций частиц на стратификацию атмосферы в определённых задачах. Моделирование переноса частиц с учётом этой функции также было верифицировано на аналитическом решении.

- Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФ 21-17-00249, Министерства науки и высшего образования (договоры 075-15-2019-1621, 2020-220-08-5835).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Wamser C., Lykossov V.N. On the friction velocity during blowing snow // Contributions to Atmospheric Physics. — 1995. — Vol. 68, no. 1. — P. 85–94.

Microclimatic features of Moscow city centre and the influence of green infrastructure: a case study of the 2010 heatwave

Kospanov A.A., Konstantinov P.I.

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

E-mail: kospanov.alen@gmail.com, kostadini@mail.ru

As the urban population continues to grow it is vital to estimate, how comfortable the people feel when extraordinary meteorological conditions occur. To use all the expensive land, the city planners have been destroying the trees and green infrastructure in the city. This work explores the effects of green infrastructure on thermal comfort indexes in a case study of a heatwave in Moscow in 2010. Moreover, the microclimatic features of a densely built-up city center with large bodies of water and areas with trees are also being explored.

The ENVI-met is a microclimate model that was developed in the university of Mainz. The model has been used to model various aspects of city microclimates both in Russia and abroad. For the case in Russia, it was used to model the extreme wind speed distribution. Moreover, the rich possibilities to include all city features can be utilized to model the temperatures.

For the case of a heat wave in Moscow in 2010 the simulation area was centered around the Balchug station. It included built-up areas, parks with high trees and a river. The modelling period encompassed 2 hours (14:30-16:30) on the hottest day of 29th of July when the temperatures reached 38,5°C. In order to make the model, the OSM data was used. The work is the first attempt to create a microclimatic ENVI-met simulation for Moscow city center. OSM is a universally available GIS dataset, however it included some missing values for building heights. Missing values were added after in-situ observations.

There were two runs – one with trees and one without them. The required time was approximately 24 hours per run. The modeling architecture used was AMD Ryzen 5 3600 Hexa-Core, Simultaneous Multithreading, RAM: 64 GB DDR4, Hard drive: 2 x 512 GB NVMe SSD, (software-RAID 1). The model had a spatial resolution of 5 meters, which allowed to replicate the shadow effects of buildings and the street canyons in the city. It is vital to estimate the features of the air circulation in the streets. Poor air circulation promotes the increase of pollution levels, which negatively impacts the life quality of the city dwellers. For the purpose, several variables were used. Firstly, the wind speeds themselves were analyzed with the detection of the poorly ventilated areas. Secondly, the turbulent energy and the flow divergence was estimated to explore the mixing possibilities in the layers closest to surface.

The results of the runs showed a drastic change in key meteorological parameters. As such, the PET index has seen a decrease of 3,5 degrees under the tree canopy which made the difference between strong and extreme heat stress. The air temperature decreased by up to 6,5 degrees. The effects of the river were underrepresented due to the model specifics.

It is possible to use ENVI-met as a pair with the WRF model in a hierarchical modelling experiment where the WRF is downscaling a reanalysis or a weather forecast down to a few hundreds of meters and then the ENVI-met produces a detailed output with resolutions of up to 5 meters or less.

- This work was supported by Russian Ministry of Education and Science (2020-220-08-5835).

Микроклиматические особенности центра города Москва и влияние зеленой инфраструктуры на примере волны жары 2010 года

Коспанов А.А., Константинов П.И.

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

E-mail: kospanov.alen@gmail.com, kostadini@mail.ru

Для городского населения в структуре мирового населения продолжает расти. Это вызвано и притоком в город из не урбанизированных территорий, и естественным ростом внутри города, а значит все больше и больше людей проживает на территории городской застройки. Для города характерны совершенно особенные микроклиматические характеристики, связанные с изменением параметров теплоемкости, альбедо, а также геометрии пространства при застройке. Для комфортного проживания в городе жизненно необходимо оценить показатели метеорологической комфортности при экстремальных метеорологических условиях.

Отдельное внимание заслуживает зеленая инфраструктура в городе. Здесь под зеленой инфраструктурой понимаются все парки, деревья и иные зеленые насаждения в городе, участвующие в формировании его микроклимата. Как и в любом динамично развивающемся городе, за последние годы в Москве положение, состояние и площадь зеленой инфраструктуры значительно менялось. Намечился тренд на уменьшение количества зеленой инфраструктуры в центре города. Это не может не влиять на комфортность, особенно в условиях экстремальной жары.

Для изучения микроклиматических особенностей города была выбрана центральная часть города Москва вокруг станции Балчуг. Выбор данной территории был обусловлен наличием метеостанции для получения начальных и граничных метеорологических условий, а также наличием как застройки с разными высотами и разной шириной улиц, так и зеленых насаждений достаточно большой площади (деревья внутри и вокруг Кремля, Болотная площадь).

В качестве данных для создания модели были использованы открытые данные сервиса Open Street Map. Данный сервис предоставляет подробную информацию об объектах города. Для выбранного полигона имелись здания без обозначения этажности. Отсутствующие данные были получены после личных наблюдений. Была произведена оценка высот зданий, информацию о высоте которых невозможно было получить из базы данных.

Далее на основе данных OSM в программе QGIS было проведено выделение слоев с разными объектами. Отдельное внимание уделялось уточнению расположения и размеров полигонов, занятых древесной растительностью. Была создана модель территории с горизонтальным разрешением 5 метров, на её основе проводилось само микроклиматическое моделирование. Размеры области моделирования составили 1960*1380 метров.

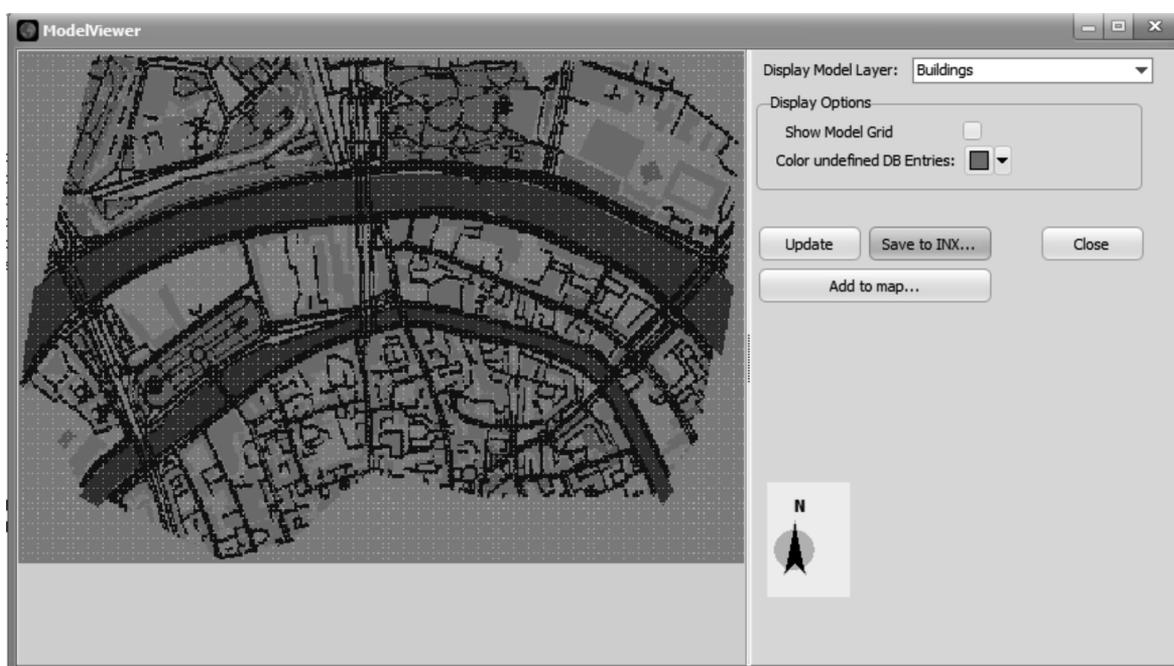


Рис. 1. Схема полученной области после обработки в приложении Monde.

Влияние зеленой инфраструктуры на комфортность города, а также особенности внутренней термической циркуляции наиболее сильно проявляются в экстремально высокие температуры. Именно поэтому для моделирования был выбран день с самой высокой зафиксированной температурой в Москве. Рекорд температуры для города Москва был установлен 29 июля 2010 года и составил +38,2 градуса по данным станции ВДНХ. В 15 часов температура воздуха на станции Балчуг составила +38,5 градусов.

Анализ микроклиматических особенностей территории и влияния зеленой инфраструктуры на показатели комфортности проводился с использованием микрометеорологического комплекса ENVI-met. Это трехмерная негидростатическая микроклиматическая модель. ENVI-met отличается от мезомасштабных и глобальных метеорологических моделей своим высоким разрешением в пространстве и времени. Характерное разрешение при микроклиматическом моделировании имеет порядок от 1 до 10 метров. Важное преимущество ENVI-met – возможность очень точного задания особенностей территории – здания задаются вплоть до окна. Можно учитывать материалы стен, толщину и температуру внутри здания. Модель учитывает энергообмен зданий с атмосферой.

Также в модели возможно очень подробно задавать особенности деревьев. Например, можно вручную задавать структуру и форму крон, проницаемость и сезонность опадания листвы. В дальнейшем это будет учтено при расчете радиационного нагрева и влагообмена с атмосферой. В целом модель производит расчет взаимодействий между почвой, растительностью, застройкой и атмосферой. Основными диагностическими переменными являются температура, влажность воздуха, скорость и направление ветра. Расчет скорости и направления ветра осуществляется через модель турбулентной энергии.

Моделирование охватывало 2 часа – с 14:30 до 16:30 по московскому времени. Серия экспериментов на вычислительной архитектуре AMD Ryzen 5 3600 Hexa-Core, Simultaneous Multithreading, RAM: 64 GB DDR4, Hard drive: 2 x 512 GB NVMe SSD, (software-RAID 1) потребовала в сумме порядка 48 часов. Было произведено 2 запуска модели. Контрольный запуск производился с учетом реального наличия и распределения зеленой инфраструктуры. Второй запуск проводился для модели, из которой были полностью исключены полигоны древесного покрова.

Результаты моделирования можно оценить по нескольким особенностям полученных данных.

Во-первых, были получены ожидаемые эффекты городской застройки. Это ветровая тень на подветренной стороне здания и увеличение скорости ветра на углах зданий. Также стоит отметить верное воспроизведение тени – на теневых участках температуры были на несколько градусов ниже, чем на свету.

Во-вторых, было получено охлаждение под деревьями и повышение влажности, что отражает эффекты пропускания крон и эвапотранспирации.

По результатам моделирования основных метеорологических характеристик был также вычислен индекс PET – физиологически эквивалентная температура. При сравнении результатов двух экспериментов для выделения влияния зеленой инфраструктуры на комфортность в городе были получены следующие закономерности:

- разница температуры воздуха на уровне 1,5 метра над поверхностью между экспериментом с деревьями и без деревьев составила 6,65 градуса Цельсия. Это прямой эффект тени деревьев
- абсолютная влажность под деревьями была выше на 2,51 г/кг, нежели в том же месте, но при моделировании без деревьев
- температурный контраст, возникший из-за деревьев, привел к изменению направления и скорости ветра
- индекс PET показывает меньшее изменение – под деревьями он на 3,5 градуса меньше, чем без них.

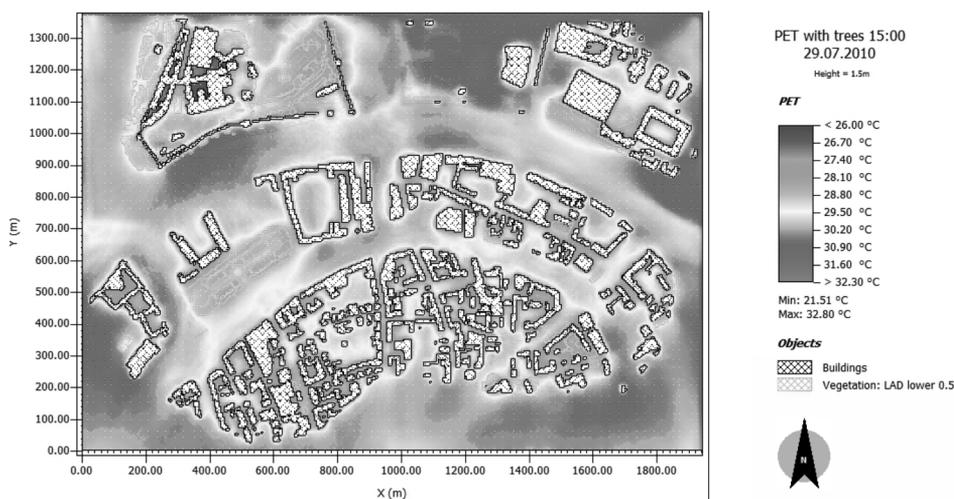


Рис.2. Карта индекса PET на 15ч при моделировании с деревьями.

Различие в разницах температур и индекса PET можно объяснить повышением влажности под деревьями из-за эвапотранспирации. В условиях жары повышенная влажность препятствует испарению пота, что затрудняет естественное охлаждение тела.

В условиях волны жары территория моделирования испытывала сильный тепловой стресс, однако под деревьями он снижался до умеренного.

Важным недостатком модели ENVI-met является отсутствие задания взаимодействия водных объектов с атмосферой. Поэтому невозможно было получить охлаждающий, ветровой и влажностный эффект от крупного водного объекта на территории – реки Москва.

Работа предполагает значительное дальнейшее развитие в двух направлениях.

Во-первых, необходимо моделировать дополнительные временные промежутки. Можно рассмотреть ночные особенности температур и ветра в городе. Также можно рассматривать и экстремально холодные периоды для анализа холодной комфортности и эффекта от нагрева зданий.

Во-вторых, можно использовать и другие полигоны для исследования. Новые разработки иерархического моделирования делают такую задачу решаемой и применимой для других целей, например, для оценки ветровой безопасности в оперативном режиме.

- Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор № 2020-220-08-5835).

Evaluation of ventilation conditions and bioclimatic comfort conditions in Moscow at the microclimatic level, depending on different types of the buildings structure

¹Perkhurova A.A., ¹Samsonov T.E., ²Varentsov M.I., ¹Kospanov A.A., ¹Konstantinov P.I.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

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

E-mail: an.perkh@gmail.com

Moscow is a large metropolis with a large number of land transport and industries that emit aerosols into the atmosphere, including those harmful to the human body. Unfavorable thermal conditions and a large amount of harmful impurities in the air have an extremely negative effect on the health of the population. For such a large city as Moscow, where more than 11 million people live, the study of these indicators plays a significant role.

To study the ventilation conditions and bioclimatic comfort, an experiment was set up to consider 8 periods with different weather conditions in order to obtain a more complete picture of the distribution of areas with unfavorable conditions.

To calculate the trajectories of particles, wind flows, temperature distribution, a three-dimensional non-hydrostatic microclimatic model ENVI-met [1] was used. It was designed to simulate meteorological fields in urban environments with a typical resolution of 0.5 to 10 meters.

The territorial domain of the center of Moscow (Balchug) was taken as the study area. The center of Moscow is characterized by different underlying surfaces. Especially for the territory studied in this work, an LCZ [2] distribution map was obtained with a step of 50 meters x 70 meters. For further analysis of ventilation conditions, homogeneous areas of local climatic zones were selected: LCZ2, LCZ4, LCZ5, LCZ8, LCZ15.

As the initial data, it was decided to use the meteorological values for June 2019 and January 2017 as one of the hottest and coldest periods, respectively, in recent years. For the selected two months, an analysis was carried out in order to identify heat waves and cold waves. Further, in each of the periods, the terms were selected that meet the following criteria:

1. Cold wave, calm day (01/08/2017)
2. Cold wave, windy day (01/07/2017)
3. Cold wave, calm night (01/06/2017 - 01/07/2017)
4. Cold wave, windy night (01/08/2017 - 01/09/2017)
5. Heat wave, calm day (06/20/2019)
6. Heat wave, windy day (06/18/2019)
7. Heat wave, calm night (tropical night) (06/07/2019 - 06/08/2019)
8. Heat wave, windy night (tropical night) (06/18/2019 – 06/19/2019)

To simulate summer conditions, we used the calculation data of the regional COSMO model with a time step of 1 hour. To simulate winter conditions, we took archived meteorological data from the site rp5.ru.

The results of winter and summer wind experiments showed that local decreases in wind speed, as expected, are mainly concentrated in yards, between buildings. The lowest speeds, even on days with strong winds, are observed in square courtyards - buildings closed on all 4 sides. Large values of wind speed (more than 2.5 m/s) are mainly confined to either narrow passages between houses, and the passage is directed perpendicular to the main stream (the effect of an urban canyon), or to the corner of a building bordering an open area (for example, a water body). Wind speed enhancement effects are only observed at high background values.

On the basis of the previously selected homogeneous LCZ in the considered area, the wind speed was averaged in the experimental periods. The results are shown in Table 1.

Table 1. Averaged wind speed values for different LCZ in different experimental periods.

LCZ	winter				summer			
	night		day		night		day	
	windy	calm	windy	calm	windy	calm	windy	calm
Date	06.01-07.01	08.01-09.01	07.01	08.01	18.06-19.06	07.06-08.06	18.06	20.06
2	1,36	0,55	0,96	0,54	1,2	0,73	2,15	1,64
4	1,61	0,64	1,21	0,64	1,41	0,86	2,51	1,91
5	1,37	0,56	0,98	0,55	1,1	0,74	1,97	1,66
8	1,47	0,58	1,08	0,61	2,6	0,77	2,2	1,73
15	1,73	0,68	1,28	0,69	1,45	0,91	2,59	2,05

From the table we can highlight the most blown area - LCZ 15. On the map, it corresponds to the Zaryadye park. The average background of the wind there is high in all the periods under study, which means that the rate of dispersion of particles is higher. It is worth highlighting LCZ 4, in which high wind speeds are also observed. The most vulnerable areas to accumulation of pollution are LCZ 2 (dense buildings) and LCZ 5.

Also, from a bioclimatic point of view, during the summer heat wave during the day, the most comfortable area will be the one where the wind speed is higher - LCZ 15 (Table 2). At night, especially in the presence of wind, the population in the center of Moscow finds itself in a zone of slight cold stress ($PET \sim 13^\circ$). During the day, with light winds, very high values of the index are observed, which correspond to extreme heat stress.

Thus, from both aspects considered (wind speed and bioclimatic comfort), LCZ 15 is the most healthy area of the center of Moscow.

Table 2. Average values of the PET thermal comfort index for different LCZs in different experimental periods.

LCZ	summer			
	night		day	
	windy	calm	windy	calm
	03h 19.06	03h 08.06	15h 18.06	15h 20.06
2	13,35	18,39	37,35	43,67
4	13,31	18,19	37	42,04
5	13,77	18,59	37,6	42,11
8	13,04	18,19	39,22	45,33
15	12,59	18,08	37,58	43,44

REFERENCES:

1. Huttner, S., 2012. Further Development and Application of the 3D Microclimate Simulation ENVI-met. University of Mainz, Mainz.
2. Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies, Bulletin of the American Meteorological Society, 93(12), 1879-1900.

Оценка условий вентилирования и биоклиматической комфортности в Москве на микроклиматическом уровне в зависимости от структуры застройки

¹Перхурова А.А., ¹Самсонов Т.Е., ²Варенцов М.И., ¹Коспанов А.А., ¹Константинов П.И.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, НИВЦ, Москва, Россия

E-mail: an.perkh@gmail.com

Москва – это крупный мегаполис с большим количеством наземного транспорта и производств, которые выбрасывают в атмосферу аэрозоли, в том числе вредные для человеческого организма. Количество частиц в воздухе определяется источниками и стоком. У источников есть суточный ход, например, автомобильный транспорт чаще используется населением с утра и вечером (во время передвижения к месту работы и обратно). Сток же определяется внешними факторами – условиями циркуляции, накладываемыми на разнородную застройку, присущую Москве. В пределах одного города наблюдается плотно и редко застроенная местность, высотки и одноэтажные дома, пруды и парки, реки, набережные, каналы и сложные дорожные развязки. В связи с этим условия переноса аэрозолей и биоклиматические показатели (индексы термического комфорта) очень неоднородны. Неблагоприятные термические условия и большое количество вредных примесей в воздухе крайне негативно сказываются на здоровье населения. Для такого большого города, как Москва, где проживает более 11 миллионов человек, изучение данных показателей играет значимую роль.

Для изучения условий вентилирования и биоклиматической комфортности был поставлен эксперимент по рассмотрению 8 периодов с различными погодными условиями для того, чтобы получить более полную картину распределения участков с неблагоприятными условиями.

Для расчетов траекторий частиц, потоков ветра, распределения температуры была использована трехмерная негидростатическая микроклиматическая модель ENVI-met [1]. Она была разработана для моделирования метеорологических полей в условиях городской застройки с характерным разрешением от 0,5 до 10 метров. В своих расчетах ENVI-met учитывает влияние зданий, растительности, характеристики различных поверхностей и почв на потоки.

В качестве исследуемой местности был взят территориальный домен центра Москвы (Балчуг). Центр Москвы характеризуется различной подстилающей поверхностью: здания, река, дороги, парки (Зарядье, Болотная площадь), а также разной плотностью застройки и высотой объектов.

Для описания различной структуры подстилающей поверхности были разработаны локальные климатические зоны (Local Climate Zones - LCZ) [2]. Подход LCZ подразумевает, что урбанизированные территории можно разделить на 17 категорий (10 типов застройки и 7 типов естественных поверхностей). Каждая категория уникальна в своей комбинации структуры поверхности, ее типов и видов деятельности человека. Данная классификация позволяет сравнивать климатические условия в разных городах в рамках одной LCZ.

Специально для исследуемой в данной работе территории была получена карта распределения LCZ с шагом 50 метров x 70 метров (рисунок 1). По пестроте карты можно заметить как сильно варьирует тип подстилающей поверхности даже на микромасштабе (в пределах одного квадратного километра). Для дальнейшего анализа условий вентилирования были выбраны однородные участки локальных климатических зон: LCZ2, LCZ4, LCZ5, LCZ8, LCZ15 (показаны на рисунке).



Рисунок 1. Карта распределения LCZ на территории центра Москвы (разрешение 50 метров x 70 метров).

В качестве начальных данных было решено использовать метеорологические значения за июнь 2019 года и январь 2017 года как одни из самых жарких и холодных, соответственно, периодов за последние годы.

По выбранным двум месяцам был проведен анализ, с целью выявления волн жары и волн холода. Далее в каждом из периодов были отобраны сроки, удовлетворяющие следующим критериям:

1. Волна холода, день, безветрено (08.01.2017)
2. Волна холода, день, ветрено (07.01.2017)
3. Волна холода, ночь, безветрено (06.01.2017 - 07.01.2017)
4. Волна холода, ночь, ветрено (08.01.2017 – 09.01.2017)
5. Волна жары, день, безветрено, ясно (20.06.2019)
6. Волна жары, день, ветрено (18.06.2019)
7. Волна жары, ночь (тропическая ночь), штиль (07.06.2019 – 08.06.2019)
8. Волна жары, ночь (тропическая ночь), ветрено (18.06.2019 – 19.06.2019)

Таким образом, картина вентиляции и распределения термического стресса по выбранным периодам будет наиболее полная с точки зрения максимальных различий.

По выбранным месяцам была скачана архивная метеорологическая информация с сайта gr5.ru. Далее данные анализировали с целью поиска волн жары и холода. Волна жары (холода) определялась как устоявшиеся более 5 дней тепловые (холодовые) аномалии температуры более 5°C по сравнению со среднеклиматической максимальной (минимальной) температурой для данного месяца. По итогам анализа в январе была обнаружена одна волна холода и в июне 2 волны жары.

Минимальные, средние и максимальные значения температуры, а также средняя скорость ветра за описанные периоды представлены в таблице 1.

Таблица 1. Минимальные, средние, максимальные значения температуры и средняя скорость ветра в периоды волн жары и холода.

	зима (волна холода 05.01-09.01.2017)				лето (волна жары 05.06-12.06, 18.06-23.06.2019)			
	ночь		день		ночь		день	
	с ветром	без ветра	с ветром	без ветра	с ветром	без ветра	с ветром	без ветра
Дата	06.01-07.01	08.01-09.01	07.январь	08.январь	18.06-19.06	07/06-08/06	18.июнь	20.июнь
средняя t°	-26,7	-20,9	-23,5	-20,5	21,9	24,9	25,7	29,9
Макс t°	-26,1	-20	-22,1	-19	24,7	27,4	26,4	30,5
Мин t°	-27,5	-21,6	-25,1	-23,2	20,1	23	24,7	29,2
Средняя скорость ветра	3	1	2	1	2	0	3	1

Для моделирования летних условий использовались данные расчета региональной модели COSMO с шагом по времени 1 час. Для ночных экспериментов брались сроки 01, 02, 03, 04 и 05 ч, для дневных – 13, 14, 15, 16, 17 ч. Далее для инициализации начальных условий составлялся файл форсинга (forcing file) с метеоданными с шагом по времени 30 минут (для расчета значений между сроками использовалась линейная интерполяция). Для моделирования зимних условий были взяты архивные метеорологические данные с сайта gr5.ru. Для ночных экспериментов брались сроки 00, 03, и 06 ч, для дневных – 12, 15, 18 ч. Для создания файла форсинга также было необходимо интерполировать данные между сроками.

При помощи специализированных утилит, входящих в пакет программ ENVI-met были рассчитаны значения индексов комфортности (biomet), а также были визуализированы результаты моделирования (Leonardo).

Результаты зимних экспериментов показали, что локальные снижения скорости ветра, как и предполагалось, в основном сконцентрированы во дворах, между зданиями. Самые низкие скорости даже в дни с сильным ветром отмечаются в квадратных дворах – закрытых со всех 4 сторон зданиями. Большие значения скорости ветра (более 2,5 м/с) в основном приурочены либо к узким проходам между домами, причем проход направлен перпендикулярно основному потоку (эффект городского каньона), либо к углу здания, граничащем с открытой местностью (например, водный объект). Эффекты усиления скорости ветра наблюдаются только при высоком фоновом значении.

Летняя картина как ветра, так и индексов комфортности получилась очень разнообразная. Высокие значения PET днём отмечаются даже несмотря на высокую скорость ветра. В волну жары, днем, самы-

ми опасными с точки зрения влияния на здоровье участками выступают замкнутые между зданиями небольшие дворы.

Локальные максимумы и минимумы в скорости ветра приурочены к тем же зонам, что и в зимние эксперименты. Однако, можно заметить, что чем выше фоновые значения потока, тем более ярко выражены зоны усиления скорости ветра в городских каньонах и в зонах, где поток натывается на угол здания.

По выбранным заранее однородным LCZ на рассматриваемой территории было проведено осреднение скорости ветра в экспериментальные периоды. Результаты приведены в таблице 2. Благодаря данному анализу можно выявить наиболее уязвимые типы урбанистической застройки к скоплению вредных частиц.

Таблица 2. Осредненные значения скорости ветра по разным LCZ в различные экспериментальные периоды.

LCZ	зима				лето			
	ночь		день		ночь		день	
	с ветром	без ветра	с ветром	без ветра	с ветром	без ветра	с ветром	без ветра
Дата	06.01-07.01	08.01-09.01	07.январь	08.январь	18.06-19.06	07/06-08/06	18.июнь	20.июнь
2	1,36	0,55	0,96	0,54	1,2	0,73	2,15	1,64
4	1,61	0,64	1,21	0,64	1,41	0,86	2,51	1,91
5	1,37	0,56	0,98	0,55	1,1	0,74	1,97	1,66
8	1,47	0,58	1,08	0,61	2,6	0,77	2,2	1,73
15	1,73	0,68	1,28	0,69	1,45	0,91	2,59	2,05

Из таблицы можем выделить наиболее продуваемый участок – LCZ 15. На карте он соответствует парку Зарядье. Средний фон ветра там высокий во все исследуемые периоды, значит и скорость рассеивания частиц выше. Стоит выделить LCZ 4, в которой также наблюдаются большие значения скорости ветра. Самыми уязвимыми участками к накоплению загрязнений являются LCZ 2 (плотная застройка) и LCZ 5.

Также с биоклиматической точки зрения в летнюю волну жары днём наиболее комфортным районом выступит тот, где скорость ветра выше - LCZ 15 (таблица 3). Ночью же, особенно при наличии ветра, население в центре Москвы оказывается в зоне небольшого холодового стресса (PET ~ 13°). Днём при слабом ветре наблюдаются очень большие значения индекса, которые соответствуют экстремальному тепловому стрессу. Именно в эти погодные условия заметен наибольший контраст между разными LCZ (от 42° до 45°), потому что перемешивание воздуха ослаблено.

Таблица 3. Осредненные значения индекса термического комфорта PET по разным LCZ в различные экспериментальные периоды.

LCZ	лето			
	ночь		день	
	с ветром	без ветра	с ветром	без ветра
	03ч 19.06	03ч 08.06	15ч 18.06	15ч 20.06
2	13,35	18,39	37,35	43,67
4	13,31	18,19	37	42,04
5	13,77	18,59	37,6	42,11
8	13,04	18,19	39,22	45,33
15	12,59	18,08	37,58	43,44

Таким образом, с обоих рассматриваемых аспектов (скорость ветра и биоклиматическая комфортность) LCZ 15 – самый благоприятный для здоровья район центра Москвы.

■ Исследование выполнено при поддержке проекта РФФИ № 17-77-20070 .

ЛИТЕРАТУРА:

1. Huttner, S., 2012. Further Development and Application of the 3D Microclimate Simulation ENVI-met. University of Mainz, Mainz.
2. Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies, Bulletin of the American Meteorological Society, 93(12), 1879-1900.

Diurnal variability of ultrafine fraction aerosol in the atmosphere of southeastern coast of Lake Baikal (Boyarsk st.) in summer 2020

Tsydyrov V.V., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Dementeva A.L., Balzhanov T.S.

Institute of Physical Materials SB RAS, Ulan-Ude, Russia

E-mail: tsydyrov@inbox.ru

The results of an experimental study of ultrafine aerosol characteristics in the atmosphere of southeastern coast of Lake Baikal. To study the microphysical parameters of aerosol in the surface air layer, the number of aerosol particles smaller than 0.2 μm was measured with a diffuse aerosol spectrometer DAS 2702 M (OOO "AeroNanoTech", Moscow) at the Boyarsky stationary site (51°83'N, 106°06'E) of IPMS SB RAS in summer 2020. Aerosol was sampled at an altitude of 2 m above the land via Teflon pipes. Meteorological and turbulent parameters were simultaneously measured using acoustic AMK-03. The 3.02 P-A, P-310A, C-310A chemiluminescent gas analyzers (OPTEK Inc., St. Petersburg) were used to measure the concentrations of ozone, nitrogen oxides, and sulfur dioxide.

The general property of the diurnal variations in the number concentration of ultrafine aerosol in the Baikal coastal zone is an increase in the concentration in the afternoon, daytime and evening hours. In the afternoon, there is a decrease in the total counting concentration of both highly dispersed particles ($0.005 < d < 0.2 \mu\text{m}$) and the submicron fraction of the aerosol ($0.2 < d < 10 \mu\text{m}$).

In the morning and afternoon, the number of nucleation-mode particles increases because breeze circulation intensification, which promotes transport of anthropogenic admixtures from the lake and activation of photochemical and catalytic reactions between gaseous impurities. In evening hours, the number concentration of ultrafine aerosol increases due to the formation of temperature inversion and accumulation of admixtures in the surface air layer. When the wind changes direction with land breeze formation, the fine aerosol concentration decreases. High aerosol concentrations on the coast of Lake Baikal are observed mainly in calm conditions.

The average value of the concentrations of the highly dispersed aerosol fraction (2646 particles/ m^3) measured during the smoke emission periods from 17 to 25 July exceeds by 2.2 times the average values of the concentrations (1027 particles/ m^3) observed during the period of weakening of the influence of smoke emissions (13.08-10.09.2020) from forest fires in neighboring regions. The average value of the submicron fraction concentration in both cases did not exceed 60 particles/ m^3 . It should be noted that the Boyarsky station is a "background" area, remote from industrial centers and less susceptible to anthropogenic influence.

In the formation of secondary aerosols, i.e. aerosols formed directly in the atmosphere, the most important role is played by nitrogen oxides, sulfur and ozone. As a result, the temporal variations of aerosol-forming gases are of interest as an indicator of the aerosol formation process. The number concentration of highly dispersed particles is closely related to the concentration of nitrogen dioxide NO_2 , and less weakly to the concentration of ozone O_3 .

- The report study was funded by RFBR, project number 19-05-50005 «Micromir» and partly supported by budget funds for IPMS SB RAS within the State Assignment № 0270-2021-0005 in organization of expedition on Lake Baikal.

Суточный ход микродисперсной фракции аэрозоля в атмосфере юго-восточного побережья оз. Байкал (стационар «Боярский») летом 2020 г.

Цыдыпов В.В., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Дементьева А.Л., Бальжанов Т.С.

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия

E-mail: tsydyrov@inbox.ru

Дисперсный состав и концентрации аэрозольных частиц являются важнейшими параметрами атмосферного аэрозоля, определяющими степень его влияния на окружающую среду и изменение климата. В последние годы все больше исследований направлены на изучение аэрозолей нанометрового диапазона размеров, в которой сосредоточено основное количество находящихся в атмосфере частиц (его счетная концентрация). Основные результаты работ в этой области представлены в обзорной статье.

рах [1,2]. Результаты экспериментальных исследований временной изменчивости микродисперсного аэрозоля в разных географических регионах приведены в [3-6]. Тем не менее, сведения о пространственно-временной динамике микродисперсной фракции аэрозоля остаются все еще крайне недостаточными. Это обусловлено значительной изменчивостью микрофизических, химических, оптических характеристик микродисперсного аэрозоля в зависимости от многих атмосферных процессов, в которых участвует аэрозоль. Поэтому исследование атмосферного аэрозоля, его микродисперсной фракции остается актуальной задачей, решение которой позволит значительно уменьшить неопределенность учета радиационных характеристик в климатических моделях. С другой стороны, данные натурных измерений важны для понимания процессов его образования и трансформации в реальной атмосфере.

В данной работе анализируются результаты экспериментального исследования счетной концентрации микродисперсного аэрозоля ($d < 200$ нм) на юго-восточном побережье оз. Байкал.

Для изучения микрофизических характеристик аэрозоля были проведены измерения счетной концентрации аэрозольных частиц на научном стационаре «Боярский» в летний период 2020 г. Научный стационар «Боярский» расположен в 160 км от г. Улан-Удэ на юго-восточном побережье оз. Байкал, имеет координаты $51^{\circ}84'$ с.ш., $106^{\circ}06'$ в.д. (рис. 1).

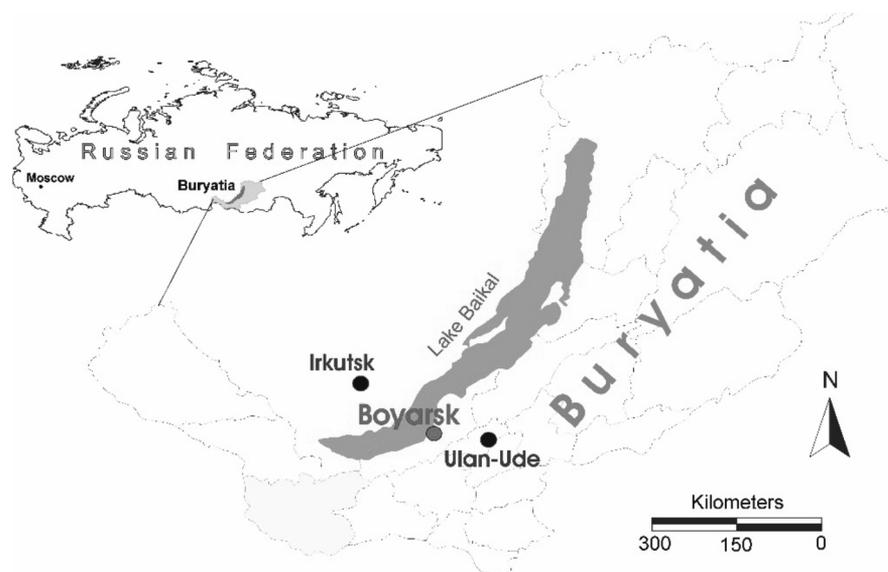


Рис. 1. Схема расположения пункта наблюдения (научный стационар «Боярский» ИФМ СО РАН).

Измерения проводились с помощью диффузионного аэрозольного спектрометра ДАС 2702 М (ООО «АэроНаноТех», г. Москва) [7]. Пределы допускаемой относительной погрешности измерений размеров аэрозольных частиц составляет $\pm 15\%$. Время одного измерения от 1 до 3 мин, в зависимости от условий измерений. Спектрометр имеет 2 режима работы: режим измерений параметров аэрозольных частиц в размерном диапазоне от 0,005 до 0,2 мкм (40 диапазонов с шагом 5 нм); режим измерений параметров аэрозольных частиц в размерном диапазоне от 0,2 до 10 мкм (12 каналов).

Отбор проб аэрозолей осуществлялся на высоте 2 м над уровнем Земли с использованием тефлоновых трубок. Одновременно выполнялись измерения метеорологических и турбулентных параметров атмосферы с помощью акустического метеорологического комплекса АМК-03, а также измерения концентрации озона (O_3), окислов азота (NO_x) и диоксида серы (SO_2) с использованием хемилюминесцентных газоанализаторов (ЗАО «ОПТЭК»): диоксид серы С-310, окислы азота Р-310, озон 3-02 П-А. Для контроля погрешности измерений осуществлялась калибровка газоанализаторов с помощью калибратора «Mod. 8500 Monitor Labs.».

На рис. 2 представлен суточный ход среднечасовых значений общей счетной концентрации аэрозоля высокодисперсной фракции (ВДА, $0,005 < d < 0,2$ мкм) и субмикронной фракции (СМА, $0,2 < d < 10$ мкм), усредненные за период измерений (17.07-25.07.20) и (13.08-10.09.2020).

Общей закономерностью суточного хода счетной концентрации аэрозоля в атмосфере прибрежной зоны озера Байкал является наличие трех максимумов: ночью, в утренние и вечерние часы. В послеполуденные часы наблюдается снижение общей счетной концентрации как высокодисперсных частиц, так субмикронной фракции аэрозоля. В утренние и дневные часы наблюдается рост числа частиц нуклеационной моды за счет усиления бризовой циркуляции в этот период, способствующих переносу антропогенных примесей с акватории озера и активизации фотохимических и каталитических реакций между примесными газами. В вечерние часы увеличение счетной концентрации микродисперсного аэрозоля связано с формированием инверсии температуры и накоплением примесей в приземном слое атмосферы.

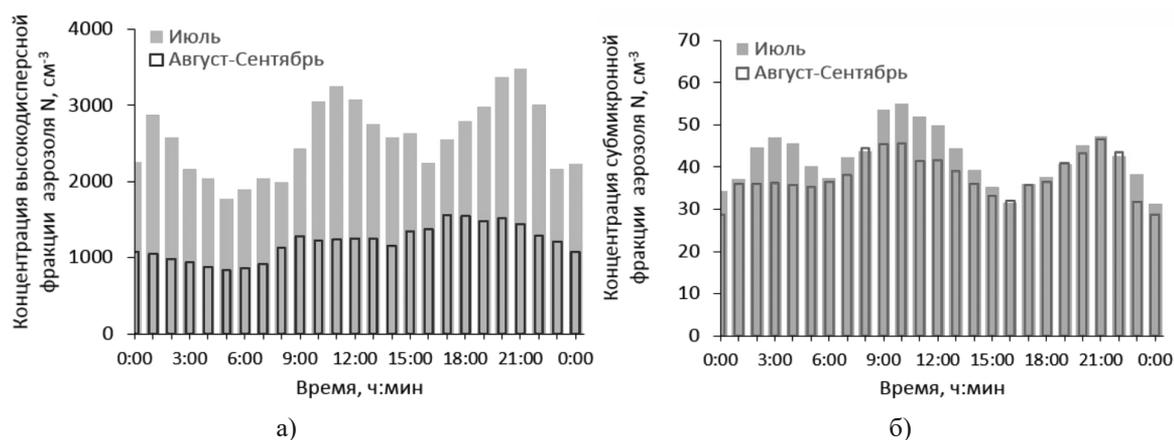


Рис. 2. Усредненный суточный ход общей счетной концентрации аэрозоля в атмосфере на побережье оз. Байкал (ст. Боярский): а) высокодисперсной фракции аэрозоля (ВДА); б) субмикронной фракции аэрозоля (СМА).

При смене направления ветра в условиях формирования берегового бриза и снижения доли антропогенных примесей концентрация микродисперсного аэрозоля снижается. Высокие концентрации аэрозоля на побережье Байкала наблюдаются в основном в штилевых условиях. Как видно из рис. 2а, среднее значение концентраций высокодисперсной фракции аэрозоля (2646 частиц/м^3), измеренных в периоды дымовой эмиссии с 17 по 25 июля превышает в 2,2 раза среднее значения концентраций ВДА (1027 частиц/м^3), наблюдавшихся в период ослабления влияния дымовых выносов с очагов лесных пожаров в соседних регионах. Среднее значение концентрации субмикронной фракции в обоих случаях не превышало 60 частиц/м^3 . Следует отметить, что ст. Боярский является «фоновой» территорией, удаленной от промышленных центров и в меньшей степени подверженной антропогенному влиянию.

В процессах образования вторичных аэрозолей, т.е. аэрозолей, образующихся непосредственно в атмосфере, важнейшую роль играют окислы азота, серы и озон. В процессах окисления различных соединений азота и серы активно участвуют молекулы озона [8], причем вариации содержания аэрозолеобразующих газов неоднозначно связаны с вариациями содержания аэрозолей [9]. Вследствие этого временные вариации аэрозолеобразующих газов представляют интерес как показатель процесса аэрозолеобразования. На рис. 3 представлены графики суточного хода малых газовых примесей (диоксид серы SO_2 , диоксид азота NO_2 , приземный озон O_3) - предшественников образования вторичных аэрозолей. Установлена тесная связь счетной концентрации высокодисперсных частиц с концентрацией диоксида азота NO_2 и менее слабая с концентрацией озона O_3 .



Рис. 3. Суточный ход усредненных десятиминутных значений общей счетной концентрации высокодисперсной фракции аэрозоля, диоксида азота NO_2 , озона O_3 и диоксида серы SO_2 на ст. Боярский (13.08-10.09.2020).

Сравнивая с измерениями предыдущих лет 2017-2019 гг., можно сказать, что поведение общей счетной концентрации микродисперсного аэрозоля в течение суток достаточно типично: наличие ночного минимума, выраженного утреннего и вечернего максимума (рис. 4). В то же время, летом 2019 г. из-за крупномасштабных лесных пожаров в Республике Бурятия, Иркутской области, Красноярском крае и Якутии в период измерений наблюдались повышенные концентрации аэрозолей, почти в 2 раза превышающие уровни, наблюдаемые в 2017-2018, 2020 гг.

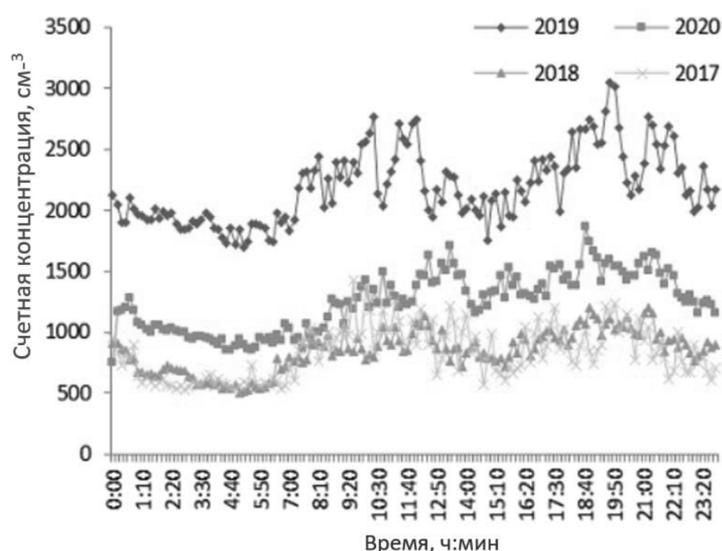


Рис. 4. Усредненный суточный ход общей счетной концентрации микродисперсной фракции аэрозоля за летний период 2017–2020 гг.

- Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-05-50005 «Микромир» и при частичной поддержке в рамках Госзадания № 0270-2021-0005 в части обработки экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кондратьев К.Я. Аэрозоль и климат: Современное состояние и перспективы разработок. 1. Образование, свойства аэрозоля и их трансформация // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19, № 1. С. 5–22.
2. Андреева И. С. Аэрозоли Сибири. Новосибирск, СО РАН, 2006, 648 с.
3. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Толмачев Г.И. Результаты климато-экологического мониторинга на TOR-станции. Ч.3. Атмосферный аэрозоль // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8, № 8. С. 1185–1190.
4. Zayakhanov A.S., Zhamsueva G.S., Sungrapova I.P. and Tsydypov V.V. Features of Diurnal Variability of Ultrafine Aerosol in the Air of the Baikal Coastal Zone and Arid Zone of Mongolia. // Atmospheric and Oceanic Optics, 2018, V. 31. No. 03. pp. 257–262.
5. Козлов А.С., Анкилов А.Н., Бакланов А.М., Веселовский Е.Д., Власенко А.Л., Еременко С.И., Малышкин С.Б., Пашенко С.Э., Шитов А.В. Исследование характеристик аэрозоля Телецкого озера // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11, № 6. С. 640–644.
6. Куценогий П.К. Концентрация и спектр размеров атмосферных аэрозолей Сибири // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7, № 8. С. 1055–1058.
7. Julanov Yu.V., Lushnikov A.A., Zagaynov V.A. Diffusion aerosol spectrometer // Atmospheric Research. 2002. V. 62. P. 295–302.
8. Hidy, G. M. Assessment of Airborne Particles. Thomas, Springfield, Illinois, p.81.
9. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. – 368 с.

Extratropical cyclones over North Atlantic based on ERA-5 and NCEP–NCAR reanalysis for 1979–2020

¹Viazilova N., ²Viazilov A.

¹RIHMI-WDC, Obninsk, Russia

²RPA "Typhoon", Obninsk, Russia

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

Extratropical cyclones, entering from North Atlantic, have a significant impact on the weather and climate of European Russia. All modern methods of cyclone identification include the cyclone centers identification and cyclone tracking the numerical algorithms. The methods of automatic cyclone identification based on data of different reanalyses at grid points. Studies of extratropical cyclones differing in both investigation methods and data, have a differences in present mid-latitude cyclone climatology for Northern Hemisphere. The goal of study is the comparison of cyclone activity in different regions of North Atlantic and

European seas based on data ERA-5/ECMWF и NCEP/ NCAR/DOE reanalyses during winter half of year for 1979-2020.

The storm tracks were calculated based on automated cyclone detection/tracking algorithm based in 6-hourly MSLP data in grid points with step $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ of NCEP/NCAR DOE reanalyses and $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ of ERA-5 reanalyses. Cyclones are identified in North Atlantic region $[30^{\circ}\text{n}-80^{\circ}\text{n}, 50^{\circ}\text{w}-70^{\circ}\text{e}]$. For analysis the cyclone trajectories with life of 12 hours or more were selected. In this work the density of generating cyclone tracks, the number of cyclone centers and cyclone activity index were calculated as main characteristics of cyclonic activity in selected regions. The density of generating cyclone tracks was calculated as the number of cyclone tracks, having start in region during winter season. The cyclone activity index was calculated as the summa of pressure anomalies in cyclone centers points of region for season. The cyclone characteristics were calculated as for all cyclones, as separately for extreme cyclones with central pressure from 980 gPa and less.

To analyze the climatology of generated extratropical cyclones in different regions of the North Atlantic, seven regions were identified, for each of which the number of generated cyclones in the winter half of the year from October to March was calculated separately for two time periods 1979-1999 and 2000-2020. The comparison shows the significant differences between reanalyses in quantity of generating cyclones in selected regions. Systematically in all regions more cyclones were identified by ERA-5 reanalysis data. The maximum number of cyclones for both reanalysis is generated in mid-latitude and polar latitudes of North Atlantic. In the same areas, the maximum differences between reanalyses are also observed. Despite significant differences in the number of detected cyclones, calculations based on both reanalysis show a tendency towards an increase in the number of generated cyclones in the winter half of the year in the last two decades, both in individual selected areas and throughout the North Atlantic region.

Analysis of the interannual variability of the number of cyclone centers and the cyclonic activity index, carried out for the regions of Island minimum $[55^{\circ}\text{n}-65^{\circ}\text{n}, 50^{\circ}\text{w}-10^{\circ}\text{w}]$ and Barenz sea $[66^{\circ}\text{n}-80^{\circ}\text{n}, 10^{\circ}\text{e}-70^{\circ}\text{e}]$, also showed a significant difference between reanalyses. In each individual winter season of the entire study period, with a relatively equal number of deep cyclones, the values of the cyclonic activity index according to the ERA-5 reanalysis data in these areas turned out to be significantly higher. This is due to both the higher intensity of deep cyclones and the higher number of moderate cyclones detected by the ERA-5 data compared to the NCEP/ NCAR/ DOE reanalysis.

Analysis of the characteristics of cyclonic activity obtained by the same method, but using different reanalyses for different regions of the North Atlantic, demonstrates the dependence of these characteristics on the choice of reanalyses data, which differ in the original numerical model, the grid and time step.

Внетропические циклоны Северной Атлантики по данным реанализов NCEP -NCAR и ERA-5 за период 1979-2020

¹Вязилова Н.А., ²Вязилов А.Е.

¹ ВНИИГМИ-МЦД, Обнинск, Россия

² НПО «Тайфун», Обнинск, Россия

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

Внетропические циклоны, выходящие с акватории Северной Атлантики, а также из районов северных европейских морей и Средиземного моря, оказывают значительное влияние на погоду и климат европейской территории России. Следует отличать понятие циклон как единичный центр низкого давления, идентифицированный в точке поля, и циклон как траекторию, имеющей несколько центров за историю жизни. Современные методы идентификации циклонов включают два этапа: идентификацию центров циклонов и расчет траекторий смещения циклонов. Методы автоматической идентификации циклонов базируются на использовании данных в узлах сетки, данных различных реанализов. Исследования внетропических циклонов отличаются как методами идентификации центров циклонов и расчета траекторий циклонов, так и данными, использованными для этих расчетов. Различия в методах идентификации и использовании различных исходных данных приводят к различиям в статистических оценках циклонической активности в различных районах Земного шара, в том числе и в регионе Северной Атлантики. Целью настоящей работы является сравнение характеристик циклонической активности в различных районах Северной Атлантики, в районах северных европейских морей и Средиземного моря, рассчитанных по данным двух реанализов, NCEP/NCAR/DOE [1] и ERA-5/ECMWF [2] в зимнюю половину года за период 1979-2020 гг.

В настоящей работе центры циклонов и траектории их смещения рассчитаны на основе метода автоматической идентификации по 6-часовым данным атмосферного давления на уровне моря (MSLP) в узлах сетки с шагом $2,5^{\circ}$ реанализа-2 NCAR/NCEP/DOE и 1.25° реанализа ERA-5 [3]. Для анализа отби-

рались траектории циклонов с длиной жизни от 12 часов и более. В качестве основных характеристик циклонической активности в настоящей работе рассчитывались плотность генезиса циклонов, количество центров циклонов и индекс циклонической активности. Плотность генезиса циклонов представляет количество траекторий циклонов, генерируемых в выбранном районе за единицу времени (месяц, сезон). Индекс циклонической активности рассчитывается как сумма аномалий атмосферного давления в центрах циклонов за единицу времени. Характеристики циклонической активности рассчитывались как для всей группы циклонов, так и отдельно для группы интенсивных циклонов, с давлением в центре от 980 гПа и менее.

Для анализа климатологии генерируемых внетропических циклонов в различных районах Северной Атлантики было выделено семь районов (рис.1), для каждого из которых количество генерируемых циклонов в зимнюю половину года с октября по март рассчитывалось отдельно для двух временных периодов: 1979-1999 гг. и 2000-2020 гг. Сравнение интегрального количества траекторий циклонов, рассчитанного по данным двух реанализов и одному и тому же методу идентификации центров циклонов, показывает существенные различия между реанализами в количестве генерируемых циклонов по районам генезиса (рис.2). Систематически во всех районах больше циклонов идентифицируется по данным реанализа ERA-5. Максимальное количество циклонов по обоим реанализам генерируется в умеренных и субполярных широтах Северной Атлантики, в этих же районах наблюдаются и максимальные отличия между реанализами.

Несмотря на существенные отличия в количестве выявляемых циклонов, расчеты по обоим реанализам демонстрируют тенденцию к росту количества генерируемых циклонов в зимнюю половину года в последние два десятка лет, как в отдельных районах, так и во всем в регионе Северной Атлантики.

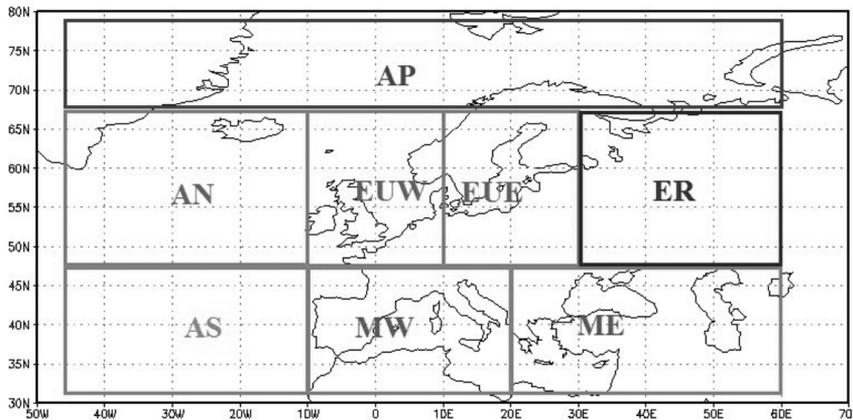


Рис.1. Выделенные районы Северной Атлантики и Европы для расчета количества генерируемых циклонов

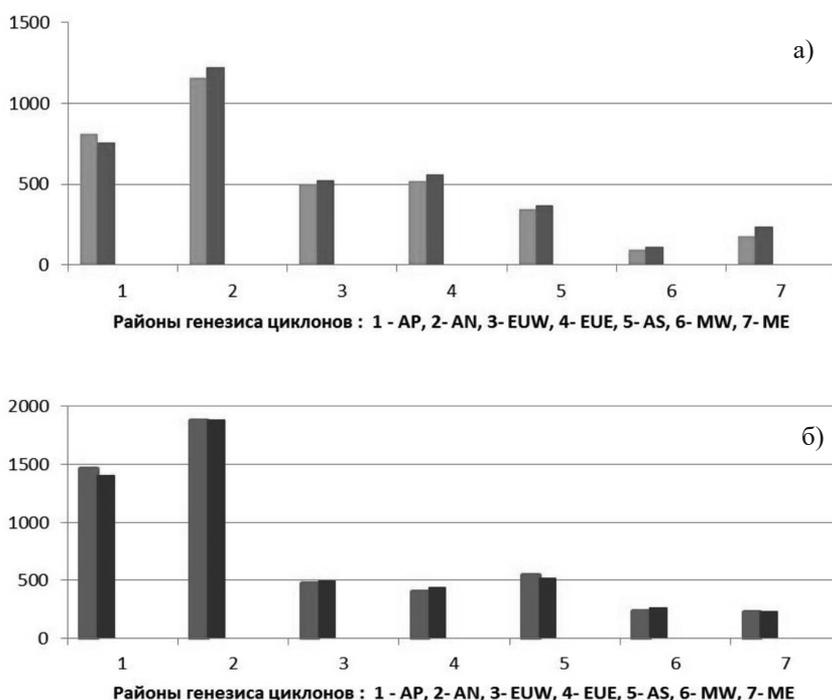


Рис.2. Интегральное количество траекторий циклонов в зимнюю половину года с октября по март по районам генезиса по данным реанализов NCEP/ NCAR/DOE (а) и ERA-5 (б) за период 1979-1999 (столбцы более светлого цвета) и 2000-2020 (столбцы более темного цвета).

Анализ межгодовой изменчивости характеристик циклонической активности, количества центров циклонов и индекса циклонической активности, интегральной суммы аномалий атмосферного давления в центрах циклонов за сезон, проведенный для районов Исландского минимума (рис.3) и Баренцева моря (рис.4), также показало существенное отличие между реанализами.

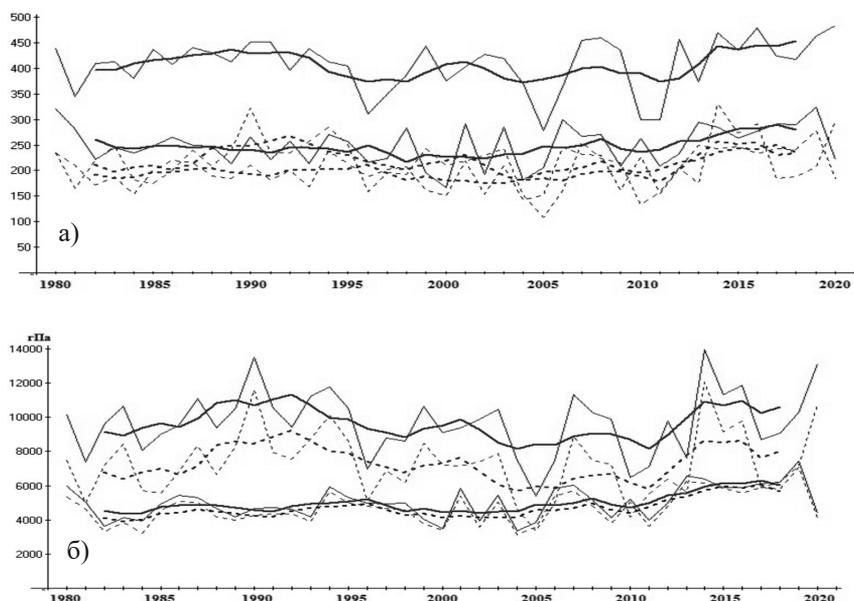


Рис.3. Количество центров циклонов (а) и специализированный индекс циклонической активности (б). Район Исландского минимума. Зимняя половина года. Обозначения: по данным реанализа NCEP/ NCAR/DOE (линии синего цвета), по данным ERA-5/ECMWF (коричневый). Сплошная линия – все циклоны, точки – глубокие циклоны. Жирная линия – скользящие средние за пять лет.

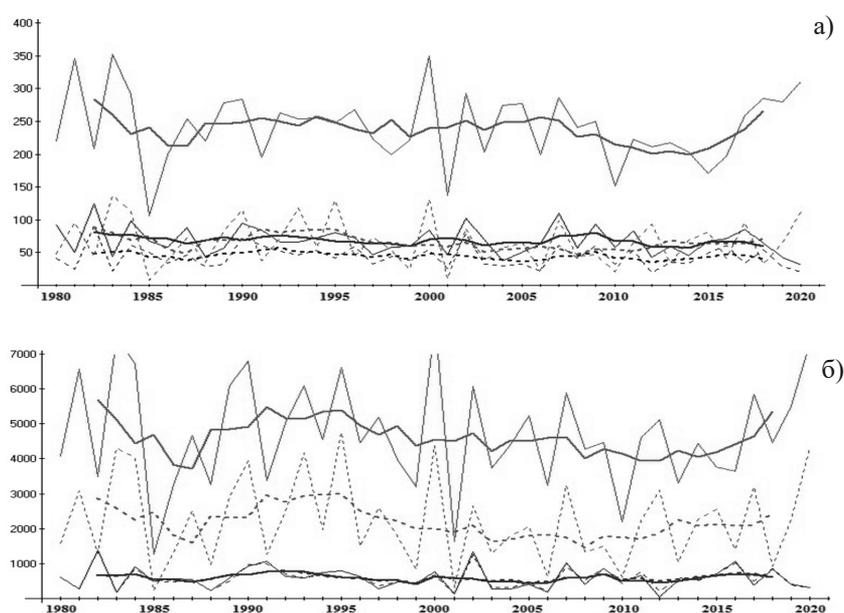


Рис.4. Количество центров циклонов (а) и специализированный индекс циклонической активности (б). Район Исландского минимума. Зимняя половина года. Обозначения: по данным реанализа NCEP/ NCAR/DOE (линии синего цвета), по данным ERA-5/ECMWF (зеленый). Сплошная линия – все циклоны, точки – глубокие циклоны. Жирная линия – скользящие средние за пять лет.

В каждый отдельный зимний сезон всего периода исследования при сравнительно одинаковом количестве глубоких циклонов значения индекса циклонической активности по данным реанализа ERA-5 в этих районах оказались значительно выше: в районе Исландского минимума в среднем в два раза, в районе Баренцева моря – более чем в 4 раза по сравнению со значениями индекса по NCEP/ NCAR/DOE. Это связано как более высокой интенсивностью глубоких циклонов, так и с более высоким количеством умеренных циклонов, выявляемых по данным ERA-5 по сравнению с реанализом NCEP/ NCAR/DOE в этих районах. При этом, изменчивость характеристик циклонической активности в выбранных районах, рассчитанная по данным ERA-5, хорошо коррелирует с изменчивостью, полученной по данным NCEP/ NCAR/DOE.

Таким образом, сравнение характеристик циклонической активности, полученных одним методом, но с использованием разных реанализов, демонстрирует зависимость этих характеристик от выбора данных, которые отличаются исходной численной моделью, шагом сетки. Использование данных реанализа ERA-5 с более высоким пространственным разрешением для одних и тех же районов дает более высокое количество выявляемых циклонов и более высокие значения индекса циклонической активности.

ЛИТЕРАТУРА:

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. Hersbach et. al. The ERA5 global reanalysis. - Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, Vol.146, Is.730, pp.1999-2049.
3. Viazilova N.A. Cyclonic activity and fluctuations in circulation in the North Atlantic. – Russian J. “Meteorology and Hydrology”, 2012, N 7, pp. 5-14.

Analysis of the vertical structure of atmosphere during the coldest days in Norilsk and Salekhard according to numerical simulation

¹Vorotilova P., ²Timazhev A., ^{1,3}Konstantinov P.

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

³RUDN University, Laboratory of smart technologies for sustainable development of urban environment under global changes, Moscow, Russia

E-mail: vorotilova99@mail.ru, timazhev@ifaran.ru, kostadini@mail.ru

Arctic climate is characterized by frequent temperature inversion. Winter, especially in this region, is the most favorable time for inversion's formation because of strong cooling of surface and high-pressure conditions. 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).

“Urban” surface-based inversions in Arctic are still weakly understood because of poor meteorological monitoring equipment in the most Arctic regions and because reanalysis resolution is too low for urban territory. So, numerical simulation now – the most available instrument to research vertical structure of atmosphere in Arctic. However, to obtain data representative for the selected region, it is necessary to choose the parameterizations of the subgrid processes.

The purpose of this work is the estimation of model reproduction of the vertical structure of atmosphere in Norilsk and Salekhard.

These cities are located in subarctic climate zone, but has different relief conditions: flat in Salekhard and elevated in Norilsk.

Vertical structure of the atmosphere in Norilsk sounding station and Salekhard sounding station was simulated with the mesoscale model ARW (Advanced Research Weather Research and Forecasting (WRF)) version 4.0. Numerical experiment was realized for two coldest days during last 10 years for each station. Calculations were made in three nested domains with the shared center at 66,53°N, 66,66°E for Salekhard and 69,32°N, 69,32°E. As an initial data, ERA5 data was used.

The obtained data was visualized with MATLAB R2017b and then was compared with sounding data. For this, measurement data was interpolated to model vertical levels with Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial.

The comparison revealed that the largest deviations of the values from the measured ones are observed at the lower border of the inversion, several inversions in one temperature profile are poorly reproduced and the model tends to underestimate the intensity of the inversion.

Исследование вертикальной структуры атмосферы в течение наиболее холодных дней в Норильске и Салехарде по данным моделирования

¹Воротилова П.Г., ²Тимажев А.В., ^{1,3}Константинов П.И.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³ Научный центр «Смарт технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений» РУДН, Москва, Россия

E-mail: vorotilova99@mail.ru, timazhev@ifaran.ru, kostadini@mail.ru

Атмосфера в арктическом регионе характеризуется высокой повторяемостью инверсий температуры. Именно здесь наблюдаются наиболее благоприятные условия для их формирования: продолжительные периоды радиационного выхолаживания и влияние отрога Сибирского антициклона [1]. Наибольший интерес представляют инверсии, развивающиеся в городах, так как скопление загрязняющих воздух примесей под инверсионным слоем и внутри него может представлять серьезную опасность для здоровья населения [2]. Кроме того, инверсии на городских и фоновых территориях развиваются под влиянием разного набора факторов, так, например, при исследовании вертикальной структуры атмосферы в городе нельзя не учитывать влияние острова тепла - области с температурой, более высокой, чем у окружающей территории (фоновой зоны) [3].

Это явление и относительно небольшие площади городов в Арктике не позволяют при исследовании атмосферы в городе использовать данные реанализа, а труднодоступность многих городов и экстремальные зимние условия – не позволяют повсеместно использовать данные наблюдений.

Одним из доступных инструментов для исследования приземного слоя атмосферы в арктических городах является численное моделирование. Однако для получения репрезентативных для выбранного региона данных необходимо подобрать параметризации подсеточных процессов.

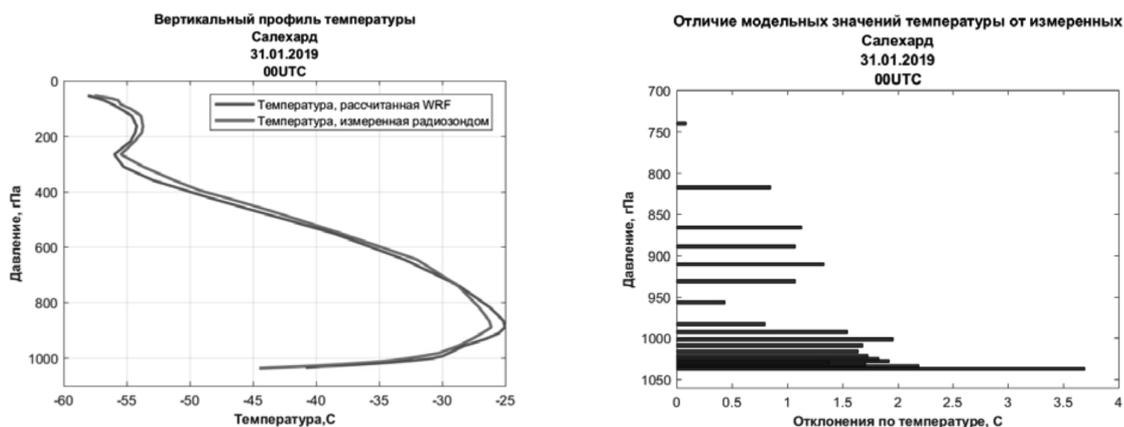


Рис. 1. Результаты сравнения вертикального распределения температуры по данным моделирования и измерений радиозонда для 31.01.19 00UTC, Салехард (05:00 по местному времени).

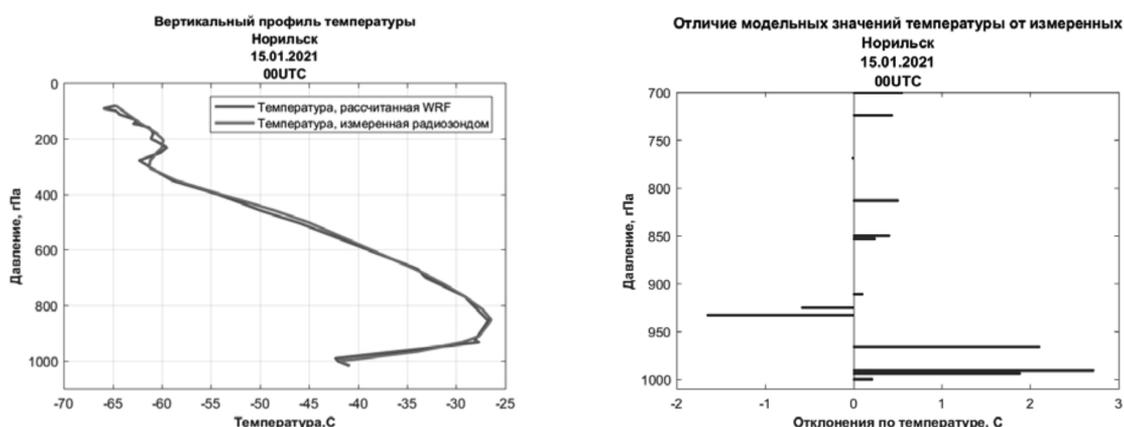


Рис. 2. Результаты сравнения вертикального распределения температуры по данным моделирования и измерений радиозонда для 15.01.21 00UTC, Норильск (07:00 по местному времени).

Целью данной работы является оценка воспроизведения моделью WRF ARW 4.0 вертикальной структуры атмосферы на станциях радиозондирования в Норильске и Салехарде.

Исследуемые станции располагаются в субарктическом климате, однако в разных условиях рельефа: Салехард – на равнине, Норильск – на возвышенности.

В ходе работы было проведено четыре численных эксперимента с использованием региональной мезомасштабной негидростатической модели WRF ARW 4.0, полученные результаты сравнивались с данными радиозондирования. В качестве начальных данных использовались данные реанализа ERA5.

Для расчетов были использованы четыре вложенных области с общим центром в точке, где располагалась соответствующая станция радиозондирования: 66,53° с.ш., 66,66° в.д. (Салехард) и 69,32° с.ш., 88,22° в.д. (Норильск).

Эксперимент проводился для двух наиболее холодных дней за последние 10 лет [4] на каждой станции: 31.01.2019г., 02.02.2019г. – для Салехарда, и 22.12.2020г., 15.01.2021г. – для Норильска.

При проведении численного эксперимента приземный слой описывался Revised MM5 scheme, планетарно-пограничный слой – параметризацией Bougeault–Lacarrere, подстилающая поверхность – Noah-MP Land Surface Model, длинноволновая и коротковолновая радиация – RRTMG scheme, блок микрофизики облачности для внешних областей описывался с помощью WSM 5-class scheme, для внутренней области – WSM 6-class scheme.

Для сравнения результатов численного эксперимента с данными радиозондирования последние были интерполированы кусочно-кубическими многочленами Эрмита на вертикальные уровни модели.

После интерполяции были построены вертикальные профили температуры воздуха по данным расчетов модели и по данным радиозондирования. Также были вычислены отклонения модельных значений от измеренных.

В результате сравнения были обнаружено, что наибольшие отклонения рассчитанных значений от измеренных наблюдаются на нижней границе инверсии, несколько инверсий в одном профиле температуры воспроизводятся плохо, модель склонна занижать интенсивность инверсии. Кроме того, некоторую погрешность вносит сама интерполяция.

Примеры полученных результатов приведены на рисунках ниже (рис.1 и рис.2).

- Исследование было выполнено при поддержке проектов РФФИ 18-05-60126 и 20-55-71004.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Безуглая Э.Ю, Берлянд М.Е //Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере– Ленинград, Гидрометеоиздат, 1983 - 328с.
2. 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.
3. 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, Kluwier Academic Publishers, 81-107.
4. [Электронный ресурс] Погода и Климат - прогнозы погоды, новости погоды, климатические данные. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/23330.htm>

Quality assessment of surface wind speed reproduction by the new detailed model COSMO-CLM hindcast in the Russian Arctic

Boiko A., Platonov V.

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

E-mail: aksinia.boiko@gmail.com, vplatonov86@gmail.com

The Arctic is one of the most vulnerable to climate change regions in the world. On average, warming in the Arctic occurs two to four times faster than in the entire globe [Screen et al., 2012; Serreze et al., 2009; Solomon et al., 2007]. Also, the Arctic is one of the most important economically significant regions - both for Russia and for the whole world, since the Northern Sea Route passes through the Russian Arctic. The rapid climate change in the Arctic has a significant impact on the plans for the socio-economic development of the Arctic region, maritime shipping, the development of oil and gas shelf areas. Freeing the surface of the Arctic Ocean from ice contributes to an increase in the recurrence of extreme winds [Laffineur et al., 2014; Moore, Renfrew, 2005]. Information about extremely high wind speeds is very important - data on wind loads

should be considered when designing and operating antennas, masts, bridges, and other structures on land, as well as ships and drilling rigs in the offshore area, which is why this study focused on wind speed. Considering the growing number of dangerous hydrometeorological phenomena, and the prospects for the development of the Arctic coast and the Northern Sea Route, it becomes necessary to study in detail the observed changes in the Russian Arctic, as well as to provide the region with relevant detailed hydrometeorological and climatic information with high spatial resolution. To make detailed assessments of climate change in the Russian Arctic becomes possible using the new model archive COSMO-CLM (COSMO-CLM Russian Arctic hindcast), covering the period from 1980 to 2016. with a spatial resolution of ~ 12 km [Platonov, Varentsov, 2021].

This hindcast, which includes about a hundred different hydrometeorological characteristics at both surface and model levels (50 levels), was created by hydrodynamic modeling using the COSMO-CLM regional atmospheric model. The calculations were carried out for the region that includes the Barents Sea, Kara Sea and Laptev Sea (Fig. 1). Currently, data are available from 1980 to 1992, 1994, 2000–2008, 2010–2016 (30 years), so the calculations were carried out using the data of these years. To assess the data on the wind speed of the model archive and conduct a comparative analysis, urgent data from the meteorological stations of Roshydromet from the site meteo.ru were used. For the study were selected 95 stations located within the model domain (Fig. 2). For comparison, station data were selected for the period from 1960 to 2016. Further, the model grids closest to the stations were found according to the coordinates. Then the statistics were calculated at these points: the differences between the values of the parameters in the model grids and at the stations, mean errors, standard deviations, and correlation coefficients. To study the extreme values of meteorological parameters, the quantile method was used. We calculated the quantile values for the stations and the corresponding model grids, as well as the differences between them. To estimate the maximum wind speeds, 95, 99, 99.9% quantiles were taken. All calculations were carried out using the MatLab software package.

The research showed that the average wind speed is well reproduced by the COSMO-CLM Russian Arctic hindcast. However, there are stations where the model and the station data are not equal: in most of these stations hindcast is overestimating wind speed (Fig. 3a, 3b). The spatial distribution of the extreme values is well displayed on both model and station data. The study of the quantile difference showed that, in contrast to the average wind speed, the extreme speeds according to the hindcast data are underestimated - the error ranges from 2 to 10 m/s (Fig 4).

For a more detailed and accurate study of the reproduction of wind speeds by the COSMO-CLM model archive, it is necessary to investigate the behavior of statistics of average and extreme values of wind speed on smaller time scales: seasonal, monthly, and daily. It is planned to estimate the studied statistics using satellite data in the future, and to compare the trends of the obtained characteristics using different data sources.

Оценка качества воспроизведения приземной скорости ветра в Российской Арктике на основе данных нового детализированного модельного архива COSMO-CLM

Бойко А.П., Платонов В.С.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

E-mail: aksinia.boiko@gmail.com, vplatonov86@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ И АКТУАЛЬНОСТЬ

Арктика является одним из наиболее уязвимых к изменениям климата регионов в мире. В среднем потепление в Арктике происходит в два – четыре раза быстрее, чем во всем земном шаре [Screen et al., 2012; Serreze et al., 2009; Solomon et al., 2007]. Предполагается, что причина этого явления заключается в целом комплексе физических процессов, большинство из которых тесно связаны с резким уменьшением площади морского льда [Stroeve et al., 2012]. В свою очередь освобождение поверхности Северного Ледовитого океана ото льда благоприятствует увеличению повторяемости экстремальных ветров, что проявляется и в увеличении опасных явлений погоды [Laffineur et al., 2014; Moore, Renfrew, 2005]. Информация об экстремально больших скоростях ветра очень важна – данные о ветровых нагрузках следует учитывать при проектировании и эксплуатации антенн, мачт, мостов и других сооружений на суше, а также кораблей и буровых установок на морской акватории, именно поэтому в данной работе был сделан акцент на исследовании скорости ветра.

Арктика является одним из важнейших экономически значимых регионов – как для России, так и для всего мира в целом, так как через Российскую Арктику проходит Северный морской путь. Стремительное изменение климата Арктики оказывает существенное влияние на планы социально-экономиче-

ского развития Арктического региона, морского судоходства, освоения нефтегазовых шельфовых районов и Северного морского пути. Таким образом, с учётом растущего числа опасных гидрометеорологических явлений, и перспектив по освоению арктического побережья и Северного морского пути, важной задачей становится детальное изучение наблюдаемых изменений в Российской Арктике, а также обеспечение региона релевантной детализированной гидрометеорологической и климатической информацией с высоким пространственным разрешением.

Большинство существующих массивов гидрометеорологических данных для арктического региона имеют либо фрагментарный характер (станционные и экспедиционные наблюдения), либо грубое пространственное разрешение (климатические архивы, реанализы, климатические модели - десятки км) либо ограниченный временной охват (спутниковые данные), что не позволяет разрешать многие опасные явления, изучать их статистические характеристики по многолетним рядам данных. Исследования особенностей ветрового режима западной части Российской Арктики выявили, что горизонтальное разрешение глобальных климатических моделей не позволяет определять экстремальные скорости ветра – для этого необходимо проводить исследования с учетом мезомасштабных процессов [Кислов и др., 2015]. Оценки показали, что мезомасштабная региональная модель COSMO-CLM оказалась способна воссоздавать над морем и вблизи побережий скорости ветра, приближающиеся к наблюдаемым экстремальным значениям [Platonov, Kislov, 2016; Platonov, Kislov, 2020]. Таким образом, анализ экстремальных скоростей ветра и сопоставление их воспроизведения глобальными и региональными моделями продемонстрировали необходимость использования негидростатических мезомасштабных моделей высокого разрешения в Арктике для успешного описания структуры наиболее сильных скоростей ветра, а также проведения статистических оценок их повторяемости и изменчивости.

Использование в исследовании нового детализированного модельного архива, созданного на основе мезомасштабной модели COSMO-CLM (COSMO-CLM Russian Arctic hindcast), охватывающего период с 1980 по 2016 гг. с пространственным разрешением ~ 12 км и временным разрешением 1 час [Platonov, Varentsov, 2021], может позволить получить новые, более детальные и физически обоснованные оценки происходящих климатических изменений, и опасных гидрометеорологических явлений в Арктическом регионе, а в частности уточнить региональные особенности распределения и тенденции скорости ветра в Российской Арктике.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Детализированный многолетний архив гидрометеорологической информации Российской Арктики, включающий в себя около сотни различных гидрометеорологических характеристик как приземных, так и на модельных уровнях (50 уровней), был создан методом гидродинамического моделирования с помощью региональной модели атмосферы COSMO-CLM. Расчеты проводились для области, включающей в себя Баренцево море, Карское море и море Лаптевых (Рис. 1). Конфигурация модели была предварительно верифицирована на данных более чем 400 станций. В окончательной конфигурации расчетов использовались реанализ ERA-Interim в качестве начальных и граничных условий [Platonov, Varentsov, 2019, 2020], технология «спектрального наджинга», применялась схема ежемесячного «усвоения» данных о состоянии почвы из глобального реанализа ERA-Interim. Первичные оценки полученного архива метеорологических данных показали адекватность воспроизведения им основных климатологических закономерностей распределения средних приземных скоростей ветра. При этом, например, проявляется детализация распределения скорости ветра во многих регионах Арктики по COSMO-CLM Russian Arctic hindcast, не отражающаяся в исходном глобальном реанализе ERA-Interim, а повторяемости высоких скоростей ветра по COSMO-CLM получаются значительно выше, особенно для областей с известной высокой повторяемостью сильных ветров (Новая Земля, Шпицберген и др.).

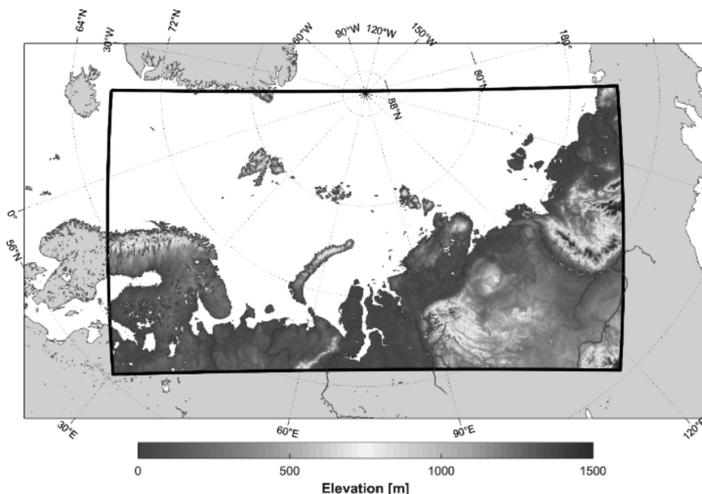


Рис. 1. Схема модельного домена с шагом сетки ≈ 12 км использованного для создания COSMO-CLM Russian Arctic hindcast, с данными о высоте над у.м. в модели, границы домена обозначены черным прямоугольником [Platonov, Varentsov, 2021].

Данные архива о скорости ветра были скачаны с репозитория figshare [https://figshare.com/collections/Arctic_COSMO-CLM_reanalysis_all_years/5186714; https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.5186714], где выложены в общий доступ приземные поля: температура, компоненты скорости ветра, осадки, давление в данный момент за большую часть охватываемого периода. В настоящее время на репозитории доступны данные с 1980 по 1992, 1994, 2000–2008, 2010–2016 (30 лет), поэтому расчеты проводились по данным этих лет.

Для оценки данных о скорости ветра модельного архива и проведения сравнительного анализа были использованы срочные данные метеорологических станций Росгидромета с сайта meteo.ru. Для исследования были выбраны 95 станций, находящихся в области модельного домена (Рис. 2).

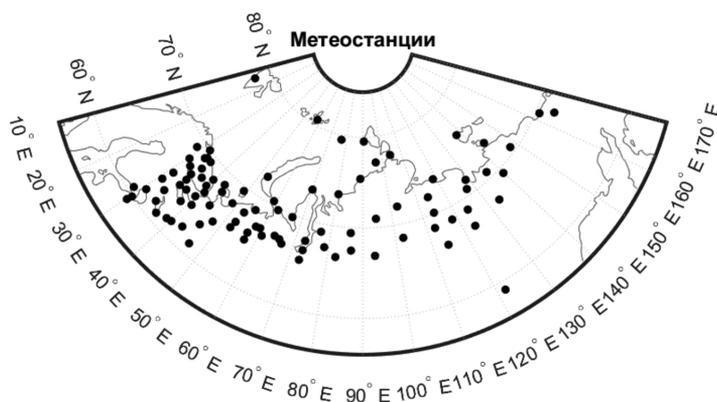


Рис. 2. Расположение метеостанций, использованных в данной работе.

Для проведения сравнения были отобраны срочные станционные данные за период с 1980 по 2016 гг. Далее по координатам были найдены ближайшие к станциям узлы модельного архива, после чего была произведена проверка попадания выбранных узлов на сушу (поскольку попадание узлов на морскую поверхность, и последующее некорректное сравнение полученных данных с данными станции – один из распространенных источников ошибок). Затем были рассчитаны статистические показатели в этих точках: разности между значениями параметров в узлах модельного архива и на станциях, потом по ним были вычислены средние ошибки, среднеквадратичные отклонения и коэффициенты корреляции. Для исследования экстремальных значений метеорологических показателей использовался метод квантилей. Были рассчитаны квантильные значения для станций и соответствующих узлов модельного архива, а также разности между ними. Для оценки максимальных скоростей ветра были взяты 95, 99, 99.9% квантили. Все расчеты были проведены при помощи пакета прикладных программ MatLab.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнение распределений значений скорости ветра по модельным и станционным данным иллюстрирует, что большая доля ошибок связана с завышением модельным архивом скорости ветра (Рис. 3а). Особенно это проявляется при меньших значениях скорости ветра – до 10 м/с. При экстремальных скоростях ветра, наоборот, данные модельного архива являются заниженными относительно станционных данных.

На карте средних ошибок видно, что завышение модельным архивом скоростей ветра действительно наблюдается чаще, чем занижение, однако также наблюдается достаточное количество станций, где ошибка между данными архива о скорости ветра и станционными данными близка к нулю (Рис. 3б). В частности, было отмечено, что на трех станциях с наибольшими средними скоростями ветра – Малые Кармакулы, Тикси и остров Диксон среднее значение ошибок действительно стремится к нулю.

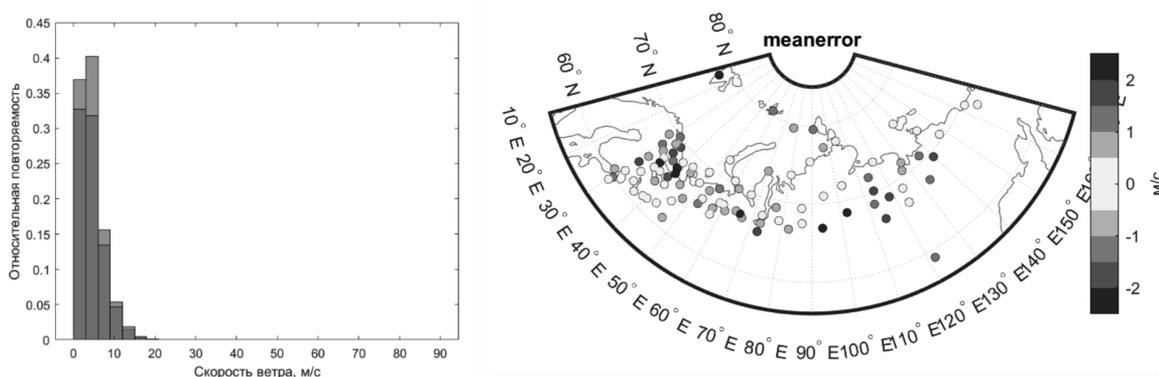


Рис. 3. (а) Распределение значений скорости ветра по станционным данным (красный) и данным модельного архива (синий), м/с; (б) Карта средних ошибок скорости ветра по станциям, м/с.

Пространственное распределение значений квантилей, а именно ярко выраженное различие между прибрежными и континентальными станциями, хорошо отображается как на модельных, так и на станционных данных. Наибольшие экстремальные скорости ветра наблюдаются на прибрежных станциях, что связано с большей возможностью «разгона» ветра над морской поверхностью, нежели над сушей. Исследование разности квантилей показало, что в отличие от средней скорости ветра, экстремальные скорости по данным модельного архива в основном занижены, по сравнению со станционными данными – ошибка составляет от 2 (Колгуев) до 8-10 м/с (Малые Кармакулы) (Рис.4).

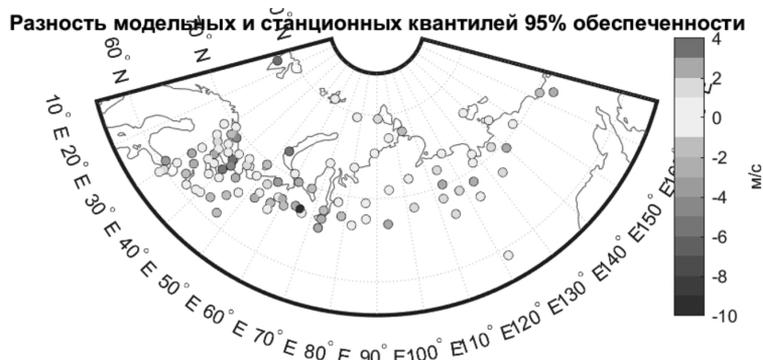


Рис. 4. Карта разности модельных и станционных данных по скорости ветра для квантиля 95%.

Заключение. Исследование показало, что средняя скорость неплохо воспроизводится модельным архивом COSMO-CLM, при этом ошибки в основном относятся к случаям завышения модельными данными скорости ветра. Пространственное распределение экстремальных значений квантилей, а именно ярко выраженное различие между прибрежными и континентальными станциями, хорошо отображается как на модельных, так и на станционных данных. Исследование разности квантилей показало, что в отличие от средней скорости ветра, экстремальные скорости по данным модельного архива занижены, по сравнению со станционными данными – ошибка составляет от 2 до 10 м/с.

Для более детального и точного исследования воспроизведения скоростей ветра модельным архивом COSMO-CLM необходимо исследовать статистические показатели средних и экстремальных величин скорости ветра на более мелких временных масштабах: сезонном, месячном и суточном, также в перспективе планируется рассчитать оценки исследуемых статистических показателей с использованием спутниковых данных, а затем провести сравнение трендов полученных характеристик с использованием различных источников данных.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кислов А.В., Матвеева Т.А., Платонов В.С. Экстремумы скорости ветра в Арктике// *Фундаментальная и прикладная климатология* 2/2015
2. Laffineur, T., C. Claud, J.-P. Chaboureaud, and G. Noer (2014), Polar lows over the Nordic seas: Improved representation in ERA-Interim compared to ERA-40 and the impact on downscaled simulations, *Mon. Weather Rev.*, 142, 2271–2289.
3. Moore, G.W.K., Renfrew, I.A. Tip jets and barrier winds: A QuikSCAT climatology of high wind speed events around Greenland. *J. of Clim.* 2005, 18.18, 3713–3725.
4. Screen, J. A., C. Deser, and I. Simmonds, 2012: Local and remote controls on observed Arctic warming. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L10709
5. Serreze, M. C., A. P. Barrett, J. C. Stroeve, D. M. Kindig, and M. M. Holland, 2009: The emergence of surface-based Arctic amplification. *Cryosphere*, 3, 11–19, doi:10.5194/tc-3-11-2009.
6. Solomon, Susan. "The physical science basis: Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate change 2007 996* (2007).
7. Stroeve, J. C., M. C. Serreze, M. M. Holland, J. E. Kay, J. Malanik, and A. P. Barrett, 2012: The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: A research synthesis. *Climatic Change*, 110, 1005–1027.
8. Vladimir S. Platonov and Alexander V. Kislov. Mesoscale high-resolution modeling of extreme wind speeds over western water areas of the Russian Arctic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 48, 2016.
9. Vladimir Platonov and Alexander Kislov. High-resolution COSMO-CLM modeling and an assessment of mesoscale features caused by coastal parameters at near-shore Arctic zones (Kara Sea). *Atmosphere*, 11(10):1062, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos11101062>
10. Vladimir Platonov and Mikhail Varentsov. Creation of the long-term high-resolution hydrometeorological archive for Russian Arctic: methodology and first results. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 386(012), 2019.

11. Vladimir Platonov and Mikhail Varentsov. A new detailed long-term hydrometeorological dataset: first results of extreme characteristics estimations for the Russian Arctic seas. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 611(012044), 2020.
12. Vladimir Platonov and Mikhail Varentsov. Introducing a new detailed long-term COSMO-CLM hindcast for the Russian Arctic and the first results of its evaluation. Atmosphere, 12(3):350, 2021.

Quality assessment of surface temperature reproduction by the new detailed COSMO-CLM hindcast based on station data in the Russian Arctic

Duntsev S., Platonov V.

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

E-mail: srgdntsv@gmail.com, vplatonov86@gmail.com

The Arctic is the region most sensitive to climate change on the globe, this applies both to physical feedbacks in the climate system and to ecological systems. However, the spatial distribution of climate changes in the region is unclear, and there are different estimates of trends in changes in certain meteorological parameters in different water areas and coastal zones of the Russian and foreign Arctic regions. Taking into account the growing number of dangerous phenomena and the prospects for the development of the Arctic coast and the Northern Sea Route, the task of providing the region with detailed hydrometeorological and climate information with a horizontal resolution of several kilometers becomes especially necessary. There are poor observational and satellite data for a long period in the Arctic, and the existing model datasets and re-analyses has quite coarse resolution. Therefore, it is important to use high-resolution modeling data to get appropriate climate change assessments in the region.

This work uses a new long-term model COSMO-CLM Russian Arctic hindcast hydrometeorological data covering the period 1980-2016. The model domain is represented by a grid resolution of ≈ 12 km ($\approx 0.108^\circ$) and covers most of the Russian Arctic, including the Barents, Kara, and Laptev Seas. All long-term calculations were carried out at the supercomputer "Lomonosov-2".

The objective of this work is to evaluate for the first time the quality of surface temperature reproduction by the new high-resolution COSMO-CLM Russian Arctic hindcast. To achieve this goal, the following tasks will be performed:

- creation of a database of average monthly temperatures of weather stations in the studied region for the period 1980-2016;
- statistical evaluation of the model's reproduction of the thermal regime of the Russian Arctic on a multi-year, seasonal and monthly scales;
- assessment of the quality of the archive based on a comparison with observational data of both average and extreme characteristics;
- assessment of detailed regional changes in the thermal regime in the Russian Arctic based on the COSMO-CLM Russian Arctic hindcast.

145 weather stations were selected with a small number of gaps in the observations for the period 1980-2016, 65 European and 80 Russian Arctic stations, which geographically fit the study area of COSMO-CLM modeling.

At the first stage of the study, the data on the 2-m temperature were averaged to monthly values. Then, the nearest model grid points were selected for each weather station according to its coordinates, to perform comparisons.

The study of the distribution of differences between the average monthly values of the model temperature and the station data showed that the distribution function is close to normal. This indicates the uniformity of errors sample. However, the function is biased a few towards negative values, which indicates a slight underestimation of the real values by the model, the error distribution mode is -0.5 $0C$.

The distributions of the 1-% and 5-% quantiles differences between the model and the actual air temperatures show accuracy of the model reproduction of extreme air temperatures. In general, the model copes with this task, but significant errors are noticeable (in the ranges from $-30C$ to $-50C$) at more continental stations in the region, as well as at high-altitude stations.

The calculated statistics of the COSMO-CLM model archive indicate that the model reproduces the surface temperature with quiet high quality. In the future work, the quality of the archive will be evaluated in more detail, based on comparison with observational data of both mean and extreme characteristics for different seasons of the year, months, as well as on a more detailed timescale. Based on the obtained results, an assessment of regional changes in the thermal regime over the research period will be carried out.

Оценка качества воспроизведения приземной температуры новым детализированным модельного архивом COSMO-CLM по стационарным данным в Российской Арктике

Дунцев С.А., Платонов В.С.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

E-mail: srgdntsv@gmail.com, vplatonov86@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ И АКТУАЛЬНОСТЬ

Арктика является регионом, наиболее чувствительным к изменению климата на земном шаре, это касается как физических обратных связей в климатической системе, так и экологических систем [Stocker et al., 2013]. Однако пространственное распределение климатических изменений в регионе неоднозначно, существуют различные оценки тенденций изменения определенных метеорологических параметров в различных акваториях и прибрежных зонах российских и зарубежных арктических регионов. С учетом растущего числа опасных явлений и перспектив развития арктического побережья и Северного морского пути задача обеспечения региона подробной гидрометеорологической и климатической информацией с горизонтальным разрешением в несколько километров становится особенно актуальной. Данные стационарных наблюдений и спутниковая информация, имеющая хороший пространственный охват и высокое разрешение, в Арктике имеются в большинстве своём за непродолжительный промежуток времени, а существующие модельные архивы и реанализы (ERA5, NCEP/CFSR, ASR и др.) имеют разрешение в первые десятки км. При этом, многие опасные гидрометеорологические явления и экстремальные характеристики связаны с процессами, происходящими на мезомасштабе, которые в большинстве своём перечисленными источниками информации не разрешаются. Поэтому для оценок изменений климата в регионе очень важно использование данных моделирования высокого разрешения.

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе используется новый многолетний модельный архив гидрометеорологических данных COSMO-CLM Russian Arctic hindcast, охватывающий период 1980-2016 гг. В качестве основного инструмента создания многолетнего массива метеорологической информации высокого разрешения использовалась негидростатическая модель COSMO-CLM (версии 5.05). Это региональная мезомасштабная модель разрабатывалась одноименным консорциумом (Consortium for Small-scale Modeling), включающим в себя национальные службы прогноза погоды ряда стран, в том числе Росгидромет. Развитие климатической версии модели осуществляется в рамках международного научного сообщества CLM-Community (<http://clm-community.eu>, [Bohm et al., 2006, Rockel et al., 2008]).

Модельная область представлена разрешением сетки ≈ 12 км ($\approx 0,108^\circ$) и охватывает большую часть территории Российской Арктики, включая Баренцево, Карское и море Лаптевых (рис. 1). Начальные и боковые граничные условия модели, а также температура морского льда и морской поверхности задавались из глобального реанализа ERA-Interim (0.70). Внешние параметры, описывающие свойства поверхности, были получены с помощью инструмента EXTPAR (Внешние параметры), GLOBE (поверхностная орография), MODIS (свойства почвы и альbedo) и Globcover2009 (растительный покров, глубина корней, фракция суши и др.). В результате верификации на данных более чем 400 станций была выбрана следующая конфигурация модели для длительных экспериментов: версия 5.05 с использованием параметризаций из модели ICON ("ICON-based physics" [Giorgetta, M.A. et al., 2019] использование метода "спектрального наджинга" [Platonov, Varentsov, 2019]). Для итоговых многолетних расчетов предложена схема ежемесячного "усвоения" данных о состоянии почвы из глобального реанализа ERA-Interim, чтобы избежать возможного накопления ошибок, в частности, за счёт иссушения почвы в модели. Все длительные расчёты были проведены на СК "Ломоносов-2" [Voevodin et al, 2019.] и заняли более чем 250000 ядро-часов, общий объём данных составил более 120 Тб. Данные архива COSMO-CLM Russian Arctic hindcast были взяты с репозитория figshare [https://figshare.com/collections/Arctic_COSMO-CLM_reanalysis_all_years/5186714; <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.5186714>].

Первичные оценки полученного архива метеорологических данных показали адекватность воспроизведения им основных климатологических закономерностей распределения средних приземных скоростей ветра и температур. Различия в термическом режиме, в том числе и экстремальных температурах (1% процентиль) наиболее ярко проявились в горных, а также в прибрежных районах, над крупными озерами. [Platonov, Varentsov, 2021]. Таким образом, предварительные оценки нового архива позволяют рассчитывать на перспективность его использования для оценок не только климатологии, но и экстремальных характеристик, а также воспроизведения многих мезомасштабных процессов и сопутствующих им опасных явлений.

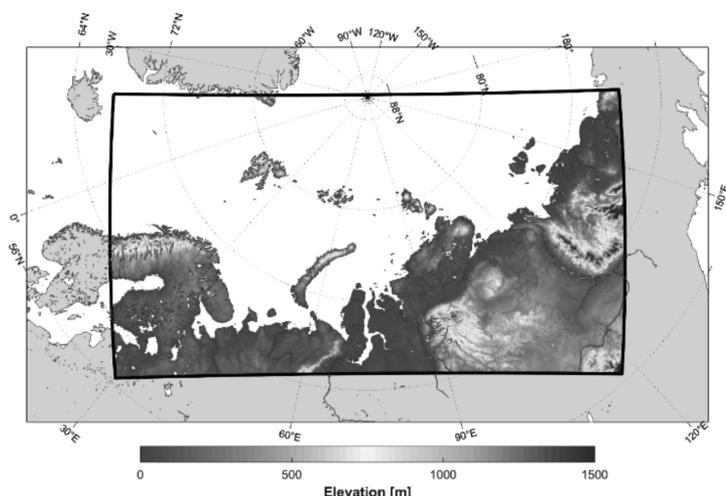


Рис. 1. Область моделирования COSMO-CLM Russian Arctic hindcast [Platonov, Varentsov, 2021].

Цель данной работы: впервые оценить качество воспроизведения приземной температуры новым модельным архивом COSMO-CLM Russian Arctic hindcast высокого разрешения. По сравнению с другими схожими архивами, он имеет пространственное разрешение ≈ 12 км. Для решения поставленной цели будут выполнены следующие задачи:

- статистическая оценка воспроизведения моделью термического режима Российской Арктики на многолетнем, сезонном и месячном масштабах;
- оценка качества архива на основе сравнения с данными наблюдений как средних, так и экстремальных характеристик;
- оценка детальных региональных изменений термического режима в Российской Арктике на основе COSMO-CLM Russian Arctic hindcast.

Для данного исследования многолетние ряды среднемесячных температур воздуха на метеостанциях были взяты с сайта NOAA's National Centers for Environmental Information (NCEI) (<https://www.ncei.noaa.gov/>) и из базы данных ВНИИГМИ МЦД (<http://aisori-m.meteo.ru/>).

В итоге было отобрано 145 метеостанций с незначительным количеством пропусков в наблюдениях сроком 1980-2016 гг., 65 европейских и 80 российских арктических станций, которые территориально попадают в исследуемую область моделирования COSMO-CLM Russian Arctic hindcast (рис. 2).



Рис. 2. Расположение метеостанций, отобранных в данной работе.

Данные по температуре на уровне двух метров были на первом этапе исследования приведены к среднемесячным значениям. Затем для каждой метеостанции по ее координатам были выбраны соответствующие ближайшие узлы сетки модели, с которыми и производился сравнительный анализ характеристик.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование распределения разностей между среднемесячными значениями температуры модели и станционными данными (рис. 3) показало, что функция распределения близка к нормальной. Это свидетельствует об однородности ряда ошибок. Однако же, функция немного смещена в сторону отрицательных значений, что говорит о небольшом занижении моделью реальных значений, мода распределения ошибок равна $-0,50$ С.

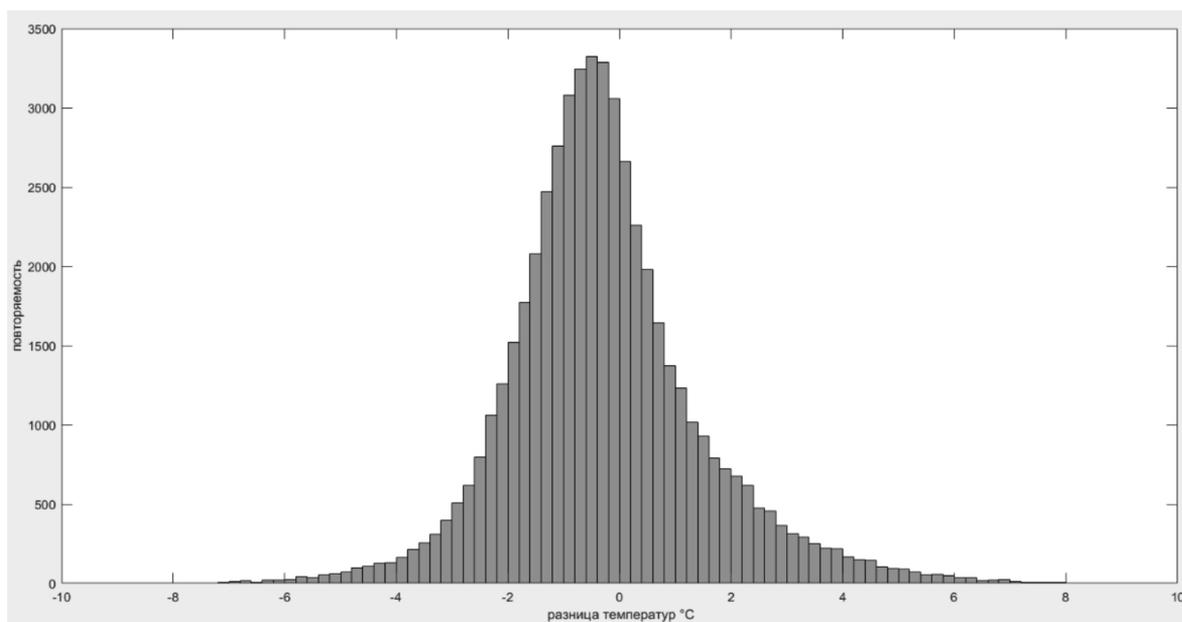


Рис. 3. Гистограмма ошибок по всей выборке.

Распределение осредненных ошибок по всем станциям (Рис. 4) подтверждает вышесказанное о том, что распределение близко к нормальному, снова видно смещение относительно нуля в отрицательную сторону. Необходимо отметить, что существует несколько станций со средними ошибками -4 $^{\circ}\text{C}$ и более, что указывает на сильные расхождения модели и станционных данных для этих точек.

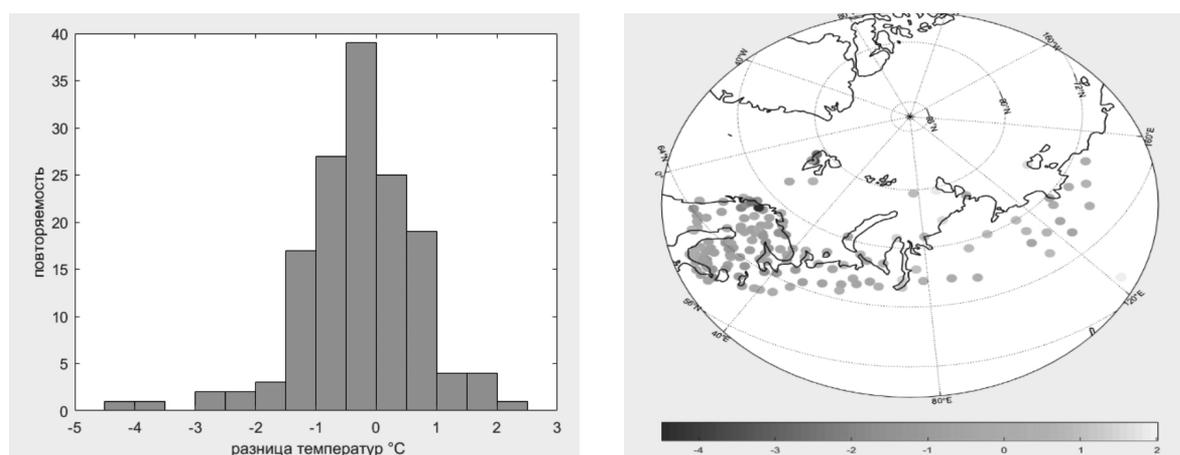


Рис. 4. Гистограмма распределения осредненных ошибок по всем станциям (слева) и карта средних ошибок по станциям (справа).

Дополнительное исследование (рис. 5) показало, что большие ошибки в значении могут быть вызваны различиями в высоте между станциями и соответствующими им узлами модельной сетки (табл.1). Для станции Svalbard airport ближайший к ней узел модельной сетки имеет высоту 320 метров, сама станция же расположена на высоте 28 метров над уровнем моря. Аналогично для станции Кваенанген, разница узла модели и станции составляет 421 метр. Такая существенная разница в высоте может систематически влиять на значения метеорологических характеристик, что и приводит к значительным искажениям модельных данных по отношению к станционным.

Таблица 1. Сравнение высот для станций с большими средними ошибками.

Название	Координаты	Высота над уровнем моря
Svalbard airport	78.25N, 15.4667E	28 метров
Узел сетки	78.1442N, 15.49E	320 метров
Кваенанген	69.8333N, 21.8842E	6 метров
Узел сетки	69.8356N, 21.9906E	427 метров

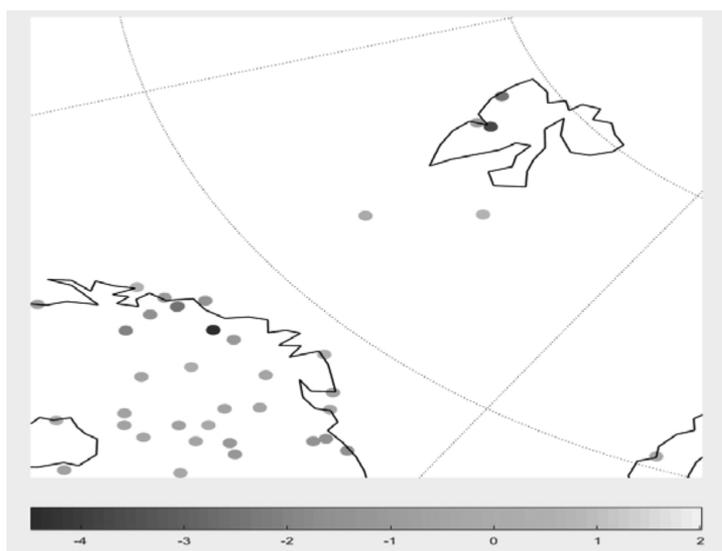


Рис.5. Станции Svalbard (обозначено верхней стрелкой) и Kvaenangen (обозначено нижней стрелкой) с большими средними ошибками.

Далее был проведен анализ воспроизведения экстремальных температур на примере сравнения данных 1-% и 5-% квантилей по станционным и модельным данным. Распределения разниц однопроцентных и пятипроцентных квантилей (рис. 6) между моделью и фактическими температурами воздуха показывают, насколько точно модель воспроизводит экстремальные температуры воздуха. В целом модель справляется с этой задачей, но заметны значительные ошибки (в диапазонах от -3 0C до -5 0C) на более континентальных станциях региона, а также на высокогорных станциях.

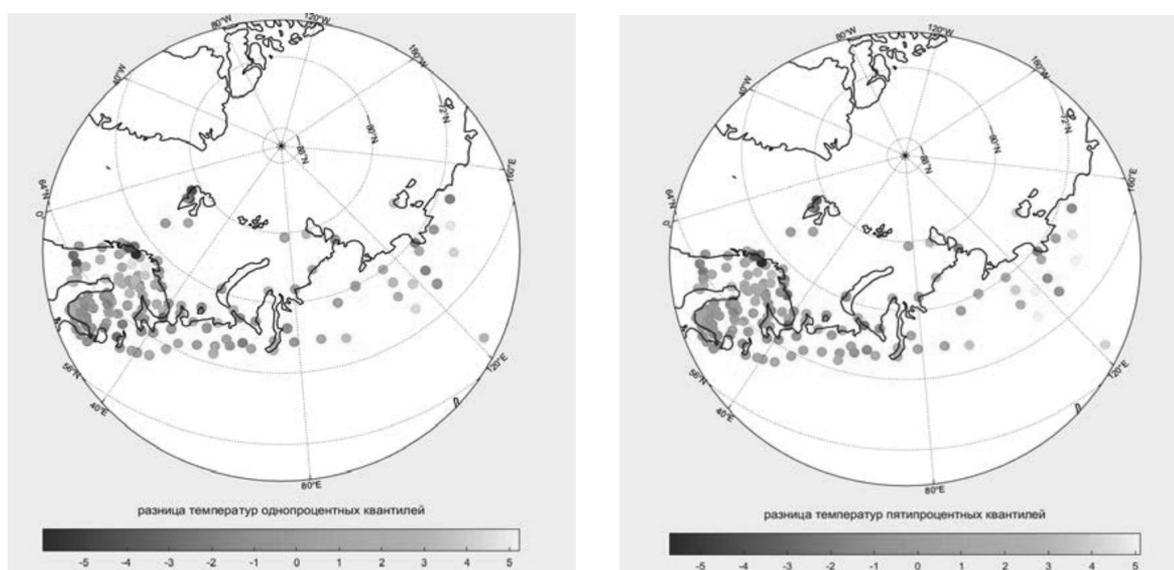


Рис.6. Карта разностей 1-% (слева) и 5-% (справа) квантилей.

Заключение. В качестве промежуточных итогов работы можно заключить, что представленные статистические показатели модельного архива COSMO-CLM указывают на то, что модель высококачественно воспроизводит приземную температуру. В дальнейшем будут более подробно выполнена оценка качества архива на основе сравнения с данными наблюдений как средних, так и экстремальных характеристик для различных сезонов года, месяцев, а также на более детальном временном масштабе. На основе полученных данных будет проведена оценка региональных изменений термического режима за исследуемый временной период.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Stocker, Thomas F., et al. "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." (2013).
2. Böhm U., Kücken M., Ahrens W., Block A., Hauffe D., Keuler K., Rockel B., Will A. CLM – The Climate Version of LM: Brief Description and Long-Term Applications // COSMO Newsletters. 2006. № 6. P. 225–235.

3. Vladimir Platonov and Mikhail Varentsov. Creation of the long-term high-resolution hydrometeorological archive for Russian Arctic: methodology and first results. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 386(012), 2019.
4. Vladimir Platonov and Mikhail Varentsov. Introducing a new detailed long-term COSMO-CLM hindcast for the Russian Arctic and the first results of its evaluation. *Atmosphere*, 12(3):350, 2021.
5. Giorgetta, M.A., Brokopf, R., Crueger, T., Esch, M., Fiedler, S., Helmert, J., Hohenegger, C., Kornblueh, L., Köhler, M., Manzini, E., et al. ICON-A, the Atmosphere Component of the ICON Earth System Model: I. Model Description. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2018, 10.7, 1613–1637. <https://doi.org/10.1029/2017MS001242>.
6. Voevodin, Vl., Antonov, A., Nikitenko, D., Shvets, P., Sobolev, S., Sidorov, I., Stefanov, K., Voevodin, Vad., Zhumatiy, S. Super-computer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community. *Supercomp. Front. and Innov.* 2019, 6, 4–11. <https://doi.org/10.14529/jsfi190201>.

SESSION III DEVELOPMENT OF EARTH SYSTEM MODEL COMPONENTS

СЕКЦИЯ III РАЗРАБОТКА КОМПОНЕНТ-МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ

Stochastic perturbation of parameters in SL-AV model

Alipova K.A., Tolstykh M.A., Goyman G.S.

Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

E-mail: ksusha_ast@mail.ru

The ensemble prediction system based on the global semi-Lagrangian atmospheric model SL-AV (Semi-Lagrangian, based on the equation of Absolute Vorticity) and Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) [1] is developed at the Institute of Numerical Mathematics RAS and Hydrometeorological Research Center of Russian Federation.

The properties of the SL-AV ensemble forecast are studied and optimized using the Stochastically Perturbed Parametrizations (SPP) [2] and Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies (SPPT) [3] algorithms. A series of numerical experiments are carried out using the SL-AV model with a resolution of 0.9×0.72 degrees in longitude and latitude, respectively, 96 vertical levels and an ensemble size of 60 members. Each series was computed for a period of 14 days from January 1, 2021 to January 14, 2021 with the start time of 00 hours UTC. Forecasts with lead times from 24 up to 240 hours are computed. The spread of the obtained ensembles and the root-mean-square error of the forecasts are compared with the spread and the RMSE of the quasi-operational forecast.

The implementation of SPP and SPPT increased the ensemble spread making it closer to the root-mean-squared error of ensemble mean forecast and thereby improved the reliability of probabilistic ensemble weather forecasts by SL-AV model.

REFERENCES:

1. Tolstykh M.A., Fadeev R.Yu., Shlyayeva A.V., Mizyak V.G., Rogutov V.S., Bogoslovsky N.N., Goiman G.S., Makhnorylova S.V., Yurova A.Yu. Atmosphere modelling system for seamless prediction. 2017. 166 p. (in Russian)
2. Ollinaho P. et al. Towards process-level representation of model uncertainties: stochastically perturbed parametrizations in the ECMWF ensemble. Q. J. R. Meteorol. Soc. V. 143. No. 702. P. 408-422. 2017. doi: 10.1002/qj.2931.
3. Buizza R., Miller M., Palmer T. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. ECMWF Tech. Memo. V. 279. 1999.

Стохастическое возмущение параметров в модели ПЛАВ

Алипова К.А., Толстых М.А. Гойман Г.С.

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

E-mail: ksusha_ast@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Все модели численного прогноза погоды имеют некоторую погрешность, и начальные данные также всегда содержат ошибки. В последние десятилетия активно развивается ансамблевый прогноз погоды, его идея состоит в том, чтобы описать вероятностную природу процессов, протекающих в атмосфере, и учесть неточности в определении начального состояния атмосферы и параметрическом описании ряда процессов в моделях атмосферы. Ансамблевый прогноз погоды обладает рядом преимуществ по сравнению с детерминированным прогнозом. Он позволяет получать априорную информацию об ошибке прогноза и делать вероятностный прогноз некоторых погодных явлений.

Одной из характеристик прогностического ансамбля является его разброс. Известно (например, [1]), что разброс ансамбля должен быть близок к среднеквадратичной ошибке прогноза. При нарушении этого требования возникает переоценка либо недооценка неопределенности прогноза, что ведет к росту ошибок.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Одним из способов повышения разброса ансамбля, а, следовательно, повышения надежности ансамблевых прогнозов, является стохастическое возмущение параметров физических параметризаций либо тенденций.

Алгоритм SPPT (Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies) [2], [3] позволяет учитывать неопределенность модели атмосферы. Возмущения добавляются не к отдельным параметрам, а к целым тенденциям параметризованных процессов. SPPT был разработан в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) и применяется в ансамблевой системе прогноза погоды. Возмущения, генерируемые алгоритмом SPPT, позволяют получить гораздо больший разброс ансамбля, чем в алгоритме SPP, который представлен далее. Недостаток данного подхода заключается в значительном воздействии на тенденции, что может привести к росту ошибки прогноза, соизмеримому с ростом разброса ансамбля.

Алгоритм SPP (Stochastically Perturbed Parametrizations) [4], [5] позволяет учитывать неопределенность, возникающую при использовании параметризаций процессов подсеточного масштаба, за счет добавления возмущений к некоторым параметрам. Данный алгоритм был разработан в ЕЦСПП и в настоящее время успешно применяется в модели IFS. Возмущения, генерируемые таким способом, дают возможность точно воздействовать именно на те параметры в параметризациях, которые содержат в себе большие неопределенности и значительно влияют на ошибку прогноза. Отсюда следует и основной недостаток этого подхода, он заключается в относительно малых возмущениях, которые вносят малый вклад в разброс прогностического ансамбля.

Для глобальной модели атмосферы ПЛАВ была реализована гибридная версия алгоритмов SPP и SPPT, а также проведена работа по исследованию влияния различных наборов возмущаемых параметров на свойства получаемых ансамблей при стохастическом возмущении параметров физических параметризаций и тенденций. Исследование проводилось с системой ансамблевого прогноза погоды на основе глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ с разрешением $0,9 \times 0,72$ градуса по долготе и широте соответственно, 96 вертикальных уровней, а также локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля (LETKF) [6], размер ансамбля – 60. В качестве возмущаемых параметров в SPP были выбраны 29 параметров в параметризациях процессов подсеточного масштаба в атмосфере (глубокая и мелкая конвекция, планетарный пограничный слой, торможение гравитационных волн, образование и выпадение осадков, облачность и пр.) и на поверхности Земли (тепло- и влагообмен с подстилающей поверхностью с учетом типа растительности, наличия снега и пр.). Также в SPPT было реализовано возмущение лишь двух тенденций - завихренности и температуры, так как известно, что применение метода SPPT к возмущению тенденции удельной влажности воздуха приводит к систематическому осушению атмосферы.

Были проведены серии тестовых расчетов для определения предельных значений амплитуды возмущений для каждого из параметров. Затем были проведены серии расчетов для настройки необходимого разброса прогностического ансамбля. Тестирование производилось на вычислительной системе Росгидромета Cray XC-40. Каждая серия считалась на 14 суток для периода с 01.01.2021 по 14.01.2021, в 00 UTC вычислялись прогнозы с заблаговременностями 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168, 192, 216, 240 часов. Разброс полученных ансамблей и среднеквадратичная ошибка прогнозов сравнивались, соответственно, с разбросом и ошибкой опытного варианта системы ансамблевого прогноза, эксплуатируемого

квазиоперативно. В этом варианте применяется постоянное по времени и пространству возмущение параметров, которое различается только по номеру участника ансамбля.

На рисунках 1-3 представлены некоторые результаты расчетов, усредненные за 14 суток. Синим и красным цветом обозначен, соответственно, разброс прогностического ансамбля и среднеквадратичная ошибка квазиоперативного прогноза, а зеленым и желтым – разброс и ошибка прогноза, вычисленного с добавлением стохастических возмущений.

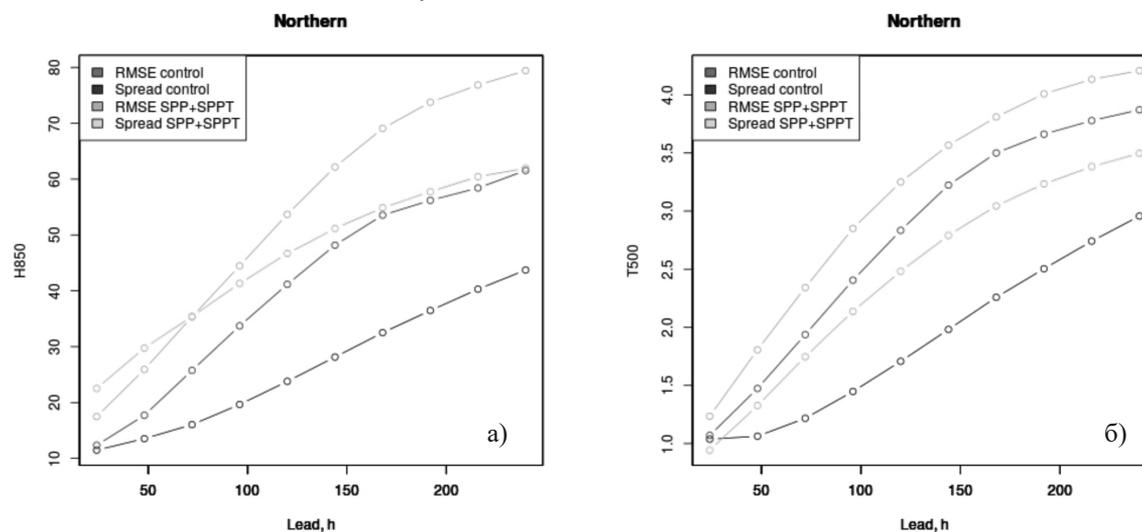


Рис. 1. Разброс ансамбля и среднеквадратичная ошибка прогноза в северном полушарии для H850 (а) и T500 (б).

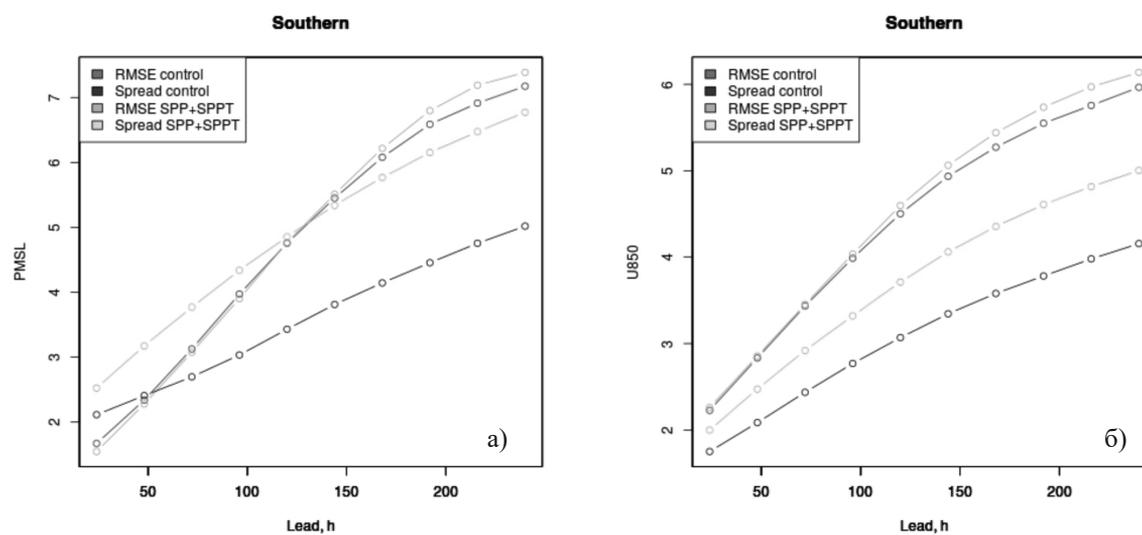


Рис. 2. Разброс ансамбля и среднеквадратичная ошибка прогноза в южном полушарии для PMSL (а) и U850 (б).

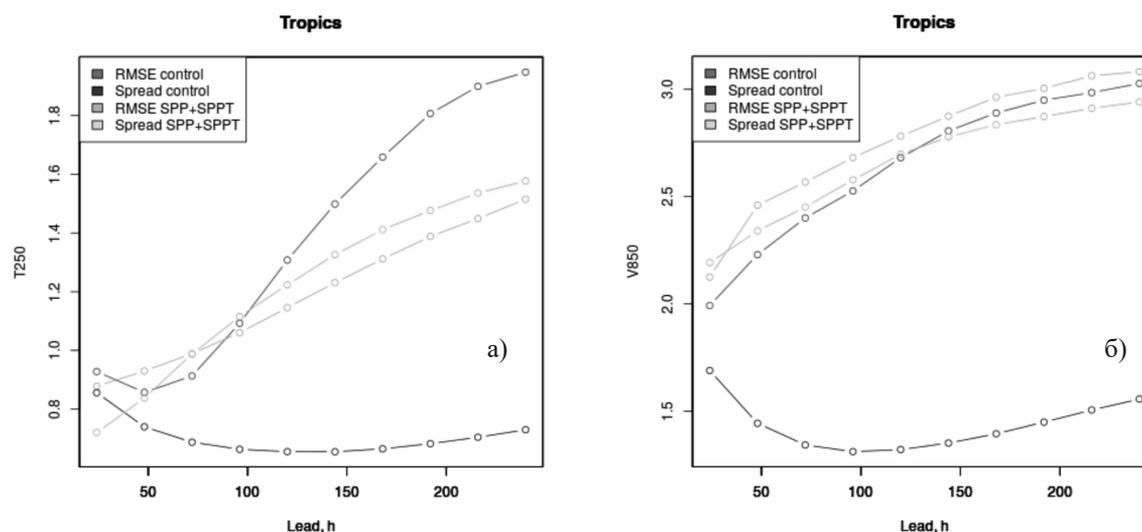


Рис. 3. Разброс ансамбля и среднеквадратичная ошибка прогноза в тропиках для T250 (а) и V850 (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было проведено исследование свойств и оптимизация прогностического ансамбля в глобальной модели атмосферы ПЛАВ с применением алгоритмов SPP и SPPT. Результаты серий численных экспериментов показывают существенное увеличение разброса ансамбля по сравнению с расчетами без стохастических возмущений. В итоге разброс ряда оцениваемых параметров существенно приблизился к среднеквадратической ошибке среднего по ансамблю прогноза. В настоящее время продолжаются работы по настройке отдельных параметров SPP и SPPT.

ЛИТЕРАТУРА:

1. V. Fortin, M. Abaza, F. Anctil, R. Turcotte, Why should ensemble spread match the RMSE of the ensemble mean? *J. Hydrometeorol.*, vol. 15, no. 4, pp. 1708–1713, 2014, doi: 10.1175/JHM-D-14-0008.1.
2. R. Buizza, M. Miller, and T. Palmer, Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System, *ECMWF Tech. Memo.*, vol. 279, 1999.
3. T. N. Palmer et al., *Stochastic Parametrization and Model Uncertainty*, 2009.
4. P. Ollinaho et al., Towards process-level representation of model uncertainties: stochastically perturbed parametrizations in the ECMWF ensemble, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 143, no. 702, pp. 408–422, 2017, doi: 10.1002/qj.2931.
5. S. T. K. Lang, S. J. Lock, M. Leutbecher, P. Bechtold, and R. M. Forbes, Revision of the Stochastically Perturbed Parametrizations model uncertainty scheme in the Integrated Forecasting System, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 147, no. 735, pp. 1364–1381, 2021, doi: 10.1002/qj.3978.
6. М. А. Толстых, В. В. Шашкин, Р. Ю. Фадеев и др. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. 2017. 166 с.

Comparative computational performance of two different techniques for calculation of the sea surface height in a climate ocean model

^{1,2}Blagodatskih D., ^{2,1}Onoprienko V., ^{3,2,1}Mortikov E., ²Iakovlev N.

¹ Nuclear Safety Institute RAS, Moscow, Russia

² Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

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

E-mail: blagodat@ibrae.ac.ru

Modern climate models require a large amount of computational resources due to both high spatial resolution and the requirement to perform calculations for a long model time. For example, the INCM5 climate model [1] developed at the INM RAS uses a grid with a horizontal resolution of $\sim 1^\circ$ and 40 vertical levels in the ocean dynamics module, whereas modern international programs for intercomparison of climate models assume calculations spanning hundreds of years [2].

One of the possible ways to increase performance is to use highly scalable algorithms on parallel computing clusters. In this report, a comparison of the computational efficiency on parallel computing systems of the ocean dynamics module of the INMCM5 climate model is carried out using two different techniques for calculation of the sea surface height.

The first technique is based on modeling the adaptation processes of hydrological fields by splitting into barotropic and baroclinic modes and further solving the system of equations of barotropic adaptation, where, in addition to the sea surface height, two components of the barotropic velocity appear. It is this technique that is used by default in the INMCM5 model. However, according to this technique, at each time step, it is necessary to solve the matrix equation with an asymmetric matrix with 7 diagonals.

The second technique proposes to use, instead of a complex system of barotropic adaptation, a five-diagonal symmetric equation for the level, obtained by substituting the level gradient into the continuity equation with subsequent integration along the vertical direction and taking into account the boundary conditions for the vertical velocity. The vertical turbulent mixing, Coriolis force, baroclinic gradient, etc. are introduced into the right side of the sea surface height equation.

- The study was supported by Russian Science Foundation, grant No. 21-71-30023.

REFERENCES:

1. Mathematical modelling of the Earth System / Volodin V.M/ and other/ Ed/ by Iakovlev N.G. — M.: MAKS Press, 2016. — pp. 151-171/
2. Griffies, S. M., Danabasoglu, G., Durack et al.: OMIP contribution to CMIP6: experimental and diagnostic protocol for the physical component of the Ocean Model Intercomparison Project, Geosci. Model Dev., 9, 3231–3296, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3231-2016>, 2016.

Сравнение вычислительной эффективности двух методик расчета уровня океана в климатической модели

^{1,2}Благодатских Д.В., ^{2,1}Оноприенко В.А., ^{3,2,1}Мортиков Е.В., ²Яковлев Н.Г.

¹ Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

² Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

³ Научно-Исследовательский Вычислительный Центр Московского Государственного Университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: blagodat@ibrae.ac.ru

Сравнение вычислительной эффективности двух методик расчета уровня океана в климатической модели. Современные климатические модели требуют большого количества вычислительных ресурсов, что объясняется как высоким пространственным разрешением, так и требованием проведения расчетов на длительное модельное время. Например, в климатической модели INCM5 [1], разрабатываемой в ИВМ РАН, в блоке динамики океана используется сетка с разрешением $0.5^\circ \times 0.25^\circ$ по горизонтали и 40 уровней по вертикали, а современные международные программы сравнения климатических моделей предполагают расчеты длительностью в сотни лет модельного времени [2].

Одним из возможных способов увеличения производительности является использование алгоритмов, обладающих высокой масштабируемостью на параллельных вычислительных кластерах. В данном докладе, проводится сравнение эффективности счета на параллельных вычислительных системах блока динамики океана климатической модели INCM5 с использованием двух методик расчета уровня моря.

Первая методика основана на моделировании процессов адаптации гидрологических полей путем расщепления на баротропную и бароклинную моду и дальнейшего решения системы уравнений баротропной адаптации, где помимо уровня фигурируют две компоненты баротропной скорости. Именно эта методика используется по умолчанию в модели INCM5. Однако, согласно данной методике на каждом шаге по времени приходится решать матричное уравнение с несимметричной матрицей с 7 диагоналями.

Вторая методика предлагает использовать вместо сложной системы баротропной адаптации уравнение только для уровня моря с пятидиагональной симметричной матрицей (в три раза меньшей размерностью чем матрица для системы уравнений баротропной адаптации), получаемое подстановкой градиента уровня в уравнение неразрывности с последующим интегрированием по вертикали и с учетом граничных условий для вертикальной скорости. Учет вертикального турбулентного перемешивания, силы Кориолиса, бароклинного градиента и т.п. осуществляется в правой части уравнения на уровень.

Ниже приводится краткое описание сущности двух сравниваемых методик.

Блок динамики океана климатической модели INCM5 [1] основан на численном решении примитивной системы уравнений гидротермодинамики океана в приближении гидростатики и Буссинеска, с использованием σ -системы координат по вертикали. Данная система уравнений записывается в следующей векторно-инвариантной форме:

$$\begin{aligned} \frac{\partial [\mathbf{U}]_h}{\partial t} &= - \left[(\nabla \times \mathbf{U}) \times \mathbf{U} + \frac{1}{2} \nabla (U^2) \right]_h - k \times [\mathbf{U}]_h - \frac{1}{\rho_0} [\nabla p]_h + D^U, \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= \rho g, \\ \nabla \cdot \mathbf{U} &= 0, \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= -\nabla \cdot (\theta \mathbf{U}) + D^\theta + R^\theta, \\ \frac{\partial S}{\partial t} &= -\nabla \cdot (S \mathbf{U}) + D^S, \\ \rho &= \rho(T, S, p), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где

$\vec{U} = (u, v, w)$ – вектор скорости течения в точке (x, y, z) в координатах (i, j, k) ;

θ – потенциальная температура;

S – соленость;

$[]_h$ – оператор проекции на подпространство (i, j) ;

l – параметр Кориолиса;

D^U, D^v, D^S – операторы параметризации подсеточных турбулентных процессов;

p – давление;

ρ_0 – фоновая плотность;

ρ – отклонение плотности от некоторого равновесного профиля;

R^{θ} – внутренний источник тепла, вызванный проникающей солнечной радиацией.

Процесс интегрирования по времени системы (1.1) состоит из нескольких этапов. На первом этапе происходит расчет процессов адвективного переноса и диффузии скалярных компонент θ^{n+1}, S^{n+1} и компонент скорости $u^{n+1/2}, v^{n+1/2}$. Используя значения θ^{n+1} и S^{n+1} рассчитывается бароклиный градиент давления, затем вычисляются скорости u^{n+1}, v^{n+1} , вызванные бароклиным градиентом давления:

$$\begin{cases} \frac{u^{n+1} - u^{n+1/2}}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho_0} P_x \\ \frac{v^{n+1} - v^{n+1/2}}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho_0} P_y \end{cases} \quad (1.2)$$

Далее производится разделение компонент скорости на баротропную и бароклиную моды:

$$u^{n+1} = \bar{u} + u', \quad v^{n+1} = \bar{v} + v' \quad (1.3)$$

$$\bar{u} = \int_0^1 u'^{n+1} d\sigma, \quad \bar{v} = \int_0^1 v'^{n+1} d\sigma \quad (1.4)$$

Бароклинные компоненты скоростей $(u')^{n+1/2}, (v')^{n+1/2}$ на новом временном слое получаются в результате решения следующей системы:

$$\begin{cases} \frac{(u')^{n+1} - u'}{\Delta t} - l(v')^{n+1} = 0 \\ \frac{(v')^{n+1} - v'}{\Delta t} + l(u')^{n+1} = 0 \end{cases} \quad (1.5)$$

Система (1.5) решается неявной схемой с методикой диагонализации пространственного оператора для члена Кориолиса [1].

Уравнения для расчета баротропных компонент $\bar{u}^{n+1/2}, \bar{v}^{n+1/2}$ и распределения уровня ζ^{n+1} на новом временном слое записываются в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{\bar{u}^{n+1} - \bar{u}}{\Delta t} - l\bar{v}^{n+1} = g \frac{\delta \zeta^{n+1}}{\Delta x}, \\ \frac{\bar{v}^{n+1} - \bar{v}}{\Delta t} + l\bar{u}^{n+1} = g \frac{\delta \zeta^{n+1}}{\Delta y}, \\ \frac{\bar{\zeta}^{n+1} - \bar{\zeta}}{\Delta t} = -\frac{\delta(\bar{u}^{n+1} H)}{\Delta x} + \frac{\delta(\bar{v}^{n+1} H)}{\Delta y} \end{cases} \quad (1.6)$$

После решения системы (1.6), производится расчет $u^{n+1/2}, v^{n+1/2}$ по следующим формулам:

$$u^{n+1/2} = \bar{u}^{n+1/2} + (u')^{n+1/2}, \quad v^{n+1/2} = \bar{v}^{n+1/2} + (v')^{n+1/2} \quad (1.7)$$

Вторая методика предполагает внесение ряда изменений в описанную выше схему расщепления по физическим процессам.

Расчет значений скаляров на новом временном слое θ^{n+1} и S^{n+1} остается без изменений. Расчет промежуточных скоростей $u^{n+1/2}, v^{n+1/2}$ производится с учетом как адвективных членов, так и силы Кориолиса. При этом в качестве схемы интегрирования по времени используется схема Адамса-Бэшфорда второго порядка.

Расчет скоростей u^{n+1}, v^{n+1} производится с учетом баротропного градиента:

$$\begin{cases} \frac{u^{n+1} - u^{n+1/2}}{\Delta t} = g \frac{\delta \zeta^{n+1}}{\Delta x} \\ \frac{v^{n+1} - v^{n+1/2}}{\Delta t} = g \frac{\delta \zeta^{n+1}}{\Delta y} \end{cases} \quad (1.8)$$

Уравнение для ζ^{n+1} получается подстановкой выражений (1.8) в уравнение неразрывности и интегрирование по глубине (1.9) с учетом использования граничного условия для вертикальной скорости (1.10):

$$w^{n+1} = \int_1^0 \left[\frac{\delta(u^{n+1}H)}{\Delta x} + \frac{\delta(v^{n+1}H)}{\Delta y} \right] \cdot \Delta \sigma \quad (1.9)$$

$$w^{n+1} = \frac{\zeta^{n+1} - \zeta^n}{\Delta t} \quad (1.10)$$

■ Исследование было осуществлено в рамках гранта РФФИ № 21-71-30023.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Математическое моделирование Земной системы / Володин Е.М., Галин В.Я., Грицун А.С. и др. Под ред. Яковлева Н.Г. — М.: МАКС Пресс, 2016. — С. 151-171
2. Griffies, S. M., Danabasoglu, G., Durack et al.: OMIP contribution to CMIP6: experimental and diagnostic protocol for the physical component of the Ocean Model Intercomparison Project, Geosci. Model Dev., 9, 3231–3296, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3231-2016>, 2016.

Choosing a horizontal grid for numerical simulation of equatorial dynamics with ocean model

^{1,2}Onoprienko V., ^{2,1}Blagodatskih D., ^{3,2,1}Mortikov E., ²Iakovlev N.

¹ Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

² Nuclear Safety Institute RAS, Moscow, Russia

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

E-mail: pbl@ibrae.ac.ru

We investigate the dependency of the equatorial dynamics of the ocean model on a choice of the horizontal grid. The possibility of using coarse grids with a step up to 2 - 4 degrees is being considered. The experiments are performed on Murray's grid [1] and Madec and Imbard's grid [2]. The evolution of an initially horizontally homogeneous ocean under wind forcing and the dynamics of equatorial gravitational waves are investigated.

In some cases we need to reduce the simulation time of numerical experiments at the cost of special resolution of the model. When studying the paleoclimate, it is important to use a grid with a coarse resolution, since the typical calculations are lengthy; the duration of several thousand model years is possible.

Our aim is to determine the largest horizontal grid step that will allow the model to reproduce the characteristic features of equatorial dynamics. We plan to use this result in our following research to find a global rectangular grid of optimal size. For each experiment case, we will carry out reference calculations with high resolution. Then we will increase the grid step until the difference between the coarse grid solution and the reference calculation becomes too large.

The Madec and Imbard grid is symmetrical about the equator at low latitudes. In the Southern Hemisphere, it coincides with the latitude-longitudinal grid, and in low latitudes of the Northern Hemisphere it is very close to it. We expect that the symmetry of the position of the coordinate lines relative to the geographic equator allows calculations with a coarser resolution.

To determine the coordinates of Madec and Imbard's grid nodes, it is necessary to numerically integrate the analytical expression along the segment. We have improved the algorithm for calculating the coordinates of the Madec and Imbard grid points and metric coefficients. Instead of integrating along meridian-like coordinate lines and using interpolation to determine the coordinates of the grid nodes we integrate an analytical expression along the only one ray. The interpolation is no longer needed and metric coefficients are calculated directly without difference approximation used by Madec and Imbard. Numerical integration is carried out with high-precision arithmetic Arb library [3].

■ The study was supported by Russian Science Foundation, grant No. 21-71-30023.

REFERENCES:

1. Murray R. J. Explicit generation of orthogonal grids for ocean models // Journal of Computational Physics. — 1996. — T. 126. — №. 2. — С. 251-273.

2. Madec G., Imbardd M. A global ocean mesh to overcome the North Pole singularity //Climate Dynamics. – 1996. – Т. 12. – №. 6. – С. 381–388.
3. F. Johansson. “Arb: efficient arbitrary-precision midpoint-radius interval arithmetic”, IEEE Transactions on Computers, 66(8):1281–1292, 2017. DOI: 10.1109/TC.2017.2690633.

Выбор горизонтальной сетки для воспроизведения экваториальной динамики численной моделью океана

^{1,2} Оноприенко В.А., ^{2,1} Благодатских Д.В., ^{3,2,1} Мортиков Е.В., ² Яковлев Н.Г.

¹ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

² Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

³ Научно-Исследовательский Вычислительный Центр Московского Государственного Университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: pbl@ibrae.ac.ru

В данной работе исследуется влияние выбора горизонтальной сетки на экваториальную динамику численной модели океана. Рассматривается возможность использования грубых сеток с шагом до 2 – 4 градусов. Эксперименты выполняются на сетке Мюррея [1] и сетке Мадека и Имбара [2]. Расчетная область представляет собой экваториальный канал. Исследуется эволюция изначально горизонтально однородного океана под действием ветра и динамика экваториальных гравитационных волн.

Существуют классы расчетов, для которых уменьшение времени их выполнения важнее точности решения. При исследовании палеоклимата обычно используют сетку с грубым разрешением, так как продолжительность расчетов составляет несколько тысяч модельных лет. Размер сетки может быть важен для некоторых задач, связанных с ансамблевыми расчетами, когда размер ансамбля важнее высокого разрешения его элементов.

Мы хотим определить, наибольший шаг горизонтальной сетки, позволяющий воспроизводить характерные черты экваториальной динамики. Эту оценку планируем использовать в последующих работах, чтобы подобрать глобальную прямоугольную сетку оптимального размера.

При движении от экватора к полюсам масштаб синоптических вихрей уменьшается. В высоких широтах к шагу сетки предъявляются более строгие требования, чем на экваторе. Сетка должна позволять модели воспроизводить синоптическую динамику океана, при этом шаг на экваторе должен быть как можно больше и уменьшаться с ростом широты.

Для нашего исследования мы выделили характерные случаи экваториальной динамики: приспособление течений к геострофическому равновесию в горизонтально однородном экваториальном канале под действием трения ветра и динамику экваториальных гравитационных волн. Для каждого случая проведем эталонные расчеты с высоким разрешением. Затем будем увеличивать шаг сетки, пока разница между решением на грубой сетке и эталонным расчетом не станет слишком большой.

Прямоугольные сетки позволяют организовать более быстрый доступ к памяти при расчетах по сравнению с неструктурированными сетками, поэтому в этой работе мы рассматриваем только прямоугольные сетки. В численных экспериментах мы планируем использовать сетки со смещенными полюсами: сетку Мюррея [1] и сетку Мадека и Имбара [2]. Координатные линии сеток изображены на рисунках 1 и 2.

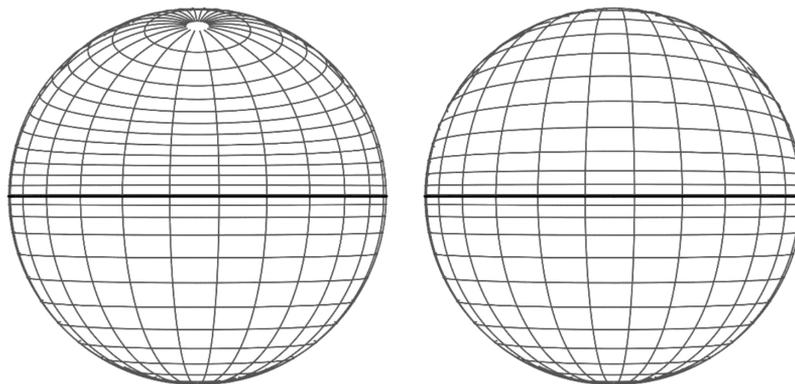


Рис. 1. Координатные линии сетки стеки Мадека и Имбара Восточном полушарии (слева) и Западном (справа). Географический экватор отмечен жирной линией.

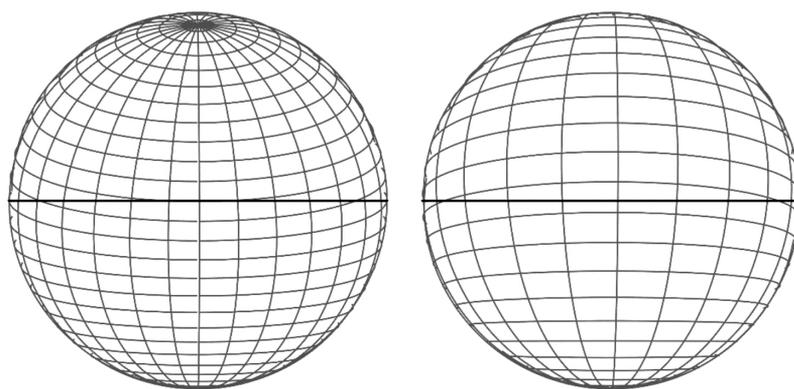


Рис. 2. Координатные линии сетки стеки Мюррея в Восточном полушарии (слева) и Западном (справа). Географический экватор отмечен жирной линией.

Обычную широтно-долготную сетку мы не рассматриваем, так как ее нельзя применить в дальнейшем для глобального расчета динамики океана. Это связано с тем, что полюса глобальной сетки лучше располагать на суше, чтобы не решать проблему связанной с ними сингулярности. Северный полюс широтно-долготной сетки не находится на суше. Проблему нельзя решить поворотом сетки, так как на суше Земле нет подходящих участков-антиподов [1].

Сетка Мадека и Имбара симметрична относительно экватора в низких широтах. В Южном полушарии она совпадает с широтно-долготной сеткой, а в низких широтах Северного Полушария близка к ней. Мы ожидаем, что симметричность положения координатных линий относительно географического экватора позволяет проводить расчеты с более грубым разрешением.

Координаты узлов сетки Мюррея записываются аналитически в явном виде. Координаты узлов сетки Мадека и Имбара определяются в результате численного интегрирования.

Мы улучшили алгоритм расчета координат узлов сетки Мадека и Имбара и метрических коэффициентов. В оригинальной работе авторы предлагали рассчитывать положение координатных линий интегрированием методом Рунге-Кутты вдоль каждого луча, а затем с помощью интерполяции определять координаты узлов сетки. Для определения метрических коэффициентов производные аппроксимировали разностными выражениями.

Интегрирование вдоль координатных линий можно заменить интегрированием функции одного переменного вдоль одного луча. Дальнейшая интерполяция при этом не требуется, для определения метрических коэффициентов не нужны разностные выражения. В случае сетки размера $m \times n$, требовалось интегрировать вдоль n лучей и выполнить m интерполяций. При использовании предлагаемого алгоритма нужно вычислить m интегралов вдоль отрезков одного луча.

Интегрирование одномерной функции реализовано с помощью библиотеки арифметики произвольной точности Arb [3]. Используемый алгоритм вычисляет не только значения интеграла, но и границы интервала погрешности внутри которого находится точное значение интеграла.

■ Работа поддержана Российским Научным Фондом, грант №21-71-30023.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Murray R. J. Explicit generation of orthogonal grids for ocean models // *Journal of Computational Physics*. – 1996. – Т. 126. – №. 2. – С. 251-273.
2. Madec G., Imbard M. A global ocean mesh to overcome the North Pole singularity // *Climate Dynamics*. – 1996. – Т. 12. – №. 6. – С. 381-388.
3. F. Johansson. "Arb: efficient arbitrary-precision midpoint-radius interval arithmetic", *IEEE Transactions on Computers*, 66(8):1281-1292, 2017. DOI: 10.1109/TC.2017.2690633.

Значительное сокращение площади морского льда в Арктике как фактор обильных апрельских снегопадов на территории Европы

Фролов Д.М.

Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

E-mail: denisfrolov@mail.ru

Волна холода в Европейских странах, сопровождавшаяся интенсивными снегопадами 14-15 апреля 2021 после потепления в конце марта – начале апреля до 20°C объясняется интенсивным испарением с поверхности Баренцева моря вызванными сокращением площади морских льдов в Арктике. Подобная ситуация в марте 2018 года, когда в марте Европу пришла волна холода со снегопадами названная “Beast from the East” подробно описана в статье Bailey, H., Hubbard, A., Klein, E.S. et al. Arctic sea-ice loss fuels extreme European snowfall. Nat. Geosci. (2021) <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00719-y>. Сравнение описанной ситуации 2018 года с ситуацией 2021 года произведено также в очерке Snow chaos in Europe caused by melting sea-ice in the Arctic <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/04/210413110628.htm>

В нём, в частности, говорится, что апрельский снегопад в 2021 году, который выпадал во время цветения фруктовых деревьев в Европе, может быть напрямую связан с уменьшением площади морского льда в Баренцевом море в Арктике и что аналогичная ситуация была в 2018 году.

В Европейской части России также после двадцатиградусного тепла в начале апреля 2021 года 21 апреля снова выпал снег на уже начавшую свою вегетацию растительность.

- Исследование проведено в рамках госбюджетной темы «Опасность и риск природных процессов и явлений».

Considerable Arctic Sea ice loss as a factor of heavy April snowfalls in Europe

Frolov D.M.

Lomonosov Moscow State University, Geographical Faculty, Moscow, Russia

E-mail: denisfrolov@mail.ru

According to the going climate warming on the Earth and in particularly in Arctic (fig. 1):

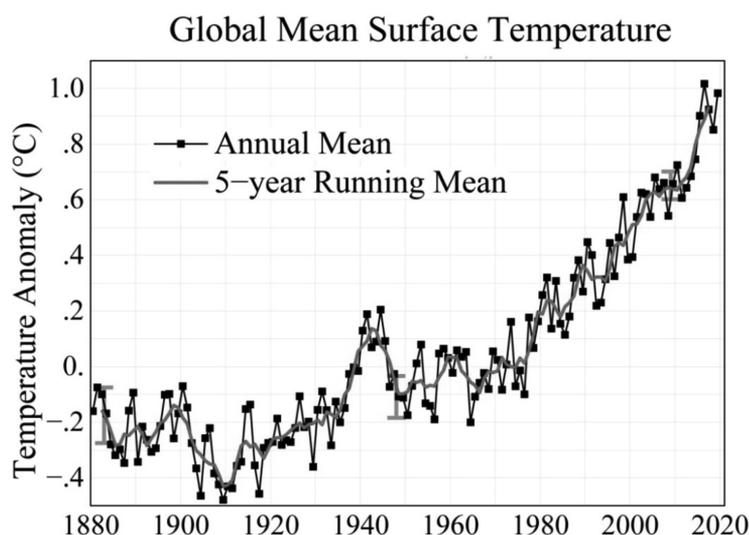


Figure 1 The anomaly of the Earth global surface mean temperature (<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>).

Earth's global average surface temperature in 2020 tied with 2016 as the warmest year on record, according to an analysis by NASA (<https://www.nasa.gov/press-release/2020-tied-for-warmest-year-on-record-nasa-analysis-shows>, <https://climate.copernicus.eu/new-decade-brings-reference-period-change-climate-data>). And also for the territory of Russian Federation 2020 it was the warmest year as well (figure 2):

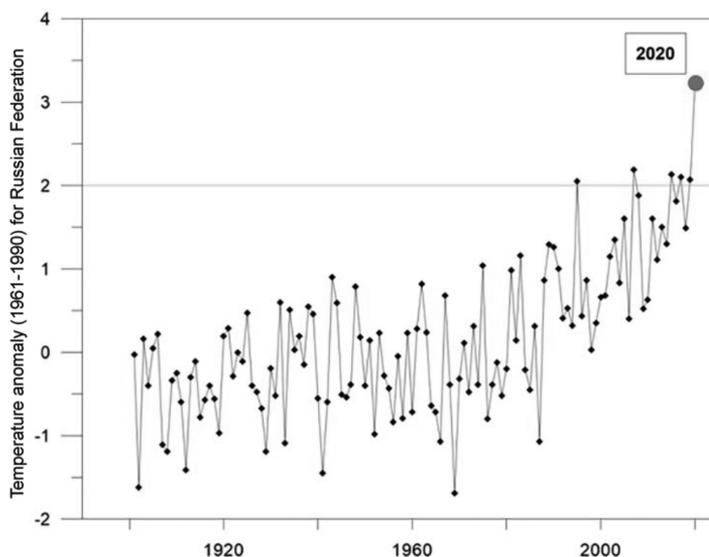


Figure 2. Air temperature anomaly relatively 1961-1990 for the territory of Russia (<https://meteoinfo.ru/novosti/17710-2020-god-samyj-teplyj-v-meteorologicheskoy-letopisi-rossii>).

Especially intensively warming goes for the territory of Siberia (<https://meteoinfo.ru/novosti/17710-2020-god-samyj-teplyj-v-meteorologicheskoy-letopisi-rossii>)

And also according to the NSIDC posts (<https://nsidc.org/arcticseaicenews/2021/01/ho-ho-ho-hum-december/>, <https://nsidc.org/arcticseaicenews/2020/12/persistently-peculiar/>, <https://nsidc.org/arcticseaicenews/2020/11/blue-waves-in-november-in-the-arctic/>) the sea ice extent in the Arctic Seas was also at the record low, especially for Russian Arctic (figure 3 and 4).

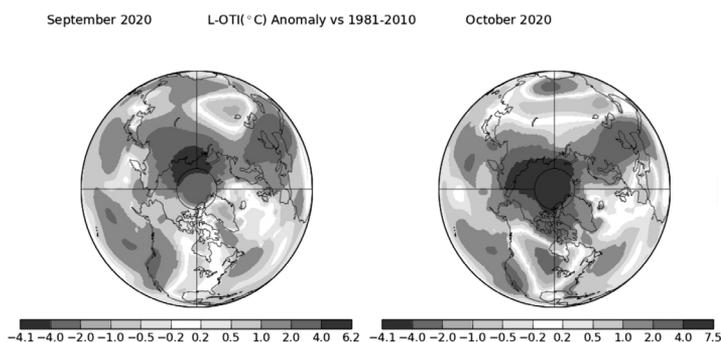


Figure 3. Air temperature anomalies in Northern Hemisphere in months 2020 (<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>).

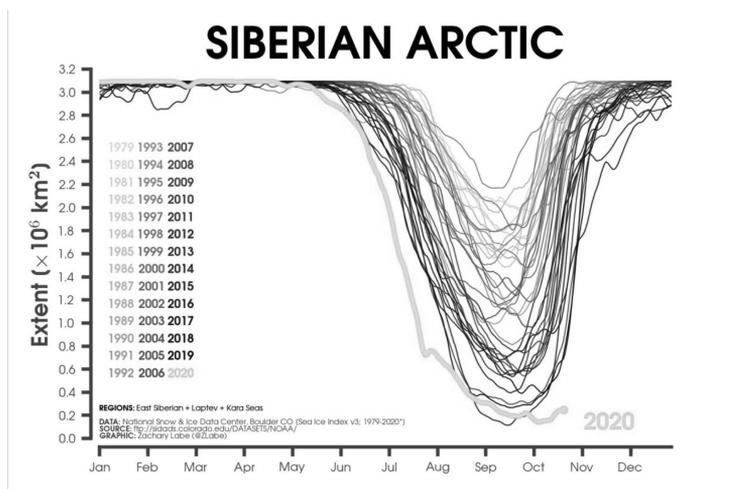


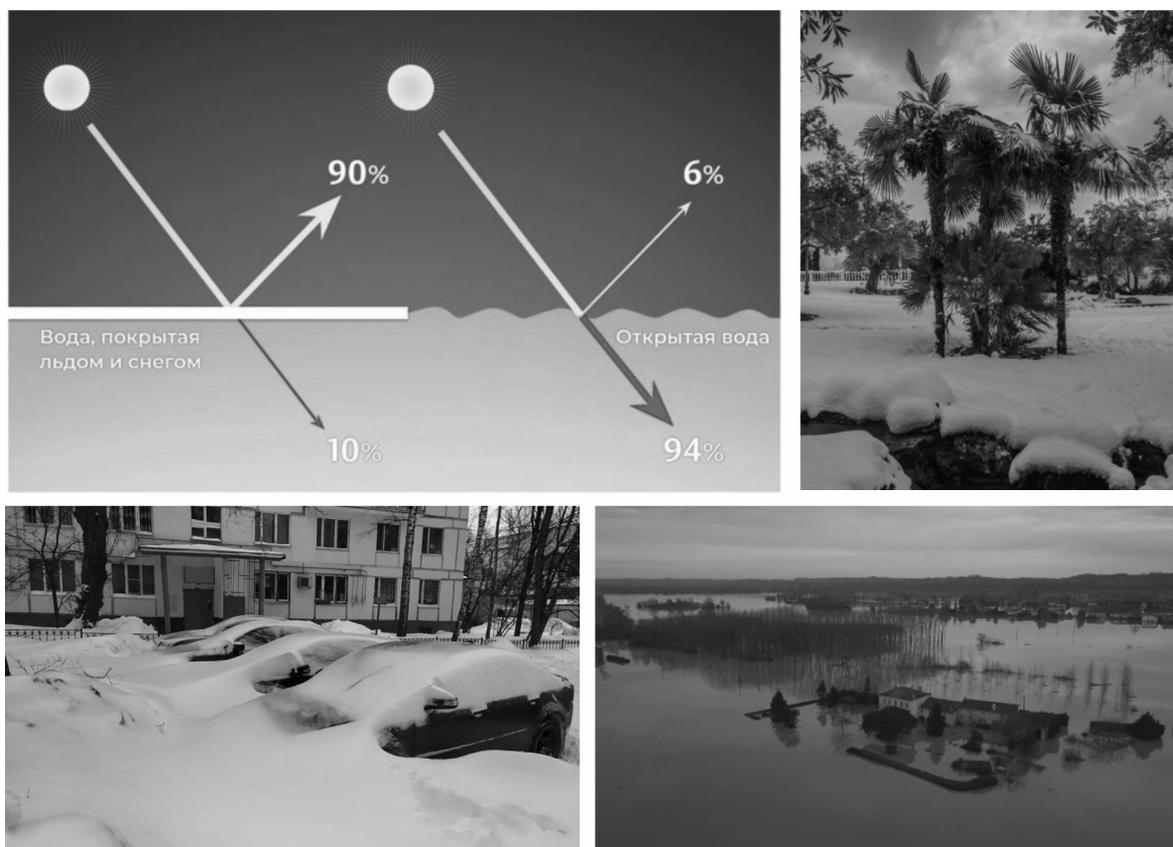
Figure 4. A minimum of sea ice extent in the Russian Arctic seas in 2020 (<https://nsidc.org/>).

This can lead to some extra evaporation and water vapor atmosphere saturation and due to atmosphere circulation extreme temperature anomalies and heavy snowfalls in the following winter season in the higher latitudes according to for example:

Wegmann M., et al Arctic moisture source for Eurasian snow cover variations in autumn // Environ. Res. Lett. – 2015 – Vol. 10, N 054015

Bailey, H., Hubbard, A., Klein, E.S. et al. Arctic sea-ice loss fuels extreme European snowfall. Nat. Geosci. (2021). <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00719-y>.

This was observed in the winter season 2020/21 in Northern Eurasia. These low temperature anomalies and heavy snowfalls brought difficult consequences for economics and for living there people.



Especially it has appeared as a cold wave in European countries, accompanied by intense snowfalls on April 14-15, 2021 after warming in late March - early April to 20 ° C, is explained by intense evaporation from the surface of the Barents Sea caused by a reduction in the area of sea ice in the Arctic. A similar situation in March 2018, when in March a cold wave with snowfalls called “Beast from the East” came to Europe, is described in detail in the article by Bailey, H., Hubbard, A., Klein, E.S. et al. Arctic sea-ice loss fuels extreme European snowfall. Nat. Geosci. (2021) <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00719-y>. A comparison of the described situation in 2018 with the situation in 2021 was also made in the essay Snow chaos in Europe caused by melting sea-ice in the Arctic <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/04/210413110628.htm>

It says, in particular, that the April snowfall in 2021, which fell during the flowering of fruit trees in Europe, may be directly related to the decrease in the area of sea ice in the Barents Sea in the Arctic and that a similar situation was in 2018.

In the European part of Russia, after a twenty-degree heat at the beginning of April 2021, on April 21, snow fell again on the vegetation that had already begun its growing season.

- The study was carried out in a frame of state topic « Danger and risk of natural processes and phenomena».

Modification of the soil-snow block of the climatic model of the INM RAS

¹Chernenkov A.Yu., ^{2,3,4}Kostrykin S.V., ²Volodin E.M.

¹ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

² Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

³ Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia

⁴ Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

E-mail: chernenkov.ayu@phystech.edu, s_kostr@mail.ru, volodinev@gmail.com

Climate modeling has been actively developing in recent decades. To describe the water cycle correctly, it is important that the models describe the seasonal snow cover correctly.

During the transitional seasons, when the temperature fluctuates around zero point, the snow can melt, but part of the melt water stays inside the layer and can refreeze. Also, some time after the snowfall, the snow becomes denser. All these affect the properties of the snow cover.

This paper considers the fifth version of the climate model of the INM RAS (INMCM5). Here described the changes in the soil-snow block of the model: changes of melting process and density of the snow cover, implementation of the process of refreezing of melt water.

It is assumed that when the snow melts, the water does not immediately go to the upper boundary of the soil, but seeps through the thickness of the snow. In this case, the melt water can refreeze, giving off heat to the snow cover. It is worth noting that now the snow cover is presented as a certain substance, consisting of three evenly mixed fractions: snow in the usual view, melt water contained in it, and refrozen snow. The evolution of the snow density is described as in the SWAP model. To take into account all fractions of snow, it is proposed to calculate the density of the snow layer as weighted average.

To test the changes made, climate calculations were carried out in 1997-2002 with the original and modified versions of the model. It follows from the calculation results that the changes into the soil-snow block lead to a later melting of snow, and the process of snow cover formation has become more intensive. This is especially noticeable in the Arctic, on the western coast of Canada and Alaska, as well as in the Himalayas. It can be noted good according to the data of the formation and disappearance of snow cover and the territories on which it lies with the data of the CAMS Global Reanalysis (EAC4) of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts and observation data.

Note that the result obtained can be used for a detailed description of snow metamorphism and a more accurate calculation of the snow albedo.

Модификация почвенно-снежного блока климатической модели ИВМ РАН

¹Черненко А.Ю., ^{2,3,4}Кострыкин С.В., ²Володин Е.М.

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

² Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

³ Институт глобального климата и экологии им. Ю.А. Израэля, Москва, Россия

⁴ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

E-mail: chernenkov.ayu@phystech.edu, s_kostr@mail.ru, volodinev@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия активно развивается моделирование климата. Для корректного описания круговорота воды важно, чтобы модели правильно обрабатывали сезонный снежный покров.

В переходные сезоны, когда температура колеблется около нулевой отметки, снег может таять, но при этом на верхнюю границу почвы уходит не вся талая вода, некоторая ее часть задерживается в слое и может перемерзнуть. Также с течением времени после снегопада снежные частицы сминаются и слипаются, в результате чего снег уплотняется. Все эти факторы влияют на свойства снежного покрова.

В данной работе рассматривается пятая версия климатической модели ИВМ РАН (INMCM5). Данная модель состоит из двух основных блоков: модели общей циркуляции атмосферы и модели общей циркуляции океана. Данная версия модели участвует в международном проекте по сравнению климатических моделей CMIP6 (Coupled Models Intercomparison Project). Некоторые результаты по моделированию современного климата с помощью данной модели представлены в работе [1].

В работе описываются изменения в описании снега моделью. Модифицируется процесс таяния, а также реализуются процесс перемерзания талой воды и изменение плотности снежного покрова, которая ранее считалась постоянной: $\rho_{\text{snow}} = 0.1854 \text{ г/см}^3$. Стоит отметить, что изменения затрагивают только атмосферный блок.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ВНЕСЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В МОДЕЛЬ

Изменения в описании снега затрагивают почвенно-снежный блок, который входит в атмосферную часть модели. Данный блок представлен одномерной моделью, описывающей процессы тепло- и влагопереноса в почве, растительности и снежном покрове, а также обмен этой системы теплом и влагой с атмосферой, его описание достаточно подробно приведено в работах [2], [3].

Определим переменные, необходимые для описания внесенных изменений:

- S – водно-эквивалентная толщина слоя снега,
- S_{sn} – "настоящий" снег (по сути, крошка из пористого льда),
- M_{soil} – вода, поступившая на поверхность почвы,
- P – интенсивность осадков при температуре подстилающей поверхности, меньшей 0°C ,
- λ – удельная теплота плавления льда,
- \mathcal{L} – удельная теплота парообразования,
- \mathcal{E} – поток скрытого тепла на поверхность снега, идущего на испарение / сублимацию,
- ρ_w – плотность воды,
- M – интенсивность снеготаяния,
- S_{wat} – талая вода, оставшаяся в слое снега,
- F – интенсивность замерзания воды,
- S_{friz} – перемерзшая талая вода (по сути, крошка из плотного льда),
- T_{sn} – температура снега,
- ΔE – избыточный / дефицитный поток тепла в тепловом балансе на поверхности.

В исходной версии модели водно-эквивалентная толщина слоя снега вычисляется на основании следующего уравнения баланса:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = P - M - \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{L}} \cdot \rho_w \quad (1)$$

Процесс таяния начинается, когда температура подстилающей поверхности становится больше 0°C , при этом весь растаявший снег, а также возможный дождь, выпавший при наличии снежного покрова, поступают на поверхность почвы.

Идея модификации заключается в более физическом описании процесса снеготаяния. Предполагается, что при таянии снега вода не уходит моментально на верхнюю границу почвы, а постепенно просачивается сквозь толщу снега. При этом талая вода может замерзнуть, отдавая тепло снежному покрову. Стоит отметить, что теперь снежный покров представляется как некоторая субстанция, состоящая из трех фракций: непосредственно снега в обычном представлении, талой вода, содержащейся в нем и перемерзшего снега.

Процесс снеготаяния-перемерзания реализуется с помощью **Алгоритма 1**.

Критическая масса воды $S_{\text{wat}}^{\text{max}}$, способная содержаться в слое снега зависит от количества снега и его пористости ϵ_{sn} . Предлагается оценивать эту массу [4] и пористость снега [5] по следующим формулам:

$$S_{\text{wat}}^{\text{max}} = S \frac{\epsilon_{\text{sn}}}{1 - \epsilon_{\text{sn}}} \quad (2)$$

$$\epsilon_{\text{sn}} = 0.11 \left(\frac{\rho_w}{\rho_{\text{sn}}} - 1 \right) \quad (3)$$

Эволюцию плотности снега предлагается описывать как в модели SWAP [4], [6]:

$$\rho_{\text{sn}}(\tau_i) = \rho_{\text{sn}}(\tau_{(i-1)}) [1 + 0.1 H_{\text{sn}}(\tau_{(i-1)}) \exp\{0.08 T_{\text{sn}} - 21 \rho_{\text{sn}}(\tau_{(i-1)})\}] \quad (4)$$

В данной модели H_{sn} – водно-эквивалентная толщина слоя снега в сантиметрах, плотность снега ρ_{sn} вычисляется в г/см^3 , температура слоя снега T_{sn} задается в градусах Цельсия. Нужно заметить, что здесь шаг по времени 1 сутки, поэтому для использования данной зависимости в модели ИВМ была необходима переинтерполяция. Чтобы учесть все фракции снега, предлагается рассчитывать плотность снежного слоя как среднее взвешенное:

$$\rho_{\text{snow}} = \rho_{\text{old}} \cdot \delta_{\text{old}} + \rho_{\text{new}} \cdot \delta_{\text{new}} + \rho_w \cdot \delta_{\text{wat}} + \rho_{\text{ice}} \cdot \delta_{\text{friz}} \quad (5)$$

Здесь ρ_{old} – плотность лежалого снега, рассчитанная по эволюционной модели, $\rho_{\text{new}} = 0.1 \text{ г/см}^3$ – плотность свежеснежавшего снега, $\rho_w = 1 \text{ г/см}^3$ – плотность воды, $\rho_{\text{ice}} = 0.917 \text{ г/см}^3$ – плотность льда, δ_{old} , δ_{new} , δ_{friz} , δ_{wat} – массовые доли (в водном эквиваленте) старого, свежего, перемерзшего снега и талой воды.

Алгоритм 1

Если

 $(\Delta E > 0, T_{sn} = 0^\circ\text{C} \text{ и } S^{n-1} > 0)$, то:

$$M = \frac{\Delta E}{\lambda}, \delta = \frac{S_{sn}^{n-1}}{S_{sn}^{n-1}} + S_{rfrz}^{n-1}$$

$$S_{sn}^n = S_{sn}^{n-1} + P - \Delta t \left(\frac{\varepsilon}{L} \cdot \rho_w + \delta \cdot M \right)$$

$$S_{rfrz}^n = S_{rfrz}^{n-1} - \Delta t(1 - \delta)M$$

$$S_{wat}^{max} = f(S_{sn}^n), \Delta S_{wat} = \max\{\Delta t \cdot M, S_{wat}^{max}\}$$

$$M_{soil} = \max\{\Delta t \cdot M - S_{wat}^{max}, 0\}$$

$$S_{wat}^n = S_{wat}^{n-1} + \Delta S_{wat}$$

Конец Если

Конец Если

$$S^n = S_{sn}^n + S_{wat}^n + S_{rfrz}^n$$

Иначе:

Если

 $(S^{n-1} > 0, S_{wat}^{n-1} > 0 \text{ и } T_{sn} = 0^\circ\text{C})$, то:

$$F = -\frac{\Delta E}{\lambda}, S_{sn}^n = S_{sn}^{n-1} + P - \Delta t \left(\frac{\varepsilon}{L} \cdot \rho_w - F \right)$$

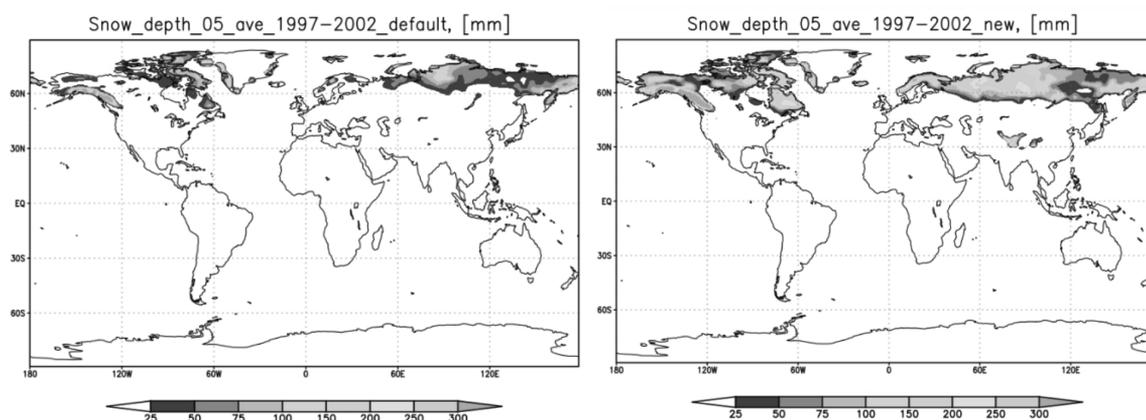
$$S_{rfrz}^n = S_{rfrz}^{n-1} + (S_{wat}^{n-1} - S_{wat}^n)$$

$$S_{wat}^n = \max\{S_{wat}^{n-1} - \Delta t \cdot F, 0\}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для тестирования внесенных изменений были проведены расчеты климата в 1997-2002 годах с исходной и модифицированной версиями модели. Из результатов расчетов следует, что внесенные изменения в почвенно-снежный блок, приводят к более позднему сходу снега (в отдельных регионах разница доходит до месяца), а процесс формирования снежного покрова происходит более интенсивно. Так, теперь в Заполярье, горах на западном побережье Канады и Аляски, а также в районе Гималаев в некоторых районах снег продолжает сохраняться даже в июне, в то время как раньше он практически весь успевал стаять в течении мая. Вклад описанных процессов в формирование устойчивого снежного покрова в конце осени - начале зимы наиболее заметен в заполярных регионах Евразии и Гималаях. Эти результаты согласуются с архивными данными наблюдений за климатом, например, данные National Centers for Environmental Information (NCEI). Также можно отметить хорошее согласие по моментам образования и схода снежного покрова и территориям, на которых он лежит, с данным Глобального реанализа CAMS (EAC4) Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды.

Также нужно отметить, что более подробное описание почвенно- снежного блока привело к увеличению количества снега в целом. Наибольшее различие между версиями наблюдается в весенние месяцы, при этом с июля по сентябрь различия минимальны. В сравнении с данными наблюдений и реанализа суммарная масса снега в случае модифицированной версии оказывается завышенной, но, вместе с тем, описание площади, покрытой снегом, наоборот, улучшается. Заметим, полученные результаты согласуются с тенденцией к завышению массы снега при более точном описании площади покрытия в ряде климатических моделей, участвующих в CMIP6, при использовании более подробного описания снега [7].



Среднемесячная водно-эквивалентная толщина слоя снега по данным (слева) исходной и (справа) модифицированной версии модели ИВМ (месяц - май).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы был модифицирован почвенно-снежный блок глобальной климатической модели ИВМ РАН, в результате чего было улучшено воспроизведение площади поверхности, покрытой снегом, в сравнении с данными реанализа. В модифицированной версии снег разделяется на лежалый,

свежевыпавший и перемерзший, а также учитывается талая вода, которая может содержаться в слое снега. Стоит отметить, что полученный результат можно использовать для подробного описания метаморфизма снега и более точного расчета снежного альбедо.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Evgeny Volodin, Evgeny Mortikov, Sergey Kostykin et al., Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5, Climate Dynamics, 2017.
2. Володин, Лыкосов, Параметризация процессов тепло- и влагообменов в системе растительность–почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных наблюдений, Известия РАН. Физика атмосферы и океана., 1998, No 4., С. 453–465.
3. Володина, Бенгтссон, Лыкосов, Параметризация процессов тепло-влагопереноса в снежном покрове для моделирования сезонных вариаций гидрологического цикла суши, Метеорология и гидрология., 2000, Т. 10, No 5.
4. Gusev Y. M., Nasonova O. N., The simulation of heat and water exchange at the land–atmosphere interface for the boreal grassland by the land-surface model SWAP, Hydrological Processes., 2002, Vol. 16, no. 10, P. 1893–1919.
5. Кучмент, Демидов, Мотовилов, Формирование речного стока. Физико-математические модели, под ред. С. В. Музылева., Наука, Москва, 1983 Т. 216.
6. Yosida Z. et al, Physical studies on deposited snow. Thermal properties., Contributions from the Institute of Low Temperature Science., 1955, Vol. 7, P. 19–74.
7. L. Mudryk, M. Santolaria-Otin, G. Krinner et al, Historical Northern hemisphere snow cover trends and projected changes in the CMIP6 multi-model ensemble, The Cryosphere, 2020, Vol. 14, No. 7, P. 2495–2514.

Development of dynamical core for the perspective global atmospheric circulation model

^{1,2,3}Shashkin V., ^{1,3,2}Goyman G.

¹ G.I. Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

² Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

E-mail: v.shashkin@inm.ras.ru, gordeygoyman@gmail.com

The increase of supercomputing systems power will allow weather forecast with global mesoscale models soon. Such models can reproduce the significant part of extreme weather events. Their accuracy and forecast leadtime are not limited by the boundary conditions unlike regional atmospheric models.

Most of current weather prediction models have horizontal resolution of about 10 km. The revision of atmospheric modeling methods is needed to switch to finer grids because of the parallel efficiency requirements [2] and non-hydrostatic nature of the mesoscale atmospheric phenomena. Also, the practical weather forecast using traditional regular latitude-longitude grid is not possible with resolution finer than 10 km [16].

It is widely accepted that a typical next generation weather forecasting model will be non-hydrostatic model using local spatial discretization on the one of quasi-uniform spherical grids [18]. However, the need to solve non-hydrostatic set of equations is still questionable [21]. There are two next-generation atmospheric models that are already introduced to the forecasting systems: ICON by DWD [20] and FV3 in USA [7]. The active development takes place in UK MetOffice [11], European Center for Medium Range Weather Forecast [9] and Environment Canada [8]. The Russian atmospheric model of such type is under development at INM RAS and Hydrometeorological center of Russia.

This work summarizes the latest activity on the development of dynamical core of the next generation weather prediction model. Three work directions are considered: (1) study of horizontal and temporal discretization properties within shallow water model on the sphere; (2) study of vertical and temporal discretization properties using non-hydrostatic vertical slice model and (3) development of parallel computations library for the cubed-sphere grid.

We use equiangular cubed sphere grid obtained by the central projection of the grid on the cube's faces to the inscribed sphere [13]. The developed shallow water model is based on the high-order finite-difference spatial approximations. A number of Eulerian and semi-Lagrangian time-integrations schemes can be applied. The vertical slice non-hydrostatic model uses finite-difference approximation on the Charney-Philips staggered

grid. Semi-Lagrangian and Eulerian time-integration schemes are considered. Both models are verified using standard test cases [19, 5, 15, 12], test results are in good agreement with published results from other authors [17, 4, 11].

The parallel computations library for the cubed-sphere grid is developed using Fortran2008 language. The solver for linearized Euler equations set is implemented using this library. The solver scales efficiently up to 5000 computational cores of Roshydromet Cray XC-40 supercomputer.

Разработка динамического ядра для перспективной модели общей циркуляции атмосферы

^{1,2,3} Шашкин В.В., ^{1,3,2} Гойман Г.С.

¹ Институт вычислительной математики РАН им. Г.И. Марчука, Москва, Россия

² Гидрометцентр России, 123242, Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия

E-mail: v.shashkin@inm.ras.ru, gordeygoyman@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

Рост мощности вычислительных систем в скором времени позволит рассчитывать прогноз погоды с помощью глобальных моделей, разрешающих мезомасштабные метеорологические явления (масштабом около 10 км). Такие модели смогут воспроизводить значительную часть экстремальных явлений погоды, а их точность и заблаговременность прогноза не будут лимитироваться граничными условиями, как в случае региональных моделей.

В настоящее время, подавляющее большинство глобальных прогностических моделей имеют горизонтальное разрешение около 10 км. При этом, значение 10 км является своеобразным порогом, за которым применение существующих моделей связано с рядом сложностей [2, 15]. Данные сложности обусловлены необходимостью массивно-параллельной реализации программного комплекса, эффективного при использовании десятков или сотен тысяч вычислительных ядер, а также тем, что мезомасштабные атмосферные явления могут быть существенно негидростатичны. Требования массивно-параллельной реализации диктуют отказ от популярных спектральных и Фурье методов дискретизации по пространству, так как для них необходимо выполнение глобальных операций с данными. Так же, при высоком разрешении невозможно использовать регулярную широтно-долготную сетку [15] - явные методы интегрирования по времени столкнутся с жестким ограничением на шаг по времени из-за сходимости меридианов к полюсам. По этой же причине применение неявных методов интегрирования приведет к необходимости решать плохо обусловленные системы уравнений, сходимость алгоритмов их решения будет медленной.

Выработалось общепринятое мнение [18] относительно моделей атмосферы нового поколения, которые заменят текущие модели в системах глобального среднесрочного прогноза погоды. Прежде всего, это модель на одной из сеток с квазиравномерным разрешением на сфере [15], использующая локальные методы дискретизации по пространству (конечные разности, конечные объемы, локальные вариации метода конечных элементов). Преобладает мнение, что модель должна решать систему уравнений динамики негидростатической атмосферы, однако в последнее время дискуссия на этот счет возобновилась [21].

На текущий момент, в системы среднесрочного прогноза погоды внедрены две модели нового поколения: модель ICON [20] немецкой метеослужбы и модель FV3 [7] в США. Разработка моделей нового поколения активно идет в метеослужбе Великобритании [11], Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды [9], метеослужбе Канады [8]. Разработка отечественной модели атмосферы подобного класса ведется в ИВМ РАН и Гидрометцентре России. В данной работе описывается текущее состояние разработки блока численного решения уравнений динамики (динамического блока) новой модели и полученные результаты. Работы проводятся по трем направлениям: (1) исследование свойств пространственных аппроксимаций на сетках с квазиравномерным разрешением на сфере в рамках модели мелкой воды, исследование свойств временных дискретизаций для моделей мелкой воды; (2) исследование свойств пространственных и временных аппроксимаций в рамках негидростатической модели в вертикальной плоскости; (3) разработка библиотеки для параллельных вычислений на сетке кубической сферы. На всех этапах заложена максимальная гибкость выбора используемых численных методов, что позволяет сравнивать их между собой, а в будущем обеспечит возможность универсального применения разрабатываемого динамического блока для разных задач: среднесрочного и сезонного прогноза погоды, моделирования климата.

МОДЕЛЬ МЕЛКОЙ ВОДЫ НА СЕТКЕ КУБИЧЕСКАЯ СФЕРА

В качестве сетки с квазиравномерным разрешением на сфере мы выбрали кубическую сферу равноугольного типа [13]. Такая сетка получается путем центральной проекции сетки на гранях куба на вписанную сферу. Преимущества сетки кубическая сфера равноугольного типа - высокая равномерность разрешения, квадратная структура на гранях куба. Наличие структуры облегчает реализацию численных методов высокого порядка, снижает их вычислительную стоимость. Недостатки - неортогональность, излом линий сетки на ребрах куба.

Мы реализовали два варианта модели мелкой воды: с полулагранжевым и эйлеровым описанием адвекции прогностических переменных. Для дискретизации по пространству использовался метод конечных разностей 2-го и 4-го порядков. Полулагранжевый вариант использует сетку без разнесения переменных (тип А по Аракаве [1]), эйлеров вариант работает на сетке с разнесением переменных типа С [1]. В сочетании с полулагранжевым подходом к описанию адвекции применяются полуявная [14] и экспоненциальная [6] схемы интегрирования по времени. В эйлеровом варианте модели применяются явная, полуявная и экспоненциальная схемы.

Все варианты модели мелкой воды испытывались на стандартных тестовых задачах [19] и [5]. Точность модели соответствовала аналогам [17], [3] при одинаковом порядке аппроксимации по пространству. В задаче "баротропная неустойчивость" [5] физические моды доминируют над модами, порожденными ошибками дискретизации (эффект "отпечатка сетки"), уже при разрешении около 100 км (Рис. 1). Такой результат хорошо согласуется с результатами конечно-объемных моделей высокого порядка аппроксимации. В тесте "обтекание горы", модифицированном так, чтобы поле орографии включало мелкомасштабную составляющую, полуявная полулагранжевая схема решения демонстрирует ложный резонансный рост возмущений [10], если не применяется фильтрация по времени. Экспоненциальная полулагранжевая схема лишена этого недостатка.

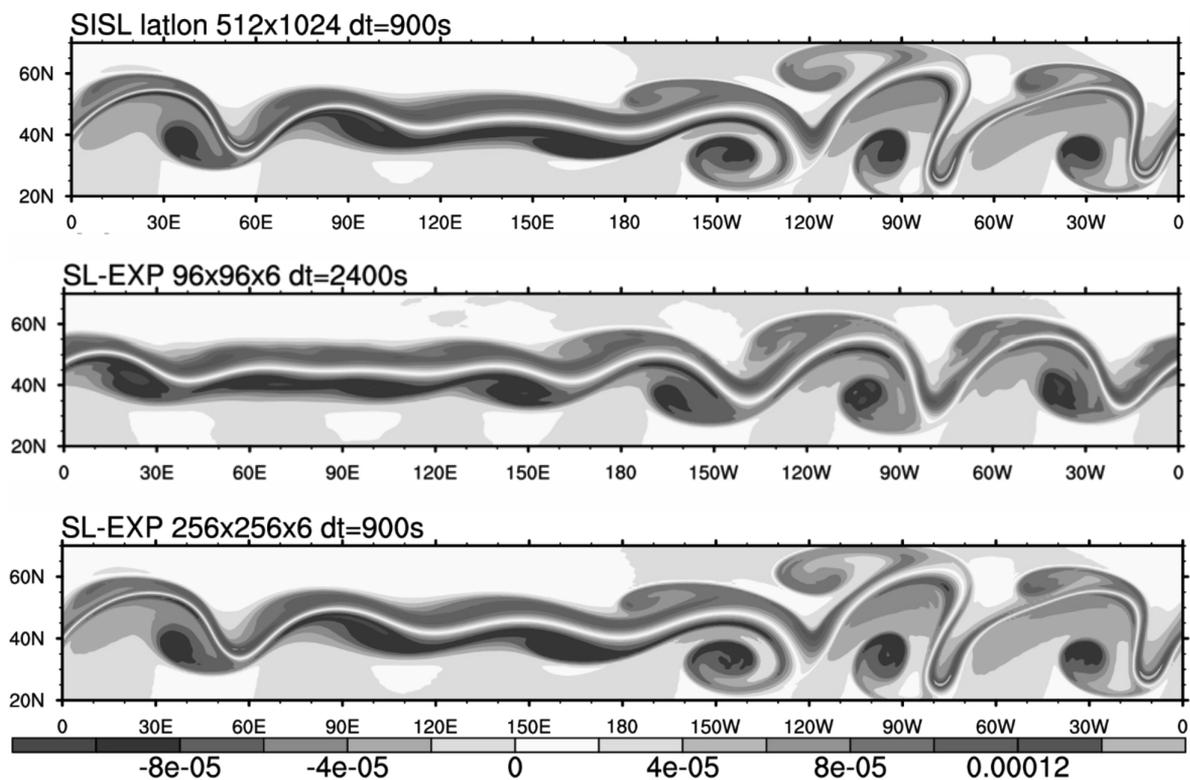


Рис. 1. Численное решение задачи "баротропная неустойчивость". Сверху вниз - решение на полуявном полулагранжевым методом на регулярной широтно-долготной сетке 512x1024 (шаг около 40 км), решение экспоненциальным полулагранжевым методом на сетке кубическая сфера 6x96x96 (шаг около 100 км), то же на сетке 6x256x256 (шаг около 40 км).

МОДЕЛЬ НЕГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ АТМОСФЕРЫ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Модель негидростатической атмосферы в вертикальной плоскости построена на основе уравнений Эйлера. Уравнения записаны в системе координат, линии которой огибают рельеф у поверхности и сглаживаются по мере подъема. Мелкомасштабная составляющая орографии сглаживается быстрее крупномасштабной [4]. Интегрирование системы уравнений негидростатической атмосферы может производиться эйлеровыми явным, горизонтально-явным вертикально- неявным методом, полуявным ме-

тодом, а также итеративно- неявным полулагранжевым методом. По пространству применяется конечно-разностная дискретизация второго порядка точности на смещенной сетке типа C по горизонтали [1], Чарни-Филипса по вертикали.

Испытание модели проводилось на стандартных экспериментах распространение гравитационной волны [12], обтекание горы типа К. Шара [15], а также на задачах обтекания орографических препятствий различной высоты и формы при разных параметрах атмосферы. Практически показана устойчивость модели при углах склона более 45°. Результаты численных экспериментов хорошо согласуются с моделями-аналогами (Рис. 2).

Разработанная модель и ее линеаризованная версия использовалась для исследования устойчивости итеративно- неявных полулагранжевых схем численного решения уравнений Эйлера. Устойчивость итеративно- неявных полулагранжевых схем, достаточная для практического применения в моделях атмосферы, достигается при четном числе итераций вычисления траекторий, использовании фонового профиля давления и децентрирования схемы Кранка-Николсон. Фоновая температура атмосферы, которая используется для построения гидростатического фонового профиля давления, может варьироваться в широких пределах (целесообразно использовать фоновую температуру, лежащую в интервале от минимальной до максимальной температуры модельной атмосферы). Оптимальное число итераций вычисления траекторий - 4.

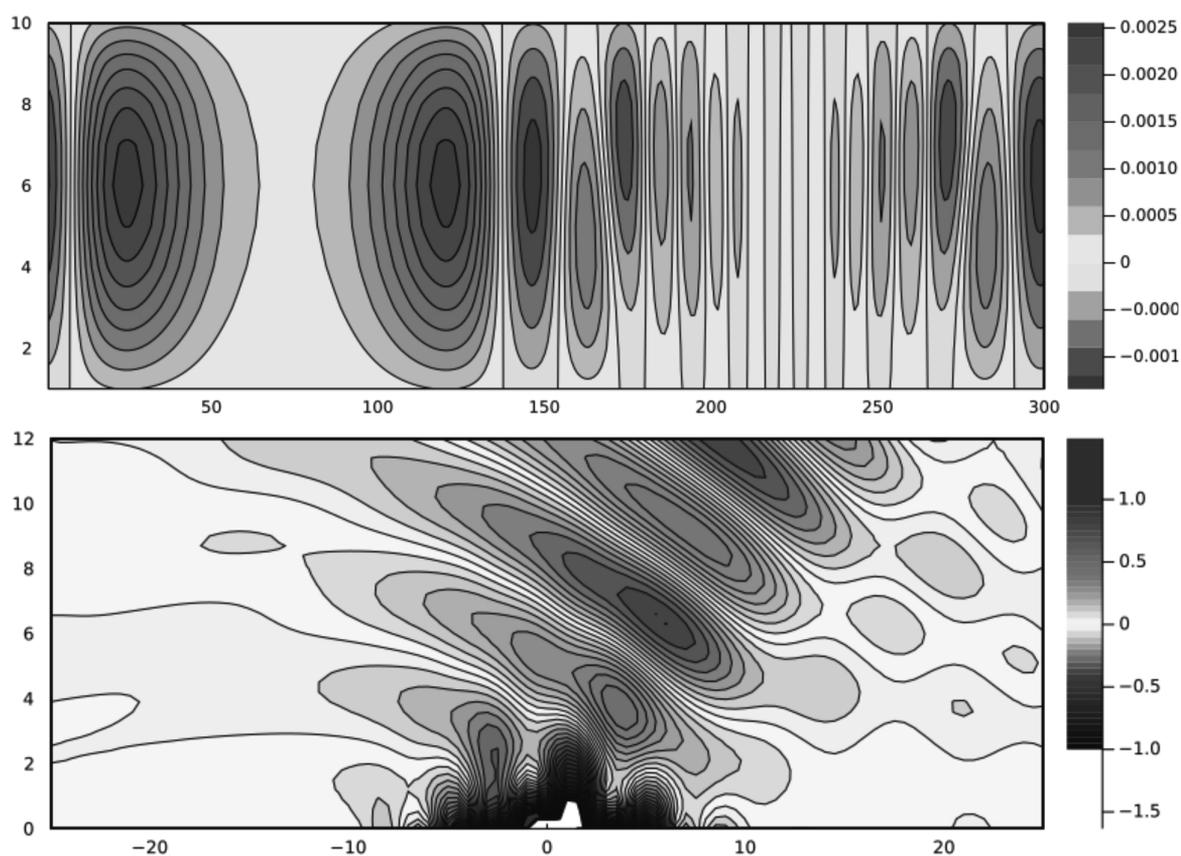


Рис. 2. Численные решения тестовых задач для негидростатической модели в вертикальной плоскости с помощью итеративно- неявного полулагранжева метода с шагом по времени 60с. Сверху - поле возмущения потенциальной температуры в задаче распространение гравитационной волны через 1 час моделирования. Снизу - поле вертикальной скорости в задаче обтекание горы К. Шара, через 1,5 часа моделирования.

БИБЛИОТЕКА ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА СЕТКЕ КУБИЧЕСКАЯ СФЕРА

Реализация подходов, изложенных в разделах 2 и 3, в рамках полной модели трехмерной негидростатической атмосферы не возможна без эффективной и удобной библиотеки для параллельных вычислений на сетке кубическая сфера. Мы разработали библиотеку ParCS на языке Fortran2008. Библиотека реализует следующий функционал: декомпозиция сетки кубическая сфера между параллельными процессами, обмены данными между процессорами, ввод-вывод, базовые дифференциальные операторы. На основе базового функционала библиотеки был реализован алгоритм численного решения трехмерных линеаризованных уравнений Эйлера на сфере. Алгоритм показал эффективную параллельную масштабируемость (в сильном смысле) до 5000 процессорных ядер при использовании вычислительной системы CRAY XC-40, установленной в ГВЦ Росгидромета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИВМ РАН и Гидрометцентре России ведутся работы по созданию динамического блока прогностической модели атмосферы нового поколения - глобальной негидростатической модели атмосферы на сетке с квазиравномерным разрешением на сфере. На текущий момент проведены исследования горизонтальных и вертикальных пространственных аппроксимаций будущей модели в рамках модели мелкой воды на сетке кубическая сфера и негидростатической модели в вертикальной плоскости. Проведены сравнительные исследования ряда перспективных и стандартных методов интегрирования по времени. Разработана библиотека для параллельных вычислений на сетке кубическая сфера. Прделанная работа создает предпосылки для реализации трехмерного негидростатического динамического ядра в ближайшее время.

ЛИТЕРАТУРА:

1. A. Arakawa and V. Lamb. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model, volume 17, pages 173–265. New York: Academic Press, 1977.
2. P. Bauer, A. Thorpe, and G. Brunet. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 535:47–55, 2015.
3. C. Chen and F. Xiao. Shallow water model on cubed-sphere by multi-moment finite volume method. *J. Comput. Phys.*, 227:5019– 5044, 2008.
4. T. Gal-Chen and R. C. J. Somerville. On the use of a coordinate transformation for the solution of the Navier-Stokes equations. *J. Comput. Phys.*, 17:209–228, 1975.
5. J. Galewsky, R.K. Scott, and L.M. Polvani. An initial value problem for testing numerical models of the global shallow water equations. *Tellus A*, 56:429 – 440, 2004.
6. S. Gaudreault and J. Pudykiewicz. An efficient exponential time integration method for the numerical solution of the shallow water equations on the sphere. *Journal of Computational Physics*, 322:827 – 848, 2016.
7. L. Harris, L. Zhou, S.-J. Lin, et al. GFDL SHIELD: A unified system for weather-to-seasonal prediction. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(10):e2020MS002223, 2020. 2
8. S. Husain, C. Girard, A. Qaddouri, and A. Plante. A new dynamical core of the Global Environmental Multiscale (GEM) model with a height-based terrain-following vertical coordinate. *Monthly Weather Review*, 147(7):2555 – 2578, 01 Jul. 2019.
9. C. Kuhnlein, W. Deconinck, R. Klein, et al. FVM 1.0: a nonhydrostatic finite-volume dynamical core for the IFS. *Geoscientific Model Development*, 12(2):651–676, 2019.
10. K. Lindberg and V. Alexeev. A study of the spurious orographic resonance in semi-implicit semi-Lagrangian models. *Monthly Weather Review*, 128(6):1982–1989, 2000.
11. T. Melvin, T. Benacchio, B. Shipway, et al. A mixed finite-element, finite-volume, semi-implicit discretization for atmospheric dynamics: Cartesian geometry. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(724):2835–2853, 2019.
12. T. Melvin, M. Dubal, N. Wood, et al.. An inherently mass-conserving iterative semi-implicit semi-Lagrangian discretization of the non-hydrostatic vertical slice equations. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 136:799–814, 2010.
13. M. Rancic, R. J. Purser, and F. Mesinger. A global shallow-water model using an expanded spherical cube: Gnomonic versus conformal coordinates. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122(532):959–982, 1996.
14. A. Robert, T. Yee, and H. Ritchie. A semi-Lagrangian and semiimplicit numerical integration scheme for multilevel atmospheric models. *Mon. Wea. Rev.*, 113:388 – 394, 1985.
15. C. Schar, D. Leuenberger, O. Fuhrer, et al. A new terrain-following vertical coordinate formulation for atmospheric prediction models. *Monthly Weather Review*, 130(10):2459 – 2480, 2002.
16. A. Staniforth and J. Thuburn. Horizontal grids for global weather and climate prediction models: a review. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 138:1 – 26, 2012.
17. P. Ullrich, C. Jablonowski, and B. van Leer. High-order finite volume methods for the shallow-water equations on the sphere. *Journal of Computational Physics*, 229(17):6104 – 6134, 2010.
18. P. A. Ullrich, C. Jablonowski, J. Kent, et al. DCMIP2016: a review of non-hydrostatic dynamical core design and intercomparison of participating models. *Geoscientific Model Development*, 10(12):4477–4509, 2017.
19. D.L. Williamson, J.B. Drake, J.J. Hack, et al. A standard test set for numerical approximations to the shallow water equations in spherical geometry. *J. Comput. Phys.*, 102:211 – 224, 1992.
20. G. Zangl, D. Reinert, P. Ripodas, and M. Baldauf. The ICON (icosahedral non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 141(687):563–579, 2015.
21. C. Zeman, N. P. Wedi, P. D. Dueben, et al. Model intercomparison of COSMO 5.0 and IFS 45r1 at kilometerscale grid spacing. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2021:1–35, 2021.

SESSION IV LAND SURFACE PROCESSES: OBSERVATIONS, MODELS AND DATA ASSIMILATION

СЕКЦИЯ IV ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ СУШИ: НАБЛЮДЕНИЯ, МОДЕЛИ И УСВОЕНИЕ ДАННЫХ

Numerical simulation of the processes of emission and interaction of gases in inland waters

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

¹ Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

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

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

⁴ Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

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

The study is devoted to the numerical modeling of the emission and interaction of gases in inland water bodies using mathematical models of various detailization in the interests of future assessments of climate change.

Lakes and water reservoirs are natural systems that are sensitive to climate change and at the same time play a direct role in these changes. To a large extent, such a two-way influence is determined by biochemical substances, among which dissolved gases play a special role, in particular, greenhouse gases: methane and carbon dioxide. The main source of carbon dioxide in water is the decomposition of organic matter – both allochthonous and autochthonous. In this case, carbon dioxide will be the product of decomposition during both aerobic and anaerobic destruction. The main source of methane in the water column is the anaerobic decomposition of organic matter in soils. Methane consumption is most efficiently provided by aerobic processes (oxidation), due to which 45-100% of CH₄ produced by bottom sediments is "eliminated", therefore, to estimate emission, it is necessary to take into account the interaction of methane with oxygen, just as for carbon dioxide, it is necessary to take into account the reactions of photosynthesis and respiration.

Within the framework of the study, the three-dimensional model being developed at the Research Computing Center of Moscow State University on the basis of a unified hydrodynamic code that combines both RANS, DNS and LES approaches for calculating geophysical turbulent flows (see, for example, [Mortikov et al., 2019; Gladskikh et al., 2021]) was supplemented with equations for calculating biochemical substances by analogy with the one-dimensional equations of biochemistry used in the one-dimensional LAKE model [Stepanenko et al., 2016]. The so-called "surface renewal model" [MacIntyre et al., 2010] were used to calculate the gas transfer coefficient.

Using 1D and 3D models, a number of numerical experiments were carried out aimed at studying the processes of emission and interaction of gases both in idealized water objects and for the real ones.

- The work was supported by grants of the RF President's Grant for Young Scientists (MK-1867.2020.5, MD-1850.2020.5), by the RFBR (18-05-00292, 20-05-00776), and by Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics (agreement with the Ministry of Science and Higher Education 075-15-2019-1621).

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 J. of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2019. V. 34, № 2. P.1-14
2. Gladskikh D. S., Stepanenko V. M., Mortikov E. V. The Effect of the Horizontal Dimensions of Inland Water Bodies on the Thickness of the Upper Mixed Layer //Water Resources. – 2021. – Т. 48. – №. 2. – С. 226-234.
3. 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.
4. Sally MacIntyre, Anders Jonsson, Mats Jansson, Jan Aberg, Damon E. Turney, and Scott D. Miller. Buoyancy flux, turbulence, and the gas transfer coefficient in a stratified lake // Geophysical Research Letters, 37(24), December 2010.

Численное моделирование процессов эмиссии и взаимодействия газов во внутренних водоемах

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

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

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

³ Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

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

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

Настоящее исследование посвящено численному моделированию эмиссии и взаимодействия газов во внутренних водоемах, пол которыми мы понимаем озера и водохранилища, с использованием математических моделей различной размерности в интересах будущих оценок изменения климата.

Водоемы суши представляют собой природные системы, чувствительные к изменениям климата и при этом играющие непосредственную роль в этих изменениях. В значительной степени такое двустороннее влияние определяется биохимическими примесями, среди которых особую роль играют растворенные газы, в частности, парниковые: метан и углекислый газ.

Основной источник углекислого газа в воде - это разложение органического вещества - как аллохтонного (поступающего с водосбора), так и автохтонного (продуцируемого в самом водоёме) происхождения. При этом диоксид углерода будет конечным продуктом разложения как при аэробной, так и при анаэробной деструкции. Его содержание в воде будет оказывать значительное влияние на карбонатное равновесие, ключевым показателем которого является pH. При значениях pH близких к нейтральным диоксид углерода будет представлен в виде растворенного газа, из-за чего может наблюдаться его эмиссия в атмосферу. При более высоких значениях pH, близких к слабощелочным, возможно поступление углекислого газа из атмосферы в водную толщу, так как такие значения водородного показателя свидетельствуют об активном фотосинтезе, при котором растворенный углекислый газ потребляется водорослями и фитопланктоном. В работе [Raymond et al., 2013] даны оценки влияния водоемов (озер, водохранилищ, рек и ручьев) на глобальный углеродный цикл: скорость выбросов оценена как ~ 2.1 петаграмм углерода в год. Показано также, что около 70 процентов потоков углекислого газа приходится на всего лишь 20 процентов поверхности Земли.

Основной источник метана в водной толще - это анаэробное разложение органического вещества в грунтах. Несмотря на его невысокую концентрацию в атмосфере, вклад метана в создание парникового эффекта (потенциал глобального потепления) составляет примерно 30% от величины, принятой для углекислого газа. Оценок эмиссии метана с водохранилищ мира достаточно много, при этом они сильно различаются между собой - от 2 до 122 Тг/год. Такое существенное различие связано с тем, что разные оценки проводились в разное время и в них учитывались разные базы данных по измерениям потоков метана с искусственных водоемов. Наиболее актуальная и современная оценка была

дана коллективом авторов [Deemer et. al. 2016] по большой базе данных измерений эмиссии метана с водохранилищ, в которую включены оценки потоков со 160 водохранилищ. Годовая эмиссия метана по этим данным составляет 17.7 Тг. Потребление метана наиболее эффективно обеспечивается аэробными процессами (окислением), за счет которого "ликвидируется" 45-100% CH_4 , произведенного донными отложениями, потому для оценки выбросов требуется учет взаимодействия метана с кислородом, так же, как для диоксида углерода необходим учет реакции фотосинтеза и дыхания.

Потоки парниковых газов с поверхности озер могут увеличиваться при потеплении приземного слоя атмосферы, что вызывает обратную связь в климатической системе: на современном этапе отмечается быстрое потепление поверхности озёр, опережающее потепление приземного воздуха. Это может вызвать не только ускорение биогеохимических процессов в озёрных экосистемах, в т.ч. генерации и эмиссии парниковых газов, но и усиление конвективных атмосферных циркуляций над крупными водоёмами. В регионах с большим количеством озер и водохранилищ наблюдается выраженное потепление климата, в связи с этим отмечается более ранний период вскрытия льда и более короткая продолжительность ледостава.

В рамках настоящего исследования был разработан и реализован блок расчета биохимических характеристик озера в рамках трехмерной гидростатической модели водоема. Используемая трехмерная модель разрабатывается в НИВЦ МГУ на основе единого гидродинамического кода, объединяющего как RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), так и DNS- (Direct Numerical Simulation), LES- (Large-Eddy Simulation) подходы для расчета геофизических турбулентных течений при высоком пространственном и временном разрешении (см., например, [Mortikov et al., 2019; Гладских и др., 2021]). Модель была дополнена уравнениями для расчета биохимических веществ по аналогии с одномерными уравнениями биохимии, используемыми в одномерной модели LAKE [Stepanenko et al., 2016]. Уравнения описывают перенос, диффузию и реакции для таких веществ как: метан (CH_4), кислород (O_2), углекислый газ (CO_2), а также азот (N), аргон (Ar), живые и отмершие частицы фито- и зоопланктона и так далее, и имеют вид:

$$\frac{\partial C_{(i)}}{\partial t} + \frac{\partial u_i C_{(i)}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (K_b + \chi_b) \frac{\partial C_{(i)}}{\partial x_i} + R(.),$$

где $C_{(i)}$ – концентрации веществ, K_b и χ_b – коэффициенты турбулентной и молекулярной диффузии соответственно, а член $R(.)$ описывает реакции. Основными и рассматриваемыми в первую очередь на данном этапе реакциями являются окисление метана, фотосинтез и дыхание.

Важным аспектом при моделировании эмиссии газов является задача параметризации коэффициента переноса газа (k_{600}). В работе [MacIntyre et al., 2010] приведена т. н. «модель обновления поверхности», которая явно учитывает весь набор процессов, которые влияют на турбулентность около границы раздела воздух-вода, например, турбулентность от теплопотерь, которая возникает, когда потоки плавучести отрицательны. Эта модель использовалась в настоящем исследовании.

С применением разработанного блока биохимии трехмерной модели, а также одномерной модели LAKE, был проведен ряд численных экспериментов, направленных на изучение процессов эмиссии и взаимодействия газов как в идеализированных постановках, так и для реальных водных объектов. Например, на Рис. 1 представлены рассчитанные трехмерной и одномерной моделями профили концентраций метана (Рис. 1а) и кислорода (Рис. 1б) к концу первых суток в рамках численной реализации лабораторного эксперимента Като-Филлипса.

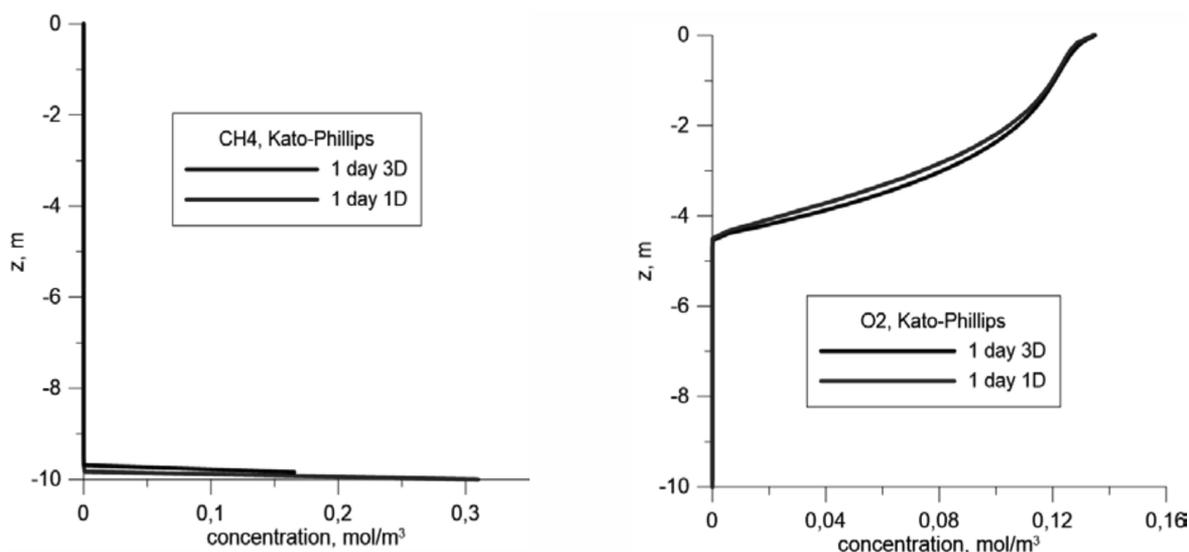


Рис. 1. Вертикальные профили концентраций метана и кислорода к концу первых суток, рассчитанные с помощью трехмерной и одномерной моделей.

На Рис. 2 представлен временной ряд значений потока метана в атмосферу, полученных с использованием трехмерной модели, также в рамках численной реализации эксперимента Като-Филлипса.

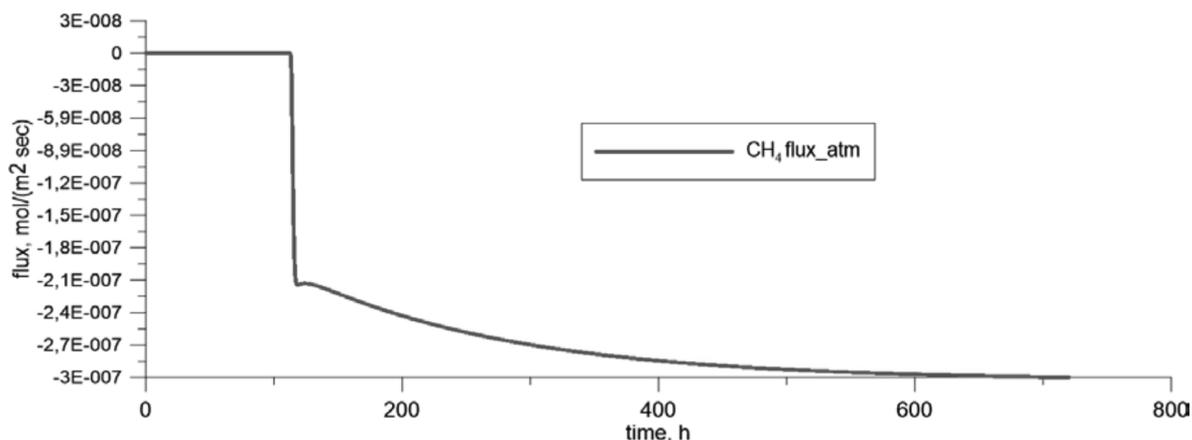


Рис. 2. Временной ряд значений потока метана в атмосферу, рассчитанных с применением трехмерной модели.

На Рис. 3 представлены одномерные профили концентраций метана и кислорода, полученные с помощью трехмерной модели, в постановках эксперимента Като-Филлипса и идеализированного водоема с прямоугольным сечением и размерами $1000 * 1000 * 10$ метров.

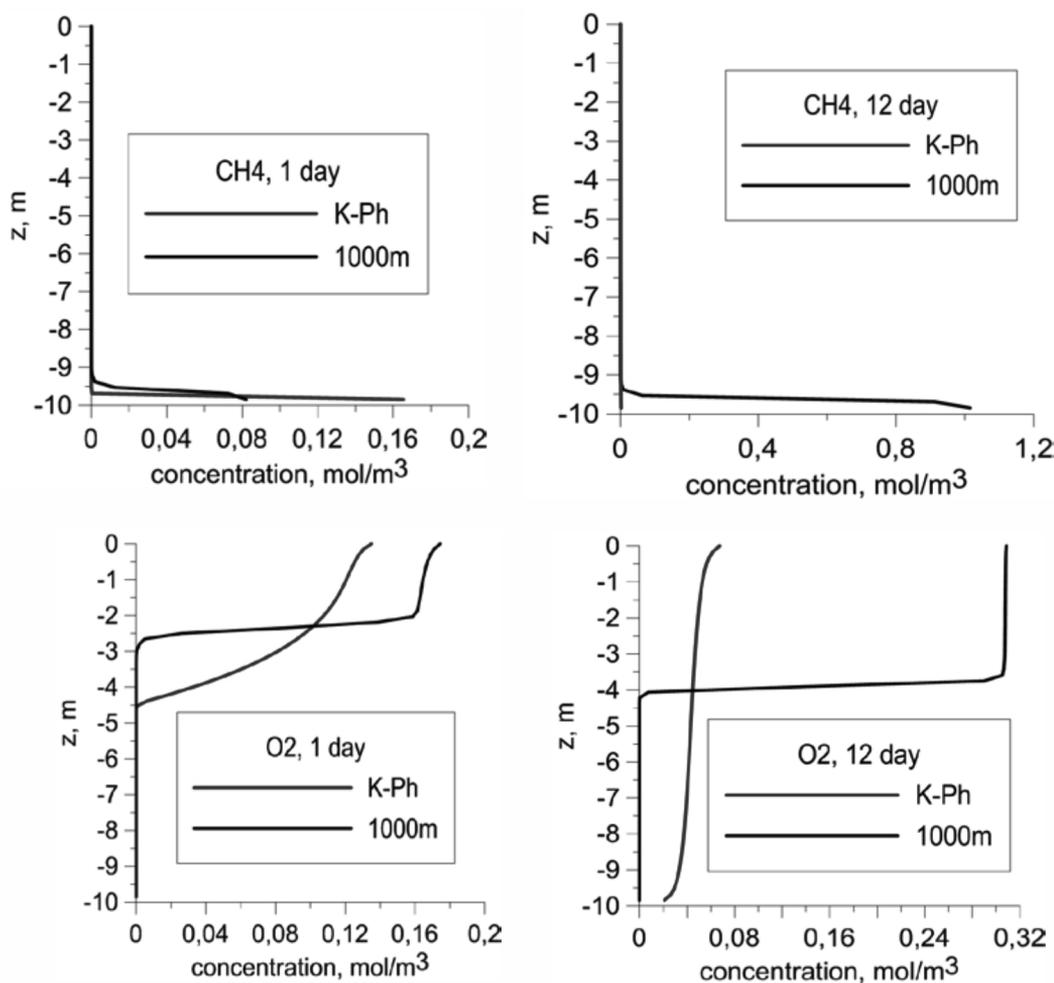


Рис. 3. Вертикальные профили концентраций метана и кислорода в постановке Като-Филлипса и в присутствии вертикальных стенок

- Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ для молодых ученых (МК-1867.2020.5, МД-1850.2020.5), РФФИ (20-05-00776) и Московского Центра Фундаментальной и Прикладной Математики (договор с Министерством науки и высшего образования 075-15-2019-1621).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Raymond, P., Hartmann, J., Lauerwald, R. et al. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature* 503, 355–359 (2013)
2. Deemer B., Harrison A., Li S., Beaulieu J., Delsonro T. et al. (2016) Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis, Springer. *BioScience*, 66, 11, 949 – 964
3. 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 J. of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2019. V. 34, № 2. P.1–14
4. Гладских Д.С., Степаненко В.М., Мортиков Е.М. О влиянии горизонтальных размеров внутренних водоемов на толщину верхнего перемешанного слоя. // *Водные ресурсы*. 2021. Т. 48. № 2. С. 155-163.
5. 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.
6. Sally MacIntyre, Anders Jonsson, Mats Jansson, Jan Aberg, Damon E. Turney, and Scott D. Miller. Buoyancy flux, turbulence, and the gas transfer coefficient in a stratified lake // *Geophysical Research Letters*, 37(24), December 2010.

Валидация приземной температуры воздуха реанализа ERA5 наблюдениями на метеорологических вышках в Сибири

¹Горбатенко В., ¹Чурсин В., ²Аршинов М., ²Белан Б., ²Давыдов Д., ²Фофонов А.,
³Мотоки Сасакава, ³Тошинобу Мачида, ⁴Беликов Д.

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

² Институт оптики атмосферы им В.Е. Зуева РАН, Томск, Россия

³ Центр глобальных экологических исследований, Национальный институт экологических исследований, Цукуба, Япония

⁴ Центр дистанционного зондирования окружающей среды, Университет Тиба, Япония

E-mail: vpgor@ggf.tsu.ru, d.belikov@chiba-u.jp

Поскольку скорость потепления атмосферы в Сибири выше, чем в других регионах Северного полушария, важно выявлять пространственные и временные локализации очагов потепления. Для решения этой задачи требуются высококачественные региональные метеорологические данные с высоким пространственным и временным разрешением за длительный период времени. В 2002 году Национальный Институт Экологических Исследований (NIES, Japan) и Институт Оптики Атмосферы им В.Е. Зуева (ИОА) Российской Академии Наук (РАН), создав российско-японскую систему мониторинга парниковых газов на территории Сибири, начали совместный проект по непрерывному измерению состава воздуха и метеорологических параметров. В настоящее время сеть состоит из девяти вышек, восемь из которых расположены в Западной Сибири, а одна - в Якутске, Восточная Сибирь. В зависимости от станции период наблюдений составляет 7–15 лет, при этом почасовые измерения температуры охватывают около 50–80% времени из-за перебоев в работе оборудования. Поэтому такие кратковременные, разреженные по времени и в пространстве наблюдения предоставляют ограниченные возможности для изучения изменений климата в регионе.

Данные реанализов обычно используются в случае отсутствия наблюдения. Среди имеющихся в настоящее время вариантов реанализ пятого поколения ERA5 разработанный ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) обеспечивает лучшее воспроизведение средние сезонных и межгодовых колебаний температуры и осадков в различных климатических условиях. Однако точность данных реанализа ERA5 сильно различается в зависимости от региона. Таким образом, для оценки возможности использования данных для исследования климата Сибири необходима комплексная валидация температурных полей ERA5. Что и является целью данной работы, для достижения которой были решены следующие задачи: сравнение данных реанализа ERA5 с натурными наблюдениями на вышках; пространственно-временная оценка распределения значений температуры на территории Сибири. Было установлено, ERA5 достоверно воспроизводит среднечасовые колебаний температуры, так как расхождение между наблюдениями и реанализом имеет нормальное распределение и лежит в диапазоне ± 1 °C и ± 3 °C, в 50% и 80% случаев, соответственно.

Данная работа является важным шагом для изучения температурных полей на обширной территории Сибири, не охваченной натурными наблюдениями, поскольку повышение среднегодовой температуры в регионе существенно влияет не только на повторяемость экстремальных погодных условий, но и на баланс парниковых газов.

Validation of the near-surface air temperature from the ERA5 reanalysis using tower observations in Siberia

¹Gorbatenko V., ¹Chursin V., ²Arshinov M., ²Belan B., ²Davydov D., ²Fofonov A.,
³Motoki Sasakawa, ³Toshinobu Machida, ⁴Belikov D.

¹ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

² V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics RAS, Tomsk, Russia

³ Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan

⁴ Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, Chiba, Japan

E-mail: vpgor@ggf.tsu.ru, d.belikov@chiba-u.jp

INTRODUCTION

Since the rate of warming of the atmosphere in Siberia is greater than over other regions of the Northern Hemisphere [1], there are significant impurities to identify the spatial and temporal localization of warming foci. In the last decade, an increase in the convective potential of the atmosphere and the recurrence of dangerous convective phenomena have been observed over this territory [2, 3, 4]. Therefore, the identification of the features of the temporal and spatial variability of the temperature regime is especially important. Assessment of local climate warming requires high-quality region-wide meteorological data (temperature, humidity, etc.) with high spatial and temporal resolution over a long period of time. In 2002, the National Institute for Environmental Studies (NIES) and V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics (IOA), Russian Academy of Sciences (RAS) began a cooperative project for the continuous measurement of greenhouse gases and meteorological parameter including the air temperature in Siberia called the Japan–Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network (JR-STATION). The network now consists of nine towers, eight located in West Siberia and one located in Yakutsk, East Siberia [5, 6]. These sites of the network is rare primarily due to the inaccessibility of wetland areas for equipping them with direct measurement sensors. Hourly measurements of temperature cover about 50–80% of the 7–15-year period, depending on station. Therefore, such short-time, noisy and sparse in time due to gaps in instrument operation datasets observed at very unevenly distributed locations provide limited data for studying the region's climate variation.

Satellite systems undoubtedly make it possible to observe various meteorological information over large territories poorly covered by the ground-based measurements. However, the accuracy of remote sensing is much lower than that of standard meteorological observations, even though the declared error of remote sensing air temperature is within 1 °C.

Reanalysis data are a commonly used technique to solve the lack of observation issue. Usually, reanalysis is the result of calculations by a global atmospheric model with regular assimilation of available meteorological observations followed by interpolation into a regular global grid to determine the state of the atmosphere where observations are unavailable. Among currently available reanalysis datasets, the fifth generation European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) atmospheric reanalysis of the global climate ERA5 [7] performs better compared with other datasets in terms of mean and interannual variations of temperature and precipitation in various climatological regions [8]. However, the accuracy of reanalysis data varies strongly between regions and variables. Limits of observations or complex terrain may cause large biases in reanalysis products. Thus, a comprehensive evaluation of temperature in terms of reproducing the temporal and spatial variability as well as the observed long-term trend is necessary to judge the reliability of data for Siberia climate research.

Therefore, the goal of this work was to assess the possibility of using temperature ERA5 for Siberia, as a basis for studying climate warming. To achieve this goal, the following tasks were solved: comparison of ERA5 reanalysis data with observations at the JR-STATION towers; conducting statistical evaluations; spatio-temporal assessment of the distribution of temperature values on the territory of Siberia; assessment of trends.

METHOD

This study used temperature datasets measured at lower inlets at nine towers of JR-STATION, Siberia Azovo (AZV, the lower inlet altitude 29 m), Berezorechka (BRZ, 40 m), Demyanskoe (DEM, 45 m), Igrim

(IGR, 24 m), Karasevoe (KRS, 35 m), Noyabrsk (NOY, 21 m), Savvushka (SVV, 27 m), Vaganovo (VGN, 42 m), and Yakutsk (YAK, 11 m) to verify the near-surface air temperature (at the level of 2 m) from the ERA5 reanalysis.

ERA5 provides hourly meteorological parameters from 1981 (expected to be extended back to 1950) based on the Integrated Forecasting System (IFS) and includes a four-dimensional variational analysis (4D-Var). ERA5 data is available in high spatial and temporal resolution: on a 0.1° latitude-longitude grid for the Land products (including the near-surface temperature) with hourly intervals. For comparison, the ERA5 datasets were collocated to the geographic coordinates of towers using the nearest grid cell in space on an hourly basis in time for the period 2000/01-2019/12.

RESULTS

Here we considered a comparison of near-surface air temperature obtained from tower observations (T_{obs}) and the ERA5 reanalysis (T_{ERA5}), as well as the temperature discrepancy ΔT defined as difference between reanalysis and observations ($\Delta T = T_{ERA5} - T_{obs}$).

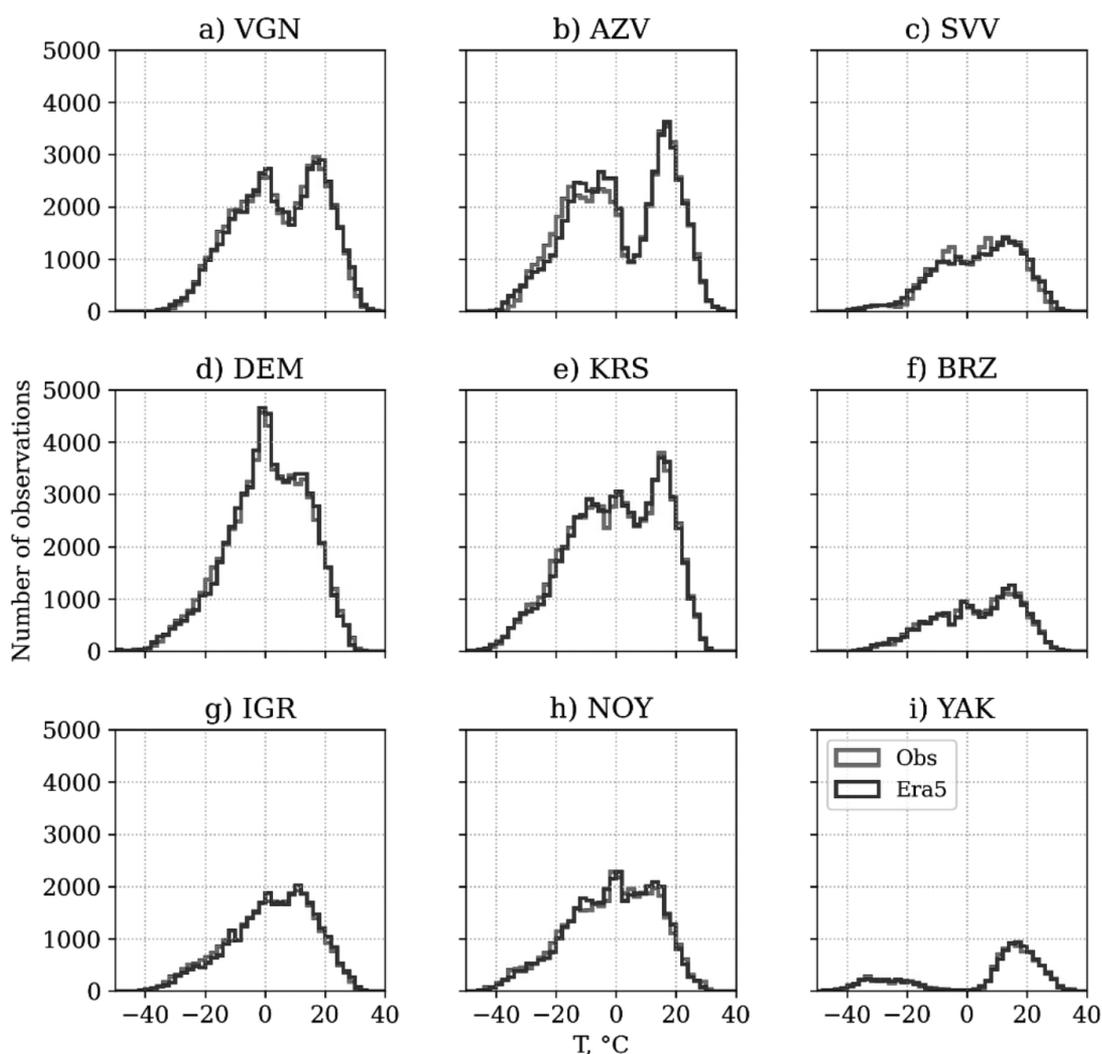


Figure 1. Comparative diagrams of hourly temperature derived at the coordinates of tower sites.

Figure 1 shows histograms, representing the frequency distributions of temperature from observations and reanalysis at tower sites. As mentioned above, the number of observations varies significantly depending on the station, therefore not all temperature ranges are presented uniformly. The maximum and minimum are about 122000 and 10000 hourly observations for KRS and YAK respectively. The recorded temperature range is between -40°C and 30°C . With an extremely continental subarctic climate, Yakutsk has the coldest winter temperatures with minimal temperatures of 50°C and below. Although winters are extremely cold and long, summers are warm, and occasionally hot, with daily maximum temperatures sometimes exceeding $+30^\circ\text{C}$, making the seasonal temperature differences for the region the greatest in the world at about 100°C . This makes predicting the temperature in this region very challenging.

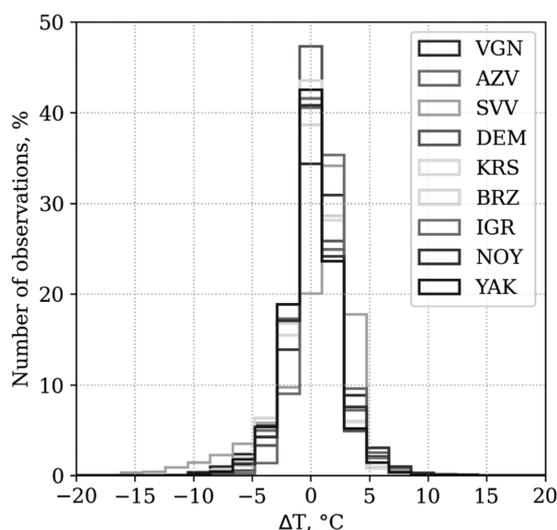


Figure 2. Comparative diagrams of the discrepancy between the reanalysis data and the tower observations of hourly temperature derived at the coordinates of tower sites.

Figure 2 shows histograms, representing the frequency distributions of the temperature discrepancy (ΔT) between observations and reanalysis at tower sites. We found almost 50% of cases fall within the ± 1 °C range, while 80% are within the ± 3 °C. The derived discrepancy is close to the normal distribution which means a random error without strong bias for most sites.

The monthly mean value and standard deviation (SD) temperature discrepancy ΔT for individual sites is shown in Table 1. With the exception of Yakutsk, the values are less 0.6 °C and 4.0 °C for mean and SD, respectively.

Table 1. Monthly mean and 1- σ standard deviation (SD) of the temperature discrepancy between reanalysis and tower observation data.

	Tower name								
	VGN	AZV	SVV	DEM	KRS	BRZ	IGR	NOY	YAK
Mean ΔT , °C	0.22	-0.09	0.25	-0.16	0.06	-0.17	0.53	0.57	-1.02
ΔT 1- σ SD, °C	1.27	2.90	4.00	1.62	2.93	4.14	1.40	3.50	4.54

CONCLUSION

The results of comparison of the air temperature datasets from the ERA5 reanalysis and observations from 9 tower stations in Siberia for 2000-2019 is presented. Due to the high resolution in time and space, the temperature field from ERA5 shows a high agreement with observations over the forest and bog complexes.

This work is an important step for the study of temperature fields in the vast territory of Siberia not covered by in situ observations, as an increase in the average annual temperature in the region significantly affects the persistence of extreme weather conditions and the greenhouse gas budget.

- Acknowledgments. The used data are available from the Global Environmental Database, hosted by Center for Global Environmental Research (CGER), National Institute for Environmental Studies (NIES) (<http://db.cger.nies.go.jp/portal/geds/index>).

REFERENCES:

1. Screen, J. A. & Simmonds, I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature* 464, 1334–1337 (2010).
2. Gorbatenko V.P., Kuzhevskaya I.V., Pustovalov K.N., Chursin V.V., Konstantinova D.A. Assessment of the variability of the convective potential of the atmosphere in the changing climate of Western Siberia // *Meteorology and Hydrology*. 2020. No. 5. S. 108–116.
3. Akhmetshina A.S, Kizhner L. I., Gorbatenko V. P., Zuev V. V., Shelekhov A. P., and Shelekhova E. A. Some characteristics of inversions in Tomsk according to MTP-5 temperature profiler. *Proc. SPIE 9292*, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 92924M (25 November 2014).
4. Korolkov V. A., K. N. Pustovalov, A. A. Tikhomirov, A. E. Telminov, V. V. Antonovich, A. A. Kobzev, "Measurement of meteorological quantities in the atmospheric boundary layer of the ultrasonic weather station AMK-03 on tethered balloon," *Proc. SPIE 10833*, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1083380 (13 December 2018).

5. Sasakawa, M.; Shimoyama, K.; Machida, T.; Tsuda, N.; Suto, H.; Arshinov, M.; Davydov, D.; Fofonov, A.; Krasnov, O.; Saeki, T.; et al. Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia. *Tellus Chem. Phys. Meteorol.* 2010, 62, 403–416.
6. Belikov, D.; Arshinov, M.; Belan, B.; Davydov, D.; Fofonov, A.; Sasakawa, M.; Machida, T. Analysis of the diurnal, weekly, and seasonal cycles and annual trends in atmospheric CO₂ and CH₄ at tower network in Siberia from 2005 to 2016. *Atmosphere* 2019, 10, 689.
7. Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P.; Hirahara, S.; Horányi, A.; Muñoz-Sabater, J.; Nicolas, J.; Peubey, C.; Radu, R.; Schepers, D.; et al. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020, 146, 1999–2049.
8. Rakhmatova, N., Arushanov, M., Shardakova, L., Nishonov, B., Taryannikova, R., Rakhmatova, V. & Belikov, D. A. Evaluation of the Perspective of ERA-Interim and ERA5 Reanalyses for Calculation of Drought Indicators for Uzbekistan. *Atmosphere* 12. issn: 2073-4433. doi:10. 3390/atmos12050527. <https://www.mdpi.com/2073-4433/12/5/527> (2021).

Selection of temperature response function for soil respiration

^{1,2}Dyukarev E.A., ¹Kurakov S.A.

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

² Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

E-mail: dekot@mail.ru

Soil respiration is an important component of the global carbon cycle and is highly responsive to changes in soil and air temperature, and other environmental parameters. Predicting soil respiration and its changes under future climatic conditions requires a clear understanding of the processes involved. Here, several models were used to describe the short-term temperature dependence of heterotrophic soil respiration and were calibrated using observations of soil efflux from a bare soil site in an urban grassland. Modified models were suggested, including a linear relationship of the temperature sensitivity and base respiration coefficients with soil temperature at various depths. We demonstrate that modification improves the soil respiration performance determined by any model. The modified models describe the long- and short-term variations of soil respiration. According to a comparison of the efficiency of the models, the best equations describing soil respiration fluxes were exponential and logistic models with linear dependences on the model parameters obtained from the soil temperatures. The often-used Q₁₀ value changed with temperature, depending on the used model. The apparent temperature sensitivity can be extremely high and does not reflect the actual relationships between soil respiration and temperature.

Выбор функции отклика почвенного дыхания на изменения температуры

^{1,2}Дюкарев Е.А., ¹Курков С.А.

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

² Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

E-mail: dekot@mail.ru

Дыхание почвы (эмиссия углекислого газа из почвы) представляет собой второй по величине поток CO₂ в земной биосфере (Кудяров, 2018) и является важным компонентом глобального углеродного цикла. Изучение углеродного обмена наземных экосистем требует точного понимания реакции почвенного дыхания на изменение характеристик окружающей среды (Reichstein and Beer, 2008). Наземные исследования потоков CO₂ (Dyukarev, 2017) были организованы в восточной части г. Томска на наблюдательной площадке Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН Ч(56° 28.5' N, 82° 3.2' E; 170 м н.у.м.) с 14 апреля по 20 октября 2014 г. Автоматическая система почвенного дыхания LI-8100A (LI-COR Biosciences, USA) с прозрачной камерой (8100-104C) использовалась для регистрации потоков на участке с обнаженной почвой. Измеренные потоки CO₂ имеют явно выраженный суточный ход в середине лета. Средние суточные значения потоков изменялись от 0,16

мкмоль/м²/с в октябре до 9,9 мкмоль/м²/с в начале июля, а ночные потоки варьировались от 0,24 мкмоль/м²/с в октябре до 10,98 мкмоль/м²/с в середине июля.

Девять моделей, описывающих взаимосвязь между дыханием почвы (SR) и температурой (Таблица 1) были протестированы. Коэффициент температурной чувствительности (параметр k) существует во всех моделях, но отражает разные типы (линейный, экспоненциальный, степенной) увеличения дыхания с повышением температуры. Базовый уровень дыхания (параметр r) обычно представляет дыхание почвы при определенной температуре. Параметры моделей почвенного дыхания были откалиброваны по наблюдаемым потокам углекислого газа.

Таблица 1.

Функции отклика почвенного дыхания (SR) на изменения температуры (Т₁), k, r, p – параметры модели, T_{ref} = 10 °C, T_K = 273.15 °C, T₀ = -46.02 °C, T_g = 40 оC, R_g = 8.31 Дж/моль/К.

Наименование	Уравнение
1. Linear	$SR = r + k \cdot T_1$
2. Q10	$SR = r \cdot k^{(T_1 - T_{ref})/10}$
3. Exponential	$SR = r \cdot \exp[k \cdot T_1]$
4. Arrhenius	$SR = r \cdot \exp\left[-\frac{k}{R_g \cdot (T_1 + T_K)}\right]$
5. Lloyd&Taylor	$SR = r \cdot \exp\left[k \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_1 - T_0}\right)\right]$
6. Power	$SR = r \cdot T_1 - p ^k$
7. Logistic	$SR = \frac{r}{1 + p \cdot \exp[-k \cdot T_1]}$
8. Sigmoid	$SR = \frac{r}{p + k^{-(T_1 - T_{ref})/10}}$
9. Gamma	$SR = (T_1 + T_g)^r \cdot \exp[p - k \cdot (T_1 + T_g)]$

К каждой модели применялись последовательно две модификации, чтобы улучшить воспроизведение наблюдаемых потоков в течение вегетационного периода. Первая модификация (модификация А) учитывала явное изменение коэффициента температурной чувствительности k при изменении температуры по линейному закону ($k = k_0 + k_1 T_2$). Вторая модификация модели (модификация В) включает изменение коэффициента температурной чувствительности k с температурой и изменение базового уровня дыхания r с температурой ($r = r_0 + r_1 T_3$). Учет зависимости параметров модели от температуры почвы (модификации А и В) значительно повысил точность модельных оценок дыхания почвы. Средний поток CO₂ из почвы за вегетационный период, полученный с использованием модифицированной логистической модели (7В), составил 2,44 мкмоль/м²/с со стандартным отклонением 1,67 мкмоль/м²/с.

Функции температурного отклика дыхания почвы (Табл.1) описывают быструю реакцию дыхания на изменения характеристик окружающей среды. Выявленные зависимости параметров моделей почвенного дыхания (k, r) от температуры почвы и воздуха характеризуются длительными медленными процессами развития микробной биомассы. Модифицированные модели могут использоваться для оценки выбросов CO₂ из почв и обеспечения лучшего понимания динамики углеродного цикла наземных экосистем. Сравнение среднеквадратических ошибок, коэффициента Нэша-Сатклифа для различных моделей показало, что экспоненциальная и логистическая модели с линейной зависимостью параметров модели от температуры почвы (модели 3В и 7В) показывают наилучшие результаты. Модели без модификаций А или В занижают максимальные значения эмиссии CO₂ почвой. Полученные результаты могут помочь будущей разработке механистических моделей реакции почвы на глобальное потепление.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Dyukarev, E.A., 2017. Partitioning of net ecosystem exchange using chamber measurements data from bare soil and vegetated sites. *Agricultural and Forest Meteorology* 239, 236–248. doi:10.1016/j.agrformet.2017.03.011
2. Kudayarov, V.N., 2018. Soil respiration and biogenic carbon dioxide sink in the territory of Russia: an analytical review. *Eurasian Soil Science* 51, 599–612. doi:10.1134/S1064229318060091

3. Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., Papale, D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Gilmanov, T., Granier, A., Grünwald, T., Havránková, K., Ilvesniemi, H., Janous, D., Knohl, A., Laurila, T., Lohila, A., Loustau, D., Matteucci, G., Meyers, T., Miglietta, F., Ourcival, J., Pumpanen, J., Rambal, S., Rotenberg, E., Sanz, M., Tenhunen, J., Seufert, G., Vaccari, F., Vesala, T., Yakir, D., Valentini, R. 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. *Global Change Biology* 11, 1424–1439. doi:10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x

On considering the annual cycle of air temperature in climate trend analysis based on quantile regression methodology

Lavrov A.S., Sterin A.M.

RIHMI-WDC, Obninsk, Russia

E-mail: sterin@meteo.ru

The technique of using the quantile regression (QR) method in studies of climatic trends assumes that acceptable standard errors in quantile estimation require a sufficiently large number of observations for each unit time interval. If there is only one observation of the meteorological value for every day, the season is an acceptable time interval for choosing it as a unit time reference interval. In previous papers published with the participation of the authors, the climatic trends of surface air temperature and air temperature in the free atmosphere were estimated by the method of QR for each of the four seasons separately. In this case, the primary temperature values were used.

This paper analyzes the trends obtained by the quantile regression method for air temperature in the free atmosphere and air temperature near the earth's surface, both for the initial (primary) temperature values and for the values of temperature anomalies calculated relative to 30-year monthly and daily norms.

It is demonstrated that for upper-air temperature, there are no significant differences between the trends calculated based on primary temperature values and the trends in temperature anomalies in the winter and summer periods. In the spring and, to a lesser extent, in the autumn, there are significant differences, mainly in the upper atmosphere, between the quantile-vertical patterns of primary temperature trends and trends that were estimated for temperature anomalies.

An interpretation of the results of calculating trends for temperature in the free atmosphere is given.

For the surface temperature, a significant amount of calculations of temperature trends has been performed both for its initial daily values: daily mean, minimum and maximum temperatures, and for their corresponding anomalies. The results of calculating surface temperature trends using quantile regression are presented and analyzed.

Об учете годового хода температуры воздуха при анализе ее климатических трендов методом квантильной регрессии

Лавров А.С., Стерин А.М.

ВНИИГМИ-МЦД, Обнинск, Россия

E-mail: sterin@meteo.ru

Традиционным методом анализа долгопериодных изменений метеовеличин, характеризующих состояние климатической системы, является оценка трендов осредненных для определенных временных отсчетов значений метеовеличин. Такая задача обычно решается методом наименьших квадратов (МНК). Но МНК-оценки не позволяют оценить долгопериодные тенденции изменения изменчивости климата [1], в том числе долгопериодные тенденции изменения близких к экстремальным значений метеовеличин. Являясь альтернативой методу наименьших квадратов, метод квантильной регрессии позволяет оценивать тренды метеовеличин для произвольного значения квантилей от 0 до 1, делая возможным анализ изменений экстремальных значений метеовеличин.

Техника использования метода квантильной регрессии в оценке климатических трендов предполагает, что приемлемые погрешности оценки квантилей требуют достаточно большое число наблюдений для каждого временного отсчета. При наличии всего одного наблюдения метеовеличины за каждые сут-

ки, приемлемым интервалом выбора временного отсчета является сезон. В работах с участием авторов [1, 2] климатические тренды приземной температуры воздуха и температуры воздуха в свободной атмосфере методом квантильной регрессии оценивались для каждого из четырех сезонов в отдельности. При этом использовались сами значения температуры.

В данной работе проводится анализ трендов, полученных методом квантильной регрессии для температуры воздуха в свободной атмосфере и температуры воздуха у поверхности земли, как для исходных значений температуры, так и для значений аномалий температуры, рассчитанных относительно 30-летних месячных и суточных норм.

В предыдущей работе авторов [2] проводился анализ трендов температуры воздуха на различных изобарических поверхностях от 850 гПа до 30 гПа методом квантильной регрессии. Анализ проводился для более чем 300 аэрологических станций, расположенных по всему Земному шару. При анализе использовались непосредственно значения температуры, без вычисления аномалий. На рис. 1 приведены вертикально-квантильные распределения трендов температуры для каждого из четырех сезонов на аэрологической станции Нарьян-Мар (23205).

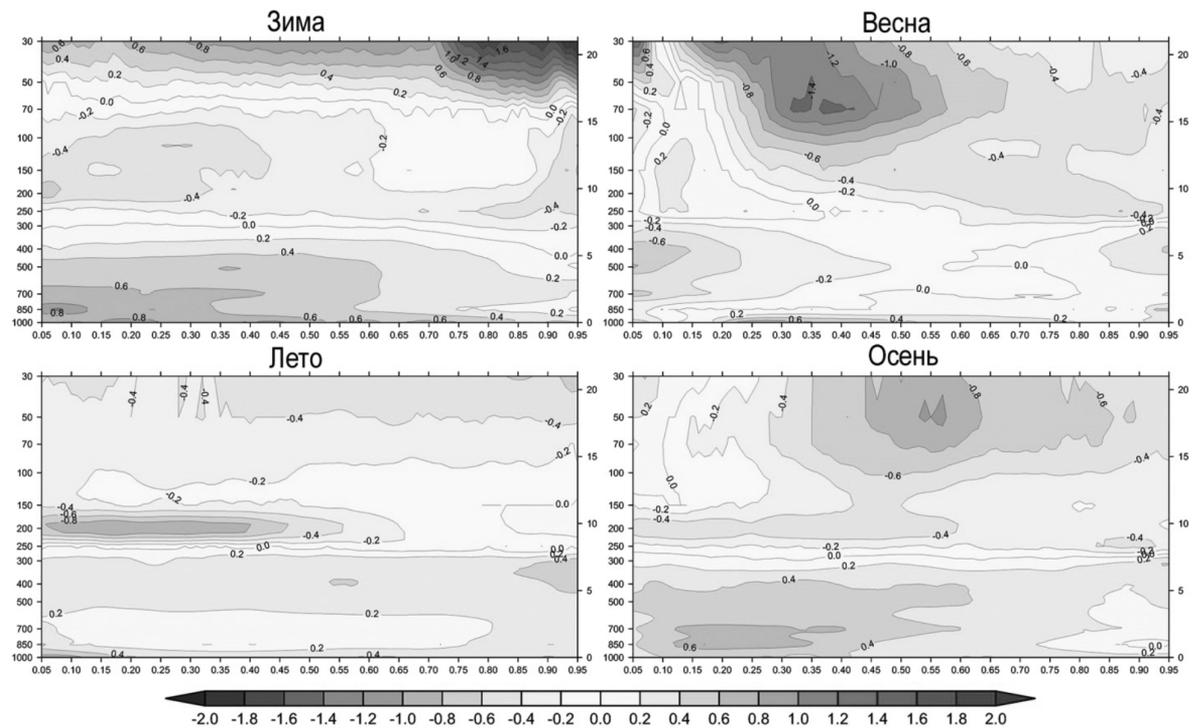


Рис. 1. Вертикально-квантильные распределения трендов температуры воздуха в свободной атмосфере для отдельных сезонов года для станции 23205 (Нарьян-Мар). Вычисления по значениям температуры для отдельных сезонов

На многих станциях, особенно в зимний период, наибольшее потепление в тропосфере наблюдалось при низких значениях квантилей, то есть для наименьших значений температуры. Для наибольших значений температуры скорость потепления была ниже. Это соответствует результатам анализа трендов приземной температуры методом квантильной регрессии, полученным ранее [3].

Неравномерный характер трендов наблюдался и в нижней стратосфере. В зимний период, и в меньшей мере – в весенний период на некоторых станциях северных широт при увеличении значений квантилей скорость стратосферного похолодания убывала по абсолютной величине, и, более того, для квантилей, приближающихся к 1, отрицательные тренды могли менять знак на противоположный положительный.

В предыдущих работах [1-3] осуществлялся анализ трендов температуры воздуха без предварительного вычисления аномалий температуры. Однако следует учитывать, что при оценках трендов методом квантильной регрессии непосредственно по значениям метеовеличины, с выбором сезона в качестве единичного временного отсчета, картина может быть искажена в ситуациях, когда метеовеличина характеризуется значительным годовым ходом, и годовой ход существенен для исследуемого сезона. Так, на рис.2а представлены значения температуры на поверхности 100 гПа для шести последовательных весенних сезонов периода 2000-2005 гг. Очевидно, что, из-за явно выраженного участка роста годового цикла температуры для весеннего сезона, наиболее низкие значения температуры (значения квантилей близки к нулю) соответствуют начальным дням весенних сезонов, а наиболее высокие (значения квантилей близки к единице) – завершающим дням весенних сезонов. Переход к рядам аномалий (относительно месячных норм, рис.2б) уменьшает влияние годового хода, что весьма важно для весеннего сезона.

Для температуры в свободной атмосфере методом квантильной регрессии были рассчитаны тренды для различных квантилей на различных изобарических поверхностях. Расчеты проводились как для исходных значений температуры, так и для аномалий температуры по отношению к нормам за отдельные месяцы и к нормам за отдельные сутки. В данной работе приводятся результаты расчетов с использованием месячных норм периода 1987-2016 гг.

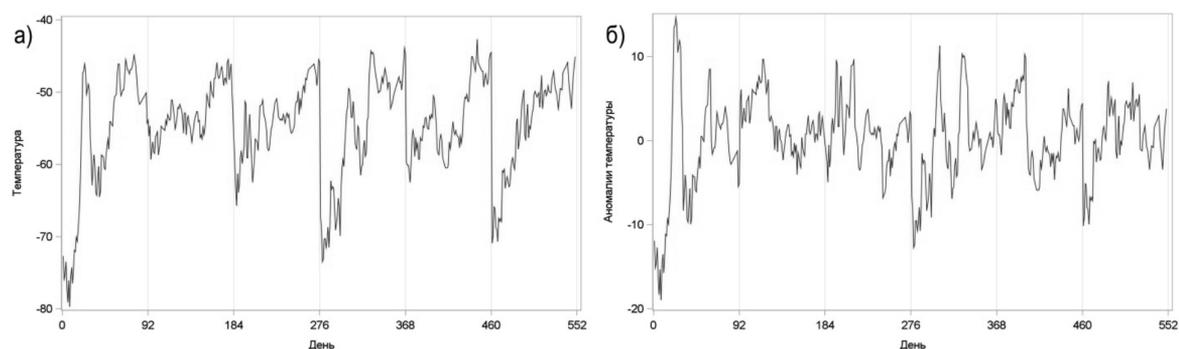


Рис. 2. Временной ряд для весенних месяцев (март-май) за период 2000–2005 гг на станции 23205 (Нарьян-Мар) на высоте 100 гПа. Слева - для исходных значений температуры воздуха, справа – для аномалий температуры по отношению к месячным нормам периода 1987–2016 гг.

На рис. 3 представлены аналогичные рис. 1 вертикально-квантильные распределения трендов, но уже аномалий температуры воздуха, рассчитанных относительно 30-летних месячных норм.

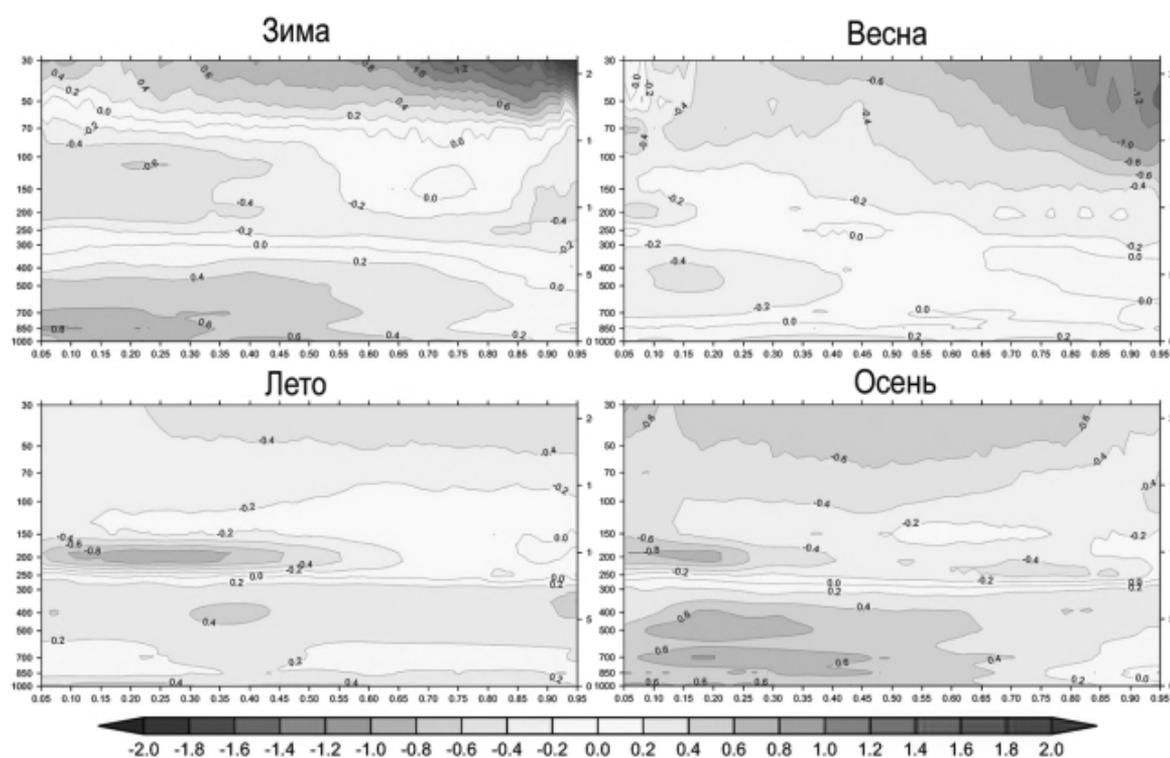


Рис. 3. Как на рис. 1, но вычисления проведены по значениям аномалий температуры относительно месячных норм за тридцатилетний период

Как следует из сопоставления рис.1 и рис.3, в зимний и летний периоды между трендами температуры и трендами аномалий температуры существенных различий нет. В весенний и, в меньшей степени, в осенний периоды наблюдаются существенные различия, преимущественно в верхних слоях атмосферы, между распределением трендов температуры и трендов аномалий температуры.

Приводится интерпретация результатов расчетов трендов для температуры в свободной атмосфере.

Для приземной температуры выполнен значительный объем вычислений трендов температуры как для исходных ее значений, так и для суточных значений: суточных средних, минимальной и максимальной температур, и их соответствующих аномалий. Результаты расчетов трендов приземной температуры с использованием квантильной регрессии приводятся и анализируются.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тимофеев А.А., Стерин А.М. 2010. Применение метода квантильной регрессии для анализа изменений характеристик климата. – Метеорология и гидрология, №5, с. 27-41
2. Sterin A.M., Lavrov A.S. 2020. On long period trends estimates of upper-air extreme and sub-extreme temperatures by use of quantile regression. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 11. Сер. «International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modeling and Information Systems»
3. Стерин А.М., Тимофеев А.А. 2016. Об оценке трендов приземной температуры воздуха для территории России методом квантильной регрессии. – Метеорология и гидрология, №6, с. 17-30

Numerical modeling of severe rime accretion in the Far North of Russia

Leonov I.I., Sokolikhina N.N.

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: leonov@geogr.msu.ru

Severe weather refers to any hazardous meteorological phenomena with the potential to cause damage, serious social disruption, or loss of human life. Such weather phenomena include thunderstorms, hurricanes, tornados, ice storms and many others.

The main purpose of this research is study of formation mechanisms of rime accretion and methods for their prediction. This is necessary to forecasting these phenomena and minimizes the economic and other losses [2].

This work is dedicated to a detailed study of a extraordinary case of the formation of rime accretion in the territory of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, which occurred in early January 2016.

Numerical experiments were implemented for the analysis of various methods for predicting the areas of possible ice accretion formation. For the numerical experiments, the atmospheric model WRF-ARW was chosen. For a theoretical assessment of the icing intensity, the Makkonen formula was used [1].

There are some results of this research. At the moment, the main mechanisms of ice accretion formation have been identified for the territory of the Far North of Russia. Numerical experiments with the WRF-ARW model were successful and they reproduced the main signs of rime accretion. The results showed that the model successfully reproduced the icing start time and the icing intensity distribution throughout the entire numerical experiment. The quality of the model's reproduction of the mass of rime accretion is difficult to estimate from the data of two meteorological stations, however, the values obtained are close to the observed values.

REFERENCES:

1. Makkonen, L. (2000) Models for the Growth of Rime, Glaze, Icicles and Wet Snow on Structures. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 358, 2913-2939.
2. The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. 2014: General summary. М.: Roshydromet, 2014. 59 p

Численное моделирование опасных изморозевых отложений на территории Крайнего Севера России

Леонов И.И., Соколихина Н.Н.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: leonov@geogr.msu.ru

В настоящее время особенное внимание уделяется изучению опасных гидрометеорологических явлений на территории России, количество которых ежегодно увеличивается [1]. К опасным метеорологическим явлениям (ОЯ) относятся явления погоды, которые интенсивностью, продолжительностью и временем возникновения представляют угрозу безопасности людей, а также могут нанести значительный ущерб отраслям экономики [2]. В типовой перечень опасных метеорологических явлений входят сильные гололедно-изморозевые отложения, вызывающие обледенение поверхности земли, деревьев, линий электропередач, технических средств и различных объектов хозяйственной деятельности человека. Особенно сильный экономический ущерб наносится инженерной и транспортной инфраструктуре России.

Обледенение у поверхности земли можно отнести к двум типам. Первый тип – это обледенение вследствие выпадения атмосферных осадков (precipitation icing). Второй тип – это внутриоблачное обледенение (in-cloud icing) [4]. Второй тип обледенения характеризуется отложениями в виде изморози. Изморозь – отложение льда на ветвях деревьев, проводах и других предметах при тумане в результате сублимации водяного пара (кристаллическая изморозь) или намерзания капель переохлажденного тумана (зернистая изморозь). Наибольший интерес в этой области представляет зернистая изморозь, так как именно этот вид изморози является наиболее опасным. Отложения зернистой изморози толщиной 50 мм и более относятся к опасным погодным явлениям [2].

Прогноз наземного обледенения является трудной задачей, так как значительное влияние на толщину и интенсивность гололедно-изморозевых отложений оказывает подстилающая поверхность и характеристики рельефа местности. Так на характеристики обледенения влияют: расстояние от водоемов, высота над уровнем моря и экспозиция склонов.

Данная работа посвящена детальному изучению яркого случая образования изморозевых отложений на территории Ямало-Ненецкого автономного округа, произошедшего в начале января 2016 года.

В начале января 2016 года на территории Ямало-Ненецкого автономного округа наблюдалась мощная адвекция тепла, которая привела к повышению температуры воздуха до -6°C и относительной влажности воздуха до 100%. Такие метеорологические условия оказались благоприятными для образования изморозевых отложений высокой интенсивности и привели к образованию на линиях электропередачи отложений льда, вес которых достигал 1100 грамм на один погонный метр провода. За период с 2-го по 10-е января произошло 25 отключений на ВЛ 110-220 кВ. Основными причинами отключений послужили образования гололедно-изморозевых отложений на проводах ВЛ, диаметр которых достигал 100-200 мм.

Территория Ямало-Ненецкого автономного округа слабо освещена данными наземных и аэрологических наблюдений. В связи с этим для исследования условий формирования опасных отложений изморози целесообразно использовать данные мезомасштабных гидродинамических моделей атмосферы.

Для проведения численных экспериментов была выбрана модель WRF-ARW (Weather Research and Forecasting) Национального центра атмосферных исследований. Выбор именно этой модели был обусловлен тем, что исходный код модели находится в свободном доступе [6]. Также данная модель находится в постоянном процессе совершенствования, имеет широкий диапазон выбора начальных данных, настроек запуска и инструментов для обработки полученных расчетов.

Начальными и граничными условиями являлись данные реанализа ERA5 с шагом по пространству 0.25° [5]. Область интегрирования имела три расчетных домена с шагами по пространству 18, 6 и 2 км. Эксперимент проводился для периода с 2-го по 6-е января 2016 года. Модель запускалась с различными настройками параметризаций микрофизики и пограничного слоя атмосферы, так как именно эти настройки наиболее сильно влияют на необходимые для исследования поля температуры воздуха, влажности, облачности и осадков. В качестве финальной версии был выбран набор микрофизики NSSL 2-moment Scheme [8] и пограничного слоя университета Вашингтона [3], показавший наилучшие результаты.

Для теоретической оценки интенсивности обледенения применялась формула Макконена [7].

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \omega \cdot A \cdot V,$$

где M – масса ледяного обложения, t – время обледенения, ω – содержание жидкой воды в объеме, A – площадь поперечного сечения объекта на котором происходит отложение льда, V – скорость ветра, α_1 – коэффициент столкновения, α_2 – коэффициент прилипания, α_3 – коэффициент намерзания.

Коэффициенты столкновения, прилипания и намерзания могут значительно занижать интенсивность отложений. Коэффициент столкновения представляет собой отношение капель столкнувшихся с объектом к общему потоку, переносимому воздухом. Коэффициент прилипания представляет собой отношение удержавшихся на объекте капель переносимых потоком к их общему количеству. Коэффициент намерзания – это отношение частиц воды, успевших замерзнуть на поверхности столкновения к общему потоку частиц.

В случае моделирования зернистой изморози коэффициенты прилипания α_2 и намерзания α_3 близки к единице, считается что практически все переохлажденные капли тумана прилипают к объекту подверженному обледенению, например к проводам ВЛ, и сразу же намерзают на объекте. Коэффициент столкновения в данном случае значительно меньше единицы. Это связано с тем, что капли переохлажденного тумана имеют небольшой размер, в среднем от 10 до 25 мкм, и небольшую массу, и, следовательно, способны обтекать объекты, находясь в воздушном потоке. Существует множество способов расчета коэффициента столкновения, наиболее общепринятым является метод описания обтекания воздушным потоком цилиндра, так как большинство объектов подверженных обледенению близки по форме к н. Однако даже такой метод имеет погрешность, в первую очередь это связано с неизвестным распределением облачных частиц по размеру. В данной работе коэффициент столкновения α_1 считался постоянным и был принят равным 0.15.

Основным местом образования опасных изморозевых отложений являлся север Надымского района Ямало-Ненецкого автономного округа. Из-за отсутствия данных наблюдений в непосредственной близости к местам аварий на ВЛ, для верификации результатов численного моделирования использовались данные наземных метеорологических станций оборудованных гололедными станками и располагавшихся южнее основного очага обледенения.

Результаты моделирования представлены на графиках ниже (рис. 1а, 1б). Черными точками отмечены фактические значения размера гололедно-изморозевого отложения на метеорологической станции. Синей линией показан накопленный вес отложения по данным моделирования с использованием модели WRF-ARW, показывающий массу образовавшегося на одном погонном метре провода льда за один час. Результаты показали успешное воспроизведение моделью времени начала обледенения и распределение интенсивности обледенения на протяжении всего численного эксперимента. Качество воспроизведения моделью массы изморозевых отложений сложно оценить по данным двух метеорологических станций, однако полученные значения хоть и кажутся завышенными, особенно на метеорологической станции Новый Уренгой, имеют правильный порядок.

Результаты исследования могут быть полезны при разработке и повышении качества методов численного прогноза изморозевых отложений, которые прогнозируются хуже, чем отложения гололеда, но являются не менее важными для учета в хозяйственной деятельности человека, особенно на территории севера России. В дальнейшем планируется проведение большего количества численных экспериментов с рассмотрением других случаев образования опасных гололедно-изморозевых отложений для более точной оценки и развития различных методов прогноза данного явления.

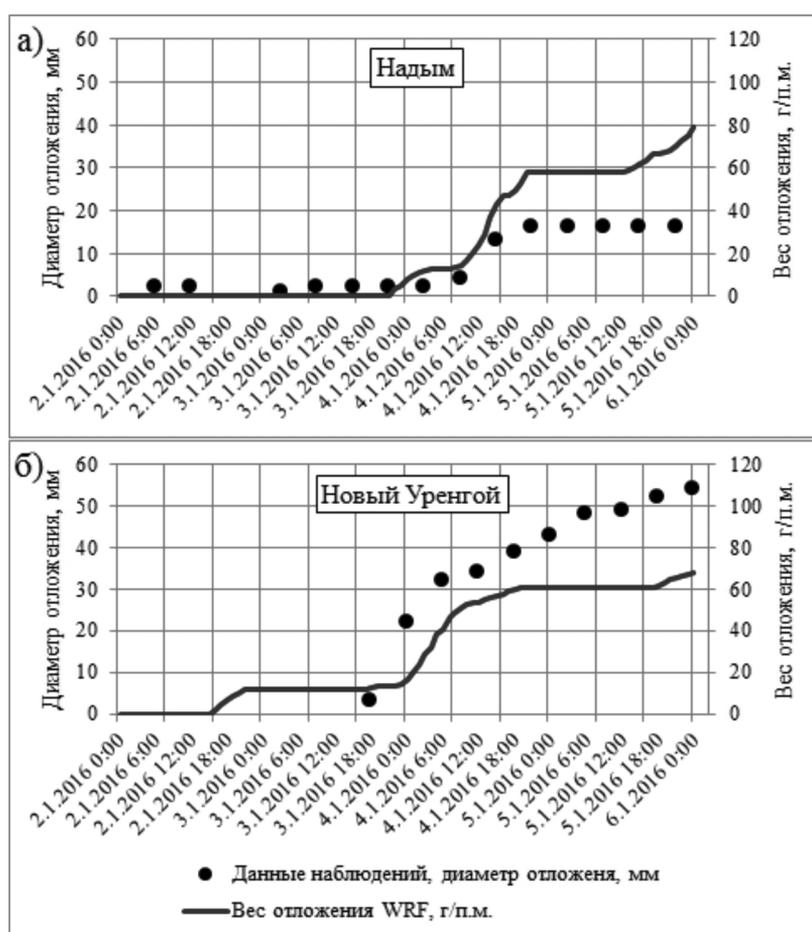


Рис. 1. Сравнение данных наблюдений за диаметром гололедно-изморозевых отложений с данными моделирования для метеостанций а) Надым и б) Новый Уренгой.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2014: Общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 59 с.
2. РД 52.27.724-2019 Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения
3. Bougeault, P., P. Lacarrere, 1989: Parameterization of Orography-Induced Turbulence in a Mesoscale—Scale Model. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1872–1890.
4. Farzahan M. Atmospheric Icing of Power Networks. // Springer Science+Business Media B.V. 2008

5. Hersbach, H, Bell, B, Berrisford, P, et al. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.* 2020; 146: 1999–2049.
6. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., ... Huang, X. -yu. (2019). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4 (No. NCAR/TN-556+STR).
7. Makkonen, L. (2000) Models for the Growth of Rime, Glaze, Icicles and Wet Snow on Structures. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 358, 2913-2939.
8. Mansell, E. R., C. L. Ziegler, and E. C. Bruning, 2010: Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics. *J. Atmos. Sci.*, 67, 171–194.

Evaluation of the global atmospheric model SL-AV's soil analysis at warm season

¹Travova S.V., ^{2,1}Tolstykh M.A.

¹Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

²Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: makhnorylova@gmail.com, m.tolstykh@inm.ras.ru

Soil moisture and temperature are key characteristics required for an accurate weather forecast. Surface temperature and humidity are interrelated and both influence the short-term forecast mostly [2]. Correct description of the soil processes at the depths, experiencing annual fluctuations and controlling the transpiration process is more important for medium and long-term forecasts [4].

The aim of this work was to evaluate the analysis of the soil temperature and moisture fields in the first meter of the active soil layer of the SL-AV global atmospheric model [7] with a resolution of 0.9 degrees in latitude and 0.72 in longitude and having 96 vertical levels relative to irregular ground-based observations of the soil state. The model analysis was prepared using the one-dimensional optimal interpolation method for the surface temperature and two lower levels, as well as the method of the simplified extended Kalman filter for soil moisture at layers 18cm and 54cm [6]. Both of these algorithms take into account only indirect information about the state of the surface; therefore, the evaluation of the analysis fields relative to direct observations can be considered independent.

The SL-AV weather forecasting system includes the multilayer soil model from the INM RAS [8] with some improvements. Soil and snow in this model are implied a continuous medium, while 8 layers (1 cm, 2 cm, 6 cm, 18 cm, 54 cm, 162 cm, 486 cm and 1458 cm) are allocated for soil parameterization and 4 - for snow.

To assess the quality of soil moisture and temperature analysis, we used data from the European observation networks: SMOSMANIA, HOBE and TERENO. The analysis was verified using data from 44 stations. These measurements are available at the International Soil Moisture Network resource [12]. The summer (from June to August) 2014 was chosen as the evaluation period.

The assessment of the state of soil moisture represented, that errors of surface moisture are often explained by inconsistencies between predicted and observed precipitation. In general, the average bias for the evaluated networks didn't exceed 0.1 - 0.15 m³/m³. The average correlation coefficient for the SMOSMANIA network turned out to be the smallest: it was 0.25 for a depth of 20 cm, 0.3 and 0.35 for 5 and 10 cm, respectively, for the lowest layer - 0.19; for HOBE and TERENO it was practically independent of depth and fluctuated around 0.5-0.55. Thus, the correlation between soil moisture observations and analysis either decreases or remained unchanged with depth.

Analysis of soil temperature data showed that the diurnal and intraseasonal variations of this meteorological element are reproduced correctly by the model, which is confirmed by high correlation coefficients. For example, it varied from 0.4 to 0.94 at 20 cm for all three considered networks. The variability of soil temperature caused by external factors becomes less with depth and the correlation between measurements and model analyses increases (Fig. 1). At the same time, the model data contains significant bias that slightly changes with depth. The error value varies from a few tenths to 2-3 degrees Celsius for different networks. The reasons for such discrepancies may be incorrect specified characteristics describing the soil (for example, its composition or coverage), inaccurate initial or boundary conditions. It is planned to assess the reproduction of the model surface fluxes, as well as to estimate the possibility of approaching of the model data to the observational data after several years of integration to find the reason of analysis errors.

Оценка воспроизведения влажности и температуры почвы в летний сезон глобальной моделью атмосферы ПЛАВ

¹Травова С.В., ²Толстых М.А.

¹ Гидрометцентр России, Москва, Россия

² Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

E-mail: makhnorylova@gmail.com, m.tolstkykh@inm.ras.ru

Одними из ключевых характеристик, необходимых для качественного прогноза погоды, как на короткие, так и на длинные сроки, являются влажность и температура почвы. Например, прогноз суточного хода приземной температуры существенно зависит от правильности воспроизведения температуры поверхности [1]. Поверхностная температура и влажность взаимосвязаны, поэтому последняя также влияет на краткосрочный прогноз [2]. Кроме этого, влажность почвы контролирует распределение энергии между потоками явного и скрытого тепла, и, следовательно, воздействует на весь пограничный слой [3]. Для среднесрочных и долгосрочных прогнозов более важным является правильное описание состояния почвы на глубинах, испытывающих годовые колебания, и контролирующего процесс транспирации [4].

Отсутствие регулярных частых широко распространенных наземных наблюдений температуры и влажности почвы привело к появлению методов, использующих альтернативные виды измерений для расчета полей анализа этих характеристик. Так, для коррекции поверхностного слоя используются спутниковые наблюдения [5] яркостной температуры поверхности Земли, а для более глубоких слоев – наземные наблюдения приземной температуры и относительной влажности [6].

В данной работе ставилась задача оценить анализ (оценку начального состояния) полей температуры и влажности в первом метре модели деятельного слоя почвы глобальной модели атмосферы ПЛАВ [7] с разрешением 0.9 градусов по широте и 0.72 по долготе и имеющую 96 уровней по вертикали относительно нерегулярных наземных наблюдений за состоянием почвы. Анализ на вышеуказанной сетке подготавливался с помощью метода одномерной оптимальной интерполяции для температуры поверхности и двух нижележащих уровней, а также метода упрощенного расширенного фильтра Калмана для влажности почвы в слоях 18 см и 54 см [6]. Оба эти алгоритма учитывают только косвенную информацию о состоянии поверхности, поэтому оценку полей анализа относительно прямых наблюдений можно считать независимой.

В системе прогноза погоды ПЛАВ используется многослойная модель почвы ИВМ РАН [8] с некоторыми усовершенствованиями. В ней грунт и снег (при его наличии) считаются непрерывной средой, при этом 8 слоев (1 см, 2 см, 6 см, 18 см, 54 см, 162 см, 486 см и 1458 см) отводятся для параметризации почвы и 4 для снега. Влажностная параметризация методом Клэппа и Хорнбергера [9]. Для расчета теплопроводности используется формула А.Ю. Юровой, полученная в результате аппроксимации наблюдений влажных и мерзлых грунтов:

$$\lambda = \frac{w \cdot (6.6w + 1.9 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot (w + i)} + \frac{i \cdot (8.9i + 2.1) \cdot 10^{-3}}{w + i}, \quad (1)$$

где λ – теплопроводность почвы (кал/сек·см·°C);

w – массовое влагосодержание почвы (гр/гр);

i – массовое льдосодержание почвы (гр/гр).

Распределение концентрации корней с глубиной задано по [10], согласно чему сумма весов по всем слоям равна 1. Величина концентрации рассчитывалась по формуле, используемой в [11].

Для оценки качества анализа влажности и температуры почвы были использованы данные европейских наблюдательных сетей SMOSMANIA, HOBE и TERENO, доступные на ресурсе International Soil Moisture Network [12]. Подробнее их характеристики представлены в таблице 1 и в работе [13]. В качестве оценочного периода было выбрано лето (с июня по август) 2014 г.

Для получения значения полей почвенного анализа модели ПЛАВ в точке наблюдений на заданных уровнях модельные данные сначала билинейно интерполировались по горизонтали в узлы станций, а затем линейно интерполировались по вертикали. В ходе расчетов предполагалось, что измерения принадлежат середине слоя, в котором проводилось наблюдение.

Верификация анализа проводилась по данным 44 станций, расположенным преимущественно на территории Западной Европы. Статистические показатели были получены для измерений, произведенных в момент анализа модели. В качестве таких характеристик выбраны средняя ошибка (Bias, наблюдения - анализ), среднеквадратическая ошибка (RMSE) и коэффициент корреляции Пирсона (R).

Таблица 1. Краткая характеристика сетей наблюдений влажности и температуры почвы, использованных в данном исследовании.

Название сети	Количество станций	Глубины измерений (верхняя граница слоя), м	Частота измерений	Название измерительного инструмента	Точность измерений
SMOSMANIA (Франция)	17	0.05	1 раз в час	ThetaProbe-ML2X PT-100	$\pm 0.05 \text{ м}^3/\text{м}^3$ $\pm 0.3^\circ\text{C}$
	17	0.10			
	17	0.20			
	16	0.30			
HOBE (Дания)	22	0.00	1 раз в час	Decagon-5-TE/ Decagon-5-TE-A	$\pm 0.05 \text{ м}^3/\text{м}^3$ $\pm 1.0^\circ\text{C}$
	22	0.20			
	21	0.50			
TERENO (Германия)	5	0.05	1 раз в час	Hydroprobe-II- Sdi-12-A Hydroprobe-II- Sdi-12-B	$\pm 0.01 -$ $0.03 \text{ м}^3/\text{м}^3$ $\pm 0.3^\circ\text{C}$
	3	0.20			
	4	0.50			

Для комплексного анализа оценок с помощью диаграммы Тейлора были дополнительно рассчитаны нормализованное стандартное отклонение (SDV) (2) и центрированная RMSE, нормализованная на стандартное отклонение наблюдений [13]:

$$SDV = \frac{\sigma_{model}}{\sigma_{observ}}, \quad (2)$$

где σ_{model} – среднеквадратическое отклонение модельного анализа,

$\sigma_{observe}$ – среднеквадратическое отклонение наблюдений.

$$E^2 = (RMSE^2 - Bias^2)/\sigma_{observ}^2. \quad (3)$$

Оценка состояния влажности почвы показала, что ошибки в поверхностной влажности часто объясняются несогласованностью прогнозируемых и наблюдаемых осадков: либо в модели выпадают лишние осадки, либо наоборот, они отсутствуют в анализе, но есть в наблюдениях. С глубиной ход влажности почвы становится более плавным. Выбросы, связанные с осадками, становятся менее выраженными в измерениях, в анализе они практически исчезают совсем. В связи с тем, что при ассимиляции узлы со свежеснегосыпавшими осадками не рассматриваются, скорее всего такое сглаживание можно объяснить слишком быстрой диффузией влаги. В целом, средние ошибки для рассматриваемых станций не превышают $0.1 - 0.15 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Средний коэффициент корреляции для сети SMOSMANIA получился наименьшим: для глубины 20 см он составил 0.25, для 5 и 10 см 0.3 и 0.35 соответственно, для самого нижнего слоя - 0.19; для HOBE и TERENO он практически не зависел от глубины и колебался около 0.5-0.55. Таким образом, с глубиной корреляция наблюдений влажности почвы и анализа либо уменьшается, либо остается неизменной.

Таблица 2. Статистические оценки сравнения полей анализа температуры и влажности почвы и данных наблюдений для глубины 20 см.

Название сети	Bias			E			R		
	min	avg	max	min	avg	max	min	avg	max
SMOSMANIA	-3.83	2.21	5.90	0.48	0.74	1.06	0.46	0.70	0.89
	-0.28	-0.06	0.11	0.73	1.02	1.28	-0.27	0.25	0.73
HOBE	-4.96	-0.90	1.74	0.45	0.87	1.48	0.40	0.71	0.94
	-0.13	-0.01	0.1	0.67	1.00	2.34	-0.63	0.50	0.99
TERENO	-0.18	-0.18	0.71	0.56	0.81	1.09	0.69	0.76	0.89
	0.02	0.1	0.13	0.88	1.29	1.66	0.55	0.56	0.59

Анализ данных температуры почвы показал, что суточный и внутрисезонный ход метеоэлемента моделью воспроизводится правильно, что подтверждается высокими коэффициентами корреляции. Например, для глубины 20 см по всем трем рассмотренным сетям он варьировался от 0.4 до 0.94. С глубиной изменчивость температуры почвы, обусловленная внешними факторами, становится меньше и корреляция между анализом и наблюдениями увеличивается по сравнению с вышележащими слоями

(рис.1). Вместе с тем в модельных данных присутствует средняя ошибка, незначительно изменяющаяся с глубиной. В зависимости от сети, ее величина варьируется от нескольких десятых до 2-3 градусов Цельсия. Причинами таких расхождений могут быть неточно заданные характеристики, описывающие почву (например, ее состав или покрытие), неточные начальные или граничные условия. Для их разделения планируется провести оценки воспроизведения моделью поверхностных потоков, а также оценить возможность приближения модельных данных к данным наблюдений через несколько лет интегрирования.

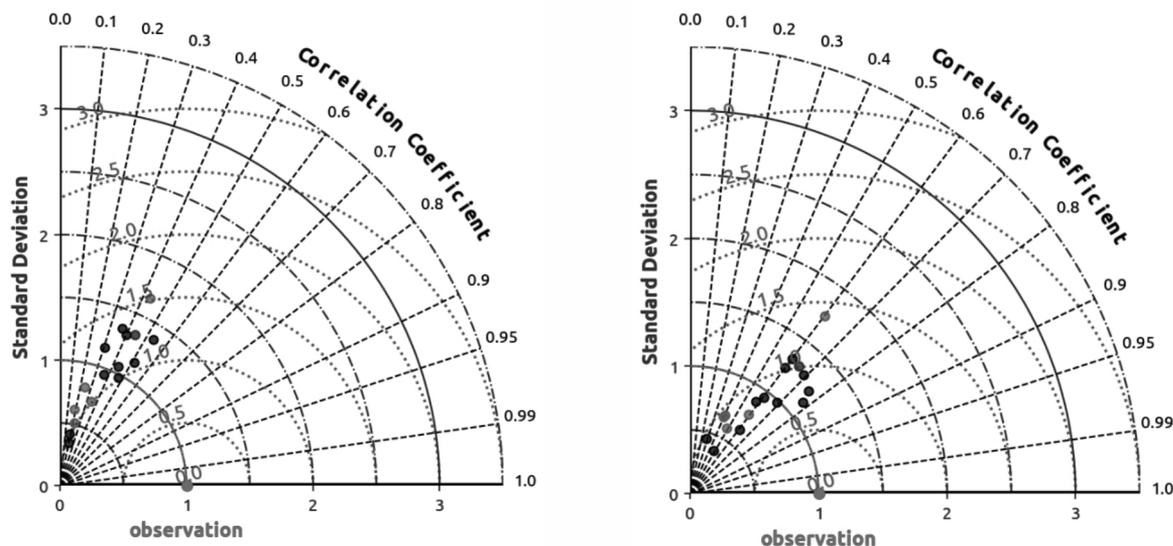


Рис. 1. Диаграммы Тейлора, показывающие сравнительный анализ температуры почвы для глубин 5 (а), 10 (б), 20 (в) и 30 (г) см сети SMOSMANIA и данных анализа модели ПЛАВ. Розовым цветом отмечена Е. Цвета кружков определяют тип поверхности на станции: черный цвет – сельскохозяйственные поля, зеленый цвет – трава и синий цвет – деревья.

Таким образом, можно заключить, что в средних широтах анализ температуры почвы в модели ПЛАВ лучше согласуется с наблюдениями, чем влажность почвы. При этом согласованность термического параметра с глубиной увеличивается, а влажности – нет. Величины ошибок анализа рассмотренных величин сравнимы с оценками, полученными для системы GLDAS [14] и позволяют работать с такой моделью почвы. Дальнейшая оценка качества этих полей для Австралии и Северной Америки, на территории которых данных наземных измерений, доступных при прогнозах, существенно меньше, позволит верифицировать работоспособность модели в засушливых регионах, а также оценить вклад усвоения приземной температуры и относительной влажности в коррекцию полей анализа.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Miralles D. G., Gentile P., Seneviratne S. I. & Teuling A. J. Land-atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: State of the science and current challenges // *Annals of the New York Academy of Science* - 2018 – vol.1436(1) – pp.19–35. <https://doi.org/10.1111/nyas.13912>
2. Nogueira M., Albergel C., Boussetta S., Johannsen F., Trigo I. F., Ermida S. L. et al. Role of vegetation in representing land surface temperature in the CHTESSEL (CY45R1) and SURFEX-ISBA (v8.1) land surface models: A case study over Iberia // *Geoscientific Model Development Discussions* – 2020 – vol.13(9) – pp.3975–3993. <https://doi.org/10.5194/gmd-2020-49>
3. Hirschi M., Seneviratne S. I., Alexandrov V., Boberg F., Boroneant C., Christensen O. B., et al. Observational evidence for soil-moisture impact on hot extremes in southeastern Europe // *Nature Geoscience* – 2011 – vol.4(1) – pp.17–21. <https://doi.org/10.1038/ngeo1032>
4. Dirmeyer P. A., Schlosser C. A., & Brubaker K. L. Precipitation, recycling, and land memory: An integrated analysis // *Journal of Hydrometeorology* – 2009 – vol.10(1) – pp.278–288. <https://doi.org/10.1175/2008JHM1016.1>
5. Albergel C., Dorigo W., Reichle R. H., Balsamo G., de Rosnay P., Muñoz-Sabater J., et al. Skill and global trend analysis of soil moisture from reanalyses and microwave remote sensing // *Journal of Hydrometeorology* – 2013 – vol.14(4) – pp. 1259–1277. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0161.1>
6. De Rosnay P., M. Drusch, G. Balsamo, L. Isaksen and C. Albergel. Extended Kalman Filter soil moisture analysis in the IFS // *ECMWF Newsletter* – 2011 - №127 - ECMWF, Reading, United Kingdom – pp.12–16.
7. Толстых М.А., Желен Ж.-Ф., Володин Е.М. и др. Разработка многомасштабной модели атмосферы ПЛАВ // *Метеорология и гидрология* – 2015 - №6 - с.26-36.

8. Володин Е. М., Лыкосов В. Н. Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность — почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных // Известия РАН. Физика атмосферы и океана – 1998 – т. 34 – № 4 – с.453—465.
9. Clapp R.B., Hornberger M.G. Empirical equations for some soil hydraulic properties // Water Resources Research – 1978 – vol. 14 – № 4 – pp.601-604.
10. Le Moigne P., Boone A., Belamari S., Brun E. et al. SURFEX v7.2 – Issue№2 – 2012, p.237. <https://www.umr-cnrm.fr/surfex/spip.php?rubrique11>
11. IFS documentation – Cy43r3. Part IV: Physical processes – p.2017 - 221
12. Dorigo W. A., Wagner W., Hohensinn R., Hahn S., Paulik C., Xaver A., Gruber A., Drusch M., Mecklenburg S., van Oevelen P., Robock A. and Jackson T. The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements // Hydrol. Earth Syst. Sci. – 2011 - vol. 15 - pp.1675-1698, doi:10.5194/hess-15-1675-2011.
13. Albergel C., De Rosnay P., Gruhier C., Sabater J.-M., Hasenauer S., Isaksen L., Kerr Y., Wagner W. Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations. - ECMWF: Technical memorandum № 652 – 2011 - p.20.
14. Wang L., Li X., Chen Y. et al. Validation of the global land data assimilation system based on measurements of soil temperature profiles //Agricultural and forest meteorology – 2016 – vol.218-219 - pp.288-297.

Variability of dates of snow cover formation in Siberia for 1970–2020 according to various datasets

¹Matyukhina A.A., ^{2,3}Voropay N.N., ³Martynova Yu.V.

¹ Tomsk State University, Tomsk, Russia

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

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

E-mail: matyukhina_nastya08@mail.ru, voropay_nn@mail.ru, foxyj13@gmail.com

Snow cover (SC) significantly impacts the climate, relief, hydrological and soil-forming processes, and plants and animals' lives. SC protects the soil from deep freezing and preserves winter crops, absorbs nitrogenous compounds, thereby fertilizing the soil, adsorbs atmospheric dust, and cools the surface layers of the air. SC contributes to significant changes in the radiation and heat balance of the underlying surface. Therefore, the dates of the appearance of SC and the formation of a stable SC (SSC) are essential characteristics of the environmental conditions under current climate changes.

Siberia is a vast geographic region in the north of Asia. A continental and sharply continental climate characterize it. We analyzed the long-term change in the dates of the SC formation for 1970-2019. In the study, we used daily data on the degree of snow coverage at 161 Siberian stations located within 60-120° E and 50-70° N.

The data were downloaded from the database of the Russia Research Institute of Hydrometeorological Information, World Data Center (RIHMI-WDC). Also, we used weekly satellite data of NOAA on the SC extent for the Northern Hemisphere. For the satellite data, the date of the SC formation beginning was determined as the date of the first day of the week, when the snow was detected for the first time.

For the station data, the first day was determined as a date with more than 5 points with the SC coverage. Since according to satellite data, a day with snow is a day with the SC coverage of more than 50% of the grid cell. When comparing the dates of the SC appearance and the SSC formation, we assume that the dates coincided on two datasets if the difference in dates ($DATE_{\text{satellite}} - DATE_{\text{station}}$) is positive and does not exceed 6.

It was found that for 1970-2020 for Siberia, the average number of the coincidences for two datasets for the SC appearance dates is 8.4, and for the dates of the SSC establishing is 8.2. The maximum number of the coincidence of the dates is 19. The correlation coefficients showed that the relationship between the coincidence of dates and geographic coordinates is significant and does not exceed the average value.

■ The research was carried out according to State project No. 121031300158-9.

Изменчивость дат образования снежного покрова Сибири по разным наборам данных в период 1970–2020 гг.

¹Матюхина А.А., ^{2,3}Воропай Н.Н., ³Мартынова Ю.В.

¹Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

³Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия

E-mail: matyukhina_nastya08@mail.ru, voropay_nn@mail.ru, foxyj13@gmail.com

Снежный покров (СП) оказывает огромное влияние на климат, рельеф, гидрологические и почвообразовательные процессы, жизнь растений и животных. СП предохраняет почву от глубокого промерзания и сохраняет озимые посевы, поглощает азотистые соединения, удобряя тем самым почву, адсорбирует атмосферную пыль, охлаждает приземные слои воздуха. Малая теплопроводность и большая теплоемкость снега приводит к тому, что теплообмен через СП замедлен, суточные колебания температуры быстро затухают с глубиной, проникая на глубину 25–35 см [1]. СП способствует существенным изменениям радиационного и теплового баланса подстилающей поверхности, поэтому даты появления СП и образования устойчивого СП (УСП) являются важными характеристиками состояния окружающей среды при современных изменениях климата. Покрытая снегом поверхность поглощает меньше радиации и охлаждает окружающий воздух. Радиационное охлаждение формирует области повышенного давления над снежным покровом, а холодный полярный воздух переносится в более низкие широты. Вдоль полярных фронтов выпадает снег, что приводит к еще большему распространению снежного покрова, и последующее атмосферное возмущение проникает дальше на юг. Такая связь действует осенью и зимой, когда поступление солнечной радиации к снегу относительно мало. Весной, когда инсоляция внутри континента велика, она меняется на обратную. Область высокого давления препятствует дальнейшей аккумуляции, но способствует ясной погоде и высокому приходу радиации к поверхности. В результате альbedo снежной поверхности снижается, возрастает таяние, и СП разрушается. Испарение с поверхности СП увеличивает атмосферную влажность, в результате чего растет противозлучение атмосферы, ускоряется испарение и образуются облака. Они прогреваются за счет поглощенной солнечной радиации и радиации, отраженной от снега. Когда же снег под облаками тает, их альbedo растет, и облака начинают охлаждаться. В горах при обильном выпадении снега граница СП опускается, окружающий район охлаждается, еще больше осадков откладывается в твердой фазе и площадь СП продолжает расширяться [2].

Сибирь – обширный географический регион на севере Азии, ограниченный с запада Уральскими горами, с востока – водораздельными хребтами, идущими вдоль Тихого океана, с севера – Северным Ледовитым океаном, с юга – государственной границей России [3]. Для Сибири характерен континентальный и резко континентальный климат. Климат Восточной Сибири, за исключением центральных и южных районов Красноярского края – резко континентальный. Западная часть Сибири – равнина, за исключением южных окраин, причем в более южной части она не отделяется от Европейской России какими-либо естественными преградами, поэтому и климат не отличается от климата Европейской России хоть сколько-нибудь резко; по мере движения на восток он становится более континентальным. В более северной полосе, начиная от 62° с.ш. почти до Ледовитого океана, границей Европейской России и Западной Сибири служит Уральский хребет, поэтому здесь климат различается резче: с октября по март холодная и более ясная погода, снега выпадает меньше, поэтому он тает раньше, и раньше же наступает весеннее тепло; лето немного теплее на востоке.

При анализе многолетнего изменения дат образования СП за 1970–2019 гг. использованы ежедневные данные о степени покрытия окрестности снегом на 161 станции Сибири, находящихся в пределах 60–120° в.д. и 50–70° с.ш. Данные наблюдений были скачаны с базы данных Всемирного научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) [4]. Также для исследования в работе были использованы данные спутниковых наблюдений NOAA о протяженности СП, полученные на основе еженедельных отчетов по Северному полушарию. Они были оцифрованы с карт снежного покрова на декартовую сетку, наложенную на полярную стереографическую проекцию. Данные имеют пространственное разрешение 190,6 км на широте 60°, обновляются ежемесячно, и охватывают период с 4 октября 1966 года по настоящее время. В связи с тем, что используемые данные имеют недельное разрешение по времени, дата начала формирования СП определялась, как дата начала недели, где впервые за сезон было отмечено появление СП на территории [5].

Проанализировано совпадение дат появления СП и образования УСП по двум разным наборам данных. Для того чтобы оценить совпадение дат появления СП по данным наблюдения на метеорологических станциях и спутниковым данным был определен первый день с покрытием окрестности СП бо-

лее 5 баллов, так как по спутниковым данным день со снегом – день с покрытием более 50% поверхности. При сравнении дат появления СП и образования УСП считаем, что даты совпали по двум базам, если разница в днях ($ДАТА_{спутник} - ДАТА_{метеостанция}$) положительна и составляет не больше 6. Так как спутниковые данные имеют недельное разрешение, начало каждой новой недели – вторник, и если разница будет превышать 6 дней, то дата образования СП по наземным метеорологическим данным будет отличаться от спутниковых данных на неделю или более.

Количество совпадений (количество случаев за период) дат появления СП вычислялись по ежедневным данным измерения покрытия окрестности СП и спутниковым данным. Максимальное количество совпадений равно 19 на станции Оленек, минимальное – 0 на станциях Тулун и Хамар-Дабан, среднее число совпадений равно примерно 8, а стандартное отклонение равно 3,55. Максимальное количество совпадений дат образования УСП равно 19 на станциях Оленек и Сухана, минимальное – 0 на станциях Хамар-Дабан и Большое Голоустное, среднее число совпадений 8, а стандартное отклонение равно 3,75.

Также были рассчитаны коэффициенты корреляции с высотой, широтой и долготой для оценки зависимости совпадений дат появления СП и установления УСП от географических координат. Связь между количеством совпадений появления СП и высотой умеренная отрицательная (–0,5, связь значима), с широтой умеренная положительная (0,48, связь значима), с долготой слабая отрицательная (–0,14, связь незначима). Максимальное совпадение дней на станции Оленек (19), минимальное дней на станции Хамар-Дабан (0) и среднее значение (8 дней) на станции Омск. Связь между количеством совпадений дат установления УСП и высотой умеренная отрицательная (–0,43, связь значима), с широтой умеренная положительная (0,40 (связь значима), а с долготой слабая отрицательная (–0,11, связь незначима). Максимальное совпадение на станции Оленек (19), минимальное на станциях Хамар-Дабан (0) и среднее значение на станции Омск (8) [6].

Таким образом, среднее число совпадений дат появления СП по двум наборам данных за период 1970-2020 гг. на территории Сибири на 161 станции равно 8,4, а среднее число совпадений установления УСП равно 8,2. Максимальное совпадение по появлению СП и установлению УСП равно 19. Коэффициенты корреляции показали, что связь между совпадением дат и географическими координатами не превышает умеренную и является значимой для широты и высоты над уровнем моря.

Для дат появления СП и установления УСП по наземным и спутниковым данным был рассчитан тренд и его значимость, а также среднее, минимум, максимум, стандартное отклонение полученных трендов для всех станций и станций, на которых зафиксированы статистически значимые изменения.

Анализ трендов дат появления СП и образования УСП по наземным и спутниковым данным показал, что зафиксировано 27 значимых трендов дат появления СП по наземным данным и 18 по спутниковым. Максимальное значение значимых трендов по наземным данным составило 7,88 дней/10 лет, по спутниковым – 6,15 дней/10 лет. Минимальное значение значимых трендов по наземным данным составило –5,98 дней/10 лет, по спутниковым –6,25 дней/10 лет. Среднее значение значимых трендов и по наземным, и по спутниковым данным отрицательное, и равно –0,79 и –2,64 соответственно. Стандартное отклонение значимых трендов равно 3,75 по наземным данным и 2,47 по спутниковым. Таким образом, значимых трендов дат появления СП по наземным данным преобладающее количество. Максимальный сдвиг появления СП на более ранние сроки зафиксирован по спутниковым данным на 6,25 дней/10 лет (ст. Верхняя Гутара).

Для дат установления УСП отмечено 13 значимых трендов по наземным данным и 21 по спутниковым. Наибольшее положительное значение трендов по наземным данным составило 5,35 дней/10 лет (ст. Антипаюта), наибольшее отрицательное –9,79 дней/10 лет (ст. Турочак), по спутниковым – все статистически значимые тренды отрицательные (от –8,3 на ст. Верхняя Гутара до –2 дня/10 лет). Среднее значение значимых трендов по наземным данным составило 0,56 по спутниковым –4,42. Стандартное отклонение значимых трендов равно 4,9 по наземным данным и 1,6 по спутниковым. Таким образом, значимых трендов дат установления УСП по спутниковым данным преобладающее количество, но все значимые тренды по спутниковым данным отрицательны. Положительные значения тренда преобладают по наземным данным, то есть происходит сдвиг дат установления УСП на более поздние сроки. Согласно анализу спутниковых данных, происходит сдвиг установления УСП на более ранние сроки.

■ Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300158-9.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ландшафтно-экологический образ зеленых островов ВАО. Снежный покров. – М.: ДДЮТЭ «Родина», 2009.
2. Котляков В. М. Климат Земли: прошлое, настоящее, будущее / В. М. Котляков, М. Г. Гросвальд, А. Н. Кренке – М.: Знание, 1985. – 48 с.
3. Поспелов Е. М. Сибирь // Географические названия мира: Топонимический словарь: Ок. 5000 единиц / Отв. ред. Р. А. Агеева. — 2-е изд., стереотип. — М.: Русские словари, Астрель, АСТ, 2002.

4. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «описание массива данных характеристики снежного покрова на метеорологических станциях России и бывшего СССР».
5. Estilow T. W., Young A. H. and Robinson D. A. A long-term Northern Hemisphere snow cover extent data record for climate studies and monitoring // *Earth System Science Data*, 2015. – V. 7, No. 1. – P. 137–42.
6. Афанасьев, В. В. Теория вероятностей [Текст] / В. В. Афанасьев. – М.: ВЛАДОС, 2007. – 350 с.

Finding of optimal predictors for the forecast of ice based on the WRF-ARW model

^{1,2}Pischnikova E.V., ²Kalinin N.A., ²Sviyazov E.M., ²Bykov A.V.

¹Perm Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Perm, Russia

²Perm State University, Perm, Russia

E-mail: sinoptik.perm@yandex.ru

Ice is called a layer of ice formed on the surface of the earth and unprotected objects during precipitation in the form of liquid precipitation (rain or drizzle), due to their freezing. When forecasting glaze ice, data on the distribution of air temperature and humidity with height in the boundary layer are usually used.

This paper examines the 2019–2020 cold season. Due to the increased temperature background, precipitation fell in different forms, atypically there was a lot of mixed and liquid precipitation. In fact, 201 events of ice were noted at 21 meteorological stations of the Perm region.

The finding of significant parameters necessary for predicting the occurrence of ice was carried out on the results of the WRF-ARW model version 4.2.2 for the period from October 30, 2019 to March 31, 2020. The finding for optimal predictors for ice forecasting based on model data was originally based on 47 model meteorological parameters. The following meteorological parameters were used as predictors: air temperature, air humidity, wind speed, atmospheric pressure reduced to sea level at the meteorological station and the geopotential height of isobaric surfaces, atmospheric precipitation.

Using the method of standards, the significance of the predictors was determined. The standards were set for a set of meteorological parameters corresponding to ice (class I) or its absence (class II). Vectors in the space of attributes (meteorological parameters) were used as standards for the indicated classes. Each specific situation was assigned to the class for which the distance in a given space turned out to be smaller. After processing the data, a contingency table of the forecast was compiled. Since the predictability of the forecast is not suitable for determining the quality of the forecast of such rare phenomena as ice, the Piers-Obukhov criterion (Q) was used to assess the significance of the parameters for the forecast. The criterion was calculated for each parameter, as if it alone was considered for the forecast. Further along Q, the most significant parameter for which the criterion has the greatest value was found. Then the Peirce-Obukhov test was calculated for pairs of predictors including the previously selected parameter. The best pair was selected for the maximum Q. Similarly, the best group of three predictors was selected, containing the best pair obtained in the previous step, then proceeded to the selection of the best groups of four predictors, etc. The selection of parameters ended when, as a result of such iterations, the values of the criterion Q ceased to grow. As a result of the procedure for selecting model parameters, 17 significant predictors were obtained for predicting of ice. In addition to the temperature and humidity characteristics, which are usually used forecasting of ice, the list of significant predictors contains information on various types of precipitation, as well as the geopotential height of the isobaric surface of 700 hPa and the wind speed at the earth's surface. The contingency table for predicting of ice, obtained from the results of the research sample, showed that out of 201 events, according to these parameters, it was possible to predict 154 cases of ice (77%). The number of missing events was 47 cases.

The study should be repeated using verification on an independent sample. Notwithstanding the relatively limited sample, this work offers valuable insights into information on atypical predictors for predicting of ice, such as an isobaric surface height of 700 hPa.

- This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-45-590021).

Поиск оптимальных предикторов для прогноза возникновения гололеда на основе модели WRF-ARW

^{1,2}Пищальникова Е.В., ²Калинин Н.А., ²Связов Е.М., ²Быков А.В.

¹Пермский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

E-mail: sinoptik.perm@yandex.ru

Гололедом называется слой льда, образовавшийся на поверхности земли и незащищенных объектах во время выпадения осадков в виде жидких осадков (дождя или мороси), вследствие их замерзания. Гололеду, как правило, сопутствуют близкая к нулю температура воздуха, высокая влажность, ветер. Толщина слоя льда, появившегося при гололеде и достигнувшая 20 мм, является критерием опасного природного явления [1, 4]. Причем лед покрывает не только горизонтальные, но и вертикальные поверхности – цокольные части строений, деревья. Особенно подвержены обмерзанию обдуваемые ветром объекты – мосты и их опоры, эстакады, столбы, линии электропередач. При прогнозе гололеда обычно используют данные о распределении температуры и влажности воздуха с высотой в пограничном слое атмосферы, наличии температурных инверсий, высотах их нижней и верхней границ, мощности и перепада температуры. При использовании результатов счета гидродинамических моделей в большинстве случаев такую информацию получить не удастся. Поля метеорологических величин представлены лишь их значениями у поверхности земли и на стандартных изобарических поверхностях, поэтому необходимо использовать дополнительные данные, например, о количестве осадков разных видов (замерзающих, в виде снега и т.д.), выдаваемых моделями [2].

В данной работе рассматривается холодный сезон 2019–2020 гг. Вследствие повышенного температурного фона осадки выпадали в разных видах, нетипично много было смешанных и жидких осадков [3]. В условиях повышенного температурного фона на территории Пермского края отмечено 386 случаев гололеда в период 1 ноября 2019 г. по 4 апреля 2020 г. Максимальный диаметр отложений льда на открытых поверхностях составил 13 мм и был зафиксирован на метеостанции Бисер. В среднем диаметр гололедных отложений составил около 1 мм. Продолжительность явления изменялась в широких пределах: от нескольких минут до десятков дней [5].

В качестве главного инструмента исследования используется гидродинамическая мезомасштабная модель WRF-ARW версии 4.2.2. Расчет выполняется на 51 вертикальном уровне, период моделирования составляет 27 ч от 12 ч ВСВ, временной шаг вывода данных – 1 ч, шаг интегрирования по времени – адаптивный, пространственное разрешение модели – 7 км (550×400 точек), модель рельефа – U.S. Geological Survey (USGS) DEM (30 s) 2017. Схемы параметризации подсеточных процессов следующие: конвекция – KIAPS SAS; микрофизика облачности – схема Томпсона [6]; коротковолновая и длинноволновая радиация – Схема GFDL (Eta); приземный слой – Схема Монино-Обухова с вязким подслоем Карлсона-Боланда и стандартными функциями подобия; подстилающая поверхность и почва – схема NOAA; пограничный слой – Схема Меллора-Ямады-Янича (Eta).

Подбор значимых параметров, необходимых для прогноза возникновения гололеда, был выполнен на результатах счета модели WRF-ARW за период с 30.10.2019 г. по 31.03.2020 г. Первые 12 часов счета модели не учитывались в выборке получаемых значений, так как в это время происходила адаптации численной модели к реальным условиям. Было рассмотрено 27 сроков модели: с 12 ч расчетных суток до 14 ч следующих, всего получилось 64638 прогностических сроков. При этом фактически гололед за исследуемый период по данным 21 метеостанции Пермского края отмечался 201 раз.

Для поиска оптимальных предикторов для прогноза гололеда на основе модельных данных первоначально было выбрано 47 модельных метеопараметров, предположительно являющихся предикторами для прогнозирования возникновения рассматриваемого явления. Помимо значений метеорологических величин в точке (на метеостанции), для некоторых параметров использовались максимальные и/или минимальные значения в пределах буферной зоны радиусом 50 км от метеостанции. Это позволяло частично нивелировать погрешности распределения метеорологических величин по модельным данным в сравнении с их фактическим распределением и, кроме того, позволяло оценить устойчивость происходящего процесса. В качестве предикторов использовались следующие метеорологические параметры: 1. Температура воздуха (температура воздуха на метеостанции у земной поверхности (на высоте 2 м) и на изобарических поверхностях 925, 850, 700 и 500 гПа; максимальные и минимальные значения температуры воздуха у земной поверхности в пределах буфера с радиусом 50 км от каждой метеостанции); 2. Влажность воздуха (относительная влажность воздуха на метеостанции у земной поверхности (на высоте 2 м) и на изобарических поверхностях 925, 850, 700 и 500 гПа; максимальные и минимальные значения относительной влажности воздуха у земной поверхности в пределах буфера с радиусом 50 км от каждой метеостанции); 3. Скорость ветра (скорость ветра

на метеостанции на высоте 10 м и на изобарических поверхностях 925, 850, 700 и 500 гПа; максимальные значения скорости ветра на высоте 10 м в пределах буфера с радиусом 50 км от каждой станции; скорость ветра при порывах на метеостанциях и ее максимальные значения в пределах буфера); 4. Атмосферное давление, приведенное к уровню моря, на метеостанции и геопотенциальная высота изобарических поверхностей; 5. Атмосферные осадки (количество осадков (общих, конвективных, неконвективных, замерзающих, в виде снега), выпавших на метеостанции по данным модели WRF-ARW; максимальное количество осадков (общих, конвективных, неконвективных, замерзающих, в виде снега), выпавших за период (1, 12, 24 ч. и т.д.), в пределах буфера по данным модели WRF-ARW).

Применяя метод эталонов, определяли значимость предикторов. Эталоны устанавливались для совокупности метеопараметров, соответствующих возникновению гололеда (I класс) или его отсутствию (II класс). В качестве эталонов для указанных классов использовали вектора в пространстве признаков (метеопараметров). Каждую конкретную ситуацию относили к тому классу, для которого расстояние в данном пространстве оказалось меньшим. После обработки данных составлялась таблица сопряженности прогноза. Так как оправдываемость прогноза не подходит для определения качества прогноза таких редких явлений, как гололед, то для оценки значимости параметров для прогноза использовался критерий Пирса-Обухова (Q). Критерий рассчитывался для каждого параметра, как если бы он один рассматривался для прогноза. Далее по Q находились наиболее значимый параметр, для которого критерий имеет наибольшее значение. Затем вычислялся критерий Пирса-Обухова для пар предикторов, включающих отобранный ранее параметр. По максимуму Q отбиралась лучшая пара. Аналогично подбиралась лучшая группа из трех предикторов, содержащую лучшую пару, полученную на предыдущем шаге, затем переходили к подбору лучших групп из четырех предикторов и т.д. Отбор параметров заканчивался, когда в результате подобных итераций значения критерия Q переставали расти. В результате проделанной выше процедуры отбора модельных параметров получился список из 17 значимых предикторов для прогноза возникновения гололеда (табл.1).

Таблица 1. Параметры модели WRF-ARW для прогноза возникновения гололеда.

№	Обозначение	Название
1	frain_acc_amax_buff	Максимальное количество накопленных замерзающих осадков в пределах буфера
2	frain_acc_p	Количество накопленных замерзающих осадков на метеостанции
3	frain_amax_buff	Максимальное количество замерзающих осадков в пределах буфера за 1 ч
4	frain_p	Количество замерзающих осадков за 1 ч на метеостанции
5	hgt_700_p	Высота изобарической поверхности 700 гПа
6	prec_amax_buff	Максимальное количество осадков за 1 ч на метеостанции
7	prec_conv_acc_amax_buff	Максимальное количество накопленных конвективных осадков в пределах буфера
8	prec_conv_acc_p	Количество накопленных конвективных осадков на метеостанции
9	prec_nonconv_amax_buff	Максимальное количество неконвективных осадков в пределах буфера за 1 ч
10	prec_snow_amax_buff	Максимальное количество осадков в виде снега в пределах буфера за 1 ч
11	rh_2m_amax_buff	Максимальное значение относительной влажности на высоте 2 м в пределах буфера за 1 ч
12	rh_850_p	Относительная влажность на изобарической поверхности 850 гПа
13	rh_925_p	Относительная влажность на изобарической поверхности 925 гПа
14	t_2m_p	Температура на высоте 2 м на метеостанции
15	tmp_700_p	Температура на изобарической поверхности 700 гПа
16	u_10m_amax_buff	Максимальная скорость ветра в пределах буфера
17	u_10m_p	Скорость ветра на высоте 10 м на метеостанции

Кроме температурных и влажностных характеристик, обычно используемых при прогнозе гололеда, в списке значимых предикторов присутствует информация о различных видах осадков, а также геопотенциальная высота изобарической поверхности 700 гПа и скорость ветра у земной поверхности.

Список требует дальнейшего уточнения по независимой выборке, которая будет получена по результатам счета модели и фактическим данным о гололеде за период 2020–2021 гг.

Таблица сопряженности прогноза возникновения гололеда, полученная по результатам исследовательской выборки, показала, что из 201 события возникновения гололеда, по данным параметрам удалось спрогнозировать 154 случая гололеда (77%). Число пропусков явления составило 47 случаев (табл. 2).

Таблица 2. Таблица сопряженности прогнозов возникновения гололеда в Пермском крае.

Факт	Прогноз		Σ
	гололед	без гололеда	
гололед	154	47	201
без гололеда	19979	44458	64437
Σ	20133	44505	64638

Из 64437 сроков без гололеда оправдалось 44458 сроков, число ложных тревог – 19979. Оправданность прогноза возникновения гололеда составила 69%. Критерий Пирса-Обухова равен 0,46, что является недостаточным для методического прогноза. Для улучшения качества прогноза требуются дополнительные исследования, в том числе проверка по независимой выборке.

Несмотря на относительно ограниченную выборку, в данной работе предлагается информация о нетипичных предикторах для прогноза возникновения гололеда, таких, например, как высота изобарической поверхности 700 гПа.

- Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-45-590021).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. РД 52.27.724 - 2019. Москва, ФГБУ «Гидрометцентр России», 2019. 72 с.
2. Пищальникова. Е.В, Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В. Численный прогноз сильных осадков в холодный период года на территории Пермского края // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 367. С. 135–145.
3. Пищальникова Е.В., Акилов Е.В. Влияние циклонической деятельности на формирование осадков холодного периода на Среднем Урале // Вестн. Удм. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2018. Вып. 4. С. 434–440.
4. Смородин Б.Л., Калинин Н.А., Давыдов Д.В. Моделирование процесса изменения температуры капель при выпадении замерзающих осадков // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 34–40.
5. Ice rains in the Middle Urals N.A. Kalinin et al 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 611 012038.
6. Thompson G., Rasmussen R.M, Manning K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I // Phys. Sci. 2004. P. 74–86.

Modeling of heat and moisture transfer in the active layer of land using various parameterizations of the moisture potential of the hydraulic flow and the moisture conductivity coefficient, taking into account various pedotransfer functions and discretization of the organic and mineral composition in depth

¹Ryazanova A.A., ^{1,2}Bogomolov V.Yu., ^{1,6}Dyukarev E.A., ^{3,4,5,6}Stepanenko V.M.

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

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

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

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

⁵Moscow center of fundamental and applied mathematics, Moscow, Russia

⁶Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

E-mail: raa@scert.ru

Soil plays an important role in energy and water exchange between the earth's surface and the atmosphere. Soil, water and energy balances are the main tools for modeling the processes occurring in the surface layer of the atmosphere, which include surface runoff, infiltration, groundwater recharge and phase transitions. To adequately reproduce and estimate soil moisture and temperature in models of the active land layer, a set of necessary parameters is required that represent the hydraulic, thermal, and mechanical properties of the soil.

In the INM RAS MSU [3] model two methods are implemented for calculating the moisture potential, the moisture conductivity coefficient and the hydraulic flow: Clapp – Hornberger [4, 5] and van Genuchten [6, 7]. The spatial distribution of these hydraulic characteristics of the soil is very heterogeneous and depends entirely on the local characteristics of the soil, thus there is no universal method for their determination. For this reason, there are a number of studies [8, 9] that offer various empirical relationships to determine these characteristics, pedotransfer functions (PTF). In our work, Williams' pedotransfer functions [8] will be used for the Clapp-Hornberger parameterization and the Wosten pedotransfer function [9] for van Genuchten's parameterization.

The GHRDS database of high spatial resolution soil characteristics will be used as the initial data on the mineral and organic composition of the soil [12]. The model of the active land layer of the INM RAS has a different number of vertical profiles from the initial data (23 profiles). To match the initial data with the vertical grid of the model, a special interpolation procedure based on the proportional division of the percentage of mineral soil components will be developed.

The main goal of this work is to compare the soil temperature and moisture profiles obtained from the results of calculating of INM RAS MSU model of the active layer of the land with two variants of the Klapp-Hornberger and van Genuchten parameterizations. In this case, the characteristics describing the mineral and organic composition of the soil are set in two versions: averaged over depth, set for each layer. The experiment is carried out for the territory of the South Siberian Plain, the model uses observational and reanalysis data as atmospheric and radiation effects, the time period is the present.

As a result of numerical experiments, a comparison is made with the data of field observations of soil temperature in the Bakcharsky district (Tomsk region) located in the southern taiga zone of Western Siberia [12]; the accuracy of temperature reproduction by the model of the active layer of land with the parameterizations of Klapp-Hornberger and van Genuchten, including various PTFs, is assessed; the role of discretization of the mineral and organic composition of the soil in depth in the formation of the heat balance on the surface is also assessed.

Моделирование тепловлагодпереноса в деятельном слое суши с использованием различных параметризаций потенциала влаги гидравлического потока и коэффициента влагопроводности с учетом различных педотрансферных функций и дискретизации органического и минерального состава по глубине

¹Рязанова А.А., ^{1,2}Богомолов В.Ю., ^{1,3}Дюкарев Е.А., ^{3,4,5,6}Степаненко В.М.

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

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³ Научно-исследовательский вычислительный центр, Московский государственный университет, Москва, Россия

⁴ Московский государственный университет, Москва, Россия

⁵ Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

⁶ Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

E-mail: raa@scert.ru

Почва играет важную роль в энергетическом и водном обмене между земной поверхностью и атмосферой. Почвенный, водный и энергетический балансы – это основные инструменты моделирования процессов, происходящих в приземном слое атмосферы, которые включают в себя поверхностный сток, инфильтрацию, питание подземных вод и фазовые переходы. Для адекватного воспроизведения и оценки влажности и температуры почвы в моделях деятельного слоя суши требуется набор необходимых параметров, представляющих гидравлические, термические и механические свойства почвы.

Согласно [1, 2] уравнения тепловлагодпереноса в почве с учётом корневой системы растительности для модели деятельного слоя суши ИВМ РАН МГУ [3] могут быть записаны в виде:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} + L_i F_i - L_v F_v,$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_w \left(\frac{\partial W}{\partial z} + \delta \frac{\delta T}{\delta z} \right) + \frac{\partial \gamma}{\partial z} - F_i - F_v - R_f - R_r,$$

где t – время, с; z – направленная вверх вертикальная координата, см; T – температура; W – количество жидкой влаги в долях от веса сухой почвы, г/г; λ_T – коэффициент теплопроводности, ккал/(г К); λ_w – коэффициент диффузии воды, см²/с; δ – коэффициент термовлагопроводности за счёт градиента температуры, К⁻¹; ρ – плотность почвы, г/см³; C – теплоёмкость почвы, кал/(г К); γ – скорость инфильтрации воды под действием силы тяжести, см/с; F_i – скорость изменения количества жидкой влаги и льда за счёт процессов замерзания/таяния, с⁻¹; F_v – скорость изменения содержания водяного пара и воды за счёт процессов замерзания/таяния, с⁻¹; R_f – изменение влагосодержания за счёт горизонтального стока воды, с⁻¹; R_r – скорость всасывания воды корневой системой растительности, с⁻¹.

В данной модели реализованы два способа расчета потенциала влаги, коэффициента влагопроводности и гидравлического потока.

Первый – параметризация Клаппа-Хорнбергера [4, 5]:

$$\psi = \psi_{max} \left(\frac{W_{max}}{W} \right)^b, \lambda_w = \lambda_{max} \left(\frac{W}{W_{max}} \right)^{b+2}, \gamma = \gamma_{max} \left(\frac{W}{W_{max}} \right)^{2b+3},$$

где b – безразмерный параметр (показатель Клаппа-Хорнбергера). Переменные с индексом max относятся к значениям соответствующих величин при максимальной влагоёмкости почвы, определяемой соотношением $W_{max} = \Pi / \rho$, где Π – пористость, ρ – плотность сухой почвы, г/см³. Коэффициент влагопроводности также можно записать в следующем виде:

$$\lambda_w = \frac{\gamma_{max} \cdot b}{W_{max}} \left(\frac{W}{W_{max}} \right)^{b+2}.$$

Второй – параметризация ван Генухтена [6, 7]:

$$W = \frac{W - W_r}{W_{max} - W_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^{1-1/n}, \gamma = \gamma_{max} W^L [1 - (1 - W^{1/(1-1/n)})^{1-1/n}]^2,$$

где W_r – минимальное количество жидкой влаги в почве, г/г; n – индекс распределения пор по размерам, α – величина, обратно пропорциональная давлению входа воздуха (давлению барбортирования), см⁻¹.

Следует отметить, что пространственное распределение этих гидравлических характеристик почвы (пористость Π , параметр b , ψ_{max} , λ_{max} и γ_{max}) очень неоднородно и полностью зависит от локальных

характеристик почв, таким образом, не существует универсального способа их определения. По этой причине, существует ряд исследований [8, 9], предлагающих различные эмпирические зависимости для определения этих характеристик – педотрансферные функции (ПТФ).

В нашей работе будет использоваться педотрансферная функция Вильямса [8] для параметризации Клаппа-Хорнбергера. Эта функция широко используется для моделирования гидравлических параметров почвы [10]. Также основной особенностью этой функции является возможность её использования как для почвы, содержащей органику, так и без неё. Для параметризации ван Генухтена предполагается использовать педотрансферную функцию Востена [9]. Для расчёта гидравлических характеристик почвы на основе этих функций в модели деятельного слоя суши ИВМ РАН МГУ будет разработана специальная программная процедура.

В качестве исходных данных минерального и органического состава почвы будет использоваться база данных почвенных характеристик высокого пространственного разрешения GHRDS [12]. Эта база имеет 30” пространственное разрешение с 8 вертикальными профилями, распределёнными по глубине следующим образом: 0 - 0,0451 м, 0,0451 - 0,0906 м, 0,0906 - 0,1655 м, 0,1655 - 0,2891 м, 0,2891 - 0,4929 м, 0,4929 - 0,8289 м, 0,8289 - 1,3828 м, 1,3828 - 3,8019 м. Модель деятельного слоя суши ИВМ РАН МГУ имеет отличное от исходных данных количество вертикальных профилей (23 профиля). Для согласования исходных данных с вертикальной сеткой модели будет разработана специальная процедура интерполяции на основе пропорционального разбиения процентного содержания минеральных компонент почвы.

Основной задачей этой работы является сравнение профилей температуры и влажности почвы, полученных по результатам расчёта модели деятельного слоя суши ИВМ РАН МГУ с двумя вариантами параметризаций Клаппа-Хорнбергера и ван Генухтена. При этом характеристики, описывающие минеральный и органический состав почвы, задаются в двух вариантах: осреднённые по глубине, заданные для каждого слоя. Эксперимент проводится для территории Южно-Сибирской равнины, в качестве атмосферного и радиационного воздействия в модели используются данные наблюдений и реанализа, временной период – современность.

В результате численных экспериментов проводится сравнение с данными натурных наблюдений температуры почв Бакcharского района (Томской области) расположенного в зоне южной тайги Западной Сибири [12]; проводится оценка точности воспроизведения температуры моделью деятельного слоя суши с параметризациями Клаппа-Хорнбергера и ван Генухтена, включающих различные ПТФ, так же даётся оценка роли дискретизации минерального и органического состава почвы по глубине в формировании теплового баланса на поверхности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Палагин Э.Г. Математическое моделирование агрометеорологических условий перезимовки озимых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1981, 191 с.
2. Лыкосов В.Н., Палагин Э.Г. Динамика взаимосвязанного переноса тепла и влаги в системе атмосфера-почва метеорология и гидрология, 1978, №8, с. 48-56.
3. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM4.0. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46.
4. Clapp R.B., Hornberger M.G. Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, 1978, V. 14, N 4, p. 601-604.
5. Campbell, G. S. (1974). A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, 117(6), 311-314. <https://doi.org/10.1097/00010694-197406000-00001>.
6. Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>.
7. Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.
8. Williams, J., Ross, P., & Bristow, K. (1992). Prediction of the Campbell water retention function from texture, structure, and organic matter. In M. T. van Genuchten, F. J. Leij, & L. J. Lund (Eds.), *Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils* (pp. 427-441). Riverside: Univ. of California.
9. Wösten, J., Lilly, A., Nemes, A., & le Bas, C. (1999). Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90(3-4), 169-185. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00132-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00132-3).
10. Western, A., and N. J. McKenzie, 2006: *Soil hydrological properties of Australia. User Guide*, CRC for Catchment Hydrology, Canberra, Australia, 21 pp. [Available online at http://www.toolkit.net.au/search/download.aspx?File_Src5doc&ResourceId52000232.].
11. Dai, Y., Xin, Q., Wei, N., Zhang, Y., Shangguan, W., Yuan, H., et al. (2019). A global high-resolution data set of soil hydraulic and thermal properties for land surface modeling. *Journal of Advances in*

12. Дюкарев Е.А., Вайзя А.А., Киселев М.В. Различия температурного режима торфяной и минеральной почв в Бакчарском районе Томской области // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2019. Т. 10. № 2.

Numerical simulation of methane fluxes from Mozhaysk reservoir by LAKE 2.3 model

Lomov V.M., Stepanenko V.M.

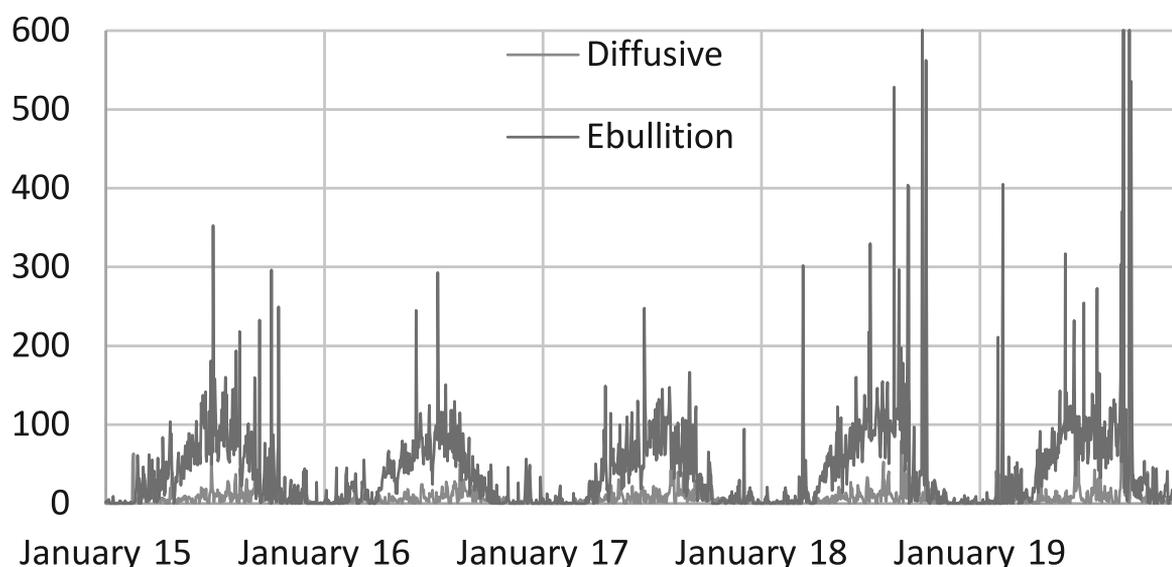
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: lomson620@mail.ru, stepanen@srcc.msu.ru

The reservoirs are not only a source of energetic or water resources, but also a source of green house gases in the atmosphere – carbon dioxide, methane, nitrous oxide. The most important green house gas in the atmosphere is CO₂, but methane has a very strong influence on global warming, because its global warming potential rate – 28 in relate to carbon dioxide. The estimations of total methane emission from worlds reservoir is 2 – 122 Tg per year. Different data bases of observations in reservoirs and different approaches to extrapolation leads to high uncertainties in these estimations.

One of the possible ways to prevent this problem is mathematical modeling methods for methane emission estimations. In this article the results of application of modeling approach for methane emission annual estimation from Mozhaysk reservoir is presented. For this goal 1D hydrodynamic model with biochemical module LAKE was used. The results of calculation for 2015 – 2019 years period showed, that ebullition is the most important component of total flux.

methane flux,
mgCH₄/m²*day



The highest methane fluxes were calculated for drawdown water level events, when the pressure is decrease rapidly, that allows to more methane bubbles appear in bottom sediments. Also, high emission rates connected with water convection period. Hydrostatic pressure is the main factor for ebullition of methane. The variability of atmospheric pressure is the factor of high emission amplitude. The experiment with LAKE model with constant pressure value showed, that in such conditions the amplitude of methane flux during the year is much lower. The second important factor for methane emission variability is temperature. The bottom sediments temperature determined the rate of methane generation. Due to this reason the methane emission slowly increased during the warm period of the year with the maximum values in the end of the summer.

The mean total annual methane emission from Mozhaysk reservoir in 2015 – 2019 calculated with LAKE model is equals 360 tonsC-CH₄. Average methane flux during this period is 37.7 mgC-CH₄*m⁻²*d⁻¹.

Численное воспроизведение потоков метана с поверхности Можайского водохранилища с помощью модели LAKE 2.3

¹Ломов В.А., ^{1,2}Степаненко В.М.

¹Московский государственный университет, Москва, Россия

²Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

E-mail: lomson620@mail.ru, stepanen@srcc.msu.ru

ВВЕДЕНИЕ

Водоохранилища и гидроэлектростанции долгое время считались источниками энергетических, водных и других ресурсов без углеродного следа, и как следствие, не учитывались при оценках антропогенного влияния на глобальное потепление. Многочисленные работы многих исследователей показали [1 - 3], что водохранилища могут быть источниками парниковых газов в атмосфере, особенно диоксида углерода и метана. Несмотря на то, что основным парниковым газом в атмосфере является CO₂, метан также вносит существенный вклад в глобальное потепление. Его концентрации в атмосфере невелики, но из-за высокого потенциала глобального потепления, который равен 28 по отношению к диоксиду углерода, вклад метана в усиление парникового эффекта составляет около 20% [4].

Существует много оценок общей эмиссии метана из искусственных водоемов. Эти оценки, сделанные в разное время, сильно различаются между собой – от 2 до 122 Тг/год. Такая большая разница в оценках связана в первую очередь с различием исходной информации об измерениях потока метана – в каждой оценке использовались разные базы данных о потоках метана с водоемов мира и, как следствие, сильно отличающиеся средние значения этих потоков, которые были экстраполированы на большую часть водохранилищ мира. Кроме того, часто измерения потоков метана даже на крупных водных объектах проводятся всего один раз в год, что не дает представления о временной изменчивости потоков.

Решением данной проблемы может быть применение методов математического моделирования для оценки потоков метана из водохранилищ. Откалиброванная по данным натуральных наблюдений модель, позволит получать достаточно точные величины эмиссии метана с учетом пространственно-временной изменчивости потоков. В качестве такой модели в данной работе была выбрана одномерная гидродинамическая модель с включением биохимического блока LAKE 2.3.

Рассмотрим процессы формирования потоков метана в водной экосистеме. Основной источник метана в воде – это анаэробное разложение органического вещества в донных отложениях [5]. Метан, образованный таким путем, поднимается к поверхности воды в виде двух основных составляющих потока – диффузионного и пузырькового. Диффузионный поток более медленный и в значительной степени подвержен окислению метанотрофами при попадании в горизонты, насыщенные кислородом. В результате этого около 80 – 90 % растворенного метана может быть окислено в поверхностных горизонтах [6].

Пузырьковый поток более быстрый и не подвержен окислению, однако, возможно растворение пузырьков в водной толще [7]. Наиболее значителен пузырьковый поток с более мелководных частей водоема из-за меньшего гидростатического давления [8]. С этим также связаны существенные выбросы пузырькового потока при резком понижении уровня водохранилища, которое может осуществляться при регулировании [9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

LAKE 2.3 – это одномерная гидродинамическая модель, в которую включен блок расчетов биохимических процессов. В данной работе использовалась модификация модели размерностью 1.5, заключается эта модификация в разделении донных отложений на колонки, расположенные на разных глубинах – таким образом учитывается наклонное дно, характерное для долинных водохранилищ.

Условно схему расчета можно описать следующим образом: образование метана в грунтах приводит к его попаданию в нижний слой модели, соответствующий тому, к которому примыкает та или иная колонка грунта. Далее в этом слое происходит расчет окисления метана, растворения пузырьков и другие биохимические процессы и с помощью турбулентного замыкания, которое является условием обмена между соседними слоями, метан переходит в следующий слой. Наилучший подход к математическому моделированию биохимических процессов – это решение системы уравнений диффузии-реакции для реагентов и продуктов, включенных в круговорот тех или иных веществ. Для метаногенеза основные процессы, которые учитываются в модели – это гидрогенотрофный и ацетатный пути производства метана, диффузионный поток метана в воде, а также отдельно «модель пузырька» в водной среде.

Основная информация, которая подается на вход в модель, это метеорологические характеристики (температура, давление, влажность, солнечная радиация, ветер, осадки), и информация о водном балансе водоема.

Объект исследования в данной работе – Можайское водохранилище. Это небольшое долинное водохранилище, расположенное на западе Московской области. На нем с 2015 года ведутся исследования, связанные с пространственно-временной изменчивостью потоков метана. Основным методом измерения потоков метана, который применен в данной работе – это плавучие камеры [3].

На основе измерений потока метана на Можайском водохранилище и настраивалась Модель LAKE. В итоге по результатам расчета модели LAKE 2.3 за 2015 – 2019 года была оценена годовая эмиссия метана.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основной результат, полученный с помощью модели LAKE 2.3 в данной работе, это временной ход диффузионного и пузырькового потоков в атмосферу (Рис.1).

Пузырьковая составляющая значительно превалирует в общем потоке метана, особенно при его значительных выбросах. В годовом ходе наблюдается достаточно характерная тенденция увеличения потока метана за теплый период года. Связано это с тем, что из-за увеличения температуры в грунтах, повышается и скорость генерации метана в колонках донных отложений. Зимой поток незначителен и небольшие выбросы связаны с разрушением ледяного покрова в модели. Помимо этого, значительные выбросы метана в атмосферу приурочены к началу весны, когда полностью разрушается ледяной покров. В результате из-за освобождения поверхности воды ото льда и весенней конвекции метан, накопившийся за зимний период может активно поступать в атмосферу.



Рис. 1. Временная изменчивость двух основных составляющих потока метана в атмосферу за 2015 – 2019 года по результатам модели.

Наибольшие значения выбросов метана связаны с динамикой уровня режима водохранилища. При задании в модели постоянного уровня водоема (уровень соответствует НПУ) резких выбросов метана, более чем $250 \text{ мгСН}_4/\text{м}^2\cdot\text{сут}$, не было зафиксировано по результатам расчета (Рис. 2А). Связано это с влиянием гидростатического давления на образование пузырьков в воде и их растворение в водной толще.

На гидростатическое давление будет оказывать влияние не только глубина водоема, но и внешнее атмосферное давление. Был проведен эксперимент по заданию постоянного атмосферного давления во входной информации в модель (Рис. 2Б). В результате этого эксперимента временной ход рассчитанного пузырькового потока имел существенно более низкую амплитуду колебаний, за исключением больших выбросов, связанных с понижением уровня. Кроме того, эти выбросы получились больше, по сравнению с основным расчетом.

По основному расчету с помощью модели LAKE 2.3 была оценена годовая эмиссия метана с Можайского водохранилища, которая составила в среднем за пять лет $360 \text{ тС-СН}_4/\text{год}$. Средний удельный

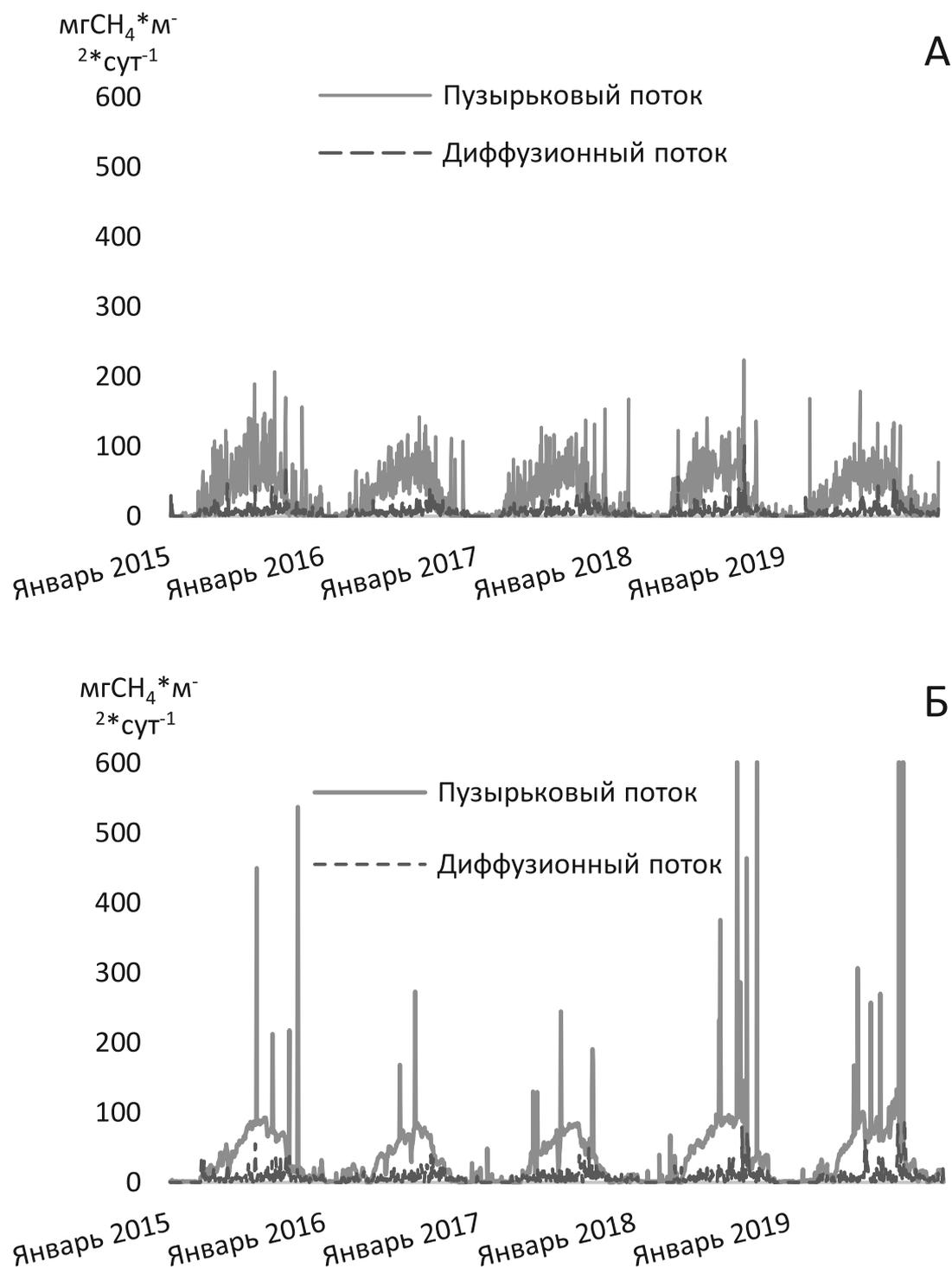


Рис.2. Результаты расчета модели при задании статичного уровня Можайского водохранилища НПУ (А), и при постоянном атмосферном давлении (Б).

поток метана за расчетный период составляет 37.7 мгС-СН₄/м²*сут. Такое среднее значение удельного потока относит Можайское водохранилище к верхнему диапазону значений для водохранилищ умеренного пояса [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в структуре потоков метана основной вклад в эмиссию вносит пузырьковая составляющая. С ней связаны наибольшие выбросы метана в атмосферу, при которых ее доля может превышать 99%. Диффузная составляющая из-за значительно меньшей скорости и подверженности окислению метанотрофами имеет намного меньшее значение. Поток метана увеличивается в течение летнего периода из-за повышения температуры в донных отложениях, способствующей интенсивности генерации метана.

Наиболее значительные выбросы метана связаны с понижением уровня водохранилища, при котором падает гидростатическое давление и происходит увеличение пузырькового потока. Кроме уровня на режим давления влияет внешнее атмосферное давление. Именно оно определяет большую амплитуду потока метана, при эксперименте, в котором атмосферное давление в модели задавалось постоянным, изменчивость пузырьковой составляющей была значительно ниже.

С помощью модели LAKE 2.3 за период с 2015 по 2019 года была оценена годовая эмиссия метана, которая в среднем составляет 360 тС-СН₄/год. Средний удельный поток метана за этот период, равный 37.7 мгС-СН₄/м²*сут, что относит Можайское водохранилище к верхней границе диапазона значений для водоемов умеренного пояса.

- Исследование выполнено при частичной поддержке гранта Президента России молодым докторам наук (МД-1850.2020.5).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Deemer B., Harrison A., Li S., Beaulieu J., Delontro T. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis // Springer. BioScience, 2016, Vol. 66, № 11, 949 – 964 pp
2. Tortajada C., Altinbilek D., Biswas K. Impact of large dams: A Global Assessment // Berlin: Water Resources Development and Management, 2012, 410 p
3. Gash J., Goldenfum J., Richard M. Taylor et.al. Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs // The World Bank Contract 7150219, 2010, 166 p
4. 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
5. 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
6. 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
7. Ostrovsky I., McGinnis D., Lapidus L., Eckert W. Quantifying gas ebullition with echosounder: the role of methane transport by bubbles in a medium-sized lake // USA: Limnology and Oceanography: Methods, Vol 6, 2008, 105 – 118 pp
8. Miller B., Arntzen E., Goldman A., Richmond M. Methane Ebullition in Temperate Hydropower Reservoirs and Implications for US Policy on Greenhouse Gas Emissions // USA: Environmental Management, Vol. 60, 2017, 1 – 15 pp
9. Harrison J., Deemer B., Birchfield M., O`Malley M. Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission // Washington: Environmental Science and Technology, Vol. 1, 2016, 1 – 11 pp

SESSION V COMPUTATIONAL AND INFORMATION TECHNOLOGIES FOR EARTH SCIENCES

СЕКЦИЯ V ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НАУК О ЗЕМЛЕ

Digital transformation of hydrometeorological support – the basis for improving the safety of the population and enterprises

Viazilov E.D.

RIHMI-WDC, Obninsk, Russia

E-mail: vjaz@meteo.ru

In connection with global climate changes in recent decades, the number of disasters has increased significantly across the globe and in Russia. A very illustrative example of ineffective use of the existing climatic and forecast hydrometeorological information is the filing of two lawsuits with general requirements for 11 billion rubles against the company «Baltic Trans-port» «Rosoboronexport» in 2019. Exposed to impacts of the storm (rolling, high air humidity with sea salt content, and penetration of seawater into the holds), missiles for the S-400 complex had to be eliminated (https://www.rbc.ru/politics/20/02/2019/5c6d7dc99a7947e81bcaf730?utm_0breferrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com).

Increasing funding for projects related to mitigating the effects of climate change and disasters (stimulating the construction of houses in safer regions, designing and building of floating houses, developing insurance taking into account the risk of floods) does not give a significant effect - the damage from disasters continues to increase.

The main problems of adaptation to the disasters are the inadequacy of assessing the situation using digital indicators, the lack of systematized and formalized information about possible impacts of disasters on industrial enterprises, the population, and recommendations for decision-making. There are cases of untimely delivering of information about a possible manifestation of disasters to government bodies, heads of industrial enterprises and the population located in the danger zone. It is necessary to organize their compulsory notification for the fastest acquaintance with the current situation by all possible means.

Differences between new business models in the era of digital transformation are following:

- Use of integrated, distributed and heterogeneous data from various sources;
- Increasing the level of automation of the processes for identifying disasters for each object, type of activity, level of danger before, during and after the passage of the disaster;
- Delivering of the necessary data to consumers in accordance with its requirements for the composition of the necessary parameters;
- Optimization of the use of hydrometeorological information in decision-making by predicting possible impacts of disasters on enterprises, assessing the possible damage before the start of disasters and calculating the cost of preventive actions.

The IT infrastructure of Roshydromet should ensure:

- Continuous observation process, including with the help of automatic meteorological stations;
- Collection of data from hydrometeorological stations;
- Integration of data from various sources;
- Exchange and delivering of data to other systems;
- Detailed acquaintance with the hydrometeorological situation;
- Use of information in business processes and decision-making.

That is, it is necessary to develop new tools to implement the transition from "patchwork" automation of hydrometeorological support for enterprises heads to end-to-end technology for support "from observation to decision-making".

Many tasks of consumer are non-standard, they require taking into account the specifics of the business processes of a particular enterprise. Each business process needs its own set of parameters, the level of their aggregation, requirements for the relevance of data, the frequency of observations, and the lead time of forecasts. Information for making quick and informed decisions must be easily accessible. Therefore, the speed of delivery of information about disasters is one of the most important requirements of many business processes carried out in enterprises. Enterprises need tools to assess the potential impacts of disasters on businesses and the public, make decisions, and calculate losses and the cost of preventive actions prior to the occurrence of the disaster.

Цифровая трансформация гидрометеорологического обеспечения потребителей – основа повышения безопасности населения и предприятий

Вязилов Е.Д.

ВНИИГМИ-МЦД, Обнинск, Россия

E-mail: vjaz@meteo.ru

ВВЕДЕНИЕ

В связи с глобальными изменениями климата в последние десятилетия на всем Земном шаре и в России существенно увеличилось число случаев опасных природных явлений (ОПЯ) [1]. Почти 20% экономики США напрямую зависит от погоды (<http://Investopedia.com>). Сюда входят компании сельского хозяйства, энергетики, развлечения, строительства, розничной торговли и путешествий. В своем выступлении в Конгрессе в 1998 году бывший министр торговли Уильям Дейли заявил: «Погода – это не просто экологическая проблема, это важный экономический фактор. По крайней мере, один триллион долларов экономики чувствителен к погодным условиям» (<https://kursiv.kz/opinions/2019-04/kak-prognoz-pogody-pomogaet-zarabatyvat-na-fondovom-rynke?page=38>). Предсказывая погоду, можно предвидеть даже цены на нефть и газ (в период похолодания увеличивается потребность в этих ресурсах). Рост или падение фондовых рынков, инфляция и даже решения центральных банков по базовой ставке зависят от того, сколько выпадет осадков (например, в Индии в период сезона муссонов).

Исследователи из Национального центра океанографических данных Великобритании предсказывают, что наводнения из-за повышения уровня Мирового океана могут увеличить расходы стран на превентивные мероприятия до \$14 трлн. В мире около 600 млн. человек живут на побережьях на высоте не более 10 м над уровнем моря, их жилища подвергаются опасности из-за глобального изменения климата. Первый заместитель главы Минвостокразвития Российской Федерации Александр Крутиков заявил о том, что прямой ущерб от последствий глобального потепления в Арктике может достигать 2-9 триллионов рублей к 2050 году.

Очень показательным примером неэффективного использования существующей климатической и прогностической гидрометеорологической информации (ГМИ) является подача в суд двух исков с общими требованиями на 11 млрд. руб. против компании «Балтик Транс-порт» «Рособоронэкспорта» в 2019 г. Подвергнувшиеся воздействию шторма (качке, высокой влажности воздуха с содержанием морской соли, проникновению морской воды в трюмы) ракеты для комплекса С-400 при перевозке морским путем в Китай пришлось ликвидировать (https://www.rbc.ru/politics/20/02/2019/5c6d7dc99a7947e81bcdf730?utm_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com).

Несмотря на существенное уменьшение площади льдов в Арктике в летний период, ледовая обстановка в отдельные годы в осенне-зимний период складывается достаточно сложной. Так теплоход «Спарта III» Мурманского пароходства, используемый в качестве контейнеровоза и совершавший рейс из Дудинки в Архангельск, оказался затертым во льдах в Енисейском заливе в середине декабря 2020 года. Сопровождавший его буксир «Кигориак» не смог обеспечить движение судна из-за обширных торосов, образовавшихся при становлении припая. В сложной ледовой обстановке у судна вышло из строя рулевое управление. Для вывода судна из ледового плена пришлось привлекать ледокол «Адмирал Макаров» и буксир аварийно-спасательное судно «Спасатель Карев».

Увеличение финансирования проектов, связанных со смягчением последствий изменения климата и ОПЯ (стимулирование строительства домов в более безопасных регионах, проектирование плавучих домов, строительство зданий на воде, развитие страхования с учетом риска наводнений) не дает существенного эффекта - ущерб от ОПЯ продолжает увеличиваться [2-4].

ЧТО ДЕЛАТЬ?

Основными проблемами адаптации к ОПЯ являются неадекватность оценки обстановки по цифровым показателям, отсутствие систематизированных и формализованных сведений о возможных воздействиях явлений на промышленные предприятия и население, рекомендаций для принятия решений. Бывают случаи несвоевременного доведения информации о возможном проявлении явления до органов государственного управления, руководителей промышленных предприятий и населения, находящегося в опасной зоне. В момент явления существующие средства оповещения (радио, телевидение, Интернет) могут не работать, т.к. в этот момент часто отключается электричество. Органы государственного управления заняты своими делами и не всегда вовремя реагируют на прогнозы явлений. Поэтому необходимо организовать принудительное их оповещение для быстреего ознакомления со сложившейся обстановкой всеми возможными средствами.

Руководители предприятий не всегда могут правильно оценить обстановку в цифровых показателях ОПЯ, им надо давать оценку возможного ущерба до начала явления, иначе они не будут предпринимать превентивных действий. Правильная и своевременная оценка сложившейся обстановки имеет большое значение для уменьшения или предотвращения ущерба. Оперативное реагирование на изменения гидрометеорологической обстановки – это условие для повышения эффективности функционирования промышленных предприятий и управления ими.

Во многих организациях уже существуют контуры управления, которые работают с хорошо структурированными процессами и данными при использовании ГМИ в бизнес-процессах, но они не всегда автоматизированы. Реальный эффект дают не сами данные о климате, наблюдения и прогноз, а их эффективное применение и наличие у предприятий методов и средств реагирования на предупреждения об ОПЯ. Противостоять серьезным экономическим последствиям поможет увеличение информированности руководителей и населения о возможных воздействиях явлений на производственную деятельность предприятий, а также получение рекомендаций для принятия решений по предотвращению или уменьшению этих воздействий.

Необходимо перейти на новый уровень автоматизации всех технологических процессов измерения, сбора, обработки, хранения, обмена, а главное использования гидрометеорологической информации. Сейчас это называется цифровой трансформацией (ЦТ), которая опирается на цифровую экономику, интернет вещей (автоматические станции и комплексы), роботизацию массовых процессов обработки данных с использованием баз знаний, машинное обучение для контроля данных, прогнозирования погоды, веб-сервисы для автоматического обмена данными между приложениями, чат-боты для поиска необходимых потребителю данных, поддержку решений, которые в сумме могут существенно помочь руководителям предприятий и населению правильно подготовиться к ОПЯ. ЦТ представляет собой качественное изменение характера функционирования предприятий, появление новых бизнес моделей за счёт постепенной, всё более глубокой оптимизации бизнес процессов предприятий с учетом гидрометеорологических условий.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 10 октября 2020 г. N 1646 "О мерах по обеспечению эффективности мероприятий по использованию информационно-коммуникационных технологий в деятельности федеральных органов исполнительной власти и органов управления государственными внебюджетными фондами" под термином «Цифровая трансформация» понимается совокупность действий, осуществляемых государственным органом, направленных на изменение (трансформацию) государственного управления и деятельности государственного органа по предоставлению им государственных услуг и исполнению государственных функций за счет использования данных в электронном виде и внедрения ИТ в свою деятельность.

ЦТ в Росгидромете - это радикальное изменение гидрометеорологического обеспечения (ГМО) промышленных предприятий и органов государственной власти за счет существенного повышения уровня автоматизации всех процессов сбора и обработки данных; применения новых бизнес моделей использования ГМИ в бизнес процессах предприятий, на которые воздействует окружающая среда. Отличиями новых бизнес моделей в эпоху ЦТ являются:

- использование интегрированных, распределенных и неоднородных данных из различных источников;
- повышение уровня автоматизации процессов выявления ОПЯ для каждого объекта, вида деятельности, уровня опасности до, в период и после прохождения явления;
- доведение необходимых данных до потребителей в соответствии с его требованиями по составу необходимых параметров;
- оптимизация использования ГМИ при принятии решений за счет прогнозов возможных воздействий окружающей среды на предприятия, оценки возможного ущерба до начала ОПЯ и расчета стоимости превентивных мероприятий.

ЧТО НУЖНО ПОТРЕБИТЕЛЮ?

Необходимо сделать так, чтобы данные попадали как можно быстрее к руководителям предприятий, что повысит эффективность процессов принятия решений за счет получения более качественного доступа к гидрометеорологическим данным и более оперативной реакции на них. Для уменьшения времени между наблюдением и использованием ГМИ нужно автоматизировать: выявление и доставку сведений об ОПЯ до потребителей; оценку уровня опасности для каждого предприятия, вида деятельности; визуализацию сложившейся гидрометеорологической обстановки; выдачу сведений о возможных воздействиях ОПЯ на объекты и виды деятельности; оценку возможного ущерба; выдачу рекомендаций для принятия решений; расчет стоимости превентивных мероприятий; принятие решения с учетом разницы между ущербом и стоимостью превентивных мероприятий.

ИТ инфраструктура Росгидромета должна обеспечивать непрерывный процесс наблюдений, в т. ч. с помощью автоматических станций, комплексов; сбор данных с пунктов наблюдений в управления Росгидромета и в прогностических центрах; интеграцию данных от различных источников; обмен и доведение данных в другие системы; детальное знакомство с гидрометеорологической ситуацией; использование информации в бизнес-процессах и принятие решений. То есть необходимо разработать новые инструменты для реализации перехода от «лоскутной» автоматизации к сквозной технологии обслуживания руководителей «от наблюдений до принятия решения».

Задачами ЦТ являются создание цифровых процессов, построение единой цифровой инфраструктуры, развитие новых цифровых продуктов для персонализированного обслуживания. ЦТ должна:

- ликвидировать непроизводительный и нетворческий труд сотрудников организаций, участвующих в ГМО потребителей;
- оптимизировать бизнес-процессы предприятий - предотвратить любые задержки в ходе сбора, обработки и доведения информации;
- развивать инфраструктуру для сбора, интеграции, накопления и доведения до руководителей только необходимой ему информации.

Результаты ЦТ должны привести к созданию единого цифрового и информационного пространства, когда данные об окружающей среде, в какой бы структуре (формате) они не были представлены, они должны быть доставлены руководителю в том виде, в котором он считает нужным. ЦТ требует активного сотрудничества с использованием современных ИТ между гидрометеорологическими организациями, учеными, органами государственного управления, руководителями предприятий, экспертами в различных областях деятельности.

Не менее важно, чтобы все результаты ЦТ помогли предприятиям, вступившим в стадию четвертой промышленной революции уменьшить их зависимость от условий окружающей среды. ГМО должно быть направлено на включение ГМИ в автоматизированные бизнес-процессы предприятий, работающих в индустрии 4.0. Развитие интернета, инфокоммуникационных технологий, устойчивых каналов связи, облачных технологий и цифровых платформ обеспечило появление открытых баз данных, глобальных сетей, выходящих за границы отдельного предприятия и взаимодействующих между собой. Это и есть четвертая ступень индустриализации (Индустрия 4.0), предусматривающая интеграцию данных, сквозную автоматизацию всех этапов обработки данных без непосредственного участия человека. Основными принципами построения Индустрии 4.0 являются [6]: совместимость (способность машин, устройств, сенсоров и людей взаимодействовать и общаться друг с другом); прозрачность (получение максимально полной информации обо всех процессах, которые происходят в промышленных объектах); поддержка принятия решений (помощь руководителям при принятии решений); децентрализация управленческих решений (делегирование некоторых функций принятия решений системе поддержки принятия решений). К Индустрии 4.0 относятся разработки безопасных городов, интеллектуальных зданий, самоуправляемых автомобилей, судов, беспилотных самолетов, автоматических производств и т.д.

ВЫВОДЫ

Сложилась парадоксальная ситуация, когда сбор, накопление, прикладная обработка данных, получение климатических обобщений, краткосрочный, долгосрочный и сверхдолгосрочные прогнозы гидрометеорологических условий и изменений климата имеются, а их использование пока не дает ощутимых бизнес-результатов, что является одним из важнейших показателей Индустрии 4.0. Принцип получения данных из «одного окна», реализующий самообслуживание руководителей предприятий, уже не устраивает их, т. к. основная нагрузка на поиск и использование данных ложится на них. Предприятия, зависящие от ГМУ, массово уходят в онлайн, проводят ЦТ своей деятельности и переходят к практическому использованию идей и подходов Индустрии 4.0. В этих условиях и ГМО должно перейти на новый уровень автоматизации – автоматическую доставку ГМИ, автоматическое использование в бизнес-процессах предприятий, создание интеллектуального информационного пространства для каждого руководителя предприятия.

Многие задачи потребителей — нестандартные, требуют учета специфики бизнес процессов конкретного предприятия, для каждого бизнес процесса необходим свой состав параметров, уровень их агрегации, свои требования к актуальности данных, частоте наблюдений, заблаговременности прогнозов. Информация для принятия быстрых и обоснованных управленческих решений должна быть легко доступна, поэтому скорость доставки сведений об ОПЯ – одно из важнейших требований многих бизнес процессов, выполняемых на предприятиях. Предприятиям нужны инструменты для оценки возможных воздействий ОПЯ на предприятия и население, принятия решений и расчета убытков и стоимости превентивных мероприятий до начала явления.

Более подробно с представленными выше идеями ЦТ ГМО потребителей можно ознакомиться в книге [7].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Чрезвычайные ситуации в России, связанные с неблагоприятными условиями погоды. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». <http://meteo.ru/pogoda-i-klimat/118-chrezvychajnye-situatsii-v-rossii/620-chrezvychajnye-situatsii-v-rossii-2015>. Дата доступа: 28.05 2021.
2. Бедрицкий А.И. Влияние погоды и климата на устойчивость и развитие экономики. // Бюллетень ВМО. 1999. Т. 48. № 2. с. 215—222.
3. Street R., Parry M., Scott J., Jacob D., Runge T. A. European Research and Innovation Roadmap for Climate Services. - European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. 2015. Luxembourg.
4. Stephane Hallegatte, Mook Bangalore, Laura Bonzanigo, Marianne Fay, Tamaro Kane, Ulf Narloch, Julie Rozenberg, David Treguer, and Adrien Vogt-Schilb. Shock Waves: Managing the Impacts of Climate Change on Poverty. International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank. 2016. - 227p.
5. European Union's project ECONADAPT Toolbox provides easily accessible information on the economic assessment of adaptation. <https://econadapt-toolbox.eu/easy-access-guide>. Accessed: 28 May 2019.
6. Тарасов И.В. Индустрия 4.0: понятие, концепции, тенденции развития. Электронный научно-экономический журнал «Стратегии бизнеса». 2018. № 6 (50). 7 с. <https://cyberleninka.ru/article/n/industriya-4-0-ponyatie-kontseptsii-tendentsii-razvitiya/viewer>.
7. Вязилов Е.Д. Цифровая трансформация гидрометеорологического обеспечения потребителей. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». – 2021. – 454 с. (в издании).

Вариационные методы для систем природоохранного прогнозирования и усвоения данных измерений

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

Представлены методы решения задач прогнозирования и охраны окружающей среды в условиях природных и антропогенных воздействий на эволюцию исследуемых процессов. Основу этих методов составляют вариационные принципы для организации комплекса математических моделей объектов Земной системы. Основные их них: атмосфера, океаны, поверхность земли и верхние слои почвы; газо-аэрозольный состав атмосферы, включая механизмы их продукции/трансформации и другие [1,2].

Кроме моделей процессов используются также результаты их наблюдений системами мониторинга и соответствующие представления в пространствах функций состояния моделей процессов (так называемые «модели наблюдений»). При этом определяются также и целевые функционалы исследования процессов и прогнозирования.

Объединение всех этих моделей и объектов в единую систему осуществляем на основе вариационного принципа со слабыми ограничениями. В его определении используем основные функции состояния и соответствующие им сопряженные функции, а также вводятся дополнительно так называемые функции неопределенностей. Это новые искомые функции, типа источников в уравнениях комплекса моделей процессов и моделей наблюдений. Они вводятся для решения обратных задач и усвоения данных.

Для удобства реализации мы определяем основной функционал системы моделирования энергетического типа и формулируем его как объединения совокупности функционалов для объектов системы

Земля и для переноса и трансформации газо-аэрозольных примесей. Объединение всех этих объектов организуем так, чтобы можно было осуществлять параллельную организацию соответствующих частей общей задачи. Конкретно, при использовании методов расщепления получаются локально одномерные системы уравнений для основных и сопряженных задач и методов последовательного усвоения данных без итераций. Это очень важно для реализации систем усвоения данных с высоким пространственно-временным разрешением и с увеличением разнообразия усваиваемых типов наблюдений.

Определим еще один аспект усвоения данных на основе математических моделей системы Земля. В настоящее время основной состав действующих и перспективных систем мониторинга дает информацию о поведении атмосферы и процессов переноса и трансформации примесей в её составе [3]. Поэтому при решении задач о процессах в отдельных частях Земной системы недостаток результатов наблюдений будет всегда сказываться на оценках фактического состояния и прогнозов ситуаций.

При объединении моделей процессов и систем усвоения данных в рамках общего вариационного принципа для решения задач Земной системы в целом, модели процессов и модели наблюдений выступают в роли инструментов пространственно-временных интерполяций/экстраполяций функций состояния и параметров во всей системе в целом. Это так называемые решения задач продолжения для целей прогнозирования и оценок качества природной среды во всей системе.

- Благодарности. Работа выполняется в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН № 0251-2021-0003 при частичной поддержке проекта РФФИ № 20-01-00560 в части рассмотрения задач продолжения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1981.
2. Володин и др. Математическое моделирование Земной системы. М: МАКС Пресс, 2016
3. Seamless prediction of the Earth system: from minutes to months// WMO-No.1156, 2015.

Variational methods for environmental forecasting systems and assimilation of measurement data

Penenko V., Penenko A.

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

E-mail: penenko@sscc.ru, a.penenko@yandex.ru

Methods for solving problems of environmental forecasting and protection in the conditions of natural and anthropogenic impacts on the evolution of the studied processes are presented. These methods are based on variational principles for organizing a complex of mathematical models of objects of the Earth system. The main ones are: the atmosphere, oceans, the earth's surface and the upper layers of the soil; the gas-aerosol composition of the atmosphere, including the mechanisms of their production/transformation, and others [1,2]. In addition to process models, the results of their observations by monitoring systems and the corresponding representations in the spaces of state functions of process models (the so-called "observation models") are also used. Besides, we also determine the target functionals of process research and forecasting. We combine all these models and objects into a common system based on the variational principle with weak constraints. In its definition, we use the main state functions and their corresponding adjoint functions, and introduce the so-called uncertainty functions. The latter are new desired functions, like sources in the equations of the complex of process models and observation models. They are introduced to solve inverse problems and assimilate data.

For ease of implementation, we define the main functional of the energy-type and formulate it as a combination of a set of functions for objects of the Earth system and for the transfer and transformation of gas-aerosol impurities. We organize the union of all these objects so that the corresponding parts of the overall task can be organized in parallel. Specifically, when using splitting methods, locally one-dimensional systems of equations for basic and adjoint problems and methods of sequential data assimilation without iterations are obtained. This is very important for the implementation of data assimilation systems with high spatial-temporal resolution and with an increase in the variety of assimilated types of observations.

Let us define another aspect of data assimilation based on mathematical models of the Earth system. Currently, the main composition of existing and prospective monitoring systems provides information about the behavior of the atmosphere and the processes of transport and transformation of impurities in its composition [3]. Therefore, when solving problems on processes in certain parts of the Earth's system, the lack of observational results will always affect the estimates of the actual state and forecasts of situations.

When combining process models and data assimilation systems within the framework of a common variational principle for solving problems of the Earth system as a whole, process models and observation models act as tools for spatio-temporal interpolation/extrapolation of state functions and parameters in the entire system as a whole. These are the so-called continuation problems for the purposes of forecasting and evaluating the quality of the natural environment throughout the system.

- Acknowledgments. This work is carried out within the framework of the state assignment of the ICM&MG SB RAS 0251-2021-0003 with the support of the RFBR 20-01-00560 regarding the continuation tasks.

REFERENCES:

1. Penenko V.V. Methods of numerical modeling of atmospheric processes. L.:Gigrometeoizdat, 1981.
2. Mathematical modeling of the Earth system/ Volodin V.M et al and other. M.: MAKS Press, 2016.
3. Seamless prediction of the Earth system: from minutes to months// WMO-No.1156, 2015.

Data Analysis and Scientific Applications with new Tree Ring web-Integrated System for Hydrology (TRISH)

^{1,2}Shiklomanov A., ¹Prusevich A., ¹Glidden S.

¹Earth Systems Research Center, University of New Hampshire, Durham, USA

²Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

The Tree Ring Integrated System for Hydrology (TRISH) has been developed at the University of New Hampshire (UNH) as an online instrument for multidisciplinary data visualization, analysis and manipulation with a focus on pan-Arctic hydrological applications with use of long-term proxy information e.g. tree-ring data. This new system was built on the OpenLayers Application Programming Interface which is an Open Source initiative for dynamic mapping in compliance with the Open Geospatial Consortium (OGC) standards and protocols. Although TRISH is a completely new web-integrated system with various new features, it retains most of the data and functionality developed earlier at UNH for the Rapid Integrated Mapping System (RIMS). Presently, the TRISH data pool includes more than 20000 single layers (e.g. elevation) and time series (e.g. gridded daily runoff) as well as several station/point network datasets. The data accessible through TRISH covers a variety of themes including climate, hydrology, land cover, demographics, economics, tree-ring proxies and others. In addition to visualization/mapping of gridded data with capability to overlay Bing or OSM (Open Street Maps) base layers for better georeferencing the exact location, TRISH also contains web services designed for digital data content interfacing: I) dataset search service among our data holdings (in 300+ file formats readable by the GDAL library); II) the ability to view different temporal aggregation sub-sets of the same time series data (e.g. daily, monthly, yearly, or long term averages, etc.) as well as their spatial aggregations (e.g. integral averages per country, per watershed, per administrative unit, etc.); III) interactive querying the source data values for each pixel of the client-side displayed maps (WFS/WCS); IV) on-line algebraic and logical calculations in Perl Data Language (PDL) syntax to create and analyze static and time series data layers via the new data calculator tool; V) tools for easy mounting and management of new vector, raster, and point/station data including associated metadata; VI) tools for statistical analysis of station/point data.

To demonstrate the capabilities of TRISH as a powerful instrument for various environmental and coupled human-natural systems research, we will present several examples of climate and hydrological data analyses with various observed, modeled, and proxy datasets for spatial domains in Siberia and beyond.

High-order approximation schemes for the staggered reduced lat-lon grid

^{1,2,3}Goyman G.S., ^{1,3,2}Shashkin V.V.

¹ Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

³ Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

E-mail: gordeygoyman@gmail.com

In this work, we consider high-order discretization of the nonlinear shallow water equations on a reduced latitude-longitude grid with variables staggering [1]. We use finite-differences based on the piecewise trigonometric interpolation for the spatial discretization of the equations. These schemes are exact for $\sin m\lambda$, $\cos m\lambda$ functions with $m \leq 2$ and allow to avoid reduced grid pole problem [2, 3]. Semi-implicit semi-Lagrangian method [4, 5] is used for the temporal discretization of the equations.

Properties of the proposed model will be studied using standard idealized tests for nonlinear shallow water equations on a sphere, proposed in [6, 7]. The report will present the obtained test results and their comparison with the shallow water model on a regular latitude-longitude grid and with the results of other models published in the literature.

REFERENCES:

1. Goyman G. S., Shashkin V. V. Horizontal approximation schemes for the staggered reduced latitude-longitude grid // *Journal of Computational Physics*. – 2021. – Т. 434. – С. 110234.
2. Shuman F. G. On certain truncation errors associated with spherical coordinates // *Journal of Applied Meteorology*. – 1970. – Т. 9. – №. 4. – С. 564-570.
3. Bénard P., Glinton M. R. Circumventing the pole problem of reduced lat-lon grids with local schemes. Part I: Analysis and model formulation // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2019. – Т. 145. – №. 721. – С. 1377-1391.
4. Robert A. A stable numerical integration scheme for the primitive meteorological equations // *Atmosphere-Ocean*. – 1981. – Т. 19. – №. 1. – pp. 35-46.
5. Hortal M. The development and testing of a new two-time-level semi-Lagrangian scheme (SETTLS) in the ECMWF forecast model // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2002. – Т. 128. – №. 583. – С. 1671-1687.
6. Galewsky J., Scott R. K., Polvani L. M. An initial-value problem for testing numerical models of the global shallow-water equations // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. – 2004. – Т. 56. – №. 5. – С. 429-440.
7. Williamson D. L. et al. A standard test set for numerical approximations to the shallow water equations in spherical geometry // *Journal of Computational Physics*. – 1992. – Т. 102. – №. 1. – С. 211-224.

Схемы высокого порядка для дискретизации уравнений на редуцированной широтно-долготной сетке с разнесением переменных

^{1,2,3}Гойман Г.С., ^{1,3,2}Шашкин В.В.

¹ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия

³ Гидрометцентр России, Москва, Россия

E-mail: gordeygoyman@gmail.com

Данная работа посвящена построению и исследованию свойств схем высокого порядка аппроксимации на редуцированной широтно-долготной сетке [1] с разнесением переменных. Регулярная широтно-долготная сетка на протяжении долгого времени являлась одним из основных вариантов для разработки глобальных численных моделей динамики атмосферы. Один из главных недостатков данной сетки – наличие анизотропии вблизи полюсов, что приводит к проблемам устойчивости, вычислительной и параллельной эффективности численных методов, а также к трудностям при формулировке схем параметризации процессов подсеточного масштаба. Это приводит к практической неце-

лесообразности использования регулярной широтно-долготной сетки с горизонтальным разрешением менее 10 км на экваторе.

На сегодняшний день предложены различные варианты горизонтальных сеток на сфере с квазиоднородным разрешением [2]. Наиболее популярными вариантами являются сетки типа равноугольная кубическая сфера [3-5], неструктурированные икосаэдральные и треугольные сетки [6-8], а также составные сетки с перекрытием, например, сетка типа Инь-Янь [9,10]. В то же время относительно небольшое количество работ посвящено построению и анализу свойств локальных дискретизаций для редуцированной широтно-долготной сетки. Эта сетка имеет ряд потенциальных преимуществ, таких как ортогональность криволинейной системы координат, наличие частичной структуры, сонаправленность крупномасштабных геофизических течений с линиями сетки, а также возможность повторного использования исходного кода (с небольшими изменениями) моделей, использующих регулярную широтно-долготную сетку. Один из главных недостатков редуцированной сетки (во многом ограничивающий её применение) – так называемая проблема полюса редуцированной сетки [11, 12] (reduced grid pole problem). Данное явление наблюдается при использовании конечно-разностного подхода для аппроксимации дифференциальных операторов и заключается в росте ошибки дискретизации вблизи полюсных точек при увеличении пространственного разрешения сетки. Однако в работе [12] было показано, что проблему полюса редуцированной сетки можно избежать, если использовать процедуры интерполяции и численного дифференцирования, которые точны для функций вида $\sin m\lambda$, $\cos m\lambda$, для $m \leq 2$, где λ – координата вдоль долготы.

В данной работе рассматривается возможность построения схем высокого порядка аппроксимации для дискретизации горизонтальных операторов на редуцированной широтно-долготной сетки с разделением переменных [13]. Построение схем и исследование их свойств производится в рамках нелинейных уравнений мелкой воды на вращающейся сфере:

$$\begin{aligned} \frac{D\mathbf{V}}{Dt} &= -f\mathbf{k} \times \mathbf{V} - \nabla(\Phi + \Phi^s), \\ \frac{D\Phi}{Dt} &= -\Phi\nabla \cdot \mathbf{V}, \end{aligned} \quad (1)$$

где f – параметр Кориолиса; Φ – толщина слоя жидкости, умноженная на гравитационную постоянную g , Φ^s – геопотенциал орографии; $\mathbf{V} = (u, v)$ – вектор горизонтальной скорости, D/D_t – лагранжева производная вдоль траектории.

Для дискретизации уравнений по времени используется полуявный полулагранжев метод [14], основанный на применении схемы Кранка-Николсон для линейных членов уравнений и схемы SETTLS [15] для нелинейных членов и вычисления траекторий полулагранжевых частиц. Для решения возникающего в результате применения полуявного метода уравнения Гельмгольца используется метод BICGstab и геометрический многосеточный метод [16].

Для пространственной дискретизации уравнений вдоль зонального направления используются схемы численного дифференцирования четвертого порядка точности полученные при помощи дифференцирования кусочно-тригонометрических интерполянтов Лагранжа [12]. Для аппроксимации вдоль меридионального направления применяются схемы четвертого порядка точности, также основанные на применении кусочно-тригонометрической интерполяции вдоль долготы. Интерполяция значений сеточных функций в исходные точки полулагранжевых траекторий производится с использованием комбинированной кусочно-полиномиальной (вдоль широты), кусочно-тригонометрической (вдоль долготы) интерполяции. Применение кусочно-тригонометрической интерполяции позволяет строить процедуры интерполяции и дифференцирования вдоль долготы точные для функций $\sin m\lambda$, $\cos m\lambda$, $m \leq 2$, то есть не подверженные влиянию проблемы полюса редуцированной сетки.

Исследования свойств предложенных дискретизаций планируется производить с использованием стандартных идеализированных тестов для нелинейных уравнений мелкой воды на сфере, предложенных в работах [17, 18]. В рамках доклада будут представлены полученные результаты тестирования и их сравнение с моделью мелкой воды на регулярной широтно-долготной сетке и с результатами других моделей, опубликованными в литературе.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Kurihara Y. Numerical integration of the primitive equations on a spherical grid //Monthly Weather Review. – 1965. – Т. 93. – №. 7. – С. 399-415.
2. Staniforth A., Thuburn J. Horizontal grids for global weather and climate prediction models: a review //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2012. – Т. 138. – №. 662. – С. 1-26.
3. Bao L., Nair R. D., Tufo H. M. A mass and momentum flux-form high-order discontinuous Galerkin shallow water model on the cubed-sphere //Journal of Computational Physics. – 2014. – Т. 271. – С. 224-243.
4. Ullrich P. A., Jablonowski C., Van Leer B. High-order finite-volume methods for the shallow-water equations on the sphere //Journal of Computational Physics. – 2010. – Т. 229. – №. 17. – С. 6104-6134.

5. S. Lin, R. Benson, J. Chen, X. Chen, L. Harris, Z. Liang, M. Morin, W. Putman, S. Rees, L. Zhou, A brief overview of the fv3 dynamical core, NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, The GFDL FV3 NGGPS Development Team, Princeton, New Jersey, USA, 2016.
6. Zängl G. et al. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2015. – Т. 141. – №. 687. – С. 563-579.
7. Kühnlein C. et al. FVM 1.0: a nonhydrostatic finite-volume dynamical core for the IFS //Geoscientific Model Development. – 2019. – Т. 12. – №. 2. – С. 651-676.
8. Pudykiewicz J. A. On numerical solution of the shallow water equations with chemical reactions on icosahedral geodesic grid //Journal of Computational Physics. – 2011. – Т. 230. – №. 5. – С. 1956-1991.
9. Qaddouri A., Lee V. The Canadian global environmental multiscale model on the Yin-Yang grid system //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2011. – Т. 137. – №. 660. – С. 1913-1926.
10. Kageyama A., Sato T. "Yin-Yang grid": An overset grid in spherical geometry //Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2004. – Т. 5. – №. 9.
11. Shuman F. G. On certain truncation errors associated with spherical coordinates //Journal of Applied Meteorology. – 1970. – Т. 9. – №. 4. – С. 564-570.
12. Bénard P., Glinton M. R. Circumventing the pole problem of reduced lat–lon grids with local schemes. Part I: Analysis and model formulation //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2019. – Т. 145. – №. 721. – С. 1377-1391.
13. Goyman G. S., Shashkin V. V. Horizontal approximation schemes for the staggered reduced latitude-longitude grid //Journal of Computational Physics. – 2021. – Т. 434. – С. 110234.
14. Robert A. A stable numerical integration scheme for the primitive meteorological equations //Atmosphere-Ocean. – 1981. – Т. 19. – №. 1. – pp. 35-46.
15. Hortal M. The development and testing of a new two-time-level semi-Lagrangian scheme (SETTLS) in the ECMWF forecast model //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2002. – Т. 128. – №. 583. – С. 1671-1687.
16. Tolstykh M. et al. Structure and Algorithms of SL-AV Atmosphere Model Parallel Program Complex //Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2018. – Т. 39. – №. 4. – С. 587-595.
17. Galewsky J., Scott R. K., Polvani L. M. An initial-value problem for testing numerical models of the global shallow-water equations //Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. – 2004. – Т. 56. – №. 5. – С. 429-440.
18. Williamson D. L. et al. A standard test set for numerical approximations to the shallow water equations in spherical geometry //Journal of Computational Physics. – 1992. – Т. 102. – №. 1. – С. 211-224.

Air quality inverse modeling algorithms for heterogeneous measurement data

^{1,2}Penenko A., ^{1,2}Penenko V., ¹Tsvetova E., ³Gochakov A., ¹Pyanova E., ^{1,2}Konopleva V.

¹ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russia

³ Siberian Regional Hydrometeorological Research Institute, Novosibirsk, Russia

E-mail: a.penenko@yandex.ru

The use of heterogeneous monitoring data makes it possible to improve the accuracy of air quality analysis and forecasting systems. One of the main uncertainties in air quality studies is information about chemical substances' sources (and sinks). Therefore, as the main task of inverse modeling, we consider the source identification problem. An approach with sensitivity operators is applied to identify sources [1,2]. The ensemble construction of the sensitivity operator provides a natural way to combine different types of measurement data in a single operator equation [3]. The structure of the equation allows one to analyze the information content of the measurement data. The combined use of image-type, integral-type, contact-type, and time-series-type measurement data is considered. The approach is illustrated in the inverse modeling scenario for the Baikal region.

■ Acknowledgments: Supported by the grant №075-15-2020-787 in the form of a subsidy for a Major scientific project from Ministry of Science and Higher Education of Russia (project "Fundamentals,

methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation on the Baikal natural territory").

REFERENCES:

1. Penenko A. Convergence analysis of the adjoint ensemble method in inverse source problems for advection-diffusion-reaction models with image-type measurements // Inverse Problems & Imaging, Vol. 14, 2020. pp. 757–782.
2. 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
3. Penenko A., Penenko V., Tsvetova E., Gochakov A., Pryanova E., Konopleva V. Sensitivity Operator-Based Approach to the Interpretation of Heterogeneous Air Quality Monitoring Data// submitted

Алгоритмы обратного моделирования качества воздуха для работы с гетерогенными данными измерений

^{1,2}Пененко А.В., ^{1,2}Пененко В.В., ¹Цветова Е.А., ³Гочаков А.В., ¹Пьянова Э.А., ^{1,2}Коноплева В.С.

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Новосибирск, Россия

E-mail: a.penenko@yandex.ru

Использование разнородных типов данных мониторинга позволяет повысить точность систем анализа и прогнозирования качества воздуха. Одной из основных неопределённостей при изучении качества воздуха является информация об источниках (и стоках) химических веществ. Поэтому в качестве основной задачи обратного моделирования будем рассматривать обратную задачу идентификации источников. Для идентификации источников применяется подход с использованием операторов чувствительности [1], основанный на идее Г.И. Марчука [2]. Ансамблевая конструкция оператора чувствительности обеспечивает естественный способ комбинировать различные типы данных измерений в одном операторном уравнении. Структура уравнения позволяет анализировать информативность данных измерений. Рассматривается комбинированное использование данных измерений типа изображения, интегрального типа, контактных измерений и данных типа временных рядов. Подход проиллюстрирован на сценарии обратного моделирования для Байкальского региона.

Рассмотрим прямоугольную пространственно-временную область Ω_T . В этой области определим математическую модель типа адвекции-диффузии-реакции, которая описывает процессы переноса в атмосфере различных субстанций (примесей, тепла, влаги, радиации и других). Рассматривается система из N_c взаимодействующих компонентов, обозначаемых индексами $l \in L = \{1, K, N_c\}$:

$$\frac{\partial \varphi_l}{\partial t} - \nabla \cdot (\text{diag}(\boldsymbol{\mu}_l) \nabla \varphi_l - \mathbf{u} \varphi_l) + P_l(t, \mathbf{r}) \varphi_l = \Pi_l(t, \mathbf{r}) + f_l + r_l, \quad (\mathbf{x}, t) \in \Omega_T, \quad (1)$$

$$\mathbf{n} \cdot (\text{diag}(\boldsymbol{\mu}_l) \nabla \varphi_l) + \beta_l \varphi_l = \alpha_l, \quad (\mathbf{x}, t) \in \Gamma^{(out)} \subseteq \delta \Omega_T, \quad (2)$$

$$\varphi_l = \alpha_l, \quad (\mathbf{x}, t) \in \Gamma^{(in)} \subseteq \delta \Omega_T, \quad (3)$$

$$\varphi_l = \varphi_l^0 + \xi_l, \quad \mathbf{x} \in \Omega, t = 0, \quad (4)$$

где $\varphi_l(\mathbf{x}, t)$ – вектор-функция состояния, обозначающая концентрацию рассматриваемых взаимодействующих веществ в точке $(\mathbf{x}, t) \in \Omega_T$, φ_l – l -й элемент вектора $\boldsymbol{\varphi}$, $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \in \mathbb{R}^n$ – вектор скорости переноса, $\mathbf{u}_l(\mathbf{x}, t) \in \mathbb{R}^n$ – вектор коэффициентов диффузии. Задаются априорные (фоновые) значения источников f_l и начальных данных φ_l^0 . Элементы операторов продукции и деструкции $P_l, \Pi_l: [0, T] \times \mathbb{R}^{N_c} \rightarrow \mathbb{R}_+$ задаются системой уравнений реакции. Обозначим через \mathbf{q} вектор неопределенностей задачи – это вектор параметров модели, за счет которых предполагается решать задачи обратного моделирования. Вектор \mathbf{q} принадлежит некоторому заданному множеству Q . Обозначим вектор заданных (определенных) параметров модели через \mathbf{v} . Задачу определения функций $\boldsymbol{\varphi}$ из (1)-(4) по известным \mathbf{q} и \mathbf{v} будем называть прямой. Обозначим ее решение через $\boldsymbol{\varphi}[\mathbf{q}]$. Точным решением обратной задачи $\boldsymbol{\varphi}^{(*)} = \boldsymbol{\varphi}[\mathbf{q}^{(*)}]$ назовем решение прямой задачи, соответствующее некоторому значению $\mathbf{q}^{(*)} \in Q$.

Определим оператор наблюдений \mathbf{H} , который связывает функцию состояния модели с результатами наблюдений $\mathbf{I} = \mathbf{H}\boldsymbol{\varphi}^{(*)} + \delta \mathbf{I}$, где \mathbf{I} – известные данные измерений, $\delta \mathbf{I}$ – функция из некоторого множества допустимых значений, которая представляет оценку ошибок результатов и моделей измерений. Обычно она неизвестна, но известна частичная информация о ней, например норма в некотором про-

странстве. Для простоты описания оператор \mathbf{H} будем предполагать проектором на некоторое подпространство U_{meas} . Пусть имеется соотношение чувствительности для некоторой функции h :

$$\langle \varphi[q^{(2)}] - \varphi[q^{(1)}], h \rangle_{\Phi} = \langle S[q^{(2)}, q^{(1)}; h], q^{[2]} - q^{[1]} \rangle_Q, \quad (5)$$

где $\langle \cdot, \cdot \rangle_{\Phi}$ и $\langle \cdot, \cdot \rangle_Q$ – заданные скалярные произведения в пространствах функций состояния и функций неопределенности соответственно, $S[q^{(2)}, q^{(1)}; \mathbf{h}]$ – функция чувствительности, вычисляемая на основе решений прямой и сопряженной задач. Если задана некоторая конечная система функций проектирования $U = \{ \mathbf{h}^{(\xi)} \}_{\xi=1}^{\Xi}$, $(\Xi = |U|)$, $U \subset U_{meas}$, то тогда на основе (5) для любых U и $q \in Q$ выполнено соотношение

$$M_U[q^{(*)}, q](q^{(*)} - q) = H_U I - H_U \varphi[q] - H_U \delta I, \quad (6)$$

где

$$M_U[q^{(2)}, q^{(1)}]z = \sum_{\xi=1}^{\Xi} \langle S[q^{(2)}, q^{(1)}; \mathbf{h}^{(\xi)}], q \rangle_Q e^{(\xi)}, \quad H_U \varphi = \sum_{\xi=1}^{\Xi} \langle \varphi, \mathbf{h}^{(\xi)} \rangle_{\Phi} e^{(\xi)}. \quad (7)$$

и $e^{(\xi)}$ – элементы канонического базиса R^{Ξ} . Оператор $M_U[q^{(2)}, q^{(1)}]$ назовем оператором чувствительности. В соотношении (6) участвует точное решение $q^{(*)}$, таким образом, мы получаем операторное уравнение, множество решений которого содержит множество решений исходной обратной задачи. Для решения уравнения (6) используется алгоритм типа Ньютона-Канторовича из [1].

Учет гетерогенных данных наблюдений осуществляется за счет формирования системы функций проектирования. В данной работе мы рассматриваем данные в виде: временных рядов концентраций в точках проведения мониторинга [3], снимков полей концентрации в финальный момент времени [1], точечных данных мониторинга в пространстве и времени, данные типа интегралов по времени от концентрации в точке [4].

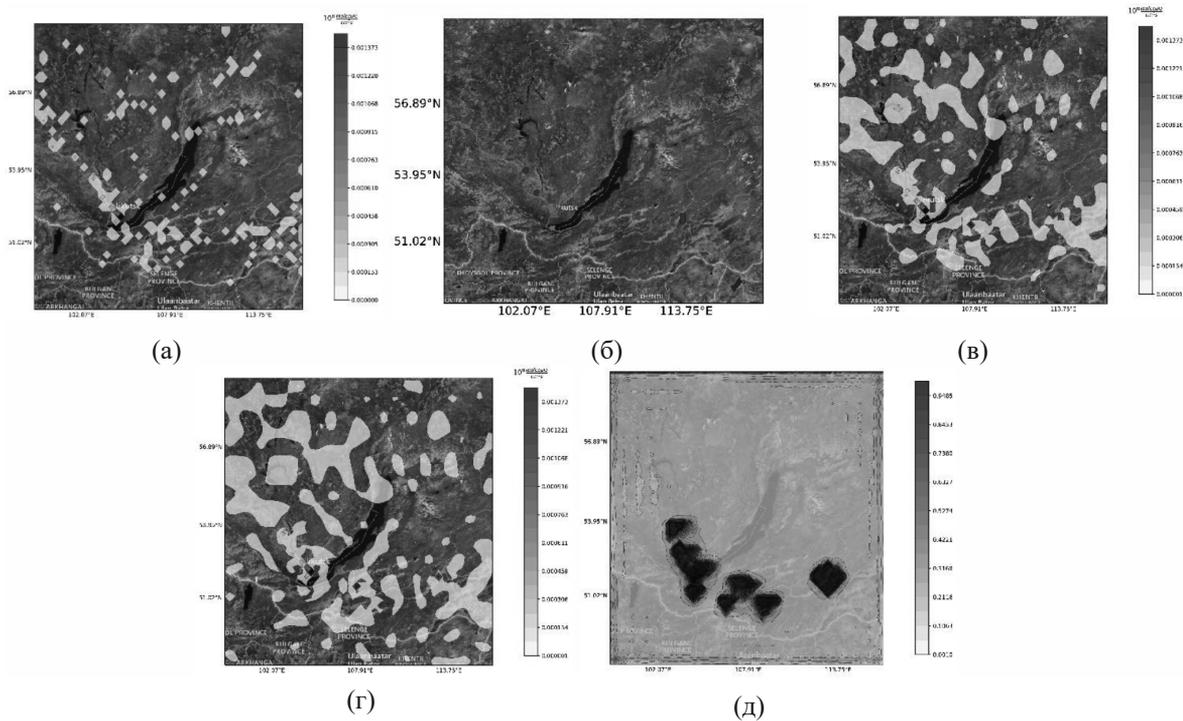


Рис. 1. Модельное «Точное» решение задачи идентификации источников (а), схема системы мониторинга для сбора «точечных» данных: временных рядов (красным), точечных (синим) и интегралов (фиолетовым) (б), результат идентификации источников по данным системы мониторинга, включающей данные всех указанных выше типов (в), проекция точного решения на ортогональное дополнение к ядру оператора чувствительности (г), функция «освещенности» системы мониторинга (д).

Кроме непосредственного решения задачи идентификации источников, требующих существенных вычислительных ресурсов [5], важной задачей обратного моделирования является задача оценки информативности данных наблюдений без непосредственного решения обратной задачи. Для этого можно использовать квазилинейную структуру операторной модели (6). В частности, рассмотреть проекцию точного решения на ортогональное дополнение к ядру оператора чувствительности для оценки того, какая часть информации о решении остается в данных измерений. Еще один способ основан на анализе функций «освещенности» [6] задачи (или диагонали указанного выше проектора проекции).

На рис. 1 представлены результаты численных экспериментов из [4] по идентификации источников по данным системы мониторинга и анализа информативности данных мониторинга.

- Благодарности. Работа выполняется при поддержке гранта № 075-15-2020-787 в форме субсидии на крупный научный проект Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект "Основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки на Байкальской природной территории").

ЛИТЕРАТУРА:

1. Penenko A. Convergence analysis of the adjoint ensemble method in inverse source problems for advection-diffusion-reaction models with image-type measurements // *Inverse Problems & Imaging*, Vol. 14, 2020. pp. 757–782.
2. Марчук Г.И. О постановке некоторых обратных задач // *Доклады Академии Наук СССР / Изд. Наука*, Vol. 156, 1964. pp. 503–506.
3. 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*, Vol. 60, 2019. pp. 392–399.
4. Penenko A., Penenko V., Tsvetova E., Gochakov A., Pyanova E., Konopleva V. Sensitivity Operator-Based Approach to the Interpretation of Heterogeneous Air Quality Monitoring Data // submitted
5. Penenko A., Gochakov A. Parallel speedup analysis of an adjoint ensemble-based source identification algorithm // *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1715, 2021. pp. 012072-1–012072-6.
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.

The reciprocal conversion of environmental data for customer information support

Peretyatko L.O., Sterin A.M., Koftan Yu.R.

All-Russia Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Centre, Obninsk, Russia

E-mail: peretyatkol@meteo.ru, sterin@meteo.ru, ykoftan@meteo.ru

Unified State Data Fund (UGFD) "is an ordered, constantly updated set of documented information on the state of the environment, its pollution, obtained as a result of the activities of the Federal Service of Russia for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet). Primary data obtained from the observation network of Roshydromet and other organizations occupy a significant volume of the UGFD.

The head organization that forms and maintains the UGFD is All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center (RIHMI-WDC) which processes the received data and replenishes the UGFD – a long-term data storage.

One of the basic principles of data storage in UGFD is that data is stored in a form that is as close as possible to the data obtained from surveillance systems. For long-term storage with preservation of the hierarchical structure of environmental data, RIHMI-WDC developed a specialized format HDDL (hydrometeorological data description language). UGFD data are referred to as "big data", since they correspond to the characteristics defining such data, among which there are "VVV": volume, velocity and variety.

Of greatest interest are the data of primary observations, which can be considered as "big data", therefore, taking into account their specificity, the following is necessary:

1) A single technology for all types of data storage, verification (completeness and reliability of data) and provision of UGFD data to consumers in the format necessary for solving their problems.

2) Technology for the formation and storage of meta descriptions (FSMD), describing the content of files and archives (file collections) of data. The meta description is information about the internal content and data state of each file.

3) Technology of mutual conversion of UGFD data (from HDDL format to other formats widely used by consumers).

This publication describes the creation of a system for mutual data conversion, with control over the adequacy of the conversion performed. Reasons for creating the system:

1) For a more efficient service of UGFD consumers, it is necessary to expand the list of data presentation formats. Currently, data is provided in two-dimensional table format and CSV format;

2) To maintain and improve the completeness and reliability of primary observation data by performing reverse data conversion, with errors identified during their use.

It is important to note that the above system is intended for converting samples or certain replicas of the primary observations of the UGFD, and not all the data stored in it! The purpose of this system is as follows:

1) Direct conversion from HDDL ensures the provision of data samples from the UGFD to consumers in the format necessary for the effective solution of their tasks (relational databases, NetCDF, XML, etc.).

2) Performing reverse conversion of data received from consumers as feedback, which makes it possible to take into account the errors found when using these data to increase the reliability of the primary observational data stored in the UGFD.

To implement a system of mutual data conversion, with control over the adequacy of the conversion, it is necessary to create:

- System for direct data conversion;
- System of reverse data conversion;
- A system for checking the adequacy of the conversion performed, having previously developed methods for controlling the adequacy.

The first version of the mutual conversion system is implemented in C++ using the Qt framework. For the first version of the system, it was chosen to convert their HDDL into the format of relational databases, since this format is one of the most common and complex among the formats listed above. PostgreSQL was chosen as the DBMS.

О взаимной конвертации данных об окружающей среде для информационного обслуживания потребителей

Перетьяко Л.О., Стерин А.М., Кофтан Ю.Р.

ВНИИГМИ-МЦД, Обнинск, Россия

E-mail: peretyatkol@meteo.ru, sterin@meteo.ru, ykoftan@meteo.ru

Единственный государственный фонд данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении (ЕГФД) "представляет собой упорядоченную, постоянно пополняемую совокупность документированной информации о состоянии окружающей природной среды, ее загрязнении, получаемой в результате деятельности Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) и других ведомств. Являясь основным участником деятельности ЕГФД, Росгидромет представляет разветвленную государственную структуру, которая осуществляет непрерывное наблюдение за состоянием окружающей среды и её загрязнением, а также сбор, анализ и обработку данных этих наблюдений.

Существенный объём ЕГФД занимают первичные данные, полученные из сети наблюдений Росгидромета и других ведомств и организаций.

Головной организацией, формирующей и обслуживающей ЕГФД, является Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных» (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», далее ВНИИГМИ-МЦД), который осуществляет обработку полученных данных и пополнение ЕГФД – долговременного хранилища данных.

Один из основных принципов хранения данных в ЕГФД заключается в том, что данные хранятся в виде, максимально приближенном к данным, получаемым из систем наблюдения. Для долговременного хранения с сохранением иерархической структуры данных об окружающей среде, полученных от наблюдательных сетей, во ВНИИГМИ-МЦД был разработан специализированный формат ЯОД (Язык описания гидрометеорологических данных). Формат ЯОД с 1978 г. является отраслевым стандартом Гидрометеослужбы для хранения данных.

Данные в формате ЯОД представляют собой комбинацию файлов – файл с описанием структуры данных, и один или несколько файлов непосредственно с данными.

Данные ЕГФД относятся к "Большим Данным" (Big Data), т.к. они соответствуют определяющим таким данным характеристикам, среди которых выделяют «три V»: объём (volume, в смысле величины физического объёма), скорость (velocity в смыслах как скорости прироста, так и необходимости высокоскоростного усвоения, накопления, обработки и получения результатов), многообразие (variety, в смысле возможности одновременной обработки различных типов и форматов структурированных, частично структурированных и неструктурированных данных).

В ЕГФД хранятся все данные первичных наблюдений, получаемые из сети Росгидромета и других ведомств и организаций, результаты обработки данных об окружающей среде, а также текстовые документы, данные на магнитных лентах.

Наибольший интерес представляют данные первичных наблюдений, которые можно рассматривать как "Большие Данные", следовательно, с учётом их специфики, необходимо создать перечисленные ниже компоненты:

- Единую для всех видов данных технологию хранения, верификации (полнота и достоверность данных) и предоставления потребителям данных ЕГФД в необходимом для решения их задач формате.
- Технологию формирования и хранения метаописаний (ФХМ), описывающих содержимое файлов и архивов (коллекций файлов) данных. Метаописание – это информация о внутреннем содержимом и состоянии данных каждого файла.
- Технологию взаимной конвертации данных ЕГФД (из ЯОД формата в другие форматы, широко используемые потребителями, и наоборот, из других форматов в формат ЯОД).

ЯОД формат удобен для накопления и хранения больших массивов данных, из которых состоит ЕГФД, однако использование его в качестве формата данных, предоставляемых потребителям, нецелесообразно ввиду его специфичности, ведомственного использования и сложности для применения потребителями.

Исследования показали, что для предоставления потребителям, их информационного обслуживания данными ЕГФД, наиболее востребованными являются форматы NetCDF, XML, JSON, CSV и форматы реляционных баз данных.

Данная публикация описывает создание системы взаимной конвертации данных, с контролем адекватности выполненной конвертации. Система конвертации дает возможность расширить список форматов предоставления данных (в настоящий момент данные ЯОД форматов с помощью имеющихся средств предоставляются только в формате двумерных таблиц и в CSV формате). Кроме того, возможность обратной конвертации способствует выявлению ошибок и пропусков данных, что позволяет улучшить полноту и достоверность данных.

Важно отметить, что вышеназванная система предназначена для конвертации выборок или определённых реплик данных первичных наблюдений ЕГФД, а не всех хранящихся в ЕГФД данных!

Первая версия системы взаимной конвертации реализована на языке C++, с использованием фреймворка Qt. Для первой версии системы была выбрана конвертация данных формата ЯОД в формат реляционных баз данных, т.к. данный формат является одним из самых распространённых и сложных среди перечисленных выше форматов обслуживания потребителей. На рисунке 1 представлена структурная схема системы взаимной конвертации.

В качестве СУБД была выбрана PostgreSQL. На текущий момент получены следующие результаты по разделам системы:

- 1) Подсистема прямой конвертации:
 - Реализован парсер файла с описанием структуры ЯОД данных;
 - Реализован алгоритм формирования структуры реляционной базы данных;
 - Реализован алгоритм сопоставления форматов хранения параметров окружающей среды ЯОД и типов данных СУБД PostgreSQL. Отметим, что алгоритм без серьезных изменений будет возможно расширить для использования других СУБД;
 - Реализовано автоматизированное формирование структуры реляционной базы данных, строящейся на основе структуры ЯОД данных;
 - Реализована возможность выбора пользователем элементов и групп элементов ЯОД данных для конвертации;
 - Осуществлена возможность конвертации как одного файла с ЯОД данными, так папки с файлами;
- 2) Подсистема обратной конвертации:
 - Реализован алгоритм, выполняющий проверку соответствия структуры реляционной базы данных с "оригинальной" структурой ЯОД данных, на которой была основа реляционная база данных;
 - Реализован алгоритм автоматической сборки SQL выражений для извлечения данных из базы данных;
 - Реализован алгоритм выборки данных из реляционных данных для обратной конвертации в файл(-лы) с данными в формате ЯОД.
- 3) Подсистема проверки адекватности выполненной конвертации:
 - Разработаны методы проверки выполненной конвертации – "Loop", "Links" и "Queries";
 - Реализован метод "Loop" ("Петля") – метод представляет собой обратную конвертацию тех данных, которые были получены в процессе прямой конвертации, которую выбрал пользователь (из ЯОД в другой формат, или наоборот).
 - Реализован метод "Links" ("Связи между данными") – метод состоит в сравнении моделей связей между данными, которая была получена в результате парсинга файла с ЯОД описанием и модели данных другого формата представления
 - Метод "Queries" ("Идентичные запросы") будет реализован в дальнейшем. Его суть состоит в формировании идентичных запросов к исходному и конвертированному массивам данных и сравнении результатов выполнения запросов.

4) Реализованы многопоточные варианты алгоритмов прямой и обратной конвертации, функционирующие с целью ускорения этого процесса.

Первая версия системы успешно протестирована на примере конвертации данных метеорологических наблюдений, обладающих достаточно сложной структурой, а также на примере данных аэрологических наблюдений, обладающих относительно простой структурой.

В докладе приводятся образцы интерфейса системы, протоколирование хода взаимной конвертации, и результаты тестирования системы при обработке данных метеорологических и аэрологических наблюдений.

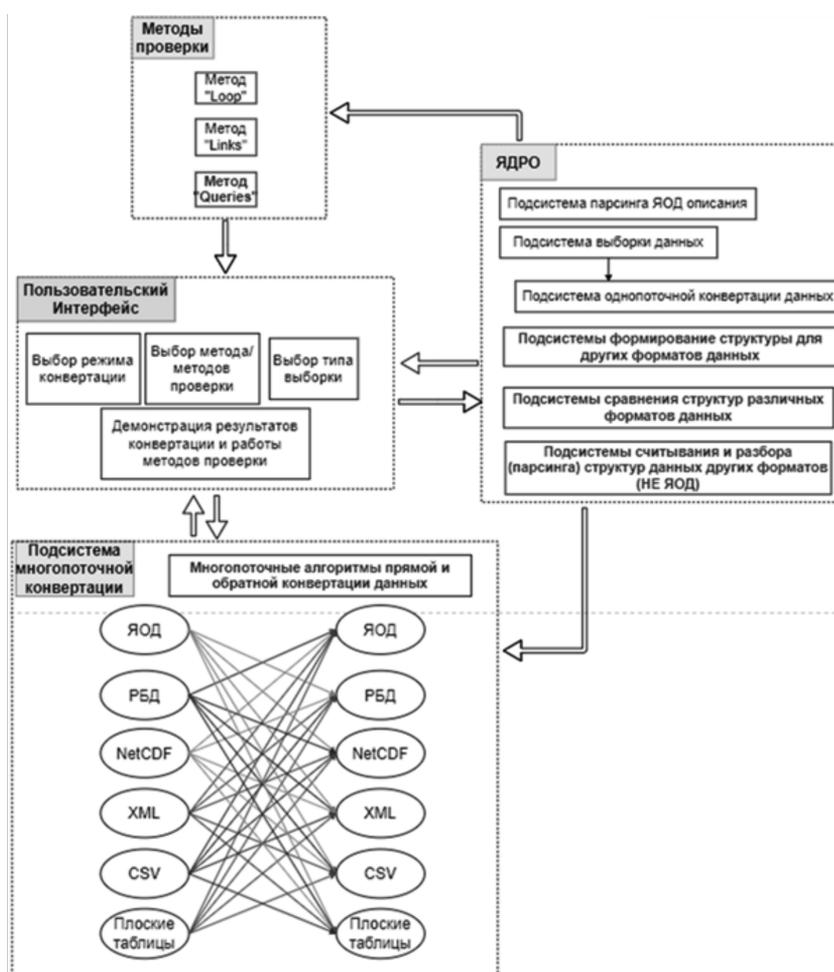


Рис. 1. Структурная схема системы взаимной конвертации.

Diagnostics of the presence of deep convection and dangerous atmospheric phenomena using satellite data

Badanov A.Yu. , Yusupov Yu.I.

MapMakers Group Ltd , Moscow, Russia

E-mail: badanov@gismeteo.com, usupov@gismeteo.com

A method for diagnosing mesoscale areas of deep moist convection, as well as the probability of showers, thunderstorms, and hail in such areas, using information obtained from meteorological satellites, is discussed.

To solve the problem of diagnosing the degree of development of the convective process, we use not only the brightness temperatures of IR radiation at wavelengths of 10.8 microns ($T_{10.8}$, K), 6.2 microns ($T_{6.2}$), obtained using satellite data, but also the results of calculations of hydrodynamic models—the tropopause temperature (T_{tp} , K), obtained, in particular, using the model of the European Center for Medium-term Weather Forecasts [1,2,3]

The method under consideration uses estimates of three parameters of the convective process: the temperature of the upper cloud layer (T_{ir}), the temperature difference between water vapor (T_{wv}) and the upper cloud layer (T_{ir}), the temperature difference between the upper cloud layer (T_{ir}) and the tropopause temperature (T_{tp}). In addition, to solve the problem of determining the probability of the presence of a phenomenon associated with convection, the size of the convective region (expressed in pixels of the satellite image) is used.

The region of weak activity is characterized by the IR brightness temperature of 10.8 microns less than 233 K ($T_{ir} < 233$ K), as well as a positive difference in the brightness temperatures of the water vapor channel of 6.2 microns and the channel of 10.8 microns ($T_{wv} - T_{ir} > 0$). The area of strong activity is characterized by the presence of the two previous parameters, as well as negative values of $T_{ir} - T_{tp}$ ($T_{ir} - T_{tp} < -2$ K) [1].

Verification of the presented algorithm was carried out by comparing the results obtained with the observations of meteorological radars and lightning direction finders.

According to the results of the preliminary analysis, the more extended the area (from 1000 pixels (more than 400 km)) and the greater the positive value of the difference ($T_{wv} - T_{ir}$), the higher the probability of registering a thunderstorm in the convective region.

REFERENCES:

1. Carlos Pinto Da Silva Neto et al., A method for convective storm detection using satellite data, *Atmosfera* 29(4), 343-358 (2016)
2. Michael F. Donovan et al., The identification and verification of hazardous convective cells over oceans using visible and infrared satellite observations, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47(1):164-184 January 2008
3. R. Amorati, et. al., IR-based satellite and radar rainfall estimates of convective storms over northern Italy, *Meteorol. Appl.* 7, 1-18, (2000)

Диагностика наличия глубокой конвекции и опасных атмосферных явлений с использованием спутниковых данных

Баданов А.Ю. , Юсупов Ю.И.

НПЦ «Мэп Мейкер», Москва, Россия

E-mail: badanov@gismeteo.com, usupov@gismeteo.com

При детектировании глубокой влажной конвекции и определении (прогнозировании) опасных явлений, связанных с ней, некоторые авторы указывают на важность использования спутниковых данных на больших масштабах. В работах [1,4] подчёркивается, что спутниковые снимки являются единственным оперативно доступным набором данных, который обеспечивает косвенное измерение неустойчивости и влажности с высоким пространственно-временным разрешением в большой области.

Мультиспектральный спутниковый анализ сыграл важную роль в понимании свойств конвективных грозных облаков: различные измерения на длинах волн в инфракрасном (ИК) диапазоне и комбинации между ними были использованы для оценки стадии развития облаков, высоты и температуры верхней границы облачности [1,5-7].

Оценки неустойчивости и влажности наряду с другими характеристиками глубокой конвекции возможно получить с помощью различных методов, применяемых к данным, полученным с помощью ИК-диапазонов спектра радиометров SEVIRI, установленных на спутниках Meteosat Second Generation (MSG) Европейского метеорологического сообщества.

На начальном этапе формирования конвективного явления, отслеживание его развития имеет решающее значение для минимизации связанного с этим явлением ущерба за счет более раннего предупреждения. Используя преимущества высокой временной выборки MSG (один раз в 15 минут) и его широкий набор спектральных каналов, особенно три канала на длинах волн 6.2, 7.3, 10.8 мкм, возможно оценить степень конвективной активности [1-7].

В настоящей работе обсуждается способ диагностики мезомасштабных областей глубокой влажной конвекции, а также вероятности наличия в таких областях ливней, гроз и града с помощью информации, получаемой с метеорологических спутников.

В рассмотренном методе используются оценки трёх параметров конвективного процесса: температура верхнего слоя облаков ($T_{ик}$), разность температур водяного пара ($T_{вп}$) и верхнего слоя облаков ($T_{ик}$), разность температур верхнего слоя облаков ($T_{ик}$) и температуры тропопазузы ($T_{тп}$). Кроме того, для реше-

ния задачи определения вероятности наличия того или иного явления, связанного с конвекцией, используется размер конвективной области (выраженный в пикселях спутникового изображения).

Область слабой активности характеризуется яркостной температурой ИК 10,8 мкм менее 233 К ($T_{ик} < 233$ К), а также положительной разницей яркостных температур водяного пара канала 6,2 мкм и канала 10,8 мкм ($T_{вп} - T_{ик} > 0$). Область сильной активности характеризуется наличием двух предыдущих параметров, а также отрицательными значениями $T_{ик} - T_{тп}$ ($T_{ик} - T_{тп} < -2$ К) [1].

Краткая схема алгоритма представлена на рис. 1.

На вход поступают яркостные температуры $T_{ик}$ (К) и $T_{вп}$ (К) на длинах волн 10,8 мкм и 6,2 мкм соответственно, а также температура тропопазы $T_{тп}$ (К) тропопазы (Рисунок 1).

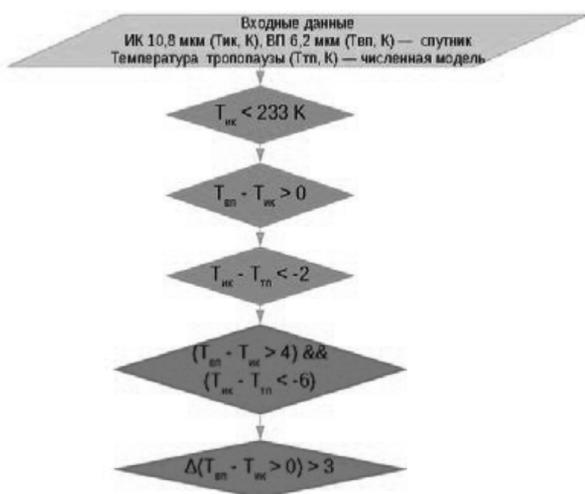


Рис. 1. Схема алгоритма [1].

Конвективные облака имеют достаточно большое вертикальное развитие, иногда достигающее уровня тропопазы или превышающее его. Вследствие этого температура верхней части конвективного облака достаточно низкая. Разные авторы приводят различные пограничные значения температуры верхней части облака, при которых его можно отнести к конвективному [9-13]. Облачный пиксель на спутниковом изображении считается принадлежащим конвективной области, если облако имеет сильное вертикальное развитие, и его верхняя граница состоит только из ледяных кристаллов. При этом температура облачности достаточно низкая ($T_{ик} < 233$ К) [1,8,14].

Следующий шаг алгоритма основан на том, что если верхняя граница развивающегося облака достигает тропопазы, то блокируется проход излучения из тропосферы, при этом атмосферное излучение, регистрируемое спутником, складывается из излучений верхней границы облака и стратосферы. Фактическая разность между яркостными температурами $T_{вп}$ — $T_{ик}$ зависит от высоты верхней границы облака и количества водяного пара в стратосфере [1,6]. Положительное значение этой разности рассматривается как индикатор глубокой влажной конвекции [15]. В работе [15] также указывается, что значение разности яркостных температур $T_{вп} - T_{ик}$ в пределе от 4 до 7 К можно рассматривать как индикатор подъёма уровня водяного пара выше верхней границы облачности.

При сильных восходящих потоках верхняя часть облака может достигать или даже превышать уровень тропопазы. В качестве третьего параметра алгоритма проводится сравнение температур на основе метода, предложенного в работе [16]. Этот метод сравнивает температуру пикселей в канале с длиной волны 10,8 мкм с температурой тропопазы, полученной с помощью расчётов по гидродинамической модели $T_{ик} - T_{тп}$. Информация о температуре тропопазы включается в расчёты для определения «пробоя» тропопазы. В данном подходе оставляются только пиксели, для которых $T_{ик} - T_{тп} < 2$ [1].

Следующий параметр метода служит для выбора пикселей с высокой конвективной активностью, оцениваемой с помощью комбинации параметров $T_{вп} - T_{ик}$ и $T_{ик} - T_{тп}$. На этом этапе выделяются пиксели, в которых $T_{вп} - T_{ик} > 4$ и верхняя граница облачности не менее чем на 6 К холоднее тропопазы ($T_{ик} - T_{тп} < -6$).

Эти пороговые значения были выбраны потому, что, как уже говорилось ранее, разность яркостных температур $T_{вп} - T_{ик}$ выше, чем 4 К может считаться признаком сильных восходящих потоков, а верхняя граница облачности в ИК-канале на 6 К холоднее, чем тропопаза указывает на превышение уровня тропопазы от ~0,6 до ~0,9 км, как при влажном адиабатическом градиенте 6,5 К/км [1].

Рассмотрим последовательность работы с данными на примере обнаружения конвективных облачных кластеров и связанных с ними явлений на территории России 5 мая 2020 года.

В связи с тем, что территория России покрыта радарными неравномерно, в рассмотрении принимаются конвективные кластеры, в которых радарными покрыто не менее 95% площади. В таблице 1 показано количество и характеристики таких конвективных кластеров в зависимости от максимального значения разности яркостных температур $T_{вп} - T_{ик}$, обнаруженной в кластере. В данной разности также показывается зависимость от яркостной температуры верхней границы облака $T_{ик}$, так как чем больше разность температур, тем меньше $T_{ик}$.

Из таблицы 1 видно, что чем выше максимальное значение $T_{вп} - T_{ик}$, тем меньше зарегистрированных конвективных кластеров, что свидетельствует о том, что чем сильнее конвекция, тем меньше областей с такой конвекцией.

Среди конвективных кластеров присутствуют те, в которых радаром зарегистрированы события, связанные с конвекцией (ливни, град, шквалы с различной интенсивностью, грозы с различной вероятностью, молнии), а также кластеры без явлений, связанных с конвекцией. С ростом максимального значения $T_{\text{вп}} - T_{\text{ик}}$ уменьшается как количество кластеров с конвективными метеоявлениями, так и количество кластеров без конвективных метеоявлений. Однако с ростом $\max(T_{\text{вп}} - T_{\text{ик}})$ доля кластеров без конвективного метеособытия стремится к нулю (см. строку «Доля ЛТ» в таблице 1), а доля кластеров с конвективным метеособытием стремится к 100% по отношению к общему количеству кластеров (см. строку «Доля успешной регистрации» в таблице 1). Важно отметить, что с ростом $\max(T_{\text{вп}} - T_{\text{ик}})$ растёт также и масштаб конвективной области: увеличиваются среднее количество пикселей в кластере, средний линейный размер и средняя площадь кластеров (см. соответствующие строки в таблице 1).

Из таблицы 2 видно, что с ростом $\max(T_{\text{вп}} - T_{\text{ик}})$ растут вероятности регистрации метеоявлений в кластере. Изображение конвективного кластера, построенного по спутниковым данным вместе с зарегистрированными метеорадарами грозами и зарегистрированными грозопеленгаторами молниями показано на рисунке 2 (слева).

Если в кластере от 1000 пикселей, то чем больше пикселей в кластере и чем выше $\max(T_{\text{вп}} - T_{\text{ик}})$, тем вероятнее наличие грозы в кластере. Если $\max(T_{\text{вп}} - T_{\text{ик}}) > 4$ (жёлтые круги, от 1000 пикселей), то вероятность регистрации грозы ~100% (рисунок 2 справа).

По результатам предварительного анализа (проведённого по 27 дням с мая по июль 2020 года), вероятность регистрации грозы в конвективной области тем выше, чем более протяжённая область (от 1000 пикселей (более 400 км)) и чем больше положительное значение разности ($T_{\text{вп}} - T_{\text{ик}}$).

Таблицы 1,2. Характеристики конвективных кластеров в зависимости от макс $T_{\text{вп}} - T_{\text{ик}}$.

	макс(Твп-Тик)>-10	макс(Твп-Тик)>-1	макс(Твп-Тик)>0	макс(Твп-Тик)>1	макс(Твп-Тик)>2	макс(Твп-Тик)>2,5	макс(Твп-Тик)>3	макс(Твп-Тик)>3,5	макс(Твп-Тик)>4	макс(Твп-Тик)>4,2
Всего кластеров	622	331	270	206	124	97	57	32	20	17
Кластеров с конвективными событиями	519	291	242	183	113	89	54	32	20	17
Кластеров без конвективного события	103	40	28	23	11	9	3	0	0	0
Кластеров с грозами	187	146	126	107	73	62	44	29	19	16
Кластеров с градом	83	73	70	66	50	42	33	25	15	14
Кластеров со шквалом	17	17	17	16	16	16	16	14	9	9
Кластеров с ливнем	443	258	218	165	103	82	53	32	20	17
Кластеров с кучевой облачностью	445	270	234	180	112	88	53	31	19	16
Кластеров с молниями	46	46	46	44	42	32	28	22	15	14
Доля ЛТ	16,56%	12,08%	10,37%	11,17%	8,87%	9,28%	5,26%	0,00%	0,00%	0,00%
Доля успешной регистрации	83,44%	87,92%	89,63%	88,83%	91,13%	91,75%	94,74%	100,00%	100,00%	100,00%
Среднее количество пикселей в кластере	133,87	224,72	245,75	279,62	383,95	459,77	627,58	830,97	965,7	1125,35
Средний линейный размер, км	124,29	174,57	183,14	190,68	215,7	247,61	297,34	370,42	373,6	421,91
Средняя площадь, км ²	14353,53	24054,54	26276,42	28142,3	34643,64	42614,24	5898,06	84471,57	91301,39	106801

	макс(Твп-Тик)>-10	макс(Твп-Тик)>-1	макс(Твп-Тик)>0	макс(Твп-Тик)>1	макс(Твп-Тик)>2	макс(Твп-Тик)>2,5	макс(Твп-Тик)>3	макс(Твп-Тик)>3,5	макс(Твп-Тик)>4	макс(Твп-Тик)>4,2
Вероятность регистрации грозы	30,06%	44,11%	46,67%	51,94%	58,87%	63,92%	77,19%	90,63%	95,00%	94,12%
Вероятность регистрации града	13,34%	22,05%	25,93%	32,04%	40,32%	43,30%	57,89%	78,13%	75,00%	82,35%
Вероятность регистрации шквала	2,73%	5,14%	6,30%	7,77%	12,90%	16,49%	28,07%	43,75%	45,00%	52,94%
Вероятность регистрации ливня	71,22%	77,95%	80,74%	80,10%	83,06%	84,54%	92,98%	100,00%	100,00%	100,00%
Вероятность регистрации молнии	7,40%	13,90%	17,04%	21,36%	33,87%	32,99%	49,12%	68,75%	75,00%	82,35%

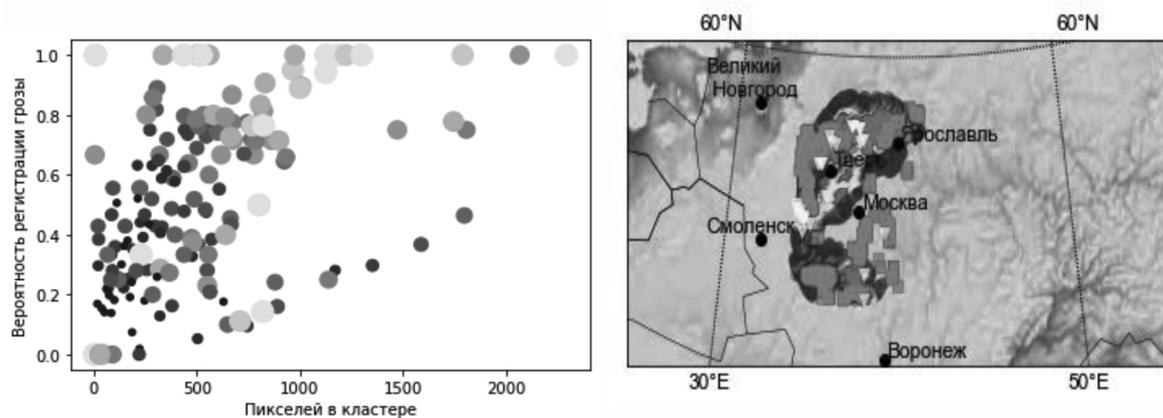


Рис. 2. Слева конвективный кластер с радарными грозами (пурпурные квадраты) и грозопеленгаторными молниями (жёлтые треугольники). Справа: зависимость вероятности регистрации радаром кластера с грозой от количества пикселей в кластере и $\max(T_{\text{вп}} - T_{\text{ик}})$. Чем ярче цвет и крупнее размер маркера, тем выше $\max(T_{\text{вп}} - T_{\text{ик}})$.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Carlos Pinto Da Silva Neto et al., A method for convective storm detection using satellite data, *Atmósfera* 29(4), 343-358 (2016)
2. Michael F. Donovan et al., The identification and verification of hazardous convective cells over oceans using visible and infrared satellite observations, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47(1):164-184, January 2008
3. R. Amorati, et. al., IR-based satellite and radar rainfall estimates of convective storms over northern Italy, *Meteorol. Appl.* 7, 1-18, (2000)
4. Roberts R. D. and S. Rutledge, 2003. Nowcasting storm initiation and growth using GOES-8 and 65' GDWD Weather Forecast. 18, 562-584
5. Setvak M., D. T. Lindsey, P. Novák, Z. DQJ, M. Radová, J. Kerkmann, L. Grasso, S.-H. Su, R. M. Rabin, J. Stastka and Z. Charvát, 2010. Satellite-observed cold-ring-shaped features atop deep convective clouds. *Atmos. Res.* 97, 80-96, doi:10.1016/j.atmosres.2010.03.009
6. Schmetz J., S. A. Tjemkes, M. Gube and L. van de Berg, 1997. Monitoring deep convection and convective overshooting with Meteosat. *Adv. Space Res.* 19, 433-441, doi:10.1016/S0273-1177(97)00051-3
7. Heymsfield G.M. and R.H. Blackmer, 1988. Satellite-observed characteristics of Midwest severe thunderstorm anvils. *Mon. Wea. Rev.* 116, 2200-2224
8. Rosenfeld D. and W.L. Woodley, 2000. Deep convective clouds with sustained supercooled liquid water down to -37.5°C . *Nature* 405, 440-442, doi:10.1038/35013030
9. Maddox, R. A., 1980: Mesoscale convective complexes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 61, 1374-1387.
10. Velasco, I., & Fritsch, J. M. (1987). Mesoscale convective complexes in the Americas. *Journal of Geophysical Research*, 92(D8), 9591. doi:10.1029/jd092id08p09591
11. Anderson C. J. and R.W. Arritt, 1998. Mesoscale convective systems over the United States during 1992 and 1993. *Mon. Wea. Rev.* 126, 578-599.
12. Machado, L.A.T., and W.B. Rossow, 1993: Structural characteristics and radiative properties of tropical cloud clusters. *Mon. Weather Rev.*, 121, 3234-3260, doi:10.1175/1520-0493(1993)121<3234:SCARPO>2.0.CO;2.
13. Bedka K., 2011. Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe. *Atmos. Res.* 99, 175-189, doi:10.1016/j.atmosres.2010.10.001
14. А.Е. Шишов, И.А. Горлач, «Алгоритм распознавания и мониторинга облачности глубокой конвекции по данным МИСЗ на основе целочисленного программирования», *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2020. № 2 (376). С. 39-59
15. Setvak M., R.M. Rabin and P.K. Wang, 2007. Contribution of the modis instrument to observations of deep convective storms and stratospheric moisture detection in goes and MSG imagery. *Atmos. Res.* 83, 505-518, doi:10.1016/j.atmosres.2005.09.015
16. Bedka K. M., J. Brunner, R. Dworak, W. Feltz, J. Otkin and T. Greenwald, 2010. Objective satellite-based detection of overshooting tops using infrared window channel brightness temperature gradients. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 49 181-202, doi:10.1175/2009JAMC2286.1

Creation of a prototype system for forecasting dangerous wind speed events for the territory of Moscow State University

¹Nikolaeva E., ^{1,2}Konstantinov P.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

² RUDN University, Laboratory of smart technologies for sustainable development of urban environment under global changes, Moscow, Russia

E-mail: nikolael99@mail.ru, kostadini@mail.ru

In the modern world, the forecast of basic meteorological parameters such as air temperature, wind speed and precipitation for the coming hours - nowcast - has reached a serious level. At the moment, a large number of predictive models with high spatial resolution have been created, for example: WRF (0.5-1 km), COSMO-Ru (1-2.2 km) and others. However, given the current level of urbanization, this is not enough.

The main goal of this work is to create a prototype of a system for forecasting dangerous wind speeds events for the MSU campus based on real forecast data. This work is carried out using data from the Canadian GEMglobal model. The modeling of the initial wind fields for the system is based on the ENVI-met 3D non-hydrostatic microclimate model. To achieve the goal, the following tasks were completed:

- Deployment of the ENVI-met model for the MSU campus.
- Investigation of the relationship between the initial conditions and the output field of wind speeds.
- Using the Bash shell in Linux, the Fortran gfortran programming language compiler and online geographic information systems, based on the predictive data of the Canadian GEMglobal model, develop a script method for online calculation of the wind field distribution on the MSU campus.

The basis of this system is the maps of wind speeds in the main directions, calculated using the ENVI-met model complex. It is a 3D non-hydrostatic microclimate model. Typical grid resolution in ENVI-met is from 0.5 to 10 meters in space and up to 15 seconds in time. The dynamics of the microclimate is calculated during the daily cycle (from 24 to 48 hours) using the fundamental laws of hydrodynamics and thermodynamics. The advantage of the model used is that it simulates the interactions between the atmosphere, soil, vegetation and buildings at the micro level.

To validate the model, an experiment was carried out to determine the relationship between the input wind speed and the maximum speed obtained as a result of the simulation. The initial data for the experiment were 5 different wind speeds and 8 wind directions. As a result, a close to linear character of the dependence of the maximum velocities and the velocity of the incoming flow is obtained. However, for each of the 8 points presented, such a relationship will be unique. Based on this, it can be assumed that the ratio of intermediate speeds (6-9 m/s, 11-14 m/s, etc.) will have the same dependencies. Therefore, you can use only 5 options for wind flow rates to create a forecast system for dangerous wind speeds for each cell in the field.

Development of a prototype system for forecasting dangerous wind speeds events includes the following blocks:

1. Creation of files with wind gain coefficients for each combination of wind direction and speed.
2. Online download of forecast data on some meteorological parameters in grib2 format from the site of the Canadian model GEMglobal.
3. Converting the downloaded data from grib2 format to text using the Bash shell in Linux.
4. Compilation of the input file according to the ENVI-met model using the Fortran gfortran compiler.
5. Visualization of the wind field in online mode based on the computer language JavaScript or visualization using geographic information systems QGIS and EverGIS Online.

As a result of the work of the system, an interactive map of the wind field is obtained, in which you can customize various styles of presentation of layers for a more visual presentation of data.

Создание прототипа системы прогноза опасных скоростей ветра для территории МГУ имени М.В.Ломоносова

¹Николаева Е.В., ^{1,2}Константинов П.И.

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

² Научный центр «Смарт технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений» РУДН, Москва, Россия

E-mail: nikolaev99@mail.ru, kostadini@mail.ru

В современном мире прогноз основных метеорологических параметров, таких как температура воздуха, скорость ветра и количество осадков на ближайшие часы – наукастинг - достиг серьезного уровня. На данный момент создано большое количество прогностических моделей с высоким пространственным разрешением, например: WRF (0.5-1 км), COSMO-Ru (1-2.2 км) и другие. Однако при современном уровне урбанизации этого бывает недостаточно. С каждым годом в современном мире растет степень урбанизации. На данный момент насчитывается порядка 30 городов с населением более 10 миллионов человек. Это так называемые мегаполисы или городские агломерации, к которым также относится Москва. Для такого густонаселенного и большого по площади города особенно важно изучать метеорологические параметры на микромасштабе, поскольку необходимо обеспечивать комфортность пребывания людей на городских территориях.

Основной целью данной работы является создание прототипа системы прогноза опасных скоростей ветра для территории кампуса МГУ на основе реальных прогностических данных. Данная работа проводится с использованием данных канадской модели GEMglobal. Моделирование исходных ветровых полей для системы происходит на основе трехмерной негидростатической микроклиматической модели ENVI-met. Для достижения цели были выполнены следующие задачи:

- Развертывание модели ENVI-met для территории кампуса МГУ.
- Исследование соотношения начальных условий и выходного поля скоростей ветра.
- При помощи командной оболочки Bash в среде Linux, компилятора языка программирования Fortran gfortran и геоинформационных онлайн систем на основе прогностических данных канадской модели GEMglobal разработать скриптовую методику онлайн-расчета распределения ветрового поля на территории кампуса МГУ.

Согласно данным Гидрометцентра России наибольшие доли процентов в суммарном числе опасных явлений и неблагоприятных условий погоды за период с 1991 по 2015 гг. приходится на ветровые (сильный ветер, ураган, шквал, смерч, пыльные бури) и дождевые (сильный дождь, продолжительный дождь, ливень, град, гроза) явления. При этом важно отметить, что перечисленные выше явления являются наиболее трудно прогнозируемыми.

Успешность прогнозирования опасных явлений погоды, связанных с ветром, на региональном уровне в большой степени зависит от точности оценки синоптической ситуации. 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 и формы, 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.

Основой данной системы являются карты скоростей ветра при основных направлениях, рассчитанные с помощью модельного комплекса ENVI-met. ENVI-met – это трехмерная негидростатическая микроклиматическая модель, первая версия которой была разработана в 1994 году при Университете Манца (Германия). Основное отличие ENVI-met и крупномасштабных атмосферных моделей, используемых для прогнозирования суточной погоды или будущих климатических условий, заключается во временном и пространственном разрешении модели. Типичное разрешение сетки в ENVI-met от 0,5 до 10 метров в пространстве и до 1-5 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.

Валидация моделей такого рода в принципе довольно сложна. Основная причина – отсутствие адекватной наблюдательной сети с разрешением до десятков метров. Было проведено много экспериментов по валидации ENVI-met и данная модель показывает достаточно хорошую корреляцию с реальными наблюдениями. Однако все равно можно сказать, что любое подобное моделирование является довольно условным и невозможно сказать, насколько точным является описание реальной ситуации. В связи с этим важным условием является установление зависимости между различными скоростями ветра при одном и том же его направлении. Другими словами, есть ли необходимость в построении карт для каждого интервала скорости или же можно использовать одно распределение ветра для любой входной скорости.

Для проведения эксперимента был выбран участок на территории кампуса МГУ. Он представляет собой территорию с очень разнообразными ландшафтами от асфальтированных участков вокруг зданий до небольших древесных массивов. Определение зависимости между входной скоростью ветра и максимальной скоростью, полученной в результате моделирования, происходило с использованием 5 скоростей ветра: 5 м/с, 10 м/с, 15 м/с, 20 м/с и 25 м/с. Каждая скорость была промоделирована при 8 направлениях ветра: севером, северо-восточном, восточном, юго-восточном, южном, юго-западном, западном и северо-западном. Для нахождения зависимости между представленными картами были проанализированы максимальные скорости ветра, получившиеся в результате моделирования, и скорости ветра, которые задавались изначально. По результатам этих данных были построены следующие графики.

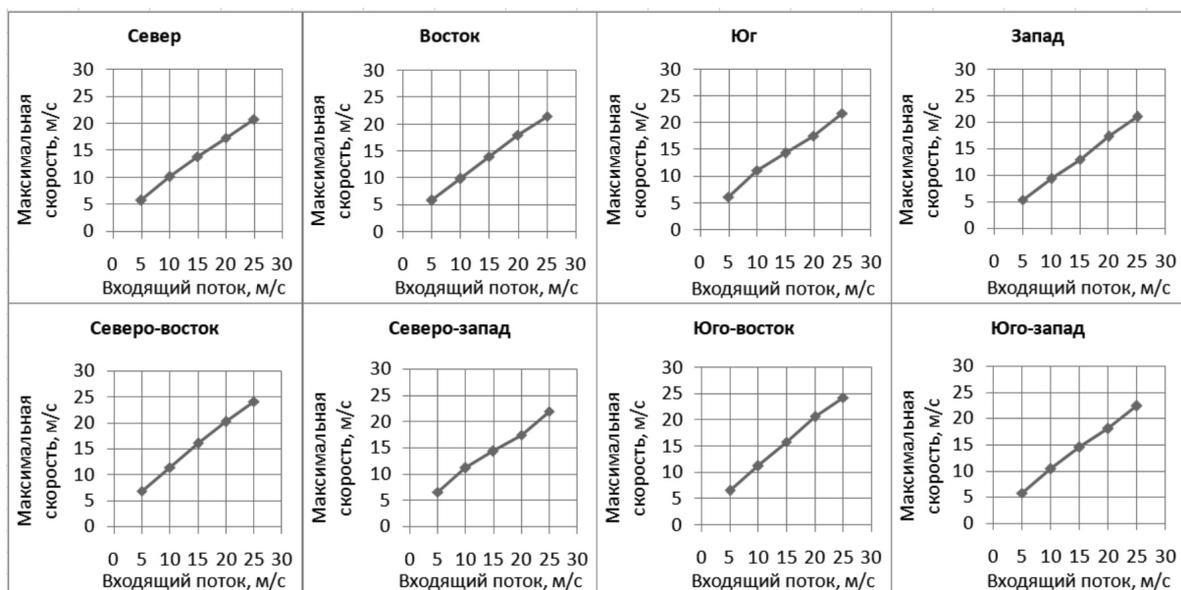


Рис. 1. Анализ соответствия входной скорости ветра и максимальной скорости в пределах всего участка моделирования, для уровня 1,5 метров.

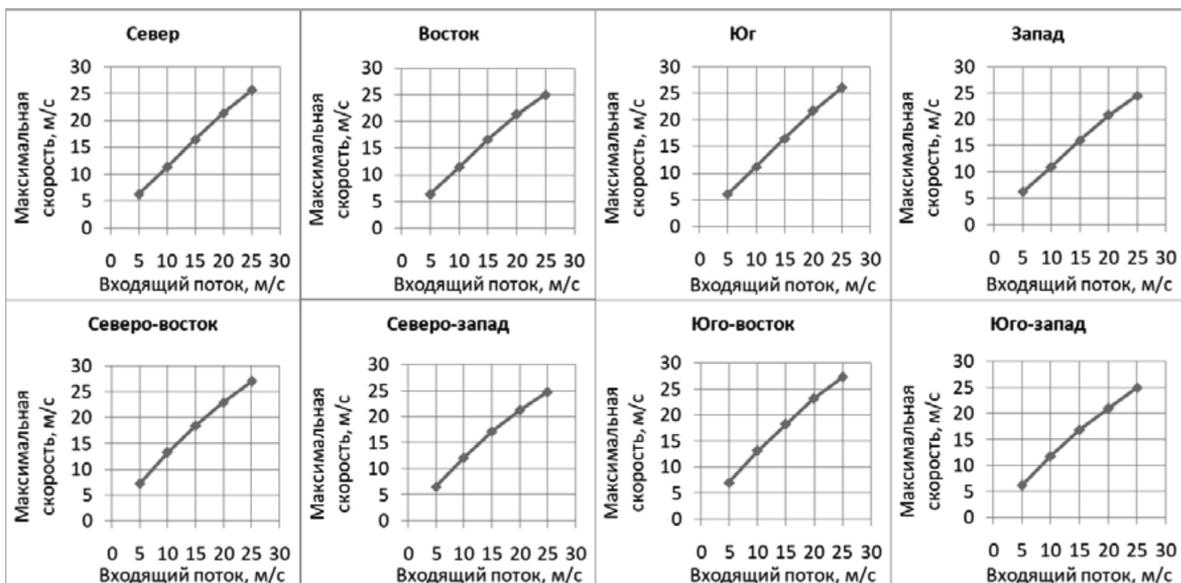


Рис. 2. Анализ соответствия входной скорости ветра и максимальной скорости в пределах всего участка моделирования, для уровня 12,5 метров.

Из полученных графиков видно, что при каждом направлении ветра как на 1,5 м, так и на 12,5 м получается близкий к линейному характер зависимости максимальных скоростей и скорости входящего потока. Однако, на любом уровне для каждого из 8 представленных румбов такая зависимость будет уникальной. Исходя из этого, можно предположить, что соотношения промежуточных скоростей (6-9 м/с, 11-14 м/с и т.д.) будут иметь такие же зависимости. Поэтому можно воспользоваться только 5 вариантами скоростей ветрового потока, чтобы создать систему прогноза об опасных скоростях ветра для каждой ячейки поля.

Прототип системы прогноза об опасных скоростях ветра должен создаваться на микромасштабном уровне. Это необходимо как для более детального анализа потенциально опасных зон, так и для обеспечения комфортности пребывания человека на различных городских территориях. Разработка технологии прогноза включает в себя следующие блоки:

1. Создание файлов с коэффициентами ветрового усиления для каждого сочетания направления и скорости ветра.
2. Онлайн скачивание прогностических данных по некоторым метеорологическим параметрам в формате grib2 с сайта канадской модели GEMglobal.
3. Конвертация скачанных данных из формата grib2 в текстовый с использованием командной оболочки Bash в среде Linux.
4. Составление входного файла по данным модели ENVI-met, используя компилятор языка программирования Fortran gfortran.
5. Визуализация ветрового поля в онлайн режиме на основе компьютерного языка JavaScript или визуализация с использованием геоинформационных систем QGIS и EverGIS Online.

В результате работы системы получается интерактивная карта ветрового поля, у которой можно настраивать различные стили представления слоев для более наглядного представления данных.



Рис. 3. Интерактивная карта на сервисе EverGIS Online.

В данной работе были осуществлены оригинальные расчеты по обеспечению ветровой комфортности пребывания человека в городской среде. В дальнейшем технологию прогноза планируется расширить за пределы территории кампуса МГУ.

- Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ № 19-77-30012. Авторы благодарят за содействие в проведении численных экспериментов с микроклиматической моделью ENVI-met коллектив Российского Государственного Аграрного Университета – МСХА Имени К.А. Тимирязева и лично доцента, к.б.н. Ярославцева Алексея Михайловича.

Lambda architecture as a basis for a digital twin of a regional climate system

Okladnikov I.G.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological System SB RAS, Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Tomsk branch, Tomsk, Russia

The ongoing and expected climate changes has spurred the development of climate models and observing systems, leading to huge volumes of geospatial observational and modeling data archives. For a comprehensive analysis of this data, necessary to understand the current and possible future climatic changes and their consequences, an appropriate information and computing infrastructure is required. Now, there are several projects of various complexity levels aimed at analyzing the accumulated geophysical data. At the same time, within the framework of solving problems based on the use of large arrays of geospatial data, there is often a need for interactive predictive analytics based on a historical background, that is, the joint use of archived data and data arriving in quasi-real time. Even though big data requires a high processing speed, in practice complex operations can be performed for a long time, which in some cases leads to obsolescence of the results obtained and the loss of their relevance. To solve this problem, as a part of a development of a digital twin [1] of a regional climate system, it is proposed to use the lambda architecture of data processing.

Lambda architecture [2] is an architecture designed to handle large amounts of data using both batch and stream processing techniques. This approach provides a balance between the efficiency of obtaining results, the throughput of communication channels and the fault tolerance of the system. This is achieved using batch processing for comprehensive and reliable analysis of historical data, while simultaneously using stream processing of operational data coming in real or quasi-real time. In this case, the results of both types of processing can be superimposed on each other before being displayed to the user. The growing popularity of the lambda architecture is associated with the growth of big data, the need to perform analysis in quasi-real time and the need to reduce the delays between data generation, their analysis and presentation of results.

The lambda architecture requires that sets of processed data be append-only and immutable. It is designed to handle time series data that is only added to existing data, rather than overwriting it. This makes it to be an ideal candidate for the implementation of a digital twin of a regional climate system, based on large arrays of immutable historical modeling and observation data, and information flows coming from local weather stations, and from regional weather forecasting models. The application of this technology will be especially relevant in solving problems of warning of dangerous and extreme meteorological phenomena.

REFERENCES:

1. Boschert S., Rosen R. (2016) Digital Twin—The Simulation Aspect. In: Hehenberger P., Bradley D. (eds) Mechatronic Futures. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5
2. Michael Hausenblas & Nathan Bijnens, inspired by Nathan Marz. Lambda architecture overview. [Электронный ресурс]. – URL: <http://lambda-architecture.net>

Лямбда-архитектура как основа цифрового двойника региональной климатической системы

Окладников И.Г.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Томский филиал, Томск, Россия

Происходящие и ожидаемые климатические изменения стимулировали развитие климатических моделей и систем наблюдения, что привело к появлению гигантских объёмов архивов геопространственных данных наблюдений и моделирования. Для всестороннего анализа этих данных, необходимого для понимания происходящих и возможных в будущем климатических изменений и их последствий требуется соответствующая информационно-вычислительная инфраструктура. В настоящий момент существует ряд проектов различного уровня сложности, направленных на анализ накопленных геофизических данных. Вместе с тем, в рамках решения задач, опирающихся на использование больших массивов геопространственных данных нередко возникает потребность в интерактивной предиктивной аналитике на базе исторического бэкграунда, то есть совместном использовании архивных данных и данных, поступающих в режиме квази-реального времени. Несмотря на то, что большие данные предполагают высокую скорость их обработки, на практике сложные операции могут выпол-

няться достаточно долго, что в ряде случаев приводит к устареванию полученных результатов и потере их актуальности. Для решения этой проблемы, в рамках разработки цифрового двойника [1] региональной климатической системы, предлагается использовать лямбда-архитектуру обработки данных.

Лямбда-архитектура [2] – это архитектура, предназначенная для обработки больших объемов данных за счет использования как методов пакетной, так и потоковой обработки. Данный подход обеспечивает баланс между оперативностью получения результатов, пропускной способностью каналов связи и отказоустойчивостью системы в целом. Это достигается за счет использования пакетной обработки для комплексного и надёжного анализа архивных данных, одновременно используя потоковую обработку оперативных данных, поступающих в режиме реального или квази-реального времени. При этом результаты обоих типов обработки могут быть наложены друг на друга перед отображением пользователю. Рост популярности лямбда-архитектуры связан с ростом объёмов больших данных, необходимостью выполнения анализа в режиме квази-реального времени и необходимостью сократить задержки между генерацией данных, их анализом и представлением результатов.

Лямбда-архитектура требует, чтобы наборы обрабатываемых данных были только пополняемыми и впоследствии неизменными. Она предназначена для обработки временных рядов данных, которые только добавляются к существующим данным, а не перезаписывают их. Это делает её идеальным кандидатом для реализации цифрового двойника региональной климатической системы, опирающегося на большие массивы неизменных данных исторического моделирования и наблюдений, и потоки информации, получаемые с локальных метеостанций, а также в результате оперативного прогностического моделирования. Особенно актуально применение этой технологии будет в решении задач предупреждения опасных и экстремальных метеорологических явлений.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Boschert S., Rosen R. (2016) Digital Twin—The Simulation Aspect. In: Hehenberger P., Bradley D. (eds) Mechatronic Futures. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5
2. Michael Hausenblas & Nathan Bijnens, inspired by Nathan Marz. Lambda architecture overview. [Электронный ресурс]. – URL: <http://lambda-architecture.net>

Comparison of Taylor-Galerkin type schemes for transport equation on sphere

Petrov S.

Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: sergey.petrov@phystech.edu

This paper investigates the dependence of the accuracy of the numerical solution of the transport equation on a sphere, depending on the use of different schemes of the Taylor-Galerkin type for time discretization. Taylor-Galerkin type schemes are widely used in dynamic blocks of finite element models of the ocean, atmosphere, and sea ice. Various initial mass distributions are considered, such as infinitely smooth Gaussian surfaces, discontinuous mass distributions. Different reversible velocity fields are set, both divergent and non-divergent. The reversibility and non-divergence of the velocity field guarantees the coincidence of the initial mass field with the final one, which makes it possible to estimate the errors. The divergent velocity field is used to test the positiveness and global conservatism of the solution. The work is organized as follows: first, a description of transport schemes of the Taylor-Galerkin type is given. Then the initial distributions of mass and velocity field are described. After that, the main results of numerical experiments in various configurations are presented. At the end, conclusions are drawn and recommendations are made on the use of a particular scheme.

Сравнение схем Тейлора-Галеркина для решения уравнения переноса на сфере

Петров С.С.

Институт Вычислительной Математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

E-mail: sergey.petrov@phystech.edu

В данной работе исследуется зависимость точности численного решения уравнения переноса на сфере в зависимости от использования разных схем типа Тейлора-Галеркина для дискретизации по времени. Схемы типа Тейлора-Галеркина активно применяются в динамических блоках конечно-элементных моделей океана, атмосферы, морского льда. Рассматриваются различные начальные распределения массы, такие как бесконечно гладкие Гауссовы поверхности, разрывные распределения массы. Задаются разные реверсивные поля скорости, как дивергентные, так и бездивергентные. Реверсивность и бездивергентность поля скорости гарантирует совпадение начального поля массы с конечным, что позволяет оценить ошибки. Дивергентное поле скорости используется для проверки положительности и глобальной консервативности решения. Работа устроена следующим образом: сначала дается описание схем переноса типа Тейлора-Галеркина. Затем описываются начальные распределения массы и поля скорости. После этого представлены основные результаты численных экспериментов в различных конфигурациях. В конце делаются выводы и даются рекомендации по использованию той или иной схемы.

СХЕМЫ ТИПА ТЕЙЛОРА-ГАЛЕРКИНА

Рассмотрим уравнение переноса массы, записанное в потоковой форме:

$$\partial_t m + \nabla \mathbf{g}(m \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

Классическая схема по времени Тейлора-Галеркина 2 порядка аппроксимации (TG2) по времени [1] записывается в виде:

$$m^{n+1} = m^n - \Delta t \nabla \mathbf{g}(m^n \mathbf{u}) + (\Delta t^2 / 2) \nabla \mathbf{g}(\mathbf{u} \nabla \mathbf{g}(m^n \mathbf{u})). \quad (2)$$

Также рассмотрим двухшаговый аналог (TTG2) схемы (2):

$$\begin{aligned} m^{n+1/2} &= m^n - (\Delta t / 2) \nabla \mathbf{g}(m^n \mathbf{u}) \\ m^{n+1} &= m^{n+1/2} - \Delta t \nabla \mathbf{g}(m^{n+1/2} \mathbf{u}) \end{aligned} \quad (3)$$

В книге [2] представлены двухшаговые схемы Тейлора-Галеркина 3-го (TTG3) и 4-го (TTG4) порядка аппроксимации по времени, которые также исследуются в данной работе.

Как известно, схемы порядка выше 1 не могут быть монотонными. В связи с этим в данной работе применяется технология коррекции потоков [3]. Суть метода коррекции потоков заключается в построении схемы низкого порядка, путем лампирования массовой матрицы и добавления искусственной вязкости в правую часть (схема Лернера), которая строится по схеме высокого порядка. Локальная разница решений по схеме высокого и низкого порядка задает численные потоки на элементе, которые балансируются с помощью специальной ограничивающей стратегии. Применение коррекции потоков гарантирует ограниченность решения снизу решением по схеме низкого порядка и сверху по схеме высокого. Таким образом, в случае положительности решения по схеме низкого порядка гарантируется положительность решения по схеме коррекции потоков. Решение по схеме коррекции потоков значительно менее диффузионно, по сравнению с решением по схеме низкого порядка, однако сохраняет свойство глобальной консервативности.

НАЧАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ И ПОЛЯ СКОРОСТИ

В данной работе реализован набор численных экспериментов, описанный в [4]. Рассматриваются два типа начальных распределений массы – Гауссовы поверхности (GH) и щелевые цилиндры (SC) и три типа полей скорости – бездивергентная пара вихрей (ND1), бездивергентная пара вихрей с зональным смещением (ND2), дивергентное поле скорости с накачкой массы к экватору (D). Описанные распределения массы представлены на Рис.1, а поля скорости в начальный момент времени на Рис.2.

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Первый тест использует начальное распределение массы GH и поле скорости ND1. Проверяется сходимость решения к точному при измельчении шага сетки. Параметры расчета: разрешение по про-

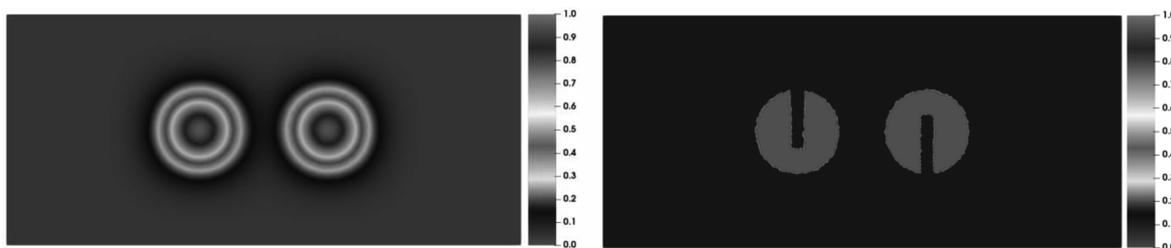


Рис.1. Начальное распределение массы. Слева – Гауссовы поверхности (GH), справа – щелевые цилиндры (SC).

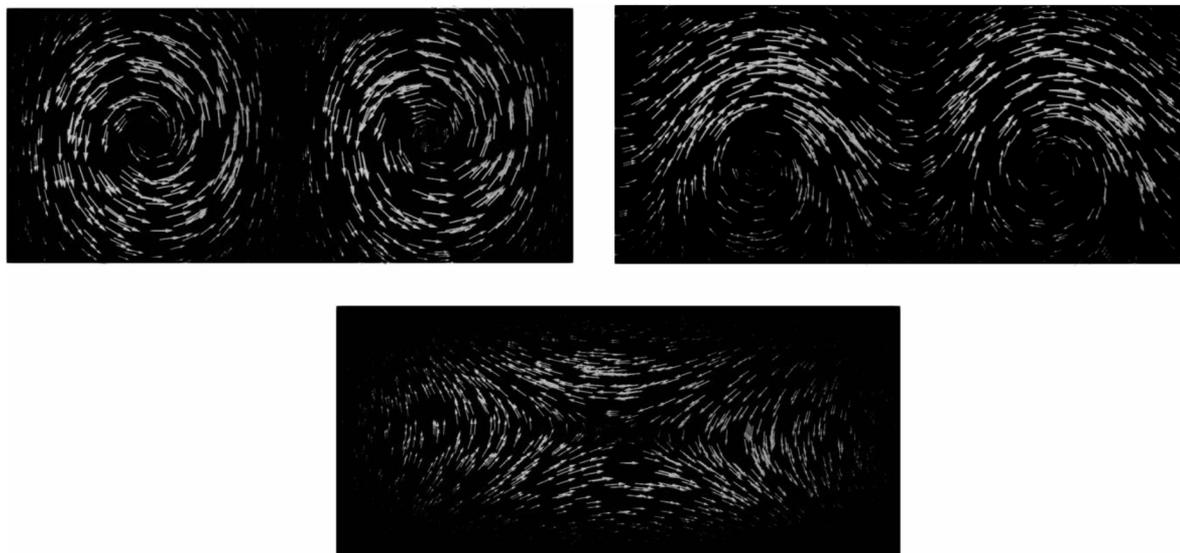


Рис.2. Поля скорости в начальный момент. Сверху слева – пара вихрей (ND1), сверху справа - пара вихрей со смещением (ND2), снизу – дивергентное поле (D).

странству 200 км., число Куранта 0.2. На Рис. 3 представлена зависимость интегральной ошибки от пространственного разрешения. Из рисунка видно, что сходимость по шагу сетки имеет порядок между h и h^2 . В логарифмическом масштабе прямая имеет угол наклона 1.8. Уменьшение порядка сходимости по сравнению с порядком аппроксимации является типичным в случае использования схемы переноса с фильтром.

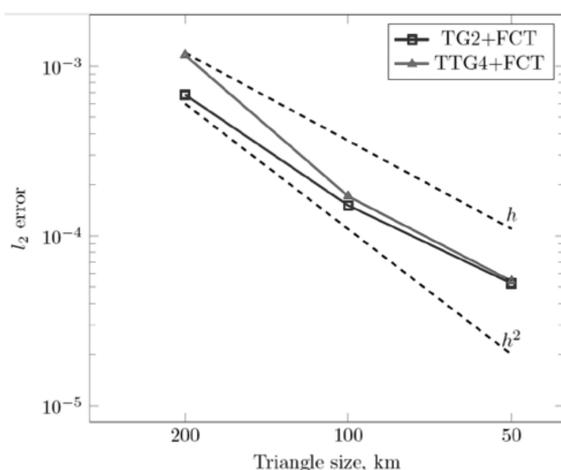


Рис.3. Сходимость решения по шагу сетки (Тест 1).

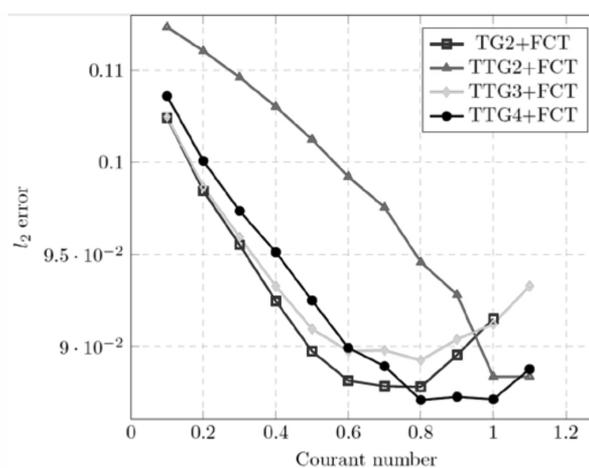


Рис.4. Зависимость интегральной ошибки от числа Куранта (Тест 2).

Второй тест использует начальное распределение SC и бездивергентное двухвихревое поле скорости со смещением ND2. Зависимость интегральной ошибки от числа Куранта представлена на Рис.4. Распределения массы в серединный и конечный моменты времени представлены на Рис.5.

Третий тест реализует перенос распределения массы SC дивергентным полем скорости D. Вычисления продемонстрировали сохранение интегральной массы с машинной точностью. На Рис.6. продемонстрирована эволюция минимального значения массы во всей области для схемы с коррекцией потоков и без.

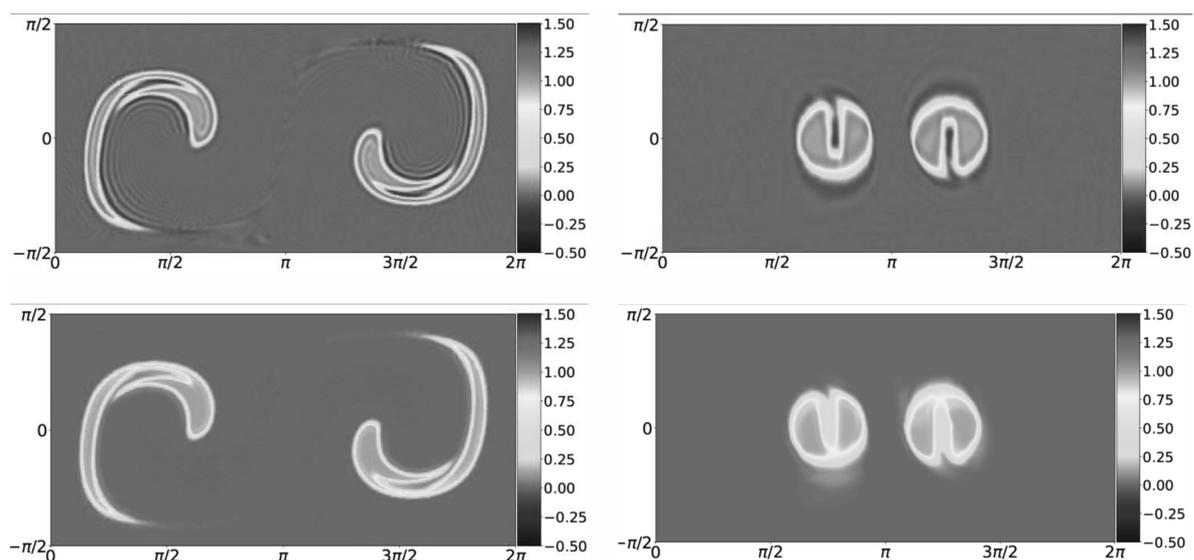


Рис.5. Распределения массы в характерные моменты времени (Тест 2). Сверху – схема TG2, снизу – схема TTG4+FCT. Слева – срединный момент времени, вправа – конечный момент времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численные эксперименты показали, что порядок сходимости по шагу сетки у схем Тейлора-Галеркина в среднем $h^{1.8}$ (Рис.1). Порядок аппроксимации на равномерной сетке второй, падение точности происходит за счет применения метода коррекции потоков.

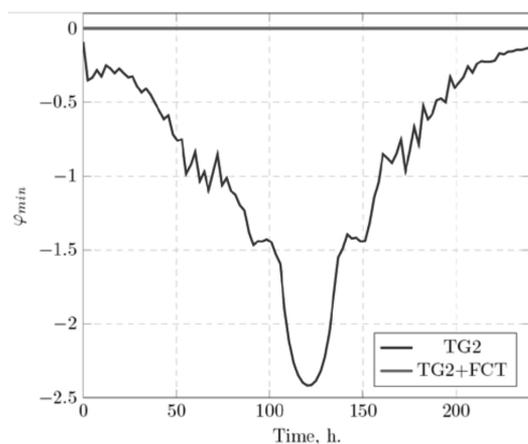


Рис.6. Эволюция минимального значения массы (Тест 3).

При малых числах Куранта схемы дают одинаковый по точности результат, за исключением схемы TTG2+FCT, который заметно хуже (Рис.4). При больших числах Куранта по точности наиболее предпочтительна схема TTG4+FCT (Рис.4). Случай больших чисел Куранта реализуется на практике при увеличении шага по времени или сгущении сетки в область береговой линии или особенности решения. Схемы с коррекцией потоков обладают свойством глобальной консервативности и положительности (Рис.6). Параллельная реализация описанных схем включена в динамический блок, разрабатываемой в ИВМ РАН, конечно-элементной модели льда на неструктурированных сетках.

ности и положительности (Рис.6). Параллельная реализация описанных схем включена в динамический блок, разрабатываемой в ИВМ РАН, конечно-элементной модели льда на неструктурированных сетках.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. The Finite Element Method, Fifth Edition, V. 3: Fluid Dynamics, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000
2. Quartapelle, L. Numerical solution of the incompressible Navier-Stokes equations. Vol. 113.: Birkhauser, 1993.
3. Lohner R., Morgan K., Peraire, J. and Vahdati M., Finite element flux-corrected transport (FEM-FCT) for the Euler and Navier-Stokes equations. Int. J. Numer. Meth. Fluids 7 (1987) 1093–1109.
4. Ramachandran D. Nair and Peter H. Lauritzen. A class of deformational flow test cases for linear transport problems on the sphere. J. Comput. Phys. 229, 23 (November, 2010), 8868–8887.

Safe city – GIS Meteo subsystem

Tikhonenko N.D., Yusupov Yu.I.

MapMakers Group Ltd, Moscow, Russia

E-mail: n.tikhonenko@gismeteo.com, usupov@gismeteo.com

Introduced nowcasting is a blending of observation data and mesoscale model, which allows to get more accurate forecast of beginning, duration and intensity of hazardous and unfavorable weather conditions. Weather surveillance radars (WSR) in Russia have a fairly dense network only in the European part, but even here there are places where information from the WSR does not overlap, and given that some stations sometimes do not transmit information, it can be quite difficult to recreate the real synoptic situation. It is expected that the proposed nowcasting system will enable the forecaster to better represent the true picture of the processes occurring in the atmosphere and will allow more accurate forecasting of such phenomena as showers, thunderstorms, squalls, and hail.

Methods which are using extrapolation or trajectory calculations for predicting new position of active convection zones does not taking into account evolution of convective processes. So to obtain a more complete picture of the forecasting processes and area without information from the WSR, we proposing to combine the measured and modeled (with corresponding lead time) radar reflectivity.

According to the implemented algorithm radar reflectivity obtained from WRF-ARW model is used both on different isobaric surfaces and maximum tropospheric value. Then this information is combined with data on the measured radar reflectivity. Weight of modeled reflectivity data increases on distance more than 100 km from central point of the WSR and reaches 1 in uncovered places.

Also there is data transmitted from meteorological radars on weather phenomena (precipitation, showers, thunderstorms, squalls, hail), calculated using complex recognition criteria [4]. In the WRF-ARW model, the predicted radar reflectivity Z is reported in dB. To use tables [4] it is necessary to convert these values to lgZ .

$$lgZ = (dBZ - 18) / 10 (1)$$

Overall score of the precipitation forecast for proposed method was carried out in accordance with [4] comparing with observation data from synoptic stations from European territory of Russia. Predictive data located in regular grid with a step of 4x4 km were brought to the coordinates of observation stations using bilinear interpolation and compared with the weather data at the time of observation.

Analysis of the results shows that our method for precipitation forecast are quite good, which suggests that use of WRF-ARW data does not worsen the forecast. Either a more complete picture of atmospheric processes provides additional information to the forecaster to assess the meteorological situation.

Thus, in the Safe City nowcasting system, it becomes possible to obtain a detailed (10 minutes, 1 km) ultra-short-term forecast with the ability to monitor meteorological data for the specialist such as precipitation, showers, thunderstorms, squalls, hail, air temperature, visibility, cloud base height, precipitation, wind gusts.

The software complex is: a data center (DC), which regularly receives information from automatic meteorological stations (AMS), including private ones, synoptic and aerological stations, weather radars network (SWR), geostationary satellites, lightning detection network; mesoscale non-hydrostatic model WRF-ARW hourly cycled, with data assimilating using 3DVAR technology; GIS Meteo, which allows a specialist to interpret the results of calculations.

Безопасный город – подсистема ГИС Метео

Тихоненко Н.Д., Юсупов Ю.И.

НПЦ «Мэп Мейкер», Москва, Россия

E-mail: n.tikhonenko@gismeteo.com, usupov@gismeteo.com

Представлен наукастинг - блендинг данных наблюдений и мезомасштабной модели, позволяющий получать точные прогнозы начала, продолжительности и интенсивности опасных и неблагоприятных погодных явлений.

В России метеорологические радиолокаторы (МРЛ) имеют достаточно плотную сеть только в Европейской части, но даже здесь есть места, где информация от МРЛ не перекрывается, а учитывая, что некоторые станции временами не передают информацию - воссоздать реальное синоптическое положение бывает достаточно сложно. Ожидается, что предлагаемая система наукастинга даст возможность дежурному синоптику лучше представить истинную картину процессов, происходящих в атмосфере и позволит точнее дать прогноз таких явлений как ливни, грозы, шквалы, град.

Так как метод прогноза нового положения зоны активной конвекции с помощью экстраполяции или по траекторным расчетам не предполагает учета эволюции конвективных процессов, то для получения более полной картины прогнозируемых процессов и покрытия мест, где отсутствует информация от МРЛ, предлагается совместно использовать фактическую и прогностическую (соответствующей заблаговременности) радиолокационную отражаемость. В комплексной системе «Безопасный город» в настоящее время используется мезомасштабная негидростатическая модель WRF-ARW версии 4.1.3. Радиолокационная отражаемость в WRF-ARW моделируется по прогностическим значениям отношения смеси гидрометеоров на различных уровнях с учетом рассеяния Релея на сферических частицах известной плотности и размеров. При этом, в соответствии с алгоритмом, изложенном в [1,2] поля фактической радиолокационной отражаемости перемещаются и смешиваются (с разными весами, блендинг) с прогностической радиолокационной отражаемостью, полученной от WRF-ARW по формуле:

$$V(x, y)_{c+p} = w O_{c+p}(x, y) + (1 - w) M_{c+p}(x, y) \quad (1)$$

где w – весовой множитель, O_{c+p} – значение в срок наблюдения, перемещенное по траекторной модели, M_{c+p} – прогноз по гидродинамической модели

В соответствии с построенным алгоритмом, для расчетов используется полученная по модели WRF-ARW радиолокационная отражаемость как на отдельных изобарических поверхностях, так и максимальная в тропосфере. Далее, эта информация стыкуется с данными о фактической радиолокационной отражаемости. При удалении от центральной точки радиолокатора на расстояние более 100 км, вес прогностической информации увеличивается и достигает 1 в неосвещенных местах.

Для построения прогностического положения радиоэха используется траекторная модель, построенная на изобарической поверхности, соответствующей максимальной радиолокационной отражаемости [3].

Среди информации, передающейся от метеорологических радиолокаторов, кроме радиолокационной отражаемости на разных уровнях, есть данные о явлениях погоды (осадки, ливни, грозы, шквалы, град), рассчитанные по комплексным критериям распознавания [4]. В модели WRF-ARW прогностические значения радиолокационной отражаемости Z передаются в dB. Чтобы воспользоваться таблицами [4] необходимо перевести эти значения в $\lg Z$.

$$\lg Z = (dBZ - 18) / 10 \quad (1)$$

На Рис.1 б) представлен наукастинг, выполненный с заблаговременностью 2 ч с использованием данных от метеорологических радиолокаторов за 20 сентября 2015 г. 19 ч МСВ и информации модели WRF-ARW за 20 сентября 2015 г. 12 ч МСВ. Данные о явлениях погоды от метеорологических радиолокаторов используются напрямую из телеграмм BUFR. Для сравнения, на Рис. 1 а) представлены фактические данные МРЛ за 20 сентября 2015 г. 21 ч МСВ. Анализ Рис. 1 и данные наблюдений на метеостанциях, показывают, что грозы в Москве, Внуково, Домодедово, а также в Твери были спрогнозированы правильно. Кроме того, правильно спрогнозированы ливневые осадки в г. Петушки. По данным МРЛ (Рис. 1 а) осадков в г. Петушки нет, однако по данным наблюдений на метеостанции г. Петушки 20 сентября зафиксированы ливневые осадки в 21 ч МСВ. Причину отсутствия в этом районе информации по данным радиолокационных наблюдений можно объяснить ослаблением сигнала в осадках или присутствием зоны экранирующих осадков [4]. Правильный прогноз по отсутствию осадков в указанный срок в г. Дмитрове, Александрове, Павловом Посаде, Клину, на метеостанциях Шереметьево, Тушино (Рис. 1 б) подтвержден информацией с метеостанций. К сожалению, невозможно проверить были или нет осадки на севере Московской области, между г. Дмитровым и г. Савелово, ввиду отсутствия там метеонаблюдений.

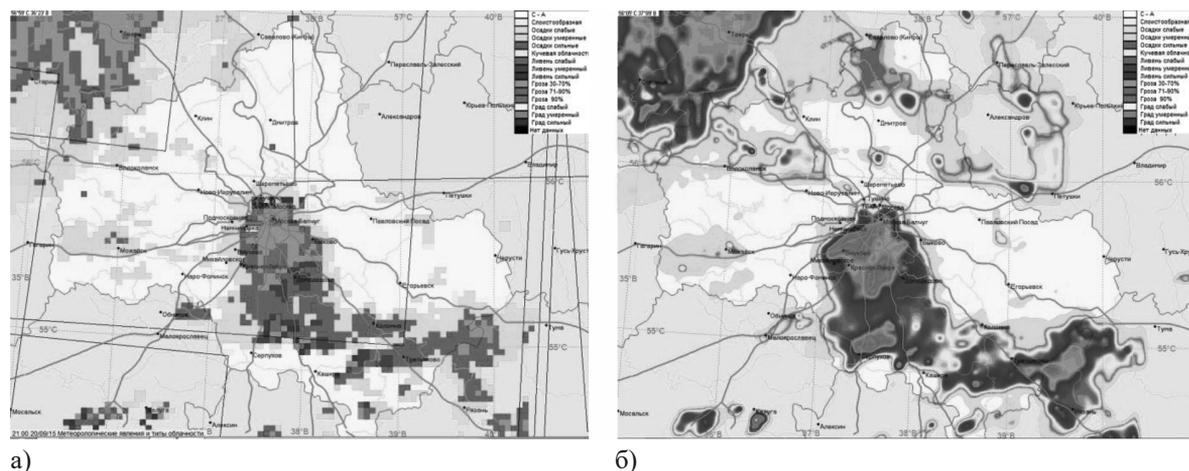


Рис. 1. Явления погоды по данным МРЛ 20 сентября 2015 г. 21 ч МСВ (а) и наукастинг с заблаговременностью 2 ч по стыкованным данным МРЛ и WRF-ARW (б).

В [2] были приведены результаты оценки качества наукастинга, построенного по данным метеорологических радиолокаторов и прогностических полей ветра. В указанной работе для оценки сопоставлялись рассчитанные поля радиолокационной отражаемости с заблаговременностью 1 - 3 ч с фактическими данными метеорологических радиолокаторов. Согласно [2] критерий Пирси-Обухова составил соответственно для заблаговременностей 1, 2 и 3 часа: 0.76, 0.61 и 0.42. В предлагаемом методе начальное поле радиолокационной отражаемости включает в себя помимо данных МРЛ, данные о виртуальной радиолокационной отражаемости, присутствующей в неосвещенных радиолокаторами местах. Поэтому, проведение оценки путем сравнения с фактическими данными радиолокаторов не имело смысла, оно повторяло бы оценки [2]. Оценка успешности прогноза осадков предлагаемого метода проводилась в соответствии с [4] по факту, путем сравнения с данными станций наблюдений европейской территории России. Прогностические данные, расположенные в узлах регулярной сетки с шагом 4x4 км, с помощью билинейной интерполяции приводились к координатам станций наблюдений и сравнивались с данными о погоде в срок наблюдения. Прогноз считался оправдавшимся, если в соответствующем пункте прогнозировались осадки и в фактических данных присутствовали осадки (в любом виде) в срок наблюдения. Результаты испытаний представлены в Табл 1 - 3. В Табл. 1 представлена матрица сопряженности для прогноза осадков по данным МРЛ с заблаговременностью 2 ч без учета прогностических данных о радиолокационной отражаемости по WRF-ARW, в Табл. 2 - с учетом данных о радиолокационной отражаемости по WRF-ARW. Для сравнения, в Табл. 3 представлены матрица сопряженности осадков по данным наблюдений за срок 12 ч МСВ и данным МРЛ за срок 12 ч МСВ. Анализ результатов показывает, что характеристики успешности прогноза осадков в Табл. 1 и Табл. 2 - довольно близки, что говорит о том, что применение данных WRF-ARW не ухудшает прогноз, однако более полная картина дает дополнительную информацию дежурному синоптику для оценки синоптического положения. Отличие в значениях общего числа выборки для Табл. 1 и Табл. 2 объясняется в значительно большем покрытии исследуемой территории прогностическими данными в случае применения данных WRF-ARW совместно с данными метеорологических радиолокаторов.

Таблица 1. Таблица сопряженности осадков по данным наблюдений за 12 ч МСВ с прогнозом осадков с заблаговременностью 2 ч по данным МРЛ и прогностических полей ветра модели WRF-ARW за 10 ч. 1 - 30 сентября 2015 г.

Прогноз	Наблюдения		Сумма	U	U + П
	Осадки	Без осадков			
Осадки	1098	249	1347	0.82	1.41
Без осадков	759	4482	5241	0.86	1.80
Сумма	1857	4731	6588		
П	0.59	0.95			
Т	0.54				
Н	0.59				

где U – оправдываемость, П – предупрежденность, Т – критерий качества прогноза Пирси-Обухова, Н – критерий надежности Багрова.

Таблица 2. Таблица сопряженности осадков по данным наблюдений за 12 ч МСВ с прогнозом осадков с заблаговременностью 2 ч по данным МРЛ, прогностической радиолокационной отражаемостью и полей ветра модели WRF-ARW за 10 ч. 1 - 30 сентября 2015 г.

Прогноз	Наблюдения		Сумма	U	U + П
	Осадки	Без осадков			
Осадки	4493	1411	5904	0.76	1.39
Без осадков	2652	13518	16170	0.84	1.74
Сумма	7145	14929	22074		
П	0.62	0.84			
Т	0.53				
Н	0.56				

Таблица 3. Таблица сопряженности осадков по данным наблюдений с данными МРЛ об осадках за срок 12 ч. 1 - 30 сентября 2015 г.

Прогноз	Наблюдения		Сумма	U	U + П
	Осадки	Без осадков			
Осадки	1288	164	1452	0.89	1.55
Без осадков	642	4590	5232	0.89	1.84
Сумма	1930	4754	6684		
П	0.67	0.97			
Т	0.63				
Н	0.68				

Анализ результатов показывает, что несколько худшее качество успешности прогнозов осадков Табл. 1 и Табл. 2 по сравнению с Табл. 3 может быть объяснено временем жизни конвективных процессов (которое иногда не превышает получаса), однако, основные показатели - критерий качества Пирси-Обухова, критерий надежности Багрова, суммарный показатель оправдываемости и предупредительности осадков), характеризуют удовлетворительное качество прогнозов. Таким образом, в системе наукастинга «Безопасный город», появляется возможность получения детального (шаг 10 минут, 1 км) сверхкраткосрочного прогноза с возможностью вывода на экран оператора таких явлений погоды как осадки, ливни, грозы, шквалы, град, так и других важных параметров как температура воздуха, видимость, высота нижней границы облаков, осадки, порывы ветра. Программный комплекс представляет собой: центр сбора данных (ЦСД), в который регулярно поступает информация от автоматических метеорологических станций (АМС), в том числе частных, синоптических и аэрологических станций, метеорологических радиолокаторов (МРЛ), геостационарных спутников, сети грозопеленгации; мезомасштабную негидростатическую модель WRF-ARW с ежечасным расчетом, в которой данные наблюдений усваиваются по технологии 3DVAR; ГИС Метео, которая позволяет специалисту интерпретировать результаты вычислений.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Юсупов Ю. И. Наукастинг в технологии ГИС Метео. Метеоспектр 2015 №1 с.43-48
2. Юсупов Ю. И. Комплексная система наукастинга для авиации в технологии ГИС Метео. Метеоспектр 2016 №4 с. 72-81
3. Wilson J. Thunderstorm nowcasting: past, present and future. Preprints, 31st Conf. on Radar Meteorology, Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc., 2003, J13-J19.
4. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. 1993, – Гидрометеоиздат, Санкт-Петербург, 358 с.

Использование программного обеспечения с открытым кодом в прикладных климатических исследованиях: интеграция метеонаблюдений для территории России

Федотова Е.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

E-mail: e.v.kasilova@gmail.com

Проблема изменения климата и связанное с ней развитие технологий чувствительных к климатическим параметрам: в частности, возобновляемой энергетики, – определяют возрастание потребности в детальной и актуальной климатической информации для решения разнообразных прикладных задач. На сегодня сформировалось два основных подхода к обеспечению отраслевых специалистов массивами климатических данных. Первый заключается в подготовке специалистами-климатологами массивов данных, учитывающих особенности той или иной отрасли: к примеру, сельского хозяйства или планирования развития энергосистем. Второй основан на использовании программного обеспечения с открытым кодом, которое разрабатывается совместно заинтересованными в нем специалистами. Этот подход оказался исключительно успешен при развитии вычислительной обработки дан-

ных (data science) и находит все более широкое применение, особенно для задач, где принципиальное значение имеет прозрачность и воспроизводимость вычислительных процедур.

Программное обеспечение с открытым кодом на сегодня начинает находить все большее применение в климатологии, позволяя объединить эффективные статистических методы обработки данных с детальными моделями физических процессов, соответствующих той или иной отрасли. Для региональных климатических исследований одним из необходимых этапов моделирования является подготовка данных метеонаблюдений. Настоящая работа направлена на разработку такого решения для территории России.

Предложены программные решения, задача которых состоит в упрощении работы с архивами данных метеорологических наблюдений, загруженных пользователем из официальной наблюдательной сети ВНИИГИ-МЦД. Предложенный программный комплекс написан на языке R состоит из двух модулей. Первый из них `climaru` предназначен для решения технических задач: проверки мета-данных архива метеоданных, извлечении списка доступных в этом архиве наблюдательных станций, их визуализации, а также чтения этого массива данных вычислительным модулем. Второй модуль `meteoclean` автоматизирует операции предварительной подготовки данных: проверку дубликатов дат и пропусков данных, а также формирование выборки станций, отвечающих заданным критериям качества на интересующем пользователем временном интервале.

Разработанный программный комплекс тестировался при решении нескольких прикладных задач, в том числе включавших расчет изменений параметров отопительного сезона и потребности в кондиционировании, исследование термодинамической эффективности теплофикации, расчет климатических воздействий на надежность линий электропередач. Во всех проектах по моделированию, выполненных с использованием разработанного комплекса, была обеспечена интеграция решаемых технических задач обработки климатических данных с современными статистическими методами и инструментами визуализации. В дальнейшем на основе выполненных разработок планируется выпуск официальных вычислительных пакетов R и их встраивание в существующую систему инструментов климатического моделирования.

Open source approach towards integration of the meteorological records across Russia into a climate impact modeling workflow

Fedotova E.

Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

E-mail: e.v.kasilova@gmail.com

Demand on the climate data is growing rapidly during the last decades. That is a result of a pressing need to develop climate change adaptation and mitigation measures alongside with large scale implementation of the climate sensitive technologies such as renewable generation as a part of these measures. An arising demand for up-to-date and detailed climate data determines new challenges for the climate services [1-2].

Two general approaches may be utilized to answer emerging climate information challenges. The first approach implies generation of a climate datasets preprocessed in such a way to satisfy for the specific requirements of a certain users group. The Copernicus Climate Change Service [3-5] may be mentioned as a great example implementing such an approach. The original reanalysis archives have been processed to minimize uncertainties of the indicators utilized in a specific branch such as energy or agriculture. The resulted archives can be directly used by the specialists of each branch in their work.

The second possible climate service approach relies on combination of an assess to the original non-corrected climate datasets with the processing tools developed to satisfy the branch requirements. In essence, this approach follows the course recently taken by the data science development. The leading data analysis tools tend to result from collaborative development efforts. The representatives of this group are a deep-learning Keras library [6], Python pandas package [7] and R tidyverse [8] data management suite to name a few most obvious examples. A number of the climate-related data analysis tools are available or under active development up to the data [climate4R, raster] and their application to the existing global-scale modern climate archives is rather straightforward.

The climate impact studies for Russia must rely rather on the second open source driven approach due to a certain deficit of the open specialized and regionalized climate data archives. The most serious obstacle towards utilization of this approach is management of the raw meteorological data. The global climate archives are have a limited spatial resolution and known to be biased which may be quite significant if regional pro-

cesses are considered [9-11]. Utilization of the original meteorological records is necessary to address both of the issues mentioned which in its turn requires a proper strategy to process meteorological records. The national meteorological service does provide a plenty of valuable primary observations data [12] which however should be preprocessed to be integrated into the climate change impact modeling workflow. Programming tools intended for such preprocessing use are to the author's best knowledge not yet openly available. The proposed work is aimed to contribute in filling this gap.

A set of climate data processing tools is developed to facilitate pre-processing of the original meteorological records related to the Russian territory for further integration of these data into a general climate impact modeling workflow. The computational tools are organized into two modules being developed as R packages. The first one `climaru` package is aimed to facilitate management of the original meteorological archives. It automates processing of the archives downloaded via meter.ru climate service including restoration of the observations meta data and stations identifiers along with visualization of the available stations and loading the observations into a computational framework for further processing. The second toolset `meteoclean` contains functions for automation of the routine procedures of data checking and cleaning. One of the major its functionalities is selection of the meteorological stations which provide data of the requested quality level considering a given time span. Combinations of these two modules is intended to satisfy requirements of the further climate impact simulations and provide climate data inputs for empirical climate impact analysis. Both modules are being implemented as R packages to ensure a seamless integration with existing R climate data processing ecosystem such as raster package [13] or climate4R [14-15] suite.

One of the application examples of the proposed preprocessing toolset is shown in the fig. 1–2. The surface wind speed station observations were taken to be utilized in climate impact study considering power transmission network failures. The surface wind speed has been shown to be the most important climate factor for the considered problem. The stations measurements of the surface wind speed were taken as input data for further analysis. A time span 1978 – 2019 has been selected as a trade-off between data availability and quality using `meteoclean` functionalities. Hierarchical clustering has been utilized on daily wind speed time series to select the regions with similar long-term wind dynamics [16]. Computations were done using `stats` package which is a part of R language [17]. The results of heuristic analysis considering wind speed impacts on the electric network failure probability is presented in the fig. 1.

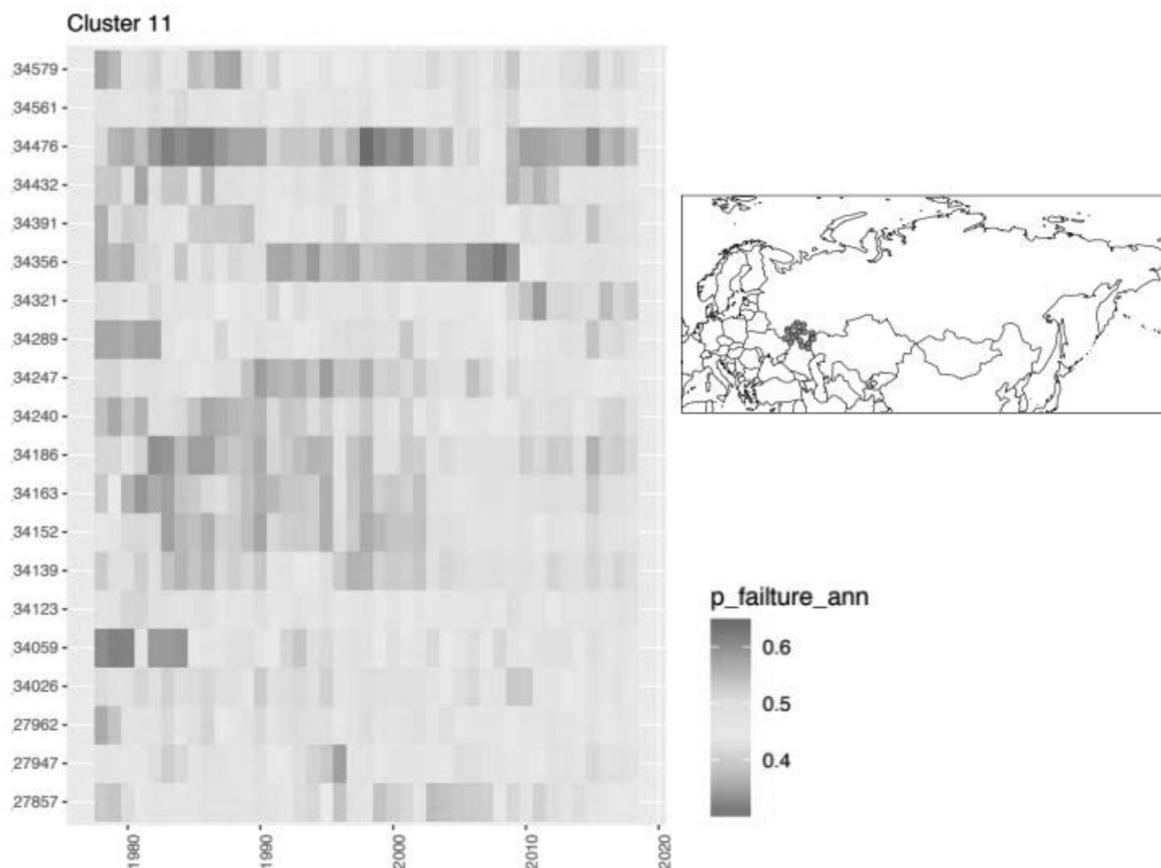


Fig. 1. Meteorological records application to analysis of the climate impacts on reliability of the electricity transmission network: heat-map representing a sensitivity towards the wind speed value of the network failure probability across the meteorological stations belonging to a certain cluster selected according to the long-term wind speed dynamics. Location of the cluster stations is presented on the map.

The main output of this study was importance of the wind natural variability for the climate-associated network reliability risks. It has been shown that quite a favorable dynamics observed during last twenty years when wind speed impact on the power lines accidents has been decreasing is unlikely to persist. Importance of the local scale processes has been demonstrated in the initial assessment. The preprocessed stations records dataset used in the fulfilled study will be utilized in further more advanced analysis which will implement re-analysis archives.

Further applications of the climate preprocessing toolset have included calculations of the heating and cooling demand shifts due to the climate change impacts, evaluation of the wind power potential and quantitative assessment of the heat waves and their impacts on reliability of the regional power systems. R implementation of the toolset has allowed to take an advantage of reach statistical infrastructure and modern visualization tools. Release of the official R packages is planned basing on the developed toolset.

- Acknowledgments. The work was supported by the Russian Science Foundation (project №18-79-10255).

REFERENCES:

1. Bloomfield H.C., Gonzalez P.L.M., Lundquist J.K., Stoop L.P., Browell J., Dargaville R., et al. The importance of weather and climate to energy systems: A workshop on next generation challenges in energy-climate modeling. *Bull Am Meteorol Soc* 2021. 102(1). E159-E167.
2. Troccoli A. (2018) Achieving Valuable Weather and Climate Services. In: Troccoli A. (eds) *Weather & Climate Services for the Energy Industry*. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68418-5_2
3. Bartok, B., I. Tobin, R. Vautard, M. Vrac, X. Jin, G. Levavasseur, S. Denvil, L. Dubus, S. Parey, P.-A. Michelangeli, A. Troccoli, Y.-M. Saint-Drenan, 2018 : A climate projection dataset tailored for the European energy sector. *Climate Services, A climate projection dataset tailored for the European energy sector*, *Climate Services*, 16, 2019, 100138, <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2019.100138>.
4. Data base on climate and energy indicators for Europe from 2005 to 2100 derived from climate projections. DOI: 10.24381/cds.f6951a62
5. Database on climate and energy indicators for Europe from 1979 to present derived from reanalysis DOI: 10.24381/cds.4bd77450
6. F.Keras. GitHub repository. 2015. <https://github.com/fchollet/keras> (assessed 14 June 2021)
7. McKinney W. *Data Structures for Statistical Computing in Python / Proceedings of the 9th Python in Science Conference*. 2010. P.56-61 Eds. S. van der Walt and J. Millman DOI:10.25080/Majora-92bf1922-00a
8. Wickham et al., (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686, <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
9. Zhil'tsova, E.L., Anisimov, O.A. Accuracy of temperature and precipitation reproduction in Russia with global climate archives. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 34, 687-694 (2009).
10. Popova V.V., Morozova P.A., Titkova T.B., Semenov V.A., Cherenkova E.A., Shiryaeva A.V., Kitaev L.M. Regional features of present winter snow accumulation variability in the North Eurasia from data of observations, reanalysis and satellites. *Ice and Snow*. 2015. 55(4). 73-86. (In Russian)
11. Voropay N., Ryazanova A., Dyukarev E. High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia // *Atmospheric Research*, Volume 254, 2021, 105528.
12. Database on meteorological observations of the All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center meteo.ru/data data base (assessed 7 June 2021)
13. Hijmans R.J. (2021). raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.4-10. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>
14. Bedia et al. (2020) Statistical downscaling with the downscaleR package (v3.1.0): contribution to the VALUE intercomparison experiment. *Geoscientific Model Development*, 13, 1711-1735.
15. Iturbide et al. (2019) The R-based climate4R open framework for reproducible climate data access and post-processing. *Environmental Modelling and Software*, 111, 42-54.
16. Klimenko V.V., Tereshin A.G., Fedotova E.V, O. E. Kondratyeva O.E., O. A. Loktionov O.A., E. M. Voronkova E.M. Changes in the wind regime and the power lines accidents in Russia / *Doklady*. 2021. (in press)
17. R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/> (assessed 9 June 2021)

Применение нейронных сетей для идентификации дифференциальных уравнений в частных производных на примере блока деятельного слоя суши модели Земной системы ИВМ РАН

^{1,2}Чернышев Р.В., ^{3,1}Криницкий М.А., ^{1,2,4}Степаненко В.М.

¹ Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

² Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

⁴ Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

Данная работа посвящена применению искусственных нейронных сетей в задаче идентификации дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП), решаемых в блоке деятельного слоя суши ИВМ РАН модели Земной системы (ESM). Модели атмосферы и климата являются одними из самых вычислительно затратных среди исследовательских приложений, решаемых на суперкомпьютерах. Пространственное разрешение и множество физических параметризаций, используемых в ESM, постоянно увеличиваются. Большинство параметров все еще недостаточно параметризованы, а многие из них не могут быть измерены напрямую. Одним из перспективных подходов калибровки моделей является применение искусственных нейронных сетей. Нейронные сети уже широко используются в задачах анализа спутниковых снимков и калибровки параметров моделей климатической системы. Нейронные сети также демонстрируют высокую эффективность при решении обычных задач математической физики.

В настоящем исследовании мы предлагаем подход применения искусственных нейронных сетей для аппроксимации параметров системы нелинейных уравнений переноса тепла и влаги в почве. Основная особенность предлагаемого метода состоит в формулировке функции потерь на базе принципиально измеряемого решения ДУЧП вместо неизмеряемых значений самих аппроксимируемых параметров. Кроме этого, мы предлагаем способ вычисления градиентов такой функции потерь по коэффициентам аппроксимирующей нейросети методом обратного распространения ошибки с учетом дифференцируемой операции интегрирования ДУЧП. Использование этого способа позволяет применять методы стохастической градиентной оптимизации на этапе обучения нейросети. В настоящем исследовании мы исследовали особенности предложенного подхода идентификации ДУЧП на эталонных примерах термодинамической модели эволюции характеристик почвы с задаваемыми параметрами различной аналитической формы. Предварительные результаты нашего исследования показывают, что предложенный подход применим для сложных нелинейных форм параметров ДУЧП с достижением высокого качества аппроксимации.

- Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №20-05-00773) и междисциплинарной школы Московского университета “Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект”.

Neural networks for identifying partial differential equations in the land surface scheme of the INMCM Earth System model

^{1,2}Chernyshev R., ^{1,3}Krinitskiy M., ^{1,2,4}Stepanenko V.

¹ Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

⁴ Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

In the previous decade, one may observe a significant increase in machine learning applications in diverse areas such as science, business, social life. The emergence of deep learning in Earth sciences is nearly exponential today. Artificial neural networks are used in atmospheric sciences for nudging, weather forecast post-processing, solving partial differential equations, etc. In our study, we apply neural networks to identify partial differential equations (PDE) parameters that can not be measured within the framework of conventional meteorological observations.

The basic numerical kernel of any land surface scheme is a solver for an equation system describing heat and water transport in soil. This system includes heat equation:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} + \rho_d (L_i F_i - L_v F_v), \quad (1)$$

where standard notations are applied, z is a coordinate directed along gravity, T is temperature. Importantly, the heat conductivity λ_T is a function of liquid water content W , i.e., the solution of the equation system: $\lambda_T = \lambda_T(W)$.

In this study, we assessed the capabilities of our approach in several scenarios. As a first step, we considered nonlinear thermal conductance (diffusion) equation with a heat conductivity λ_T as a function of the solution T :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_T(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (2)$$

We assume Dirichlet boundary conditions meaning for each T profile, the solution on the boundaries assumed to be constant. In the second scenario, we considered a nonlinear water vapor W diffusion equation with Dirichlet b.c.s, similar to the thermal conductance equation (2) presented above. In the third scenario, we considered a nonlinear water vapor W dynamics equation known as Richards equation:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_W(W) \frac{\partial W}{\partial z} \right) + \frac{\partial \gamma_W(W)}{\partial z}, \quad (3)$$

where λ_W is liquid water diffusivity coefficient, and γ_W is hydraulic conductivity coefficient. Finally, in the fourth scenario, we considered a system of thermal conductance equation and Richards equation.

When using neural networks for approximating a function, one needs to formulate a loss function which has to be differentiable w.r.t. outputs of the network and subsequently w.r.t. parameters of the network. In contrast with the routine way, we propose formulating the loss function as a measure of discrepancy between approximate numerical solutions of a PDE: one involving a known "true" form for the parameters being identified, and the other involving the parameters approximated with neural networks. The data on "true" solution is often known in discrete points of time and space. For the discrete mesh, we approximate numerically the partial derivatives in equations (2-3) for all scenarios by explicit scheme.

Given the parameters to identify with neural networks ($\lambda_{T,NN}(T)$, $\lambda_{W,NN}(W)$ and $\lambda_{NN}(W)$) and the true forms of these parameters ($\lambda_{T,true}(T)$, $\lambda_{W,true}(W)$ and $\lambda_{true}(W)$), we define the loss function the following way:

$$\mathcal{L} = \left[\sum_i \left(\frac{\partial T_{NN,i}}{\partial t} - \frac{\partial T_{true,i}}{\partial t} \right)^2 + C_W \sum_i \left(\frac{\partial W_{NN,i}}{\partial t} - \frac{\partial W_{true,i}}{\partial t} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

where C_W , K^2 is a weighting multiplier, which makes the contribution of two terms in square brackets comparable under similar relative errors of parameters defining tendencies of temperature and soil moisture. In this study, we used several forms for λ_{true} : exponential, exponential with cosine-like additive term, and threshold-like (see fig. 2).

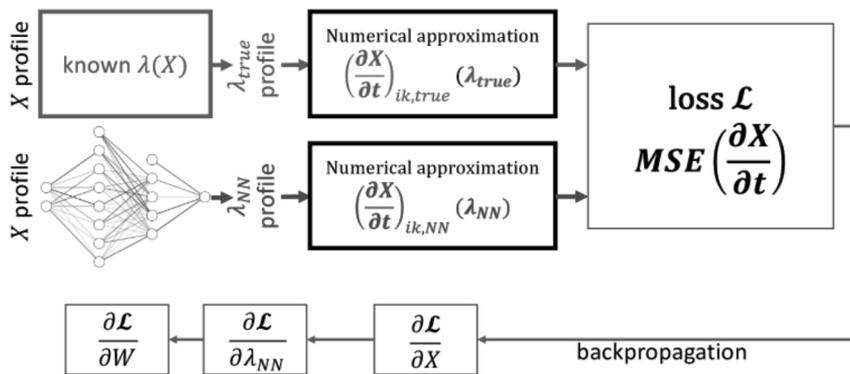


Fig. 1. The scheme of our approach for the computation of loss function \mathcal{L} gradients w.r.t. parameters of the neural network. Here, the numerical approximations of the partial derivatives are computed using the explicit scheme formula. X is a substitute for temperature T or water vapor W ; λ_{true} is the known form for the parameter to identify; λ_{NN} is the approximation of this parameter computed using the neural network; i enumerates level elements following the spatial coordinate z ; k enumerates profiles of a mini-batch in case of mini-batch stochastic optimization procedure.

Neural networks, specifically feed-forward networks (a.k.a. multilayer perceptions, MLP) are known as universal approximators of functions. We exploited MLP as an approach for creating a neural network capable of approximating parameters $\lambda_T(T)$, $\lambda_W(W)$ and $\gamma(W)$. We explored the architecture space to some extent in search for an appropriate configuration. We came to the architecture containing six sequential layers of widths [256,1024,1024,256,256,1]. The networks configured this way perform the mapping $\mathbf{R}^1 \rightarrow \mathbf{R}^1$: the networks input variable is one-dimensional (one value of T or W), and the output is one-dimensional as well (one value of

$\lambda_T(T)$, $\lambda_W(W)$ or $\gamma(W)$). We used Adam baseline method for optimizing the networks. At each iteration of stochastic optimization we also added normal distributed noise to every initial profile in the batch. For improving the convergence of the proposed scheme, we exploited several techniques: batch normalization, learning rate scheduling, scheduling of noise rate, additional regularization loss terms improving convergence. For improving the convergence of neural networks optimization, we propose using additional penalty terms to the loss function that penalize negative gradients of the network w.r.t. its input, negative output values, and non-zero output values in the origin.

In this study, we also assessed the sensitivity of the first-scenario network approximating $\lambda_T(T)$ to small perturbations in T initial conditions that may be considered simulating measurement errors. We injected additive Gaussian noise to T initial conditions generated as a sample from zero-centered multivariate Gaussian distribution with non-diagonal covariance matrix. We varied correlation radius r_c , m that reflects the link between measurement errors at different depths. In this study, we considered the following form of covariance matrix:

$$\Sigma_{ij} = \sigma^2 e^{-\frac{1}{r_c}|z_i - z_j|}, \quad (5)$$

where Σ_{ij} are the ij -th elements of the covariance matrix, r_c is the correlation radius, $i, j = 1 \dots L$, L is the number of finite-difference depth levels, σ^2 is a constant characterizing noise magnitude. With several training runs, we did not find a dependency between saturated loss values and correlation radius. One may assume it to be caused by the stochastic manner of neural networks initialization. We tend to interpret this behavior as an indication of independence between PDE identification quality and the characteristics of non-systematic measurement errors in our approach.

For assessing the quality of our approach, we used $MAPE(\lambda)$ (6) and root mean squared errors of solution tendency (7). Since the parameters λ_T and λ_W are strictly non-negative and their values vary in order of magnitudes, the $MAPE(\lambda)$ measure is more informative compared to $RMSE(\lambda)$. In contrast, the solution tendency $\partial X/\partial t$ is not limited, thus $RMSE(\partial X/\partial t)$ represents its quality perfectly. Note that these metrics are calculated without additional penalty terms described above.

$$MAPE(\lambda_{NN}, \lambda_{true}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\lambda_{i,NN} - \lambda_{i,true}}{\lambda_{i,true} + \xi} \right|, \quad (6)$$

$$RMSE\left(\frac{\partial X_{NN}}{\partial t}, \frac{\partial X_{true}}{\partial t}\right) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial X_{i,NN}}{\partial t} - \frac{\partial X_{i,true}}{\partial t}\right)^2}, \quad (7)$$

where ξ is a small constant added for computational stability.

In figures below, we present qualitative results of the approximations in different scenarios with different true forms of the parameters.

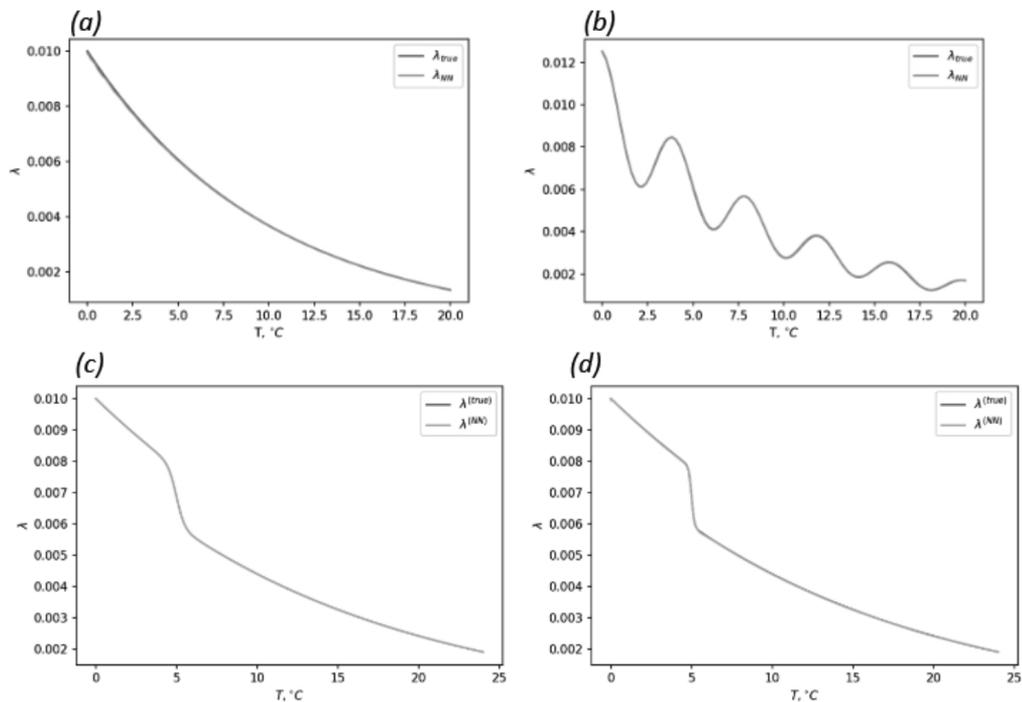


Fig. 2. Qualitative results of $\lambda_T(T)$ approximation within the first scenario: (a) in case of exponential true form; (b) in case of exponential form with cosine-like additive term; (c,d) in case of threshold-like form with (c) smooth and (d) hard threshold.

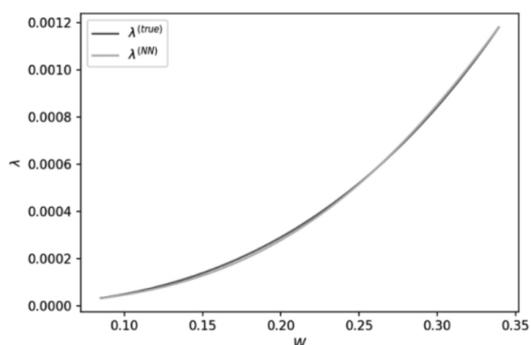


Fig. 3. Qualitative results of $\lambda_w(W)$ approximation within the second scenario.

The results of our study show that our approach provides an opportunity for identifying nonlinear thermal diffusion and Richards equations using artificial neural networks. We demonstrated the modified data-driven approach for reconstructing PDE coefficients of different forms without their ground truth values. Instead, in this approach, one may exploit direct measurements of the PDE solution. In contrast with recently developed physics-informed neural networks (PINN) methods, our approach is not meant to approximate a PDE solution directly. Instead, we state an inverse problem and propose its solution using artificial neural networks and the method for its optimization. This approach is more general than PINN, where unknown coefficients of a PDE assumed constants. There is room for combining our approach with PINN, though: one may identify a PDE using our method and further approximate the PDE solution with PINN.

- The work is supported by Russian Foundation for Basic Research (grant No. 20-05-00773) and Moscow State University interdisciplinary school «Brain, cognitive systems, artificial intelligence».

SESSION VI FUTURE EARTH PROGRAM AND NORTHERN EURASIA FUTURE INITIATIVE

СЕКЦИЯ VI ПРОГРАММА «БУДУЩАЯ ЗЕМЛЯ» И ИНИЦИАТИВА «БУДУЩЕЕ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ»

Northern Eurasia Future Initiative (NEFI), Update

¹Groisman P., ²Grebenets V., ³Tchebakova N., ⁴Vova O.

¹ North Carolina State University Raleigh, Raleigh, NC, United States

² Moscow State University, Moscow, Russia

³ Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

⁴ Institute of Geography, University of Göttingen, Göttingen, Germany

E-mail: groismanp@bellsouth.net

NEFI was conceived in 2015 as a successor of the Northern Eurasia Earth Science Partnership Initiative (NEESPI; <http://neespi.org>). In 2016, a NEFI White Paper was posted at <http://nefi-neespi.org/>. This White Paper was converted and expanded into two peer-reviewed programmatic NEFI Science Plan papers (Monier et al. 2017; Groisman et al. 2017). Being focused on the same region, the difference between two Initiatives stems from their major Science Questions:

- NEESPI: How do Northern Eurasia's terrestrial ecosystems dynamics interact with and alter the biosphere, atmosphere, cryosphere, and hydrosphere of the Earth?
- NEFI: How to provide in Northern Eurasia a sustainable societal development (economy well-being, activities, health, and strategic planning) in changing climate, ecosystems, and societies?

In other words, while NEESPI foci were on understanding of the processes that have and will be occurred over Northern Eurasia, NEFI foci are to answer questions about what should be done for the human well-being in the changing natural and social environments of the region.

Currently, NEFI includes 35 international projects devoted to the Arctic, Eurasian Boreal Forest Zone, and the Dry Land Belt of Northern Eurasia (31 of them are new).

Three main regions of the NEFI studies are located in:

1. The Eurasian Arctic –the region of the most prominent natural changes;
2. Boreal Forest zone –the largest storage of terrestrial carbon; and
3. Dry Latitudinal Belt of Northern Eurasia –the largest extratropical region with acute water deficit.

In the presentation, we show examples of new NEFI studies for each of these three regions.

1. Due to the harsh climatic conditions and the presence of permafrost, the problem of storing solid waste in cryolithozone is especially acute. For the permafrost zone of the Eurasian Arctic, Grebenets et al. (2021) assessed the effect of solid pollutants of different composition and type of storage on permafrost and classified waste based on the standpoint of its genesis with its impact on permafrost accounted for.
2. In the Boreal Forest Zone, the ecosystems' boundaries are unstable. Here we address an important topic for this Zone, the resilience of boreal forest in Southern Siberia Mountains (Altai and Sayany) in the ongoing global warming (Tchebakova et al. 2021).
3. A new composite Gobi drought index (GDI) based on the combination of Soil Moisture and Ocean Salinity Soil Moisture, several products from the MODIS satellite and in situ Soil Moisture observations was developed, validated, and applied to the dry Gobi desert areas of Mongolia. This remote sensing product was retrieved at the 1 km spatial resolution for the summer months in Southwest Mongolia from 2000 to 2018 and its use improved the regional drought monitoring and assessment of vegetation response to the varying soil/climatic conditions (Vova et al. 2021).

Each year, the NEFI active organizes three or more dedicated NEFI Sessions at the AGU, JpGU and SCERT Conferences. NEFI Special Issue of the Environ. Res. Lett. is being published (currently, the Issue has 53 papers accepted and a number of manuscripts are in the review process). The deadline for the article submissions to the NEFI Special Issue is December 30, 2021. NEFI is open for joining of other research groups.

REFERENCES:

1. Grebenets et al. 2021: The problem of storage of solid waste in permafrost. Environ. Res. Lett. (submitted).
2. Groisman et al. 2017: Northern Eurasia Future Initiative (NEFI): Facing the challenges and pathways of global change in the twenty-first century. Progress in Earth and Planetary Science, 4:41.
3. Monier et al. 2017: A Review of and Perspectives on Global Change Modeling for Northern Eurasia. Environ. Res. Lett., 12: 083001.
4. Tchebakova et al. 2021: Do droughts cause dark-needled forests decline/die-back in the south-central Siberian mountains? Environ. Res. Lett. (submitted)
5. Vova et al. 2021: Development of a new Drought index using SMOS satellite soil moisture products: Case Study in Southwestern Mongolia. Land (submitted).

Межгосударственное информационное взаимодействие в Северной Азии

Бешенцев А.Н.

Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ, Россия

E-mail: anbesh@gmail.com

Обмен информацией и другие виды информационной активности приграничных хозяйствующих субъектов стран Северной Азии являются основой успешного экономического и природоохранного международного взаимодействия. Процесс информатизации приграничных территорий соседствующих стран характеризуется технологическими и организационными особенностями, но в целом определяется внедрением общих технических инноваций: использование микропроцессорной техники; цифровое хранение данных; использование сети Интернет; применение геоинформационной технологии и средств глобального позиционирования. Основными задачами при формировании и развитии единого информационного пространства природопользования трансграничных территорий является достижение необходимого уровня информационного потенциала региона посредством создания согласованных геоинформационных ресурсов и развития общей инфраструктуры пространственных данных.

Для организации такого информационного соседства в области охраны природы и рационального использования природных ресурсов РФ и Монголии в трансграничном бассейне оз. Байкал совместными усилиями БИП СО РАН и Водного комитета Монголии создан Байкальский информационный центр (БИЦ) как программно-технический комплекс информационных ресурсов и технологий сбора, хранения, анализа и распространения данных экологической и природоохранной тематики о состоянии окружающей среды. Основным технологическим модулем БИЦ является ГИС бассейна оз. Байкал.

Создание БИЦ обеспечит надежный механизм межгосударственного взаимодействия и эффективного функционирования информационной системы охраны природы для комплексного управления природными ресурсами трансграничного бассейна оз. Байкал. Организация телекоммуникационного доступа к ГИС обеспечена через WEB-сайт (<http://bic.iwlearn.org>), позволяющий интерактивную работу на сервере БИЦ.

Организация БИЦ будет способствовать:

- объединению телекоммуникационных ресурсов трёх субъектов Российской Федерации (Республика Бурятия, Иркутская область и Забайкальский край) и Монголии и формированию единого информационного пространства трансграничной территории, позволяющего органам управления и планирования двух стран осуществлять единую экономическую, социальную, законодательную и природоохранную политику в целях устойчивого развития региона;
- использованию материалов в подготовке и принятии решений органами государственной власти и муниципальных образований в области охраны природной среды и рационального использования природных ресурсов;
- формированию многоуровневого сетевого сервиса, способствующего доступу к актуальной и надёжной информации по заявленной тематике и работающему на основе единой базы данных и единых стандартов обмена информацией.

Развитие БИЦ обеспечит руководителей всех уровней необходимыми метрическими показателями и индикаторами, алгоритмами их обработки и анализа, а также позволит принимать обоснованные межгосударственные управленческие решения. Такое начало станет предпосылкой к созданию трансграничной инфраструктуры пространственных данных и формированию межгосударственного геоинформационного пространства.

Interstate information cooperation in North Asia

Beshentsev A.N.

Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia

E-mail: anbesh@gmail.com

Informatization of economic entities and information-oriented registration of social and natural processes are the common characteristics of modern territorially-based activities. Information exchange and other kinds of informational activity of the border-area economic entities lie at the core of successful international economic and environmental cooperation. The process of informatization of the border-area territories is characterized with its own technological and organizational peculiarities, and is in general determined by the introduction of technological innovations, such as the use of microprocessor technologies; digital data storage; the use of the Internet; application of geoinformation technology and means of global positioning.

At present, the majority of administrative and academic organizations, dealing with territorial management and planning, have come to formalize considerable bodies of geographic information as databases. The maintenance of distance-based access to such information as well as the continual functioning of telecommunication system enable us to speak of the global geoinformation space (GIS), wherein the interaction of data, information and knowledge takes place, where the producers and consumers of information are concentrated and where territorial assignments are formulated.

The specific character of GIS is based on the management of spatially coordinated information, describing natural and social-economic objects and processes. The establishment and development of GIS is related with the territorial activities of society, while its virtual basis is geographic information, alienated from the subjective conciseness and functioning in telecommunication systems and through the communication channels.

The establishment of Russian-Mongolian GIS is being undertaken at a low pace, unlike the densely populated and infrastructurally developed regions. Efforts, applied by the state and research institutions, do not lead to the efficient implementation, which can be explained by a number of problems.

1. Heterogeneity of the indicators and formats, used for the formalization of the described phenomena and processes. The owners of corporative databases have to formulate information requirements on their own while collecting and analyzing diverse data as well as to engage in identification and classification of data, purchase the software and technical equipment, address the problem of data compatibility, integration, generalization and establishment of territorial links.

2. The lack of the single topographic-geodesic and cartographic basis. Significant amounts of digital-spatial data for one territory are to be repeatedly prepared a number of times with the varying degrees of precision, timeliness and plausibility. The produced state information resources are not adjusted in terms of the cartographic basis and the system of basic classifiers of spatial data.

3. Information resources and telecommunication systems are placed on the transboundary territory in a highly uneven manner. This kind of localization corresponds to the distribution of the major research and information centers, but it does not take into account the needs of the population and those of the administrative bodies.

4. Access to and exchange of information through the telecommunication channels are both limited due to the existence of inter-departmental boundaries and are made possible only through the organizational affiliation of the user. The capacity of such information-telecommunication systems is limited and is protected by the reference to the corporate interests, while their functioning is maintained without interaction with the analogues WEB-nodes.

5. High costs for the establishment of telecommunication systems, conditioned by the purchase of the software and technical equipment, recruitment of qualified experts, providing an expertise, planning, data transfer etc.

6. Different quality of information. Data, available from the external network, may be of low quality and legitimacy. Metadata do not always characterize data quality.

7. The issue of information security. Since the amount of data, used jointly, tends to rise, there is an increasing need in restricting the access of certain users and certain kinds of usage as well as in elaborating safe models of authorization. Non-uniform character of documents in the Internet and physical distribution of information makes such protection even more difficult.

8. Introduction of technologies. The existing hurdles between scientific research and information industry. Researchers do not have sufficient knowledge of the practical methods and solutions, while industry does not seek to apply the results of scientific research. A great number of commercial products are designed on the corporate order and are not based on the scientific-technical expertise.

At present, virtually each administrative body, municipality, research or administrative department possess a certain database or a non-structured body of data, sharing a limited territorial character as well as a narrow thematic specialization. Integration of these geo-data could consist in the elaboration of the conceptual scheme of uniting large information massifs of different formats and analytical algorithms for their processing as the single databank. Economic and social relationships on the research territory are connected with the quality of nature management, while its border-area problems have a similar character. It is therefore reasonable to use the information model of nature management as the major factor of common territorial structures, while the integration process of information resources should be started with the unification of the existing databases on the natural-resources and social themes. The development of information-based cooperation between the border economic entities is only possible under the particular conditions of territories, facilitating new forms of cooperation and relationships, integration of consumers, resources, technologies, infrastructure and national interests.

Thus, the major tasks for the establishment and development of the single information space of nature management of transboundary territories consist in attaining the required level of informational potential of the region through establishing mutually adjusted geo-information resources and elaboration of the shared infrastructure of spatial data. In order to implement these «information-based neighborhood» policies, it is necessary to observe the following major principles.

1. Organizational principles include the following activities and measures:

- setting up the Interstate Council for the coordination of activities between the bodies of territorial management, businesses, research institutions aiming at maintaining sustainable GIS of the transboundary territory;
- establishment and development of the single Databank on natural and social-economic information, providing for the grounded decision-making on the problem issues of transboundary relationships;
- software and technical support of agricultural enterprises and land-users;
- providing differential access to the information resources to different groups of users according to their needs and competencies;
- elaboration of GIS on the basis of the assessment of the social and economic effect of technological innovations and initiatives.

2. Technological principles include the following activities and measures:

- establishment of inter-state telecommunication nodes and routes on the basis of shared software and technological equipment;
- maintaining conceptual unity of the databases and the formats of information resources;
- unification of the existing telecommunication nodes according to their information contents, technological capacity, program software;
- integration with analogous international systems;
- use of topographic material of the single scale set, common ellipsoid parameters and cartographic projections;
- formalization of all geo-information resources on condition of maintaining accuracy, fullness and timeliness of information.

3. Environmental principles include the following activities and measures:

- registration of objects and processes of nature management on the basis of the ecosystem approach and single classification of natural landscapes;
- identification of spatial-temporal linkages, regularities and synergetic effects of transboundary nature management;
- providing a continual spatial and substantial assessment for the transformation of natural landscapes and identifying the areals of the negative impact and ecological pressures;
- identification of the optimal social-economic capacity of landscapes;
- ecological and environmental cartography.

4. Normative-methodic principles include the following activities and measures:

- filling and updating data and information exchange on the basis of the unified methodic and normative principles and standards;
- ascertaining the rights and duties of the proprietors of information resources (upholding responsibility for the accuracy, fullness and timeliness of the provided data);
- upholding the single principles of data protection on the basis of the shared legal framework.

International cooperation in the area of environment protection and rational natural resources management within the transboundary basin of Lake Baikal in the Russian Federation and Mongolia can be successfully maintained only provided the single GIS system is set up on the territory of the two countries. This task

can in turn be resolved through the establishment of Baikal information center (BIC) – a structured entity of information resources and technologies of collection, storage, analysis and dissemination of data on the environmental condition through the integration of information flows on the territory of the two countries (<http://bic.iwlearn.org>) (fig. 1).

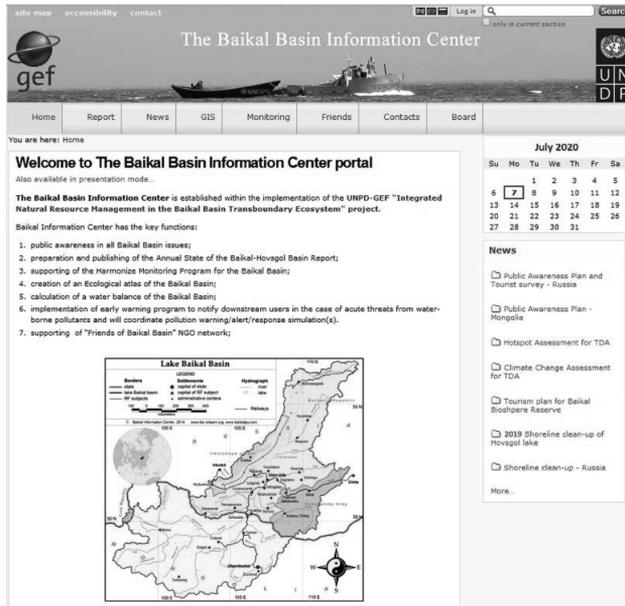


Figure 1. Interface of geo-portal.

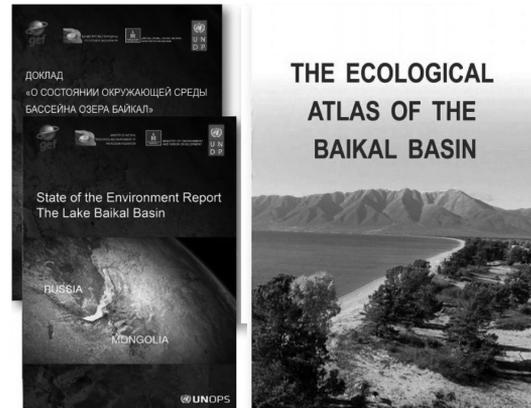


Figure 2. Title of Atlas and Report

The result of the joint work was the creation of an Ecological Atlas of the Baikal basin and the State of the Environment Report of the Baikal basin in Russian, English and Mongolian (fig. 2).

The establishment of BIC can provide a safe mechanism of the interstate cooperation and facilitate the efficient functioning of the information system of environment protection with the purpose of maintaining complex management of natural resources in the transboundary basin of Lake Baikal.

BIC is to pursue the following tasks:

- information-analytical support of the main groups of consumers of natural and resource-oriented information (state bodies of the federal authorities, regional authorities of the Russian Federation and Mongolia, local self-administration bodies as well as public organizations and individuals);
- production of information resources on nature management and environment protection, required for maintaining sustainable development of the Russian Federation and Mongolia;
- accelerating the procedures of information processing from collecting primary geo-data to the analysis of converted data;
- improving the quality of data processing and securing the storage of nature-resource information;
- maintaining the transparency and manageability of the information processes on the territory of the transboundary basin of Lake Baikal.

The major technological module of BIC is the GIS of Lake Baikal basin as the program-technical complex of information resources and technologies of data collection and analysis. It comprises information, analytical and technological sub-systems on the basis of Arc GIS package and geo-databank. The telecommunication access to GIS is provided through the website (<http://bic.iwlearn.org>), making possible interactive work on the BIC server. The BIC organization will facilitate:

- unification of telecommunication resources of three federation subjects of the Russian Federation (Republic of Buryatia, Irkutsk Oblast and Zabaikalski Krai) and Mongolia and thus the establishment of the single information space of the transboundary territory, which would enable the administrative and planning bodies of the two countries to uphold unified economic, social, legislative and environmental policy for the sustainable development of the region;
- use of materials for the decision-making by the state department and municipal bodies in charge of environment protection and rational use of natural resources and responsible for maintaining the sustainable development of the region;
- formation of the multi-layered network service, facilitating the access to the timely and reliable information on the chosen theme and functioning on the basis of the unified database and information exchange standards;

The development of BIC could provide the decision-makers of all levels with the required metrical indicators and parameters, processing algorithms as well as enable them to take scientifically-grounded decisions. This initiative would serve as a prerequisite for the establishment of the transboundary infrastructure of spatial data and the formation of interstate GIS.

Assessment of the tourist attractiveness of the southeastern part of the Irkutsk region

Mirsaeva N.A., Ivanova A.A.

Kazan Federal University, Kazan, Russia

E-mail: NAMirsaeva@kpfu.ru, asya7496@gmail.com

The article analyzes the tourism potential of the southeastern part of the Irkutsk region on the basis of the Tourism Climate Index (TCI). The analysis of the long-term dynamics of this index is carried out, the main spatial and temporal patterns in its distribution are revealed. As the initial data, 8-term data of the Federal State Budgetary Institution "RIHMI-WDC" of the main meteorological parameters of 7 weather stations of the Irkutsk region (Balagansk, Bayandai, Bolshoe Goloustnoye, Zhigalovo, Inga, Irkutsk, Khomutovo) and one weather station of the Republic of Buryatia (Davsa) from 1988 to 2018 were used.

To assess the tourist attractiveness of the study area, the TCI values for January and July were used, since these months can be attributed to the most touristically busy.

Winter can be attributed to the most unattractive time to visit the Irkutsk region in terms of climate and weather. The short duration of a sunny day, high wind speed, a large amount of precipitation, and low air temperatures make the greatest contribution to the deterioration of the tourist attractiveness of the region in January.

The least attractive for tourists, in terms of climate, is the coast of Lake Baikal, since the TCI values in this territory and on average in the region can be attributed to "very unfavorable". The summer period, on the contrary, is the most attractive for tourists.

The greatest contribution to the formation of TCI values is made by the long duration of the sunny day, low cloud cover and lower wind speeds compared to winter.

In July, the dynamics of changes in the average monthly TCI values is most pronounced in the entire study area. All values are above the mark of 65 points, which indicates a "good" tourist attraction of the area. At the same time, the TCI values obtained for the territory on average improved from "good" to "very good".

According to the assessment of the tourist attractiveness of the south-eastern part of the Irkutsk region, the following conclusions were obtained:

1. The most attractive month for tourism is July, especially in places remote from Lake Baikal (Balagansk, Bayandai, Zhigalovo, Inga), the least – January.
2. For the entire study period from 1988 to 2018, there is a tendency to increase the TSI values, and, consequently, to improve the potential of the region.
3. Based on the above analysis of the tourist potential of the territory, we can make a recommendation that the most comfortable, for the average person, climatic conditions of this region are observed in the summer period from July to August.

Оценка туристической привлекательности юго-восточной части Иркутской области

Мирсаева Н.А., Иванова А.А.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

E-mail: NAMirsaeva@kpfu.ru, asya7496@gmail.com

В работе произведен анализ туристического потенциала юго-восточной части Иркутской области на основе индекса туристической привлекательности Tourism Climate Index (TCI). Проведен анализ многолетней динамики указанного индекса, выявлены основные пространственно-временные закономерности в его распределении. В качестве исходных данных использовались 8-срочные данные ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» основных метеорологических параметров 7 метеостанций Иркутской области (Балаганск, Баяндай, Большое Голоустное, Жигалово, Инга, Иркутск, Хомутово) и одной метеостанции Республики Бурятия (Давса) с 1988 по 2018 гг.

Для оценки комфортности климата рассчитывался модифицированный индекс Мичковского [1]:

$$TCI = 2 \times (4CId + CIa + 2R + 2S + W) \quad (1)$$

где CId – дневной суб-индекс комфортности CIa – суточный суб-комфортности, R , S и W – суб-индексы соответственно осадков, длительности светового дня и скорости ветра [2].

Величине TCI ставится в соответствие «климатическая привлекательность» (табл. 1).

Таблица 1. Рейтинг «климатической привлекательности» в зависимости от значения ТСИ.

Значение ТСИ	Оценка
90-100	Идеальная
80-89	Превосходная
70-79	Очень хорошая
60-69	Хорошая
50-59	Приемлемая
40-49	Маргинальная
30-39	Неблагоприятная
20-29	Очень неблагоприятная
10-19	Экстремально неблагоприятная
<10	Неприемлемая

Для оценки туристической привлекательности исследуемой территории были использованы значения ТСИ за январь и июль, т.к. данные месяцы можно отнести к наиболее туристически загруженным.

Зимний период можно отнести к наиболее непривлекательному времени для посещения Иркутской области в плане климата и погоды. Малая продолжительность солнечного дня, высокая скорость ветра, большое количество осадков, низкие температуры воздуха вносят наибольший вклад в ухудшение туристической привлекательности области в январе.

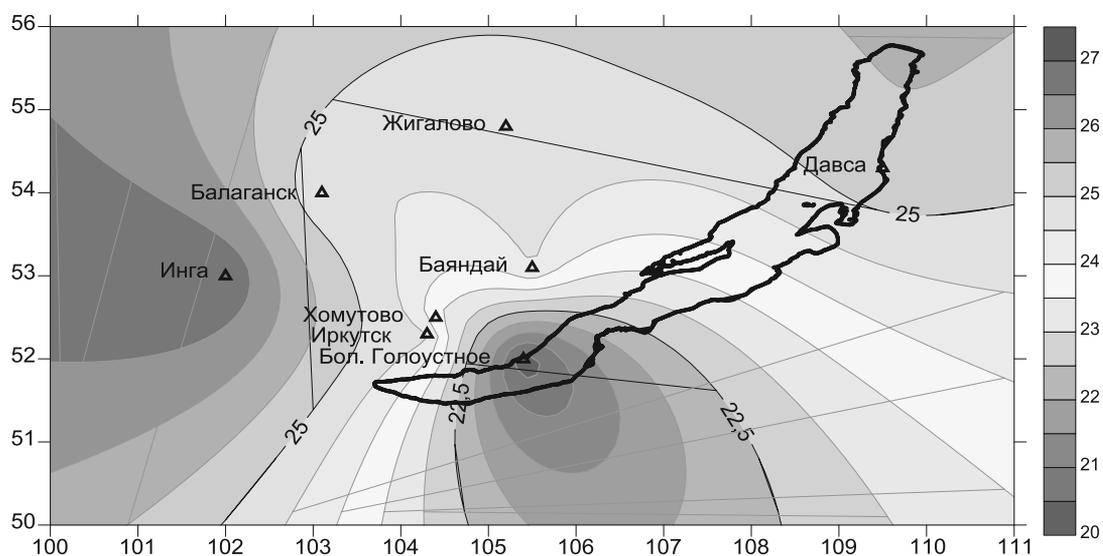


Рис. 1. Среднемесячные значения ТСИ в январе.

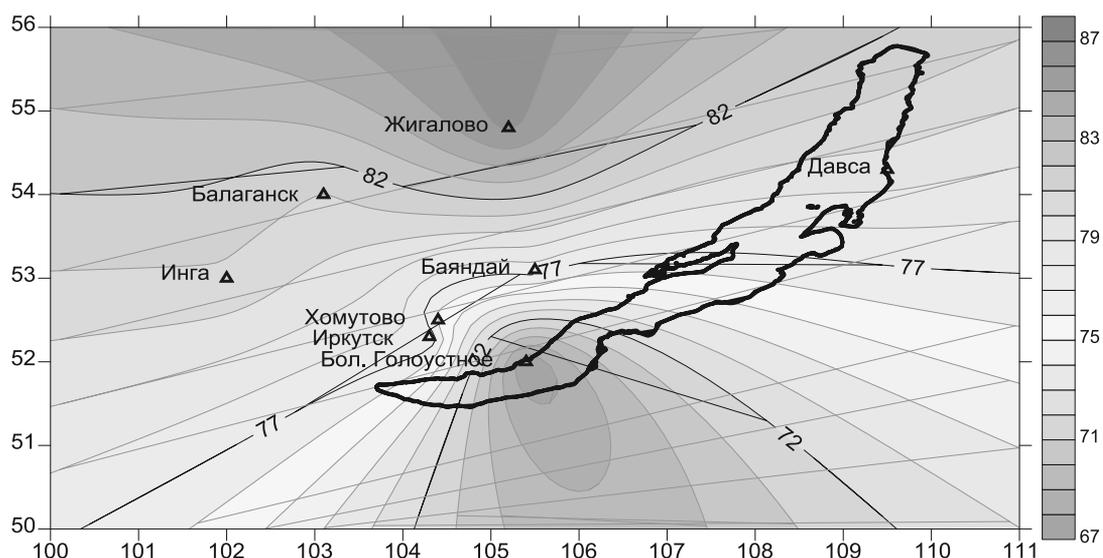


Рис.2. Среднемесячные значения ТСИ в июле.

Так, на рисунке 1 видно, что наименее привлекательным для туристов, в плане климата, является побережье озера Байкал, т.к. значения ТСИ на данной территории и в среднем по области можно отнести к «очень неблагоприятным» (табл. 2).

Летний период, наоборот, является наиболее привлекательным для туристов.

Наибольший вклад в формирование значений ТСИ вносят большая продолжительность солнечного дня, малые значения облачности и меньшие, по сравнению с зимой, скорости ветра.

На рисунке 2 видно, что распределение среднемесячных значений ТСИ в июле повторяет распределение в январе. Наименее благоприятные условия также наблюдаются на побережье озера Байкал, при этом средние значения по исследуемой области можно отнести к «очень хорошим» (табл. 2).

Таблица 2. Среднемесячные значения ТСИ по грациям.

Станция	январь	июль
Жигалово	Очень неблагоприятная	Превосходная
Давса	Неблагоприятная	Очень хорошая
Балаганск	Очень неблагоприятная	Превосходная
Баяндай	Очень неблагоприятная	Очень хорошая
Инга	Неблагоприятная	Превосходная
Иркутск	Очень неблагоприятная	Очень хорошая
Хомутово	Очень неблагоприятная	Очень хорошая
Бол. Голоустное	Очень неблагоприятная	Хорошая
Среднее по району	Очень неблагоприятная	Очень хорошая

За период с 1988 по 2018 гг. климат, с точки зрения оценки его туристической привлекательности, изменился в положительную сторону.

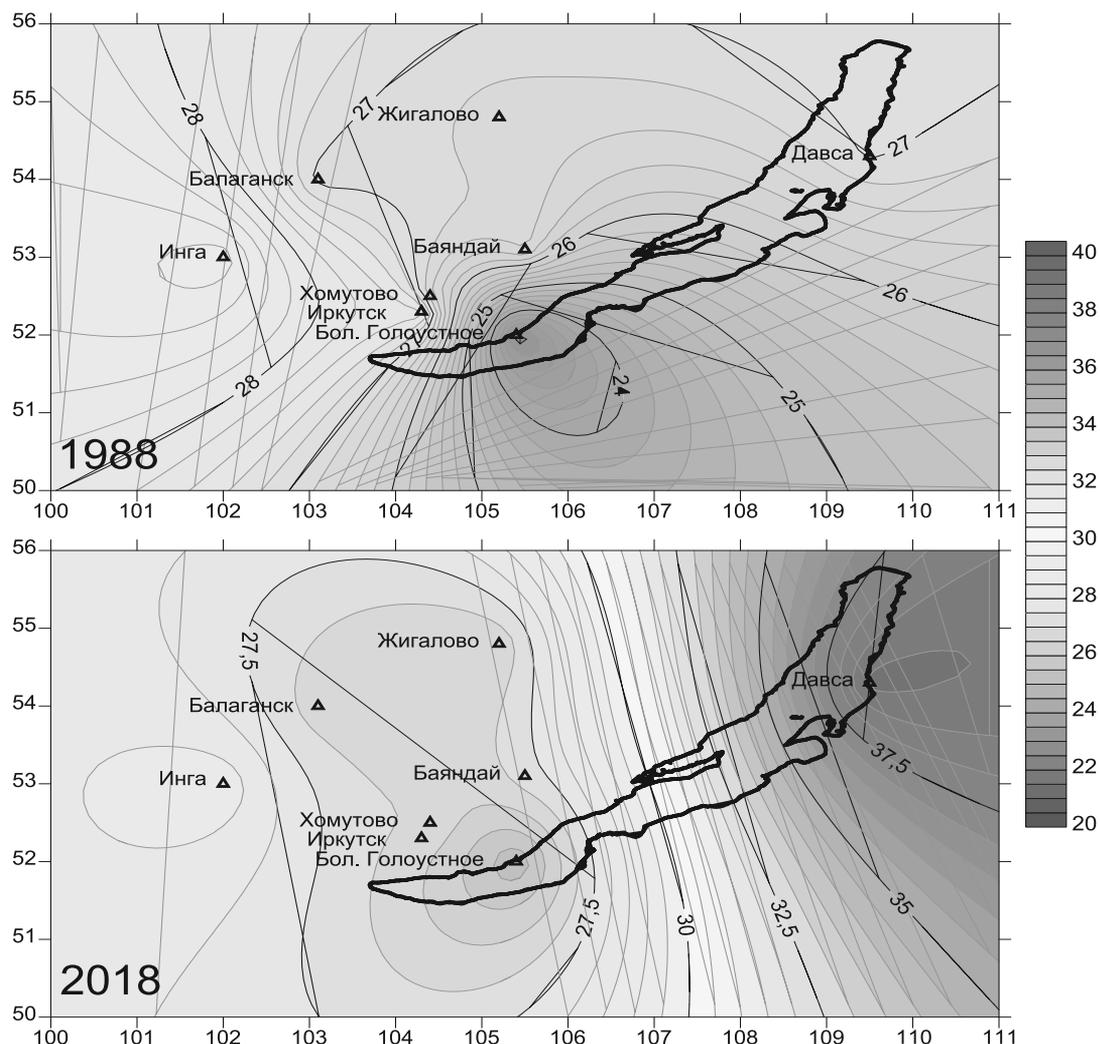


Рис. 3. Изменение распределения среднемесячных значений ТСИ в январе.

К примеру, на рисунке 3 видно, что наибольшее улучшение привлекательности произошло на станции Давса (12,1 балл (табл. 3), что можно связать с уменьшением скоростей ветра (по срочным данным) и увеличением температуры воздуха.

Таблица 3. Изменение среднемесячных значений ТСИ (баллы) в январе за период с 1988 по 2018 гг.

Станция	1988		2018		Изменение
	значение	оценка	значение	оценка	
Жигалово	26,7	Очень неблагоприятная	26,6	Очень неблагоприятная	-0,1
Давса	27,0	Очень неблагоприятная	39,2	Неблагоприятная	12,1
Балаганск	26,9	Очень неблагоприятная	26,7	Очень неблагоприятная	-0,2
Баяндай	26,6	Очень неблагоприятная	27,3	Очень неблагоприятная	0,6
Инга	28,9	Очень неблагоприятная	28,8	Очень неблагоприятная	-0,1
Иркутск	27,8	Очень неблагоприятная	26,8	Очень неблагоприятная	-1,0
Хомутово	26,6	Очень неблагоприятная	26,9	Очень неблагоприятная	0,3
Бол. Голоустное	22,8	Очень неблагоприятная	25,1	Очень неблагоприятная	2,3
Среднее по району	26,7	Очень неблагоприятная	28,4	Очень неблагоприятная	1,7

На остальных станциях изменение ТСИ в январе незначительно.

В июле динамика изменения среднемесячных значений ТСИ наиболее ярко выражена на всей исследуемой территории.

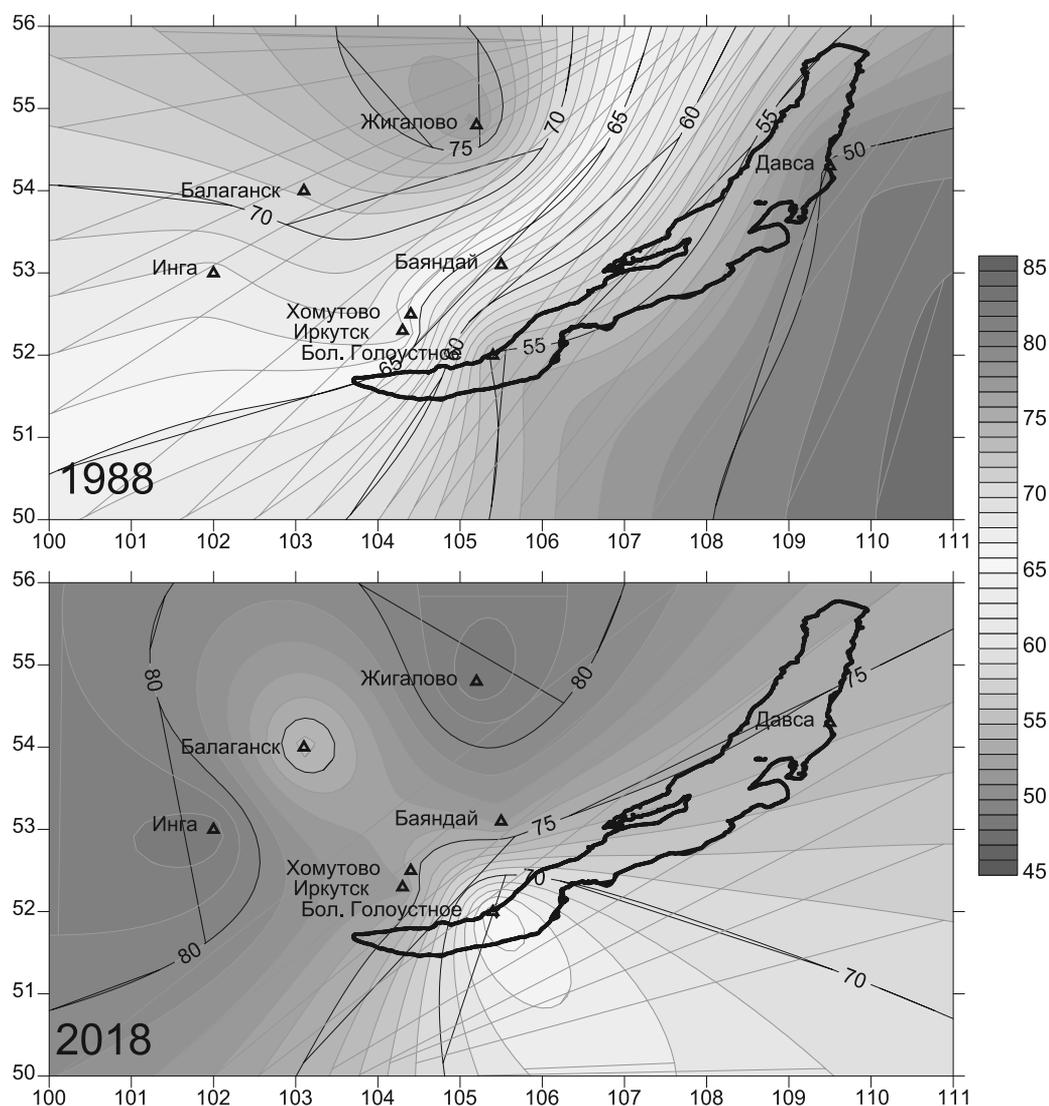


Рис. 4. Изменение распределения среднемесячных значений ТСИ в июле.

Как видно на рисунке 4, все значения находятся выше отметки в 65 баллов, что говорит о «хорошей» туристической привлекательности района. При этом, значения ТСИ, полученные по территории в среднем, улучшились с «хорошо» до «очень хорошо» (табл. 4).

Таблица 4. Изменение среднемесячных значений ТСИ (баллы) в июле за период с 1988 по 2018 гг.

Станция	1988		2018		Изменение
	значение	оценка	значение	оценка	
Жигалово	77,3	Очень хорошая	82,9	Превосходная	5,6
Давса	49,6	Маргинальная	74,4	Очень хорошая	24,7
Балаганск	71,1	Очень хорошая	73,4	Очень хорошая	2,2
Баяндай	62,9	Хорошая	77,4	Очень хорошая	14,5
Инга	67,6	Хорошая	82,7	Превосходная	15,0
Иркутск	67,8	Хорошая	77,5	Очень хорошая	9,7
Хомутово	65,5	Хорошая	75,3	Очень хорошая	9,8
Бол. Голоустное	54,6	Приемлемая	64,7	Хорошая	10,1
Среднее по району	64,6	Хорошая	76,0	Очень хорошая	11,5

Исходя из вышеприведенного анализа туристического потенциала юго-восточной части Иркутской области получены следующие выводы:

Наиболее привлекательным месяцем для туризма является июль, в особенности, в пунктах, отдаленных от о. Байкал (Балаганск, Баяндай, Жигалово, Инга), наименее – январь.

За весь исследуемый период с 1988 по 2018 гг. наблюдается тенденция на увеличение значений ТСИ, а, следовательно, на улучшение потенциала региона.

Наиболее комфортные, для среднестатистического человека, климатические условия данного региона наблюдаются в летний период с июля по август.

- Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 20-55-00014 Бел_а).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Z. Mieczkowski The tourism climatic index: a method of evaluating world climates for tourism, University of Manitoba, The Canadian Geographer, 1985 – PP. 220-233.
2. D. Scott, M. Ruddy, B. Amelung and M. Tang An Inter-Comparison of the Holiday Climate Index (HCI) and the Tourism Climate Index (TCI) in Europe, 2016, – 18 p.

