

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ
И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ НАУК ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ:**

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

Международной молодежной школы и конференции

CITES-2013,

Петрозаводск, Россия, 25 августа – 5 сентября 2013 г.



**COMPUTATIONAL
INFORMATION TECHNOLOGIES
FOR ENVIRONMENTAL SCIENCES:**

SELECTED AND REVIEWED PAPERS

presented at the International Young Scientists School and Conference

CITES-2013,

Petrozavodsk, Russia, August 25 – September 5, 2013

Организаторы CITES-2013

Сибирский центр климато-экологических исследований и образования
Институт вычислительной математики РАН
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ
Томский филиал Института вычислительных технологий СО РАН
Томский государственный университет
Петрозаводский государственный университет
Институт прикладных математических исследований КНЦ РАН

Благодарности за поддержку

Президиум РАН, РФФИ, NASA и NOAA через программу NEESPI, WMO.

CITES-2013 organizers

Siberian Center for Environment Research and Training
Institute for Numerical Mathematics RAS
Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS
Scientific Research Computer Center of the Moscow State University
Tomsk Branch of Institute of Computational Technologies SB RAS
Tomsk State University
Petrozdavodsk State University
Institute of Applied Mathematical Research KarSC RAS

Thanks

Support of RAS Presidium, RFBR, NASA and NOAA via NEESPI Program, WMO is acknowledged

Введение

Настоящий сборник содержит статьи, рекомендованные программным комитетом для опубликования. Данные статьи подготовлены участниками CITES-2013 (<http://www.scert.ru/ru/conference/cites2013>), в основном молодыми учеными, по материалам докладов, представленных ими на Международной конференции «Вычислительные и информационные технологии для наук об окружающей среде» и Рабочем совещании NEESPI/SIRS. Моделирование климатических процессов и информационно-вычислительные системы для наук о Земле, основные темы CITES-2013, дополняются в нем работами по геосферно-биосферным взаимодействиям, мониторингу и оценке современных климатических изменений в Северной Евразии и их последствиям, как для окружающей среды, так и для населения - основным темам Рабочего совещания NEESPI/SIRS. Сборник отражает современный уровень фундаментальных и прикладных работ по изучению различных аспектов глобальных и региональных климатических изменений и ход реализации крупных региональных проектов NEESPI и SIRS.

Председатель CITES-2013
Е.П. Гордов

Сопредседатели Рабочего совещания NEESPI/SIRS
**П.Я. Гройсман,
В.В. Зувев**

Preface

This volume comprises papers of participants of the CITES-2013 event (<http://www.scert.ru/en/conference/cites2013>) which were selected for publication by the Program Committee from those presented at the International Conference on Computational Information Technologies for Environmental Sciences and NEESPI/SIRS Workshop. The major themes of CITES-2013 are modeling of climate processes, and information and computer systems for Earth Science. They are complemented in this volume by articles on geosphere-biosphere interactions, monitoring and evaluation of current climate change in Northern Eurasia and their consequences, both for the environment and for the people which are the main issues of NEESPI/SIRS Workshop. The volume reflects the current level of basic and applied studies on various aspects of global and regional climate change and the implementation of large regional projects NEESPI and SIRS.

Chair of CITES-2013
E.Gorfov

Co-chairs of NEESPI/SIRS workshop
**P. Groisman,
V. Zuev**

Содержание / Content

Введение / Preface..... 3

Секция 1 Моделирование и анализ атмосферных процессов Session 1 Modeling and analysis of atmosphere processes

Kurbatskiy A., Kurbatskaya L.

Eddy mixing and Global Intermittency of Turbulence in the Environmental Flows of Regional Scale..... 8

Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И.

Вихревое перемешивание и глобальная перемежаемость турбулентности в течениях окружающей среды регионального масштаба 8

Tolstykh M.A., Shashkin V.V., Yurova A.Yu

Recent developments of the global semi-Lagrangian atmospheric model 12

Толстых М.А., Шашкин В.В., Юрова А.Ю

Усовершенствования глобальной полулагранжевой модели атмосферы..... 13

Iakovlev N.G., Golubeva E.N., Platov G.A.

On the formulation of the large-scale Arctic Ocean water and sea ice modeling problem..... 16

Яковлев Н.Г., Голубева Е.Н., Платов Г.А.

О постановке задачи моделирования крупномасштабного состояния вод и морского льда

Северного Ледовитого океана..... 17

Pavel Ya. Groisman, Richard G. Lawford

Northern Eurasia Earth Science Partnership Initiative (NEESPI) in the past two years 19

Frolkis V.A., Kokorin A.M

Assessment of the impact of different stratospheric aerosol models from volcanic origin on the Earth radiation-thermal regime 22

Фролькис В. А., Кокорин А. М.

Оценка воздействия различных моделей стратосферного аэрозоля вулканического происхождения на радиационно-термический режим Земли..... 22

Зуев В.В.

Тропические вулканы и глобальные изменения озона и климата..... 26

Zuev V.V.

Tropical volcanoes, global ozone depletion, and climate change..... 27

Пененко А.В.

Алгоритм многомерного вариационного усвоения данных для моделей конвекции-диффузии 28

Penenko A.V.

Multidimensional variational data assimilation algorithm for convection-diffusion models 29

Константинов П.И., Варенцов М.И., Самсонов Т.Е.

Новые подходы к моделированию процессов теплообмена в пограничном слое атмосферы над Московским мегаполисом 32

Konstantinov P.I., Varentzov M.I., Samsonov T.E.

New approaches for thermal exchange processes simulation in Moscow's atmospheric boundary layer 34

Юдин М.С.

Гравитационные течения в атмосфере: модели конечных разностей и конечных элементов..... 35

Yudin M.S.

Gravity currents in the atmosphere: FDM and FEM models 35

Monzikova A.K., Kudryavtsev V.N., Soren E. Larsen

Use of a planetary boundary layer model to estimate wind power potential of the Gulf of Finland 38

Монзикова А.К., Кудрявцев В.Н., Soren E. Larsen

Использование модели пограничного слоя для оценки ветроэнергетического потенциала Финского залива 38

Vargin P.N., Peters D., Gabriel A.

Влияние волновых цепочек на активность планетарных волн в нижней стратосфере Антарктики в сентябре 2002 г..... 40

Vargin P.N., Peters D., Gabriel A.

Impact of extratropical Rossby wave trains on planetary wave activity in the polar southern lower stratosphere in September 2002..... 41

Мартынова Ю.В., Зарипов Р.Б., Крупчатников В.Н.

Чувствительность прогнозов WRF ARW к выбору карт землепользования 41

Martynova Yu.V., Zaripov R.B., Krupchatnikov V.N

Sensitivity of WRF ARW forecasts to choice of landuse maps 42

Секция 2 Моделирование и анализ состояния подстилающей поверхности и ее гидрологического режима

Session 2 Modeling and analysis of land surface state and its hydrological regime

Георгиади А.Г., Милукова И.П., Капшутина Е.А., Бородин О.О.

Речной сток в бассейнах крупнейших рек южного макросклона Русской равнины в теплые климатические эпохи прошлого, настоящего и будущего 43

Zdorovennova G., Zdorovennov R., Palshin N., Terzhevik A.

Water temperature, ice and albedo dynamics in a shallow ice-covered lake in spring 44

Здоровеннова Г., Здоровеннов Р., Пальшин Н., Тержевик А.

Динамика температуры воды, ледового режима и альбедо поверхности мелководного покрытого льдом озера весной 44

Дюкарев Е.А., Гордов Е.П., Дюкарев А.Г., Аутрей Б., Лэйн Ч.Р.

Идентификация, описание и функциональная оценка изолированных болот 47

Dyukarev E.A., Gordov E.P., Dyukarev A.G., Autrey B., Lane C.R.

Identification, characterization, and functional assessments of isolated wetlands 47

Qianlai Zhuang

Land-use and land-cover changes and their effects on carbon and water cycling in Northern Eurasia 49

Shiklomanov A.I., Prusevich A.A.

Modeling hydrological processes across Northern Eurasia with a new Water Balance Model- Transport from Anthropogenic and Natural Systems (WBM-TrANS)

Olchev A.

Application of a process-based Mixfor-SVAT model to estimate a sensitivity of net CO₂ exchange and evapotranspiration of boreal forests to climate changes 53

Ольчев А.В.

Применение процесс-ориентированной Mixfor-SVAT модели для оценки чувствительности нетто СО₂ обмена и эвапотранспирации бореальных лесов к климатическим изменениям 53

Марченко С., Виссер Д., Романовский В.Е., Чапман В., Фролкинг С., Воли Д.

Гидротермическое моделирование состояния многолетнемерзлых пород и сезонно-талого слоя для оценки углеродного цикла в Северной Евразии 56

Marchenko S., Wissler D., Romanovsky V., Chapman W., Froelking S., Walsh J.E.

Coupled Hydrological and Thermal Modeling of Permafrost and Active Layer Dynamics: Implications to Permafrost Carbon Pool in Northern Eurasia 57

Druzhinin P.V., Shkiperova G.T.

Relationship of nature and socio-economic development 60

Дружинин П.В., Шкиперова Г.Т.

Взаимосвязь природы и социально-экономического развития регионов 61

Charles R. Lane, Hongxing Liu, Oleg Anenkhonov, Brad Autrey, Victor Chepinoga

Using high-resolution multispectral WorldView-2 imagery and Indicator Species Analysis to map freshwater deltaic wetlands 63

Зиновьев А.Т., Галахов В.П., Кошелева Е.Д., Ловцкая О.В.

Влияние глобальных изменений климата на гидрологический режим рек юга Западной Сибири 64

Zinoviev A., Galakhov V., Kosheleva E., Lovtskaya O.

Influence of global climate changes on hydrological regime of rivers in the south West Siberia 65

Секция 3 Моделирование и анализ климата

Session 3 Climate modeling and analysis

Penenko V.V., Tsvetova E.A., Penenko A.V.

Advanced variational modeling technologies for environmental studies 70

Пененко В.В., Цветова Е.А., Пененко А.В.

Перспективные вариационные технологии моделирования для изучения окружающей среды 71

Perekhodtseva E.V.

On the operative hydrodynamic-statistical forecast of summer storm winds and heavy precipitation over the North West territory of Russia including territory of Karelia 73

Крупчатников В.Н., Мартынова Ю.В.

Динамика общей циркуляции атмосферы Северного полушария при климатических изменениях 76

Krupchatnikov V., Martynova Yu.

Dynamics of general circulation atmosphere in Northern Hemisphere under climate changes 77

Морару Е.И., Логинов С.В., Инполитов И.И.

Изменчивость трендов температуры поверхности океана, тепловых потоков и эффективного излучения в северной Атлантике за период глобального потепления 1975-2011 гг. 80

<i>Ushakov K., Ibrayev R.</i>	
Simulation of the World Ocean climate by means of the INM – IO RAS numerical model	82
<i>Ушаков К.В., Ибраев Р.А.</i>	
Воспроизведение климата Мирового океана с помощью численной модели ИВМ – ИО РАН	83
<i>Andrei Sokolov, Erwan Monier, Adam Schlosser, Jeff Scott and Xiang Gao</i>	
Studying different sources of uncertainty in the projection of the future climate change over Northern Eurasia	87
<i>Larissa Nazarenko, Nick Tausnev, Gavin Schmidt</i>	
Simulation of the present and future climate change with the GISS ModelE2	87
<i>Pikaleva A.A., Nadyozhina E.D., Shkolnik I.M.</i>	
Investigation of natural methane emission over the territory of Northern Eurasia in the late XX and XXI centuries using the MGO regional climate model	91
<i>А.А. Пикалёва, Е.Д. Надёжина, И.М. Школьник</i>	
Исследование естественной эмиссии метана на территории Северной Евразии в XX и XXI веках с помощью региональной климатической модели ГГО	92
<i>Borzenkova A.V., Shmakin A.B.</i>	
Changes of climatological conditions of automobile transport functioning in north of European part of Russia.....	93
<i>Борзенкова А.В., Шмакин А.Б.</i>	
Изменения климатических условий функционирования автомобильного транспорта на севере европейской территории России	94
<i>Shulgina T.M., Gordov E.P.</i>	
Temperature and precipitation extreme changes in Siberia.....	97
<i>Shtabkin Y.A., Moiseenko K.B.</i>	
Seasonal variations of CO and NOx near-surface concentrations in central Siberia: observations and model simulations	100
<i>Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б.</i>	
Сезонные вариации приземных концентраций CO и NOx в центральной Сибири: наблюдения и численное моделирование	101
<i>Guzova E.N., Zavalishin N.N.</i>	
Modeling carbon dioxide emissions dynamics from the West Siberia southern taiga bogs	105
<i>Гузова Е.Н., Завалишин Н.Н.</i>	
Моделирование динамики эмиссии парниковых газов с верховых болот южной тайги Западной Сибири.....	105
<i>Martynova Yu.V., Krupchatnikov V.N.</i>	
Influence of anthropogenic climate forcing on some storm track characteristics in the Northern Hemisphere	108
<i>Мартынова Ю.В., Крупчатников В.Н.</i>	
Влияние климатических возмущений антропогенного происхождения на некоторые характеристики шторм-треков Северного полушария	109
<i>Morozova P., Kislov A.</i>	
Reaction of mountain glaciers to climate variability: a stochastic aspect	111
<i>Морозова П.А., Кислов А.В.</i>	
Реакция горного оледенения на колебания климата: стохастический аспект.....	112

Секция 4 Данные и информационно-вычислительные системы для наук о Земле

Session 4 Data and information-computational systems for the Earth Science

<i>Maksyutov S., Oda T., Saito M., Valsala V.K. Belikov DA., Ito A.</i>	
Integrated global carbon cycle modeling system for studies in atmospheric CO ₂ data assimilation.....	116
<i>Okladnikov I.G., Gordov E.P., Titov A.G., Bogomolov V.Yu., Martynova Yu.V., Shulgina T.M.</i>	
Web-GIS application for analysis of georeferenced data	118
<i>Arzhanova N.M., Bulygina O.N., Razuvaev V.N.</i>	
Roshydromet's specialized hydrometeorological datasets for climate monitoring and climate research	120
<i>Аржанова Н.М., Булыгина О.Н., Разуваев В.Н.</i>	
Специализированные массивы гидрометеорологических данных Росгидромета для мониторинга климата и климатических исследований	120
<i>Kadochnikov A.A.</i>	
Organization of access to observational data using web services for monitoring systems the state of the environment	121

Кадочников А.А.

Организация доступа к данным наблюдений с помощью веб-сервисов для систем мониторинга состояния окружающей природной среды.....	121
<i>Titov A.G., Gordov E.P., Okladnikov I.G.</i>	
Architecture of integrated system of geospatial data services for climate research	124

Секция 5 Математические методы в экологии

Session 5 Mathematical methods in ecology

Rettieva A.N.

Bioresource management problems with asymmetric players.....	127
--	-----

Реттеева А.Н.

Задачи управления биоресурсами с несимметричными игроками.....	128
--	-----

Smirnov N.V., Kirillov A.N.

Mathematical modeling of nitrification and organic matter oxidation processes in the biological treatment system.....	131
---	-----

Смирнов Н.В., Кириллов А.Н.

Математическое моделирование процессов нитрификации и окисления органического вещества в системе биологической очистки	132
--	-----

Tyutyunov Yu., Kovalev O., Titova L., Berdnikov S.

Spatial demo-genetic model for studying phenomena observed during introduction of the ragweed leaf beetle <i>zygogramma suturalis</i> f. in the South of Russia	
---	--

Тютюнов Ю.В., Ковалев О.В., Титова Л.И., Бердников С.В.

Пространственная демогенетическая модель в изучении феноменов, наблюдаемых при интродукции амброзиевого <i>zygogramma suturalis</i> f. листоеда на юге России.....	136
--	-----

Chubatov A.A., Karmazin V.N.

Problem of intensity identification of atmospheric pollution source.....	138
--	-----

Чубатов А.А., Кармазин В.Н.

Задача идентификации интенсивности источника загрязнения атмосферы.....	139
---	-----

Pridacha V.B., Sazonova T.A., Olchev A.V.

Effects of environmental conditions on CO ₂ / H ₂ O exchange of <i>Betula</i> species in the taiga zone of North-West Russia	142
--	-----

Придача В.Б., Сазонова Т.А., Ольчев А.В.

Влияние условий внешней среды на показатели CO ₂ и H ₂ O обмена растений рода <i>Betula</i> таежной зоны Северо-Запада России	143
---	-----

Kisternaya M.V., Kozlov V.A., Leri M.M., Pavlov Y.L.

Forecast of the emerge period of <i>hadrobregmus pertinax</i> (L.) – the pest of the historic timber structures	145
---	-----

Кистерная М.В., Козлов В.А., Лери М.М., Павлов Ю.Л.

Прогнозирование периода лёта жука-ксилотрофа – вредителя памятников деревянного зодчества....	145
---	-----

Pavlov Yu., Khvorostyanskaya E.

Probabilistic model of host-parasite system.....	149
--	-----

Павлов Ю.Л., Хворостянская Е.В.

Вероятностная модель системы паразит-хозяин.....	149
--	-----

Ivashko A.A.

Multistage Mate Choice Game with Age Preferences.....	152
---	-----

Ивашко А.А.

Многошаговая игра наилучшего взаимного выбора с возрастными предпочтениями.....	152
---	-----

Секция 6 Выполняемые в Северной Евразии Программы

Session 6 Core environmental activities in Northern Eurasia

Gutman G., Groisman P.

The NASA LCLUC Program in Northern Eurasia: An Update.....	154
--	-----

Gordov E.P.

Siberia Integrated Regional Study: the state of the art and projections	156
---	-----

Gordova Yu., Martynova Yu., Shulgina T., Titov A., Genina E., Gorbatenko V., Gordov E., Groisman P.Ya.,

Lykosov V.N.

NEESPI/SIRS capacity building program: from CITES/ENVIROMIS YS conferences to continuous learning on the base of web-GIS platform «Climate»	157
---	-----

Секция 1

Моделирование и анализ атмосферных процессов

Session 1

Modeling and analysis of atmosphere processes

ПРИГЛАШЕННЫЕ ДОКЛАДЫ

Eddy mixing and Global Intermittency of Turbulence in the Environmental Flows of Regional Scale

^{1,2} Kurbatskiy A., ³Kurbatskaya L.

¹Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: kurbat@itam.nsc.ru, L.Kurbatskaya@ommgp.sccc.ru

Certain qualitative features of the eddy mixing in an atmospheric boundary layer (ABL) during stronger stratification are highlighted using the simulations with the mesoscale RANS turbulence scheme. Behavior of turbulent eddy mixing coefficients for momentum and heat in this study is consistent with the representation that the flow can sustain propagating internal waves that can effectively transport momentum, but not heat. This behavior is in good agreement with observational results for stably stratified atmospheric boundary layer flows. This paper is focused also on the modelling with use of the RANS turbulence scheme of intermittent turbulence as near to a surface and about the LLJ, and of turbulent Prandtl number too. The role of the turbulent diffusion processes (the statistical moments of the third order) in generation of intermittent turbulence is discussed. The simulation results agree with the LES simulation, showing presence of the intermittency of the TKE as near to a surface and the intermittent turbulence below of the LLJ.

Вихревое перемешивание и глобальная перемежаемость турбулентности в течениях окружающей среды регионального масштаба

^{1,2} Курбацкий А.Ф., ³Курбацкая Л.И.

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Россия

³ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: kurbat@itam.nsc.ru, L.Kurbatskaya@ommgp.sccc.ru

RANS схема турбулентности [1], включающая эффект внутренних гравитационных волн, применяется для анализа структуры течения и статистики турбулентности устойчиво стратифицированного атмосферного пограничного слоя (АПС). Акцент делается на анализе возможности RANS метода моделирования турбулентности в описании некоторых особенностей вихревого перемешивания, энергетики и глобальной перемежаемости турбулентности в устойчивом АПС. Анализируется возможность описания в рамках RANS приближения перемежающейся структуры турбулентности как вблизи поверхности, так и поднятой турбулентности в окрестности струйного течения низкого уровня, формирующегося наверху устойчивого пограничного слоя. Обсуждается роль процессов турбулентной диффузии (статистических моментов третьего порядка) в генерации перемежающейся турбулентности. Результаты численного моделирования согласуются с результатами LES моделирования и натурных наблюдений, показывая наличие перемежаемости кинетической энергии турбулентности как вблизи поверхности, так и поднятой турбулентности ниже струйного течения низкого уровня.

1. Вихревое перемешивание: коэффициенты диффузии импульса и тепла.

С ростом устойчивости АПС вертикальный перенос импульса и тепла турбулентными вихрями существенно ослабляется стратификацией. Возрастающая при этом активность внутренних гравитационных волн способствует поддержанию импульса течения, но не тепла. Включение в трехпараметрическую $E - \varepsilon - \langle \theta^2 \rangle$ RANS схему стратифицированной турбулентности [1] эффекта воздействия внутренних волн на перенос импульса и тепла позволяет корректно воспроизвести поведение вихревых коэффициентов диффузии импульса и тепла (рис. 1) в согласии с данными измерений в атмосфере [2].

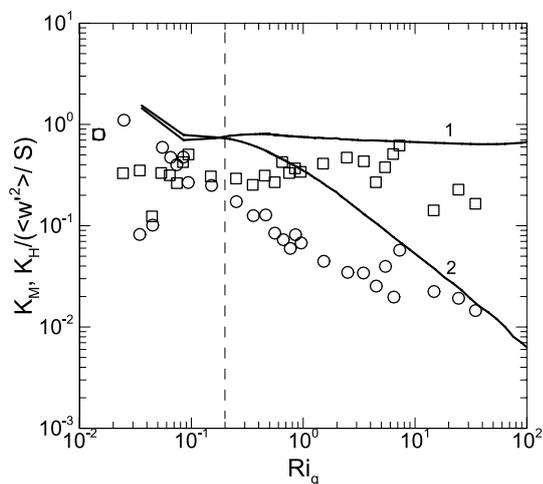


Рис. 1. Коэффициенты вихревой диффузии импульса K_m (линия-1) и тепла K_h (линия -2), нормализованные на величину $\overline{w^2}/S$, как функции числа Ричардсона в устойчиво стратифицированном планетарном пограничном слое. Данные измерений [2]: K_m – \circ , K_h – \square .

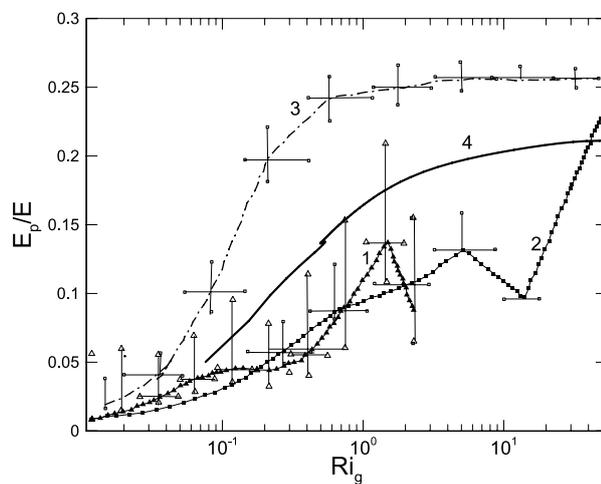


Рис. 2. Отношение турбулентной потенциальной энергии к полной турбулентной энергии, E_p / E , в зависимости от градиентного числа Ричардсона Ri_g . Линия 1 – измерения в атмосфере, линия 2 – лабораторный эксперимент, линия 3 - LES расчет [3], линия 4 - результаты трехпараметрической RANS модели.

3. Энергетика устойчиво стратифицированного АПС

Трехпараметрическая RANS схема турбулентности, включая уравнения баланса для турбулентной кинетической энергии (ТКЕ) и турбулентной потенциальной энергии (ТПЕ), позволяет анализировать преобразование ТКЕ в стратифицированных геофизических течениях. Рис. 3 показывает вычисленную фракцию ТПЕ, E_p / E ($E = E_p + E_k$ - полная энергия турбулентности) как функцию числа Ri_g вместе с недавними данными измерений в атмосфере (линия 1), лаборатории (линия 2) и LES расчетом [3]. Результаты численного моделирования по трехпараметрической RANS - модели (линия 4) и LES расчет (линия 3) показывают монотонную зависимость: отношение E_p / E увеличивается с ростом числа Ri_g и стремится к конечному значению $E_p / E \approx 0,21$.

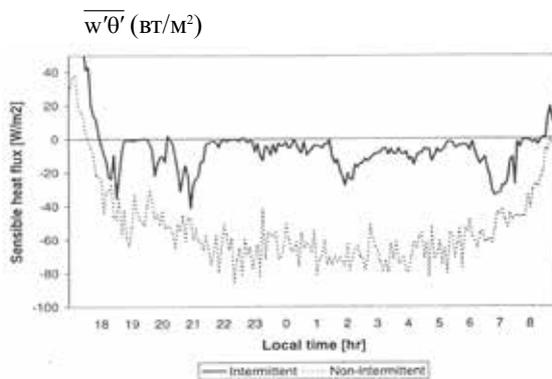
4. Глобальная перемежаемость турбулентности в устойчивом атмосферном АПС

Термически устойчивый пограничный слой формируется при охлаждении поверхности. Если при этом отсутствуют механизмы ускорения потока воздуха вблизи поверхности, генерация турбулентности может нейтрализоваться деструкцией, вызванной термически устойчивой стратификацией. Однако и в этих условиях наблюдениями часто фиксируются локализованные явления взрывного характера, так называемые 'бёрстинги' (bursts). Поэтому отличительная особенность устойчиво стратифицированных пограничных слоев связана с перемежающейся турбулентностью, которая характеризуется ко-

роткими периодами турбулентного состояния (bursts) и промежуточными периодами относительно слабых флуктуаций. При не подавленных стратификацией вихрях на всех масштабах в периоды слабой турбулентности перемежающаяся турбулентность понимается, как глобальная [4]. Пример глобальной перемежаемости на рис. 3 (сплошная линия) из [5] показывает наблюдаемое развитие во времени турбулентного потока тепла на поверхности в условиях понижения ее температуры при относительно небольших скоростях движения воздуха. Отчетливо видно чередование периодов интенсивной турбулентности ('бёрстингов') с большими отрицательными потоками тепла и более спокойных периодов с очень малыми величинами потока тепла. Прерывистая, перемежающаяся турбулентность вызывается изменениями в средней эволюции полей скорости и температуры вблизи поверхности. Как видно из рис. 1, турбулентные бёрстинги имеют не периодический характер.

В настоящем исследовании предпринята попытка выяснить чувствительность RANS схемы турбулентности высокого уровня замыкания в воспроизведении перемежающегося характер турбулентности в устойчивом атмосферном пограничном слое как вблизи поверхности, так и в окрестности струйного течения в верхней части пограничного слоя.

Представленные ниже результаты вычислительного эксперимента ставили своей целью выяснение чувствительности трехпараметрической RANS схемы турбулентности к воспроизведению перемежающейся турбулентности как вблизи твердой поверхности, так и 'поднятой' турбулентности, генерируемой струйным течением низкого уровня над термически устойчивым АПС.



Локальное время (в часах)

Рис.3. Пример глобальной перемежаемости: вертикальный турбулентный поток тепла вблизи поверхности [2]. Толстой линией показан случай с глобальной перемежаемостью в условиях небольших скоростей движения воздуха. Точечная линия показывает поток тепла в условиях повышенных скоростей движения воздуха над поверхностью; почти на всем временном интервале наблюдений фиксируется обычная, не перемежающаяся турбулентность.

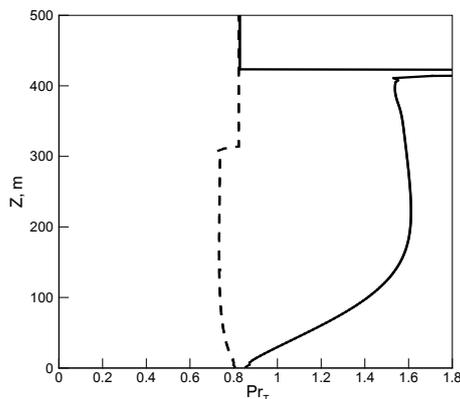


Рис. 5а. Вертикальный профиль турбулентного числа Прандтля, вычисленный по трехпараметрической RANS схеме турбулентности. Сплошная линия - вычисление с учетом эффекта внутренних гравитационных волн в поддержании импульса течения в устойчиво стратифицированном пограничном слое, штриховая линия - вычисление без учета эффекта внутренних волн.

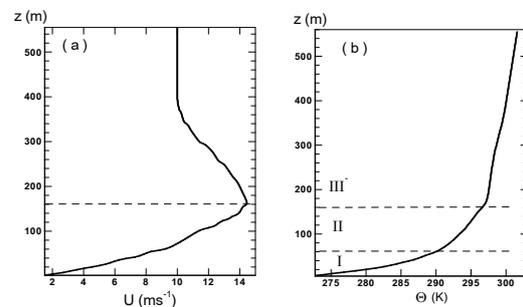


Рис. 4. Струйный профиль скорости (а) и профиль потенциальной температуры (б) в квазиустановившемся состоянии сильно устойчивого пограничного слоя (после 9 часов интегрирования).

Турбулентное число Прандтля представляет собой относительную эффективность турбулентного перемешивания для импульса по отношению к теплу. Это важный безразмерный параметр, применяемый для параметризации потока в устойчивом пограничном слое [6] и обычно априори формулируется [7], как зависящая от устойчивости константа. Поскольку в трехпараметрической RANS схеме турбулентности независимо вычисляются вихревые коэффициенты импульса и тепла (значение Pr_t не предписывается заранее), вариация числа Прандтля Pr_t в устойчивом пограничном слое может быть сопоставлена как с LES [8], так и DNS моделированием [7]. Такое сопоставление представлено на Рис. 5а, б. Без учета эффекта внутренних гравитационных волн на турбулентный перенос импульса в условиях устойчивой стратификации (штриховая линия на рис. 5а) вертикальный профиль турбулентного числа Прандтля не имеет возрастающего тренда с высотой (сплошная линия на рис. 5а), полученного как при численном LES моделировании [8], так и DNS моделировании [7] (рис. 5б).

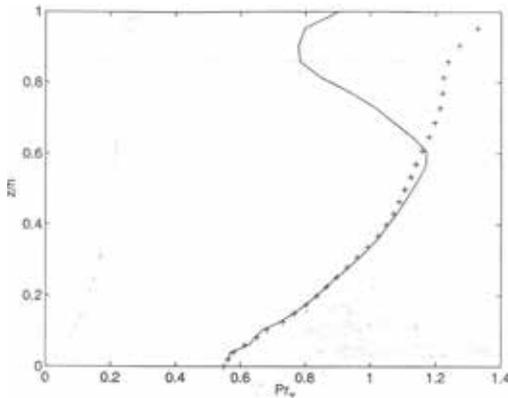


Рис. 5б. Вертикальные профили турбулентного числа Прандтля (сплошная линия – LES моделирование [8], символы в форме крестиков - DNS моделирование [7]) для случая умеренного охлаждения поверхности ($(w'\theta')_s = -0,02 \text{ К м с}^{-1}$).

Низкоуровневая струя и поднятая турбулентность

Турбулентность, генерируемая сдвигом скорости в окрестности струи численно моделировалась по LES схеме в [9, 10].

На рис. 6а приведены вычисленные временные ряды перемежающейся КЭТ, вычисленные по RANS схеме турбулентности для квазиустановившегося состояния сильно устойчивого пограничного слоя (с форсингом на поверхности в виде задания постоянного отрицательного потока тепла

$(w'\theta')_s = -0,05 \text{ К м с}^{-1}$). Верхняя диаграмма (1) – область генерации КЭТ сдвигом над струей; нижние три диаграммы, (2)-(4), охватывают область под струей. Хотя сдиг возрастает как ниже, так и выше струи, турбулентные бёрстинги с большей вероятностью возникают в области под струей. На обоих рисунках (6а,б) можно видеть, что между спокойными периодами наблюдается ‘взрывное’ возрастание КЭТ в пределах сравнительно короткого временного масштаба. Кроме того, можно видеть, что интенсивность порождения в области под струей выше, чем над струей. Такой же вывод сделан в [11] при анализе данных натуральных измерений CASES-99.

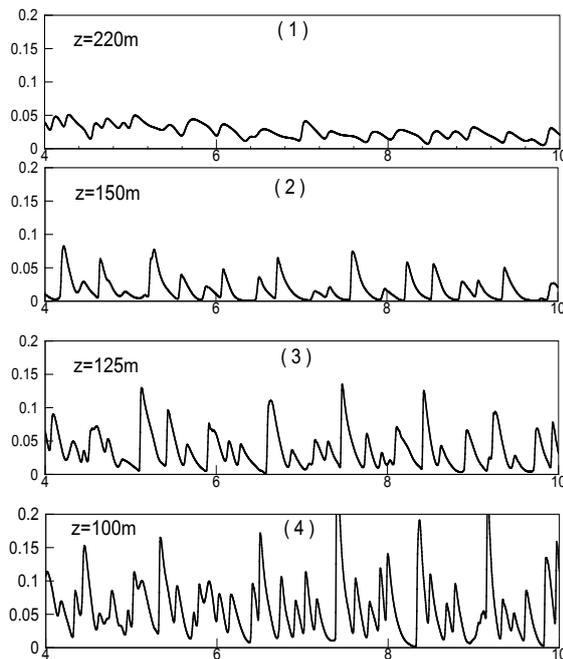


Рис. 6а Временные ряды кинетической энергии турбулентности $E = 1/2(u'^2 + v'^2 + w'^2)$ над верхней ветвью струи (диаграмма (1)) и на нижней ветви струи (диаграммы (2) - (4)) в сильно устойчивом пограничном слое ($(w'\theta')_s = -0,05 \text{ К м с}^{-1}$), полученные при численном моделировании по трехпараметрической RANS схеме турбулентности. На каждой из диаграмм по оси абсцис – локальное время в часах, по оси ординат – кинетическая энергия турбулентности $E \text{ (м}^2\text{с}^{-2}\text{)}$.

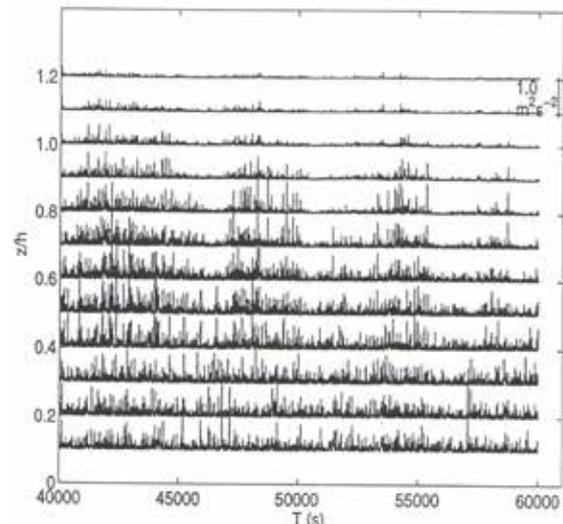


Рис. 6б. Временные ряды перемежающейся кинетической энергии турбулентности $E = 1/2(u'^2 + v'^2 + w'^2)$, полученные в сильно устойчивом пограничном слое LES моделированием [4] ($(w'\theta')_s = -0,05 \text{ К м с}^{-1}$; z – вертикальная координата, h – высота пограничного слоя).

Перемежающийся характер скорости турбулентного трения вблизи поверхности (на первом расчетном слое ($\Delta z/2 = 1,5625 \text{ м}$)) показан на рис. 7.

$$u_* = \left((-\overline{u'w'})^2 + (-\overline{v'w'})^2 \right)^{1/4}$$

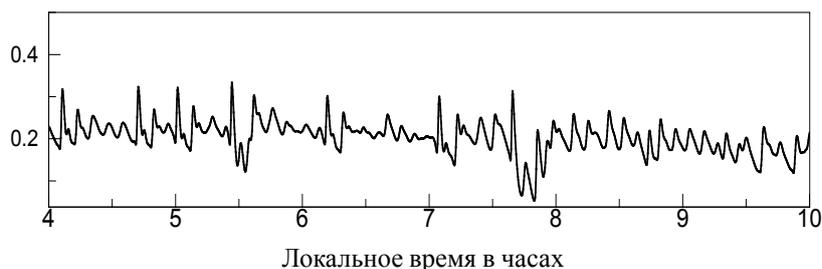


Рис. 7. Временной ряд турбулентной скорости трения u_* вблизи поверхности (на высоте $z=1,5625$ м) в квазиустановившемся сильно устойчивом пограничном слое, полученный при численном моделировании по трехпараметрической RANS схеме турбулентности.

Литература:

1. Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И. О турбулентном числе Прандтля в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46, № 2. С.187-196.
2. Pardyjak E. R., Monti P., Fernando H. J. S. Flux Richardson number measurements in stable atmospheric shear flows // J. Fluid Mech. 2002. V. 459. P. 307-316.
3. Zilitinkevich S.S., Elperin T., Kleerorin N., Rogachevskii I., Esau I., Mauritsen T., Miles M.W. Turbulence energetic in stably stratified geophysical flows: Strong and weak mixing regimes // Quarterly Journal of the Meteorological Society. 2008. V. 134. P. 793-799.
4. Mahrt L. Stratified atmospheric boundary layers // Bound. - Layer Meteor. 1999. V. 90. P. 375-396.
5. Poulos G. S. D., Fritts C., Blumen W., Bach W. D. CASES-99 field experiment: An overview // Preprints. 14th Symp. On Boundary Layer and Turbulence. Aspen, CO, Amer. Meteor. Soc., 618-621.
6. Gerz T., Schumann U., Elghobashi S. Direct numerical simulation of the stratified homogeneous turbulent shear flows // J. Fluid. Mech. 1989. V. 200. P. 563-594.
7. Schumann U., Gerz T. Turbulent mixing in stably stratified shear flows // J. Appl. Meteor. 1995. V. 34. P. 33-48.
8. Zhou B., Chow F. K. Large-Eddy Simulation of the Stable Boundary Layer with Explicit Filtering and Reconstruction Turbulence Modeling // J. Atmos. Sci. 2011. V. 68. P. 2142- 2155.
9. Conangla L., Cuxart J. On the turbulence in the upper part of the low-level jet: An experimental and numerical study // Bound. - Layer Meteor. 2006. V. 118. P. 379-400.
10. Cuxart J., Jimenez M. A. Mixing Processes in Nocturnal Low-Level Jet: An LES study // J. Atmos. Sci. 2007. V. 64. P. 1666- 1679.
11. Sun J., Mahrt L., Banta R. M., Pichugina Y. L. Turbulence Regimes and Turbulence Intermittency in the Stable Boundary Layer during CASES-99 // J. Atmos. Sci. 2012. V. 69. P. 338-351.

Recent developments of the global semi-Lagrangian atmospheric model

^{1,2}Tolstykh M.A., ^{1,2}Shashkin V.V., ²Yurova A.Yu.

¹ Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

² Hydrometcentre of Russia, Moscow, Russia

E-mail: tolstykh@inm.ras.ru, vvshashkin@gmail.com, alla.yurova@gmail.com

Web: www.inm.ras.ru, www.meteoinfo.ru

The global semi-Lagrangian atmospheric model SLAV developed in the Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences and Hydrometcentre of Russia, is operationally used for medium-range and seasonal forecasts. The dynamical core of the model uses fourth-order finite differences on the unstaggered grid for approximation of non-advective terms of atmosphere dynamics equations. The vertical component of absolute vorticity and divergence are prognostic variables. The model includes a set of parameterization for subgrid scale processes, developed by the ALADIN/LACE international consortium.

Improvement of forecasts quality is closely related to the ameliorations in prognostic model. Recently, the works are carried out on the model version having horizontal resolution of 20-25 km in the Northern hemisphere, and vertical – 51 levels. This version shows smaller errors in comparison with the operational version having horizontal resolution about 75 km and 28 levels down. Among recent developments of the model is the introduction and tuning of more perfect parameterizations of short - and long-wave radiation, the multilayer soil description. In the dynamical core (for solution of the atmosphere dynamics equations), the mass-conserving semi-Lagrangian advection algorithm is implemented. The scalability of program implementation in case of horizontal resolution of 20-25 km is currently limited by 432 processors. The works on scalability increase are being carried out.

The works are carried out with partial support of RFBR grant 13-05-00868.

Усовершенствования глобальной полулагранжевой модели атмосферы

^{1,2}Толстых М.А., ^{1,2}Шашкин В.В., ²Юрова А.Ю.

¹ Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

² Гидрометцентр России, Москва, Россия

E-mail: tolstykh@inm.ras.ru, vvshashkin@gmail.com, alla.yurova@gmail.com

Web: www.inm.ras.ru, www.meteoinfo.ru

Глобальная полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ [1], разработанная в ИВМ РАН и Гидрометцентре России, оперативно применяется для среднесрочных и сезонных прогнозов. Динамический блок модели основан на полулагранжевом полуявном алгоритме, применении конечных разностей четвертого порядка на несмещенной сетке для аппроксимации неадвективных слагаемых уравнений динамики атмосферы. Вертикальный компонент абсолютного вихря и горизонтальная дивергенция используются в качестве прогностических переменных. Модель включает в себя набор параметризаций процессов подсеточного масштаба, разработанный международным консорциумом ALA-DIN/LACE [2].

Повышение качества прогнозов тесно связано с усовершенствованием прогностической модели. В последнее время ведутся работы над версией модели, имеющей горизонтальное разрешение 20-25 км в Северном полушарии, а вертикальное – 51 уровень. Эта версия демонстрирует меньшие ошибки по сравнению с оперативной версией, имеющей горизонтальное разрешение около 75 км и 28 уровней по вертикали. Среди ведущихся работ – включение в модель и настройка более совершенных параметризаций коротко- и длинноволновой радиации, многослойной почвы. В полулагранжевом блоке решения уравнений динамики атмосферы реализуется сохранение массы воздуха и пассивных скаляров. Масштабируемость программной реализации модели при горизонтальном разрешении 20-25 км составляет пока 432 процессора, ведутся работы по ее повышению.

Некоторые из вышеперечисленных работ более подробно рассмотрены далее.

1. Локально-консервативный алгоритм полулагранжев численного решения уравнения переноса в трехмерном случае на сфере в σ системе координат по вертикали

Значительным недостатком полулагранжевых методов решения уравнений гидротермодинамики атмосферы является нарушение законов сохранения массы. Наиболее серьезно этот недостаток проявляется при моделировании атмосферы на сроки от сезона и более, т.к. за длительное время, в результате численных ошибок, масса модельной атмосферы и ее компонентов может значительно измениться. Существуют различные подходы к проблеме сохранения массы полулагранжевыми алгоритмами. В данной работе представлена реализация трехмерной версии полулагранжева консервативного (т.е. сохраняющего массу) каскадного алгоритма численного решения уравнения переноса [3].

В сигма-системе координат по вертикали, в гидростатическом приближении, уравнение переноса в интегральной форме записывается как:

$$\frac{d}{dt} \int_{A(t)} a^2 p_s q \cdot \cos\varphi d\varphi d\lambda \sigma = 0$$

где $A(t)$ - произвольный лагранжев (т.е. перемещающийся с жидкостью) объем, a - радиус зем-

ли, p_s - приземное давление, φ, λ - широта и долгота, $\sigma = p/p_s$ - вертикальная координата, p - давление, q - концентрация переносимой величины. Данное уравнение описывает сохранение массы переносимой величины в лагранжевом объеме $A(t)$.

Если предположить, что на шаге по времени $n+1$, лагранжев объем $A(t)$, совпадает с некоторой ячейкой вычислительной сетки $A(t^{n+1}) = A_{i,j,k}$, то среднее значение концентрации примеси в этой ячейке на шаге по времени $n+1$ можно найти по формуле:

$$(p_s q)_{i,j,k}^{n+1} V_{i,j,k} = \int a^2 (p_s q)^n \cdot \cos \varphi d\varphi d\lambda d\sigma \quad (1),$$

где $V_{i,j,k}$ - объем ячейки сетки $A_{i,j,k} \cdot A(t^n)$

Вычисление интеграла в правой части уравнения (1) состоит из двух шагов:

- Восстановление формы лагранжева объема на шаге по времени n - $A(t^n)$ (этот шаг аналогичен вычислению обратных траекторий частиц в не консервативных полулагранжевых алгоритмах)

- Вычисление массы переносимой величины, заключенной в объеме $A(t^n)$ (т.е. собственно вычисление интеграла от $p_s q$).

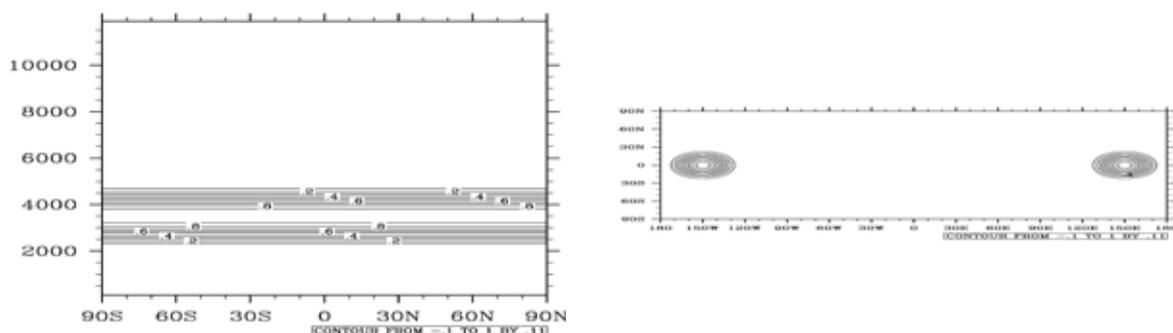
В данной работе используется аппроксимация объема $A(t^n)$, которая позволяет разбить вычисление трехмерного интеграла на три последовательных вычисления одномерных интегралов (т.н. каскадный подход). Применение каскадного подхода значительно повышает вычислительную эффективность алгоритма.

Представленный алгоритм численного решения уравнения переноса тестировался на задаче «твердое вращение с колебаниями по вертикали» из [4], «Идеализованная ячейка Гадлея» и «Деформирующий поток» (1-1 и 1-2 из [5]).

В тесте «Идеализованная ячейка Гадлея» задано сложное поле скорости ветра в плоскости широта-высота, которое сильно деформирует начальное распределение переносимой величины, заключенное в слое между 3000м и 5000м (см. рис. 1, левая колонка). Поле скорости ветра – зависит от времени, через 12 часов после начала моделирования ветер «разворачивается» и за следующие 12 часов приводит поле концентрации в исходное состояние. Таким образом, точное решение совпадает с начальным распределением.

Поле скорости ветра в тесте «Деформирующий поток» является суперпозицией вертикальных колебаний, твердого вращения вдоль экватора и деформирующей компоненты ветра в плоскости широта-долгота. Деформирующая компонента зависит от времени и меняет направление через 6 модельных дней. В качестве начального распределения используются функции различной гладкости (от разрывных до абсолютно гладких), с носителем в виде двух эллипсоидов, расположенных в районе экватора. В процессе переноса, начальное распределение концентрации растягивается в две тонких, спирально закрученных полосы (см. рис. 1, правая колонка), с большими значениями градиента на краях. Благодаря «развороту» деформирующей компоненты поля ветра, происходящему через 6 модельных дней, точное решение на 12-й день совпадает с начальным распределением концентрации.

Нормы ошибок l_1, l_2 численных решений тестовых задач, полученных с помощью локально-консервативного алгоритма оказались в 3-5 раз меньше, чем нормы ошибок аналогичных численных решений, полученных с помощью не консервативного полулагранжева алгоритма, использующего три-кубическую лагранжеву интерполяцию. Представленный локально-консервативный алгоритм использует аппроксимацию подсеточного распределения концентрации, не предполагающую гладкость функции распределения на границах ячеек, и, как следствие, описывает перенос величин с негладкими распределениями точнее, чем неконсервативный алгоритм.



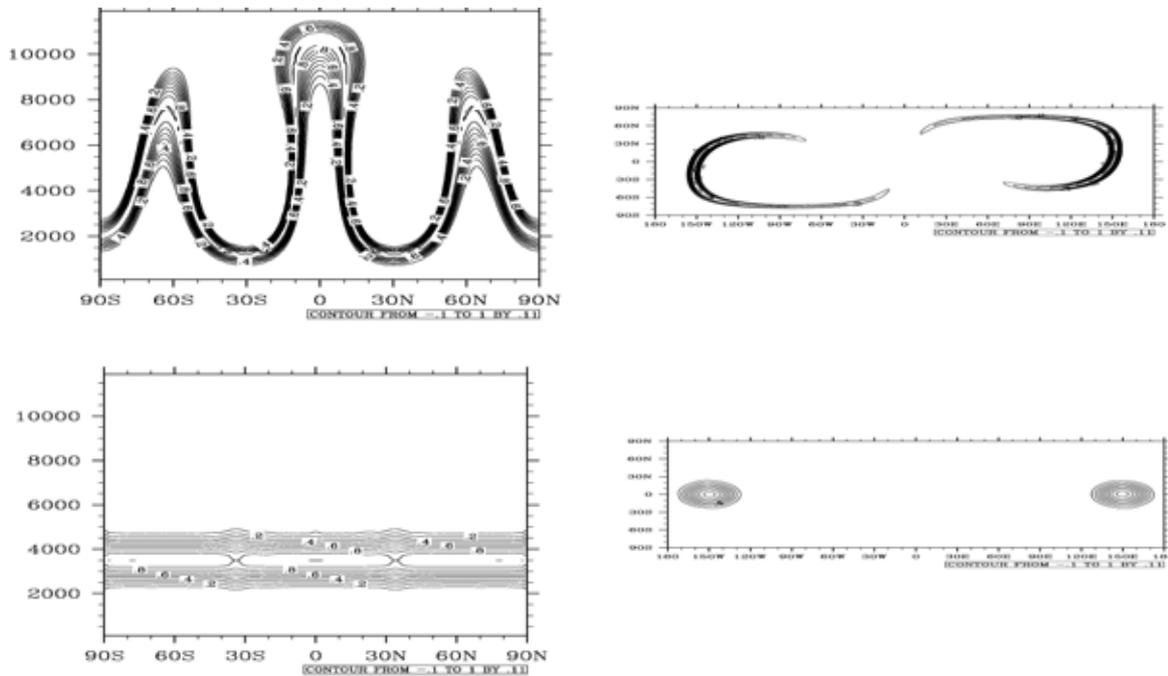


Рисунок 1. Левый столбец: тест 1-2, «Идеализованная ячейка Гадлея», сечения в плоскости широта-высота, сверху вниз: начальное распределение концентрации переносимой величины (совпадает с точным решением, через 24 часа), численное решение через 12 часов, численное решение через 24 часа (приведены численные решения, полученные с помощью представленного локально-консервативного алгоритма). Правый столбец: тест 1-1, «Деформирующий поток», сечения в горизонтальной плоскости на высоте 5000м, сверху вниз: начальное распределение концентрации переносимой величины (совпадает с точным решением, через 12 дней), численное решение через 6 дней, численное решение через 12 дней (приведены численные решения, полученные с помощью локально-консервативного алгоритма).

2. Многослойная модель почвы ИВМ РАН в модели атмосферы ПЛАВ

В ходе экспериментов тестировалось две версии модели: со схемой теплообмена ISBA [6], которая применяется в оперативной версии модели ПЛАВ, и с многослойной схемой ИВМ РАН [7]. Эксперименты были проведены на версии модели ПЛАВ с переменным разрешением по широте (от 30 км в полосе широт 48-90° с. ш. до 70 км в Южном полушарии), разрешением по долготе 0,5625° и 50 уровнями по вертикали.

Было выполнено сравнение ошибок прогноза (средней и абсолютной) для всех заблаговременностей прогноза (от 12 до 72 часов) для версии модели ПЛАВ со схемой теплообмена ISBA и с многослойной схемой ИВМ РАН для прогнозов, стартующих в 12 ч ВСВ для 30 дней апреля 2012 г., с осреднением ошибок за месяц. В ходе сравнения было показано, что абсолютная ошибка уменьшается при применении многослойной схемы для всех регионов для большинства заблаговременностей и регионов (на рис. 2 – ошибки для заблаговременности 72 ч). Такое уменьшение ошибок прогноза для регионов, где в апреле происходит оттаивание почвы (Россия и Азия), связано с более правильным описанием фазовых переходов вода/лед в почве. В настоящее время ведутся работы по реализации системы задания начальных условий для модели почвы по реальным данным.

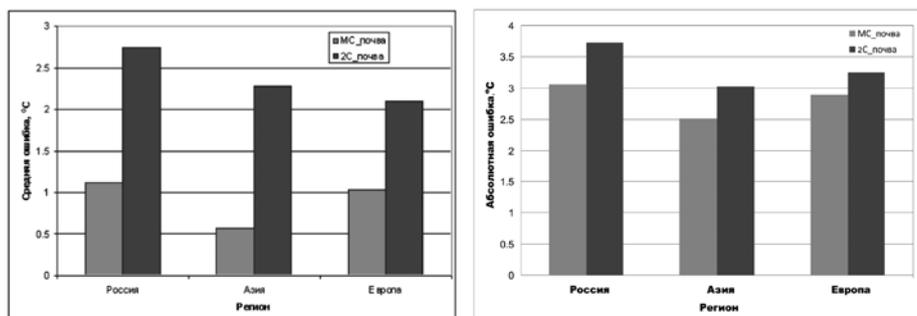


Рисунок 2 – Средняя (слева) и абсолютная (справа) ошибка, прогноза на 72 часа. Осредненные результаты за апрель 2012 г.

Литература:

1. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. 2010. М, Обнинск: ОАО ФООП, 111 стр.
2. ALADIN International Team. 1997. *The ALADIN project: Mesoscale modelling seen as a basic tool for weather forecasting and atmospheric research* WMO Bull. 46: 317324.
3. Nair R.D., Scroggs J.S., Semazzi F.H.M. *Efficient conservative global transport scheme for climate and atmospheric chemistry models* // *Mon. Wea. Rev.* – 2002. – Vol. 130. – P. 2059–2073.
4. Jablonowski Ch., Lauritzen P. H. , Taylor M. and Nair R. D. , 2008: *Idealized test cases for the dynamical cores of Atmospheric General Circulation Models: A proposal for the NCAR ASP 2008 summer colloquium*. http://www.cgd.ucar.edu/cms/pel/asp2008/idealized_testcases.pdf
5. Ullrich P.A., Jablonowski C., Kent J., Lauritzen P.H., Nair R.D., Taylor M.A., *Dynamical Core Model Intercomparison Project. Test case document v. 1.7, 2012*, http://earthsystemcog.org/site_media/docs/DCMIP-TestCaseDocument_v1.7.pdf
6. Noilhan J., Planton S. *A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models* // *Mon. Wea. Rev.* 1989. Vol. 117. P. 536–549.
7. Володин Е.М., Лыков В.Н. *Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность-почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных наблюдений* // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 1998. Vol. 34, № 4. P. 453–465.

On the formulation of the large-scale Arctic Ocean water and sea ice modeling problem

¹Iakovlev N.G., ²Golubeva E.N., ²Platov G.A.

¹Institute of Numerical mathematics RAS and P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

²Institute of Computational mathematics and Mathematical geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: nick_yakovlev@mail.ru

Last decades were characterized by the growing scientific and practical interest to the Arctic Ocean. The information is gained via various observational platforms such as satellites, drifting buoys, moorings, submarines and ice-breakers. Numerical modeling is also important part of the efforts on analyzing ocean and ice changes in past and in present days for better prediction of the Earth climate evolution in future.

Modern regional Arctic Ocean and global models achieved an impressive progress, both in physics and in numerics. Meanwhile Arctic Ocean is a complicated physical object, and it's not enough to increase the model resolution. Authors have 10 years of experience of Arctic Ocean modeling in projects AOMIP and DAMOCLES and recognized, that the problem of the numerical modeling should be reformulated once again, for actually no of the principal questions, putted down at the beginning of the, say, AOMIP, were answered properly. As an example of the problem which demands physical rather than computational approach the problem of the Atlantic and Pacific waters transport is presented. Some other problems – say, problem of deep convection under the sea ice, or problem of the ice-ocean boundary layer are also under discussion.

Thus, we aimed to put a set of questions (and will try to give an answer on some of them):

- What are the principal physical processes, responsible for the changing Arctic Ocean climate formation and how adequately these processes are represented in modern models?
- What is (if any) the optimal model resolution to represent the observed state of the Arctic Ocean under the traditional approximations of hydrostatics, Boussinesque and incompressibility?
- Where is the limit of the traditional physical approximations, and in what regions, if spatial resolution will be finer?
- What kind of new parameterizations will be required and which old ones will be still valid for the extremely fine resolution models?
- And, finally, what is more important now – to invest in new fine resolution models (on structured and unstructured meshes) or in more sophisticated physical parameterizations in the limits of the already developed coarse resolution models?

О постановке задачи моделирования крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана

^{1,2}Яковлев Н.Г., ³Голубева Е.Н., ³Платов Г.А.

¹ Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

² Институт океанологии РАН, Москва, Россия

³ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: nick_yakovlev@mail.ru

Конец XX – начало XXI века были ознаменованы значительной активизацией международных исследований в Арктике, которые шли по нескольким направлениям. Прежде всего, значительно обогатился инструментарий получения данных наблюдений. Информацию о состоянии Северного Ледовитого океана дают различные спутниковые системы, в основном ориентированные на измерение площади льда. Есть постоянно меняющаяся сеть из довольно большого количества буев, объединенная в рамках Международной Арктической программы буев *IABP - International Arctic Buoy Program* (информацию о работе программы, а также все собранные данные можно получить на сайте <http://iabp.apl.washington.edu/>). Особенность использования буев в Арктике – трудность реализации программы всплывающими буями типа Argo (<http://www.argo.ucsd.edu>), так как происходит разрушение буя при его всплытии и столкновении со льдом. Данные с буев позволяют получать информацию о температуре, солености, некоторые метеорологические параметры, и отслеживать положение буя, что позволяет вычислить скорость дрейфа льда. В ключевых проливах устанавливаются заякоренные буи, ориентированные на измерения профилей температуры и солености, и, в меньшей степени – скорости течений. Данные буев дополняются данными, полученными с судов, немногочисленными данными, полученных автономными подводными планерами и данными, полученных подводными лодками. Прототип интегрированной системы сбора и обработки данных, объединяющей все наблюдательные платформы через системы ассимиляции данных, создан в ходе проекта *DAMOCLES (Developing Arctic Modelling and Observing Capabilities for Long-term Environmental Studies* – Разработка возможностей моделирования и наблюдения Арктики для долгопериодных исследований окружающей среды) - интегрированном европейском вкладе в Международный Полярный Год 2007-2008, см. <http://www.damocles-eu.org>.

Для решения задач мониторинга Арктики и более полного понимания роли полярных регионов в глобальной климатической системе необходимо поддерживать исследования, связанные не только со сбором гидрологической информации, но и проекты, связанные с численным моделированием динамики ледового покрова и циркуляции водных масс. В частности, проекты, направленные на разработку моделей, способных воспроизводить прошлое состояние климатической системы и ее изменения. Цель этих работ заключается в выяснении взаимосвязей в климатической системе, поиске причинно-следственных отношений в прошлом и проведение расчетов по предполагаемым сценариям развития событий в будущем. Одним из таких проектов являлся международный проект АОМІР (Arctic Ocean Intercomparison Project, <http://www.whoi.edu/page.do?pid=29836>), стартовавший в 2001 году и преобразованный в 2012 году в международный проект FAMOS (The Forum for Arctic Ocean Modeling and Observational Synthesis, <http://www.whoi.edu/projects/famos/>). Основной задачей, которая ставилась на старте проекта, было более глубокое понимание физических механизмов формирования среднего состояния и изменчивости вод и морского льда северной полярной области Мирового океана для их более точного воспроизведения в моделях Земной системы (моделях IPCC-класса). Предполагалось, что основным инструментом исследования будет являться численное моделирование. Конкретными задачами исследования являлись следующие:

- тестирование и верификация совместных моделей океан – лед на основе проведения координированных экспериментов, в которых жестко фиксировались параметры атмосферного форсинга, сток рек;
- усовершенствование моделей на основе использования современных подходов численного моделирования и введения физических параметризаций;
- исследование изменчивости состояния водных масс и морского льда СЛО на сезонных и декадных масштабах. Выявление механизмов, ответственных за происходящие изменения.

Начальный координированный эксперимент АОМІР при использовании данных атмосферного реанализа NCEP/NCAR выявил поразительные различия между результатами численного моделирования по многим ключевым параметрам – различия были как между моделями, так и между моделями и данными наблюдений. Северный Ледовитый океан оказался довольно сложным регионом для численного моделирования. Два вывода, которые последовали в результате анализа этого эксперимента:

- осознание того, что численные модели воспроизводят соленость океана, которая значительно отклоняется от наблюдаемых среднемноголетних полей;

- циклоническое направление потока атлантических вод вдоль материкового склона СЛО, соответствующее принятой в настоящее время схеме [Rudels, 1994], воспроизводилось только в некоторых моделях, для остальных моделей потребовалась дополнительная переработка, поскольку они воспроизводили антициклонический поток.

Несмотря на последовавший с 2002 года значительный прогресс, основные задачи, которые ставились в начале проекта, так и не были решены. Так, не было получено ответа на механизмы формирования наблюдаемой циркуляции атлантических и тихоокеанских вод, а, следовательно, не были сформулированы априорные требования к моделям, которые должны воспроизвести эту циркуляцию. К сожалению, координированные эксперименты, в результате которых были бы выявлены преимущества и недостатки моделей в воспроизведении океанических процессов, были проведены на начальном этапе проекта. Отдельные эксперименты, проводимые различными группами в рамках различных специализированных подпрограмм, используют различный атмосферный форсинг, что вносит неопределенность в анализ и сравнение моделей.

В настоящее время усилилась тенденция проведения экспериментов при повышенном сеточном разрешении, что естественно для воспроизведения динамики Северного Ледовитого океана, характеризующегося малыми характерными пространственными масштабами движений (первый бароклинический радиус деформации Россби составляет порядка 3-5км). Естественно, что для расчетов на большие интервалы времени предпочтительнее выглядят глобальные модели, не требующие довольно хитроумной постановки граничных условий на «открытых» границах. Однако высокое пространственное разрешение и глобальная модельная область затрудняют проведение расчетов на длительный срок, позволяющий говорить о выходе решения на «модельный климат» - обычно для верхнего километрового слоя океана это время порядка нескольких сотен лет. Кратковременный период расчета (порядка двух десятилетий), возможный при повышенном разрешении (порядка 3км), или единичные эксперименты не позволяют оценить, воспроизводит ли численная модель среднесрочное состояние и изменчивость, известную из данных наблюдений в течение всего исследуемого периода, начиная с 1948 г. по настоящее время, и что является причиной соответствующего поведения модели.

Среди проводимых координированных экспериментов можно отметить эксперимент по анализу распространения тихоокеанских вод [Proshutinky, et. al., 2011]. После проведения эксперимента остается открытым вопрос: почему численные модели воспроизводят различную траекторию потока тихоокеанских вод, причем на качество модельных результатов по сравнению с данными наблюдений формальное пространственно-временное разрешение не имеет определяющего значения? Какие процессы не описывает конкретная численная модель? Решение таких вопросов связано с постановкой задачи анализа физических механизмов, приводящих к тем или иным изменениям в состоянии морского льда и водных масс СЛО.

Как уже отмечалось, важными физическими особенностями СЛО являются маленький бароклинический радиус деформации Россби (порядка 3-5км), маленький масштаб Райнса (также порядка 3-5км на материковом склоне), и сочетание в одном регионе как очень сильно устойчивой стратификации в летний сезон (в связи с формированием теплого и пресного верхнего слоя), так и неустойчивой стратификации с зонами глубокой конвекции, проникающей до дна (в Норвежско-Гренландском море). Такой маленький горизонтальный масштаб в комбинации с особенностями стратификации приводит к сложностям при моделировании. Это связано с тем, что радиус Россби и масштаб Райнса по порядку величины совпадают с пространственным масштабом, при котором необходимо отказываться от приближения гидростатики (переходная зона в зависимости от особенностей вертикальной структуры находится в диапазоне 1-10км). Попытка описать прямо пространственные масштабы порядка 1км приводит и к проблеме явного описания конвективного перемешивания, так как в этом случае мы приближаемся к масштабу конвективной ячейки (порядка 100м). Вероятно, что именно с маленькими характерным горизонтальным масштабом вихрей и связан тот факт, что увеличение пространственного разрешения не дает ожидаемого эффекта в плане точности описания интенсивных струй и переноса тепла и солей. При горизонтальном разрешении порядка 5км спектр модели обрезается на масштабе накачки, и это не позволяет правильно описать переходы энергии по спектру. Таким образом, переход от разрешения порядка 20км к разрешению порядка 5км может сопровождаться даже ухудшением результатов, так как организованные струи распадаются на цепочки вихрей, динамика которых описана неадекватно. В результате струи разрушаются, а потоки тепла и солей резко падают. Это приводит к неверному описанию состояния океана в целом.

Все это позволяет предположить, что в настоящее время задачу моделирования динамики СЛО следует рассматривать не только как задачу вычислительной математики и вычислительных технологий, а скорее как физическую задачу по определению наиболее существенных масштабов и связанных с ними физических процессов.

Участвуя в течение десятилетия в АОМР, авторы считают, что направление, связанное с развитием и калибрацией численных моделей СЛО должно быть активизировано. С точки зрения построения численных моделей и проведения вычислительных экспериментов в настоящий момент необходимо ответить на ряд остро стоящих вопросов, таких как:

- Какие физические процессы ответственны за формирование наблюдаемого состояния СЛО и как они описаны в современных моделях (естественно, здесь мы говорим об определенном пространственном масштабе, различаемом современными системами наблюдений)?

- Какое пространственное разрешение следует считать оптимальным (с точки зрения точности решения и объема вычислительных затрат) для моделирования СЛО в рамках существующих моделей, использующих так называемые «традиционные» приближения – гидростатики, Буссинеска и несжимаемости?

- До какого пространственного масштаба, и в каких районах СЛО будут справедливы основные предположения о состоянии океана и морского льда, используемые сейчас, при переходе к более высокому пространственному разрешению?

- Какие потребуются новые параметризации, и какие старые параметризации перестанут работать при переходе к более высокому пространственному разрешению?

- И, наконец, что в данный момент важнее – направлять усилия на увеличение пространственного разрешения (в рамках структурированных и неструктурированных пространственных аппроксимаций) или на улучшение параметризации физических процессов в пределах уже достигнутого разрешения?

Эти вопросы актуальны не только для задач моделирования Северного Ледовитого океана, но и для выбора стратегии моделирования Мирового океана в рамках моделей Земной Системы для прогнозов изменений климата.

Литература:

1. Proshutinsky, A., Y. Aksenov, J. Clement-Kinney, R. Gerdes, E. Golubeva, D. Holland, G. Holloway, A. John, M. Johnson, E. Popova, M. Steele, and E. Watanabe, 2011. *Recent advances in Arctic Ocean studies employing models from the Arctic Ocean Model Intercomparison Project*, *Oceanography*, 24(3), 102-113.
2. Rudels, B., E.P. Jones, L.G. Anderson and G. Kattner, 1994. *On the intermediate depth waters of the Arctic Ocean*. In: O.M. Johannessen, R.D. Muench, J.E. Overland (Editors), *The Polar Oceans and their role in shaping the global environment*, *Geophysical Monograph* 85, pp 33-46.

Northern Eurasia Earth Science Partnership Initiative (NEESPI) in the past two years

¹Pavel Ya. Groisman, ²Richard G. Lawford

¹ University Corp. for Atmospheric Research at NOAA/NCDC, Asheville, North Carolina, USA

² International GEWEX Project Office, Washington, District Columbia, USA

E-mail: pasha.groisman@noaa.gov

1. Introduction

The Northern Eurasia Earth Science Partnership Initiative, or NEESPI, is a currently active program of internationally-supported Earth systems science research, which has as its foci issues in Northern Eurasia that are relevant to regional and global scientific and decision-making communities. NEESPI is an interdisciplinary program of internationally-supported Earth systems and science research that addresses large-scale and long-term manifestations of climate and environmental changes.

NEESPI Study Area (Figure 1) includes: former Soviet Union, northern China, Mongolia, Fennoscandia, and Eastern Europe. This part of the globe is undergoing significant changes – particularly those changes associated with a rapidly warming climate in this region and with important changes in governmental structures since the early 1990s and their associated influences on land use and the environment across this broad expanse. How this carbon-rich, cold region component of the Earth system functions as a regional entity and interacts with and feeds back to the greater Global system is to a large extent unknown. Thus, the capability to predict future changes that may be expected to occur within this region and the consequences of those changes with any acceptable accuracy is currently uncertain.

One of the reasons for this lack of regional Earth system understanding is the relative paucity of well-coordinated, multidisciplinary and integrating studies of the critical physical and biological systems. By establishing a large-scale, multidisciplinary program of funded research, NEESPI has been aimed at developing an enhanced understanding of the interactions between the ecosystem, atmosphere, and human dynamics in Northern Eurasia. Specifically, the NEESPI strives to understand how the land ecosystems and continental water dynamics in Northern Eurasia interact with and alter the climatic system, biosphere, atmosphere, and hydrosphere of the Earth.



Figure 1. NEESPI logo. It shows also the NEESPI study domain and its major land cover types.

2. From conception to present days

Eight years ago Northern Eurasia Earth Science Partnership Initiative (NEESPI) was launched with the release of its Science Plan (<http://neespi.org>). This web site contains the NEESPI history, presentations at the NEESPI past conferences, the NEESPI Science Plan (260 pp.) and its Executive Summary (18 pp.; also dubbed in 2007 as a refereed publication in the Special NEESPI issue of "Global and Planetary Change"). The NEESPI Science Plan includes elements of WCRP, IGBP, IHDP и DIVERSITAS. Gradually, the Initiative was joined by numerous international projects launched in EU, Russia, the United States, Canada, Japan, and China. NEESPI duration ~ 12 years (started in 2004). Throughout its duration, NEESPI served and is serving as an umbrella for more than 155 individual international research projects (Figure 2). Currently, the total number of the ongoing NEESPI projects (as on May 2013) is 50 and has changed but slightly compared to its peak (87 in 2008). More than 700 scientists from more than 200 institutions of 30 countries worked or are working under the Initiative umbrella. Recently, we queried the NEESPI Principal Investigators and found that more than 75 PhD Theses devoted to Northern Eurasia studies were defended during the life of the Initiative.

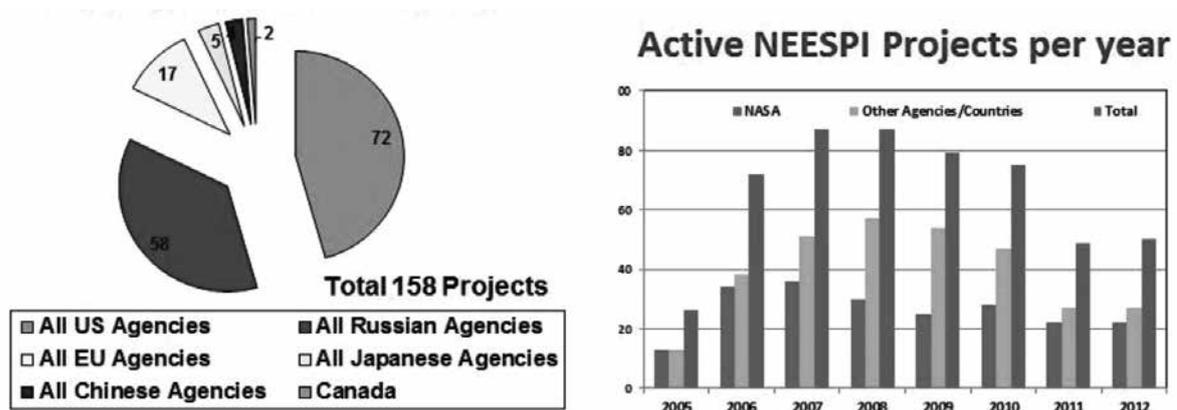


Figure 2. Completed and ongoing NEESPI Projects by country (or group of countries) sorted by funding source and per year as of May 2013..

3. NEESPI Outreach

During the Mega-Project life, more than 1,160 papers and 31 books were published. The past 24 months were extremely productive in the NEESPI outreach. NEESPI leadership organized six Open Science Sessions at the major Geoscience Unions/Assembly Meetings (EGU, JpGU, and AGU) and six International Workshops. The programs of three of these Workshops (in Tomsk, Yoshkar Ola, and Irkutsk, Russia) included Summer Schools for early career scientists. More than 320 peer-reviewed papers, books, and/or book chapters were published or are in press since January 2011 (this list was still incomplete at the time of preparation of this abstract). In particular, a suite of 25 peer-reviewed NEESPI articles was published in the Forth Special NEESPI Issue of "Environmental Research Letters" (ERL) <http://iopscience.iop.org/1748-9326/focus/NEESPI3> (this is the third ERL Issue). In December 2012, the next Special ERL NEESPI Issue was launched <http://iopscience.iop.org/1748-9326/focus/NEESPI4>. Northern Eurasia is a large study domain. Therefore, it was decided to describe the latest findings related to its environmental changes in several regional monographs in English. Four books on Environmental Changes in the NEESPI domain were published by the University of Helsinki (Groisman et al. 2012), Akademperiodyka (Groisman and Lyalko 2012), and Springer Publishing House (Gutman and Reissell 2001; Groisman and Gutman 2013) being devoted to the high latitudes of Eurasia, to Eastern Europe, and to Siberia. We expect that one more book devoted to East Asia (Chen et al. 2013) will be published simultaneously by Higher Education Press and De Gruyter Publ. House in Beijing and Berlin respectively prior to commence of this Meeting.

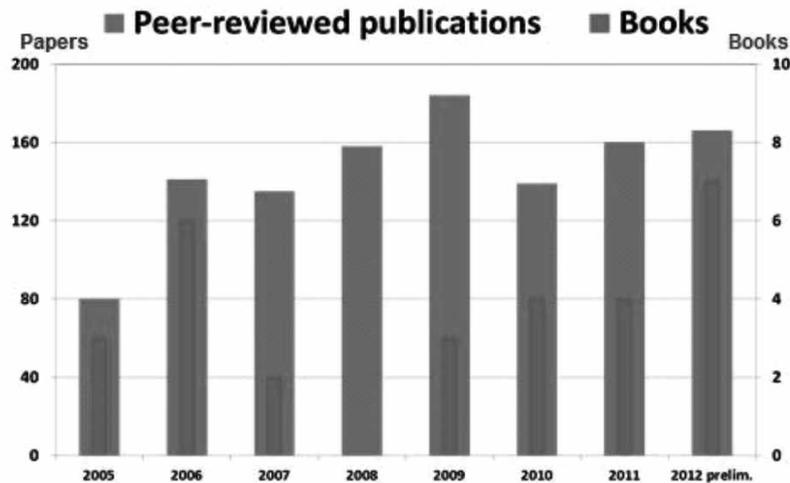


Figure 3. Dynamic of the NEESPI publications by year.

4. Content of the presentation at the Conference

In this presentation, the description of the NEESPI Program will be complemented with an overview of the results presented in the latest our books:

- *Arctic Land Cover and Land Use in a Changing Climate: Focus on Eurasia*
- *Earth System Change over Eastern Europe*
- *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences;*
- *Dryland East Asia: Land Dynamics amid Social and Climate Change* and
- The future of the Initiative will be discussed.

References (cited):

1. Chen, J., S. Wan, J. Qi, G. Henebry, M Kappas, and G. Sun (eds.) 2013: *Region of East Asia: Land Dynamics amid Social and Climate Change*. Beijing: Higher Education Press and Berlin: De Gruyter.
2. Groisman, P.Ya. and V.I. Lyalko (eds.) 2012: *Earth Systems Change over Eastern Europe*. Akademperiodyka, Kiev, The Ukraine, 488 pp. ISBN 978-966-360-195-3.
3. Groisman, P.Ya., A. Reissell, and M. Kaukolehto (eds.) 2012: *Proceedings of the Northern Eurasian Earth Science Partnership Initiative (NEESPI) Regional Science Team Meeting devoted to the High Latitudes*. Report Series in Aerosol Science, No. 130, Helsinki, Finland, 153 pp.
4. Gutman, G. and A. Reissell, eds., 2011: *Arctic land cover and land use in a changing climate: Focus on Eurasia*. VI, Springer, Amsterdam, The Netherlands, 306 pp.

Key References:

1. Groisman, P.Ya., and S.A. Bartalev, 2007: *Northern Eurasia Earth Science Partnership Initiative (NEESPI): Science plan overview*. *Global and Planetary Change*, 56, issue 3-4, pp. 215-234.
2. Groisman, P.Ya., and 27 Co-Authors, 2009: *The Northern Eurasia Earth Science Partnership: An Example of Science Applied To Societal Needs*. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 90, pp. 671-688.

Assessment of the impact of different stratospheric aerosol models from volcanic origin on the Earth radiation-thermal regime

¹Frolkis V.A., ²Kokorin A.M.

¹ Petersburg State Transport University, A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory, St. Petersburg, Russia

² P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

E-mail: VFrolkis@VF13868.spb.edu

In climate changes, caused by natural and anthropogenic factors, an important role is played by stratospheric aerosol, variations of which are able to generate regional and global climatic variations. In the process of examining this issue, the main focus is usually paid to modeling of the aerosol influence on the radiation and temperature regimes of the climate system, but the impact on climate of the structure of aerosol particles and their distribution by size usually is not taken into account. Without the parameters of the aerosol distribution, it is impossible to correctly assess aerosol impact on the radiation regime modifications which may have different sign, in depending of the values of these parameters.

The impact of the two-layer particles of stratospheric aerosol is simulated on the Instantaneous Radiative Forcing (IRF) and the stationary climate temperature regime. Aerosol particles are described by the form-factor $ff = r / r_{kernel}$, where r is the radius of the particle, r_{kernel} is the radius of its kernel. The lognormal size distribution r is considered. Different values of the form-factor describe the different stages of the 75% sulfate shell formation. Three models of "two-layer" aerosol particles are discussed: 1) two-layer particles, which have a sharp boundary between the kernel and the shell; 2) antireflection particles are two-layer particles, which do not have sharp boundaries between the kernel and the shell; 3) quasihomogeneous particles are homogeneous particles, which have the same integral optical characteristics, as well as two-layer particles. Also are given the results of similar calculations with the homogeneous particles of 75% sulfate aerosol. The optical properties of aerosol particles are calculated according to the Mie theory.

There is used a two-dimensional zonally and annually average steady state energy balance radiative-convective equilibrium model. This model is semi-empirical with the detailed radiation code, the parameterized energy transfer, the conservation of the relative humidity in the troposphere, and the albedo – temperature feedback.

The calculations of the IRF and surface temperature changes due to different stratospheric aerosol models are carried out. The stratospheric aerosol layer have optical thickness is 0.05 at a wavelength of 0.55 μm . Aerosol layer is located above the tropopause. Ensembles of aerosol particles with the following characteristics are considered: the position parameter $a_g = 0,05, 0,3, 0,5 \mu\text{m}$, the shape parameter $\sigma_g = 1,1, 1,5, 2,0, 2,5 \mu\text{m}$ and form-factor values $ff = 1,43, 2,057, 2,745, 3,439$.

Conclusion: 1) The size distribution of volcanic aerosol particles, its internal structure ff may exert a significant influence on the changes of the radiation field of the climate; 2) In some cases the IRF due to the stratospheric aerosol variations is not reliable index for climate change evaluation; 3) Considered two-layer particles and two-layer antireflection particles have more efficient antigreenhouse properties (geoengineering) than the particles of 75% sulfate aerosol.

The study is supported by SPSUACE (Grant № 2F-11).

Оценка воздействия различных моделей стратосферного аэрозоля вулканического происхождения на радиационно-термический режим Земли

¹Фролькис В. А., ²Кокорин А. М.

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения, Главная геофизическая обсерватория им.

А. И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Санкт-Петербургский филиал, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия

E-mail: VFrolkis@VF13868.spb.edu

При изучении изменений климата, обусловленных естественными и антропогенными факторами, важную роль играет стратосферный аэрозоль, вариации которого могут приводить к региональным и глобальным климатическим изменениям. Рассматривая эту проблему, основное внима-

ние обычно уделяется моделированию влияния аэрозоля на изменения радиационного и температурного режимов климатической системы, а воздействие на климат структуры аэрозольных частиц и распределение их по размерам обычно не учитывается. Если не знать параметры распределения аэрозоля, то невозможно правильно оценить его влияние на изменение радиационного режима, которое, в зависимости от значений этих параметров, может иметь разный знак. Также важен состав аэрозольных частиц. В стратосфере присутствуют: а) сернокислые аэрозоли (капли 75-процентного раствора серной кислоты, образующейся в результате химических и фотохимических реакций с участием SO_2 , H_2O и O_2); б) вулканический пепел; в) метеорная пыль (продукт сгорания метеоритов), которую можно разделить на мелкодисперсную и крупнодисперсную фракции; г) двухслойные частицы с ядрами из вулканического пепла и мелкодисперсной метеорной пыли с оболочкой, состоящей из 75-процентной серной кислоты ($75\% \text{H}_2\text{SO}_4$) [1].

Численные эксперименты показывают, что в стратосфере происходит образование двухслойных частиц [1]. В частности, механизм, обуславливающим появление таких частиц, может считаться гетерогенная гетеромолекулярная нуклеация, когда на ядрах образуется оболочка из 75%-ого раствора серной кислоты, в которой ядра могут как растворяться, так и не растворяться. Данные экспериментальных измерений указывают, что существует связь между радиусами частиц сернокислотной фракции, а, следовательно, и толщиной сернокислотной оболочки, и концентрацией в стратосфере сернистого газа [2]. Содержание стратосферных газовых примесей, из которых образуются аэрозольные частицы, также определяет концентрацию аэрозолей.

На высоте 18 – 20 км в стратосфере всегда присутствует слой сернокислотного аэрозоля, не связанный с выбросами в стратосферу вулканических газов – слой Юнге. Он образован каплями концентрированной серной кислоты (примерно 75%) и твердыми гранулами сульфата аммония, концентрация таких частиц с радиусом более 0,15 мкм находится в диапазоне $1 - 3 \text{ см}^{-3}$. С другой стороны, вулканический пепел, попадающий в стратосферу, имеет сухую поверхность, которая постепенно покрывается слоем серной кислоты, причем механизм роста оболочки в данном случае в чем-то эквивалентен процессу обводнения аэрозольной частицы в пограничном слое атмосферы [1]. Время жизни частиц мелкодисперсной фракции в стратосфере составляет около трех лет.

В настоящей работе моделируется влияние двухслойных частиц стратосферного аэрозоля на мгновенный радиационный форсинг и стационарный климатический температурный режим. Мгновенным радиационным форсингом (МРФ) называют изменение ΔR интегрального эффективного радиационного потока R на уровне тропопаузы, обусловленного вариацией какого-либо радиационно-активного фактора климатической системы при условии, что все остальные ее составляющие (в частности, температура) остаются неизменными. При вычислении МРФ вертикальная ось направлена сверху вниз, т.е. положительному изменению R соответствует как увеличение нисходящего ($\Delta R D > 0$), так и уменьшение восходящего ($\Delta R U < 0$) интегрального потоков.

Аэрозольные частицы описываются значениями форм-фактора $ff = r / r_{nuc1}$, где r – радиус частицы, r_{nuc1} – радиус ее ядра. Размеры r , как предполагается, распределены по логарифмическому нормальному закону с параметрами: a_g – параметр положения, σ_g – параметр формы. Различные значения форм-фактора описывают разные стадии формирования сернокислой оболочки. Рассматриваются три модели “двухслойных” аэрозольных частиц: 1) непосредственно двухслойные частицы – частицы, у которых имеется резкая граница между ядром и оболочкой [3]; 2) просветленные частицы – двухслойные частицы, у которых нет резкой границы между ядром и оболочкой, т.е. наблюдается плавный переход между двумя фракциями [4]; 3) квазиоднородные частицы – однородные частицы, которые имеют такие же интегральные оптические характеристики, как и двухслойные частицы. Также приводятся результаты аналогичных расчетов с однородными частицами сернокислого аэрозоля $75\% \text{H}_2\text{SO}_4$ [5]. Оптические свойства аэрозольных частиц рассчитываются по теории Ми.

Для моделирования используется полумпирическая двухмерная среднезональная стационарная энергобалансовая радиационно-конвективная модель (ЭБРКМ) с детальным радиационным блоком, параметризованным описанием глобального переноса тепла, с сохранением относительной влажности и альбедо - температурной обратной связью [5, 6]. Применяемая ЭБРКМ достаточно адекватно описывает изменения радиационных и температурных характеристик среднезональных тропосферы и стратосферы, обусловленных внешними воздействиями на радиационный баланс [7].

Проведены расчеты мгновенного радиационного форсинга и изменения температуры поверхности ΔT_s , обусловленные различными моделями стратосферного аэрозоля, оптическая толщина которого $\tau = 0.05$ на длине волны $\lambda = 0.55$ мкм. Аэрозольный слой располагается над тропопаузой. Рассматриваются ансамбли частиц со следующими характеристиками: параметр положения $a_g = 0.05, 0.3, 0.5$ мкм, параметр формы $\sigma_g = 1.1, 1.5, 2.0, 2.5$ мкм и значениями форм-фактора $ff = 1.43, 2.057, 2.745, 3.439$. Результаты вычислений МРФ и изменения температуры поверхности ΔT_s , приведены в таблицах 1 и 2.

Аэрозольный слой способствует увеличению потока отраженной солнечной радиации на верхней границе атмосферы, но при этом создает разнонаправленное изменение интегрального эффективного радиационного потока R на тропопаузе, которое описывается как положительными, так и отрица-

тельными значениями мгновенного радиационного форсинга. Так, положительные значения МРФ в основном получаются при использовании двухслойной и квазиоднородной моделей в предельном случае малых частиц с узким распределением по размерам ($a_g = 0.05$; $\sigma_g = 1.1$) и больших частиц с широким распределением (0.5; 2.5), а также при использовании модели больших просветленных частиц, имеющих широкое распределение (0.5; 2.5) с $ff = 1.43, 2.057$. Во всех остальных численных экспериментах используемые модели аэрозоля приводят к отрицательному МРФ.

Положительный МРФ сопровождается положительными изменениями R на верхней границе атмосферы (ВГА), которые обусловлены одновременным уменьшением коротковолнового S и увеличением длинноволнового I эффективных потоков на тропопаузе и ВГА. Причем значительное увеличение I (до 15 Вт/м²), проявляющееся как раз в указанных предельных случаях малых и больших частиц, изменяет знак ΔR .

Положительный МРФ приводит к положительным изменениям температуры поверхности (в таблицах 1 и 2 это отмечено курсивом и полужирным шрифтом), а отрицательный МРФ, как правило, соответствует отрицательным изменениям ΔT_s . Однако при использовании модели просветленной частицы в двух указанных предельных случаях (0.05; 1.1) и (0.5; 2.5) отрицательный радиационный форсинг соответствует положительным ΔT_s (этот факт в таблицах помечен подчеркнутым полужирным шрифтом). Это свидетельствует о том, что МРФ, широко используемый в современных исследованиях, не всегда однозначно указывает на знак возможного изменения климата.

Таблица 1. Радиационный форсинг (Вт м⁻²), обусловленный различными моделями аэрозольных частиц, при ряде значений параметра положения a_g (мкм), параметра формы σ_g (мкм) и форм-фактора, а также аэрозольными частицами 75% H₂SO₄ [5]

	Модель частицы												75% H ₂ SO ₄
	двухслойная				просветленная				Квазиоднородная				
	форм-фактор ff												
σ_g	1.43	2.057	2.745	3.439	1.43	2.057	2.745	3.439	1.43	2.057	2.745	3.439	
$a_g=0.05$													
1.1	-0.2	4.6	6.9	7.8	-6.9	-3.7	-3.6	-3.6	2.4	6.2	7.7	8.2	4.4
1.5	-2.9	-2.0	-1.6	-1.5	-4.2	-3.6	-3.6	-3.6	-2.4	-1.7	-1.5	-1.4	-11.9
2.0	-4.1	-3.7	-3.5	-3.4	-4.7	-4.4	-4.4	-4.4	-3.8	-3.5	-3.4	-3.4	-12.3
2.5	-5.3	-4.7	-4.5	-4.4	-5.9	-5.7	-5.7	-5.7	-4.9	-4.6	-4.4	-4.4	-12.2
$a_g=0.3$													
1.1	-3.4	-3.1	-3.0	-2.9	-3.8	-3.7	-3.6	-3.6	-3.2	-3.0	-2.8	-2.9	-12.2
1.5	-5.5	-4.9	-4.7	-4.6	-6.1	-5.8	-5.7	-5.7	-5.1	-4.7	-4.6	-4.5	-12.4
2.0	-6.3	-5.6	-5.1	-5.0	-7.4	-7.2	-7.1	-7.2	-5.8	-5.2	-4.5	-5.0	-11.8
2.5	-4.6	-3.4	-2.9	-2.7	-4.1	-5.3	-6.0	-6.0	-3.7	-3.0	-2.7	-2.6	-1.1
$a_g=0.5$													
1.1	-4.4	-3.6	-3.3	-3.2	-5.1	-4.6	-4.5	-4.4	-3.9	-3.3	-3.2	-3.1	-12.6
1.5	-6.7	-5.8	-5.5	-5.4	-7.7	-7.3	-7.3	-7.3	-6.2	-5.6	-5.4	-5.3	-12.4
2.0	-5.6	-4.3	-3.8	-3.6	-6.6	-7.0	-7.1	-7.1	-4.7	-3.9	-3.6	-3.5	1.0
2.5	-0.09	1.6	2.2	2.5	7.1	2.9	-1.9	-2.0	-5.1	2.0	4.2	5.2	2.1

Так, возможное увеличение T_s при $\Delta R < 0$, объясняется тем, что, во-первых, при отрицательных значениях МРФ изменения R на ВГА положительны, а, во-вторых, слой «тропосфера и поверхность» находится в лучистом равновесии со стратосферой. Поэтому, когда $\Delta R > 0$, вся климатическая система нагревается, что приводит к увеличению температуры поверхности.

В двух указанных предельных случаях при использовании двухслойных и просветленных частиц МРФ существенно (разброс значений более 10 Вт/м²) зависит от величины форм-фактора ff . Для остальных распределений по размерам зависимость МРФ от ff сохраняется, но разброс не превышает 5 Вт/м². Двухслойные частицы (0.05; 1.1) с тонкой сернистой оболочкой ($ff = 1.43$) характеризуются увеличением отраженного коротковолнового потока SU на ВГА, а частицы с более толстой оболочкой приводят к уменьшению SU . У двухслойных частиц большего размера и частиц с более широким распределением зависимость ΔSU от ff падает, а у просветленных частиц такой зависимости нет.

Двухслойные и просветленные частицы в широком диапазоне параметров a_g , σ_g и ff обладают ярко выраженными антипарниковыми свойствами и могут быть использованы при создании стратосферного аэрозольного экрана, компенсирующего парниковое потепление, вызываемое малыми газовыми составляющими атмосферы. Наилучшей эффективностью обладают более крупные частицы ($a_g > 2$ мкм) с параметром формы $\sigma_g = 1.5-2.0$ мкм, которые при оптических толщинах, не превышающих 0.06,

обеспечивают компенсацию парникового потепления прогнозируемого вплоть до 2050 г.

Таблица 2. Изменения стационарной температуры поверхности (°С), обусловленные различными моделями аэрозольных частиц, при ряде значений параметра положения a_g (мкм), параметра формы σ_g (мкм) и форм-фактора, а также частицами 75% H_2SO_4 [5]

σ_g	Модель частицы													
	двухслойная				просветленная				Квизиоднородная				75%	
	форм-фактор ff													H_2SO_4
	1.43	2.057	2.745	3.439	1.43	2.057	2.745	3.439	1.43	2.057	2.745	3.439		
$a_g=0.05$														
1.1	3.0	5.5	6.1	6.6	-0.7	1.8	2.0	1.9	4.3	6.0	6.4	6.5	4.0	
1.5	-1.12	-0.76	-0.62	-0.69	-1.43	-0.81	-0.91	-0.68	-0.83	-0.63	-0.63	-0.68	-0.38	
2.0	-2.06	-1.94	-2.07	-2.06	-2.18	-1.95	-1.96	-1.99	-2.31	-2.15	-2.11	-2.16	-0.61	
2.5	-2.44	-2.69	-2.51	-2.58	-2.68	-2.23	-2.43	-2.48	-2.64	-2.59	-2.72	-2.47	-0.44	
$a_g=0.3$														
1.1	-1.7	-1.9	-1.8	-1.8	-1.8	-1.7	-1.7	-1.7	-1.8	-1.9	-1.5	-1.8	-0.6	
1.5	-2.7	-2.8	-2.6	-2.9	-3.1	-2.6	-2.6	-2.5	-2.8	-2.8	-2.7	-2.9	-0.7	
2.0	-2.4	-2.5	-2.6	-2.6	-2.9	-2.9	-2.6	-2.4	-2.5	-2.8	-2.8	-2.8	-0.1	
2.5	-0.8	-0.9	-0.6	-0.5	0.8	-0.3	-0.7	-0.9	-0.4	-0.6	-0.7	-0.7	0.9	
$a_g=0.5$														
1.1	-2.1	-1.9	-2.0	-2.0	-2.2	-1.8	-1.7	-1.9	-1.8	-2.0	-2.0	-2.0	-0.6	
1.5	-2.7	-2.8	-2.8	-2.6	-3.3	-3.0	-3.1	-3.3	-3.0	-2.9	-2.9	-2.9	-0.7	
2.0	-1.3	-1.3	-1.6	-1.6	-1.2	-1.3	-1.6	-1.7	-1.4	-1.5	-1.6	-1.4	0.6	
2.5	3.8	3.7	3.5	3.6	9.5	6.7	3.3	3.2	3.9	3.5	3.5	3.6	1.7	

Заключение

1) Распределение по размерам частиц вулканического аэрозоля и его внутренняя структура могут оказывать существенное влияние на изменения радиационного поля.

2) В ряде случаев мгновенный радиационный форсинг, обусловленный вариациями стратосферного аэрозоля, не является индикатором, позволяющим сделать однозначный вывод о соответствующем изменении климата.

3) Рассматриваемые двухслойные и просветленные частицы обладают более эффективными антипарниковыми свойствами (геоинжиниринг), чем частицы 75% H_2SO_4 .

Работа выполнена при поддержке Гранта № 2Ф-11 СПбГАСУ.

Литература:

1. Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем — СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. 194 с.
2. Васильев А.В., Ивлев Л.С. Эмпирические модели и оптические характеристики аэрозольных ансамблей двухслойных сферических частиц. //Оптика атмосферы и океана. 1997, т. 10, № 8. С. 856-865.
3. Ивлев Л.С., Коростина О.М. Расчеты оптических характеристик стратосферных аэрозольных частиц двухслойной структуры. //Известия РАН, ФАО. 1994, т. 30, № 6. С. 802- 806.
4. А.М Кокорин. Влияние влажности на характеристики рассеяния и поглощения света радиально-неоднородных частиц аэрозоля в пограничном слое над морем. //Оптический журнал. 2012 №12. С. 3-12.
5. Фролькис В.А., Кароль И.Л. Моделирование влияния параметров стратосферного аэрозольного экрана на эффективность компенсации парникового потепления глобального климата. //Оптика атмосферы и океана РАН, 2010 т. 23, № 8. С. 710-722.
6. Кароль И.Л., Фролькис В.А. Энергобалансовая радиационно-конвективная модель глобального климата // Метеорол. и гидролог. 1984. № 8. С. 59-68.
7. Кароль И.Л., Киселев А.А., Фролькис В.А. Радиационный и термический режимы атмосферы и климатическая система: индексы внешнего воздействия и их оценка. //Труды ГГО. 2009, вып. 560, С. 33-50.

Тропические вулканы и глобальные изменения озона и климата

Зуев В.В.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
E-mail: vvzuev@imces.ru

На рубеже 80-х и 90-х годов прошлого столетия активно обсуждались две основные глобальные экологические проблемы: разрушение озонового слоя и потепление климата. Основными причинами, ответственными за возникновение этих проблем были определены техногенные выбросы фреонов и парниковых газов, прежде всего, CO_2 . Другие причины природного характера декларативно объявлялись несущественными. Приоритет антропогенного фактора в глобальных изменениях озона и климата сохраняется незыблемым, хотя реальное поведение озонового слоя и приземных температур в последние 10-15 лет совсем не согласуется с ним.

Время жизни уже выброшенных в атмосферу фреонов составляет до сотни лет, поэтому прекращение их выбросов согласно Монреальскому протоколу должно было сказаться на озоновом слое не ранее 2050 г. Тем не менее с середины 90-х годов наблюдается его быстрое восстановление. Размеры и глубина антарктической озоновой дыры так же неуклонно стали уменьшаться. Длительное время, почти всю последнюю четверть 20-го века, наблюдался согласованный ускоряющийся рост как глобальных температур, так и атмосферного содержания CO_2 , что, вроде бы, подтверждало значимость антропогенно обусловленного «парникового эффекта». Однако в течение первого десятилетия XXI века в изменениях этих параметров проявляется явное рассогласование: несмотря на ускоренный рост CO_2 в атмосфере отмечается стабилизация глобальной температуры атмосферы у поверхности Земли. Ясно, что антропогенный фактор не может полностью контролировать глобальные изменения озона и климата.

Однако динамика этих изменений хорошо согласуется с активностью вулканогенных аэрозольных возмущений тропической стратосферы, которая была высока до середины 90-х годов. В последние 15 лет эта активность значительно понизилась. При извержениях тропических вулканов плинианского типа формируется эруптивная газопепловая колонна, в центре которой при температуре около 1000°C и малом содержании кислорода происходит термическое разложение метана, содержащегося в вулканических выбросах, с образованием сажи. В верхней части эруптивной колонны в стратосфере струя растекается, горизонтально расширяясь в виде эруптивной тучи. При этом в условиях высокой турбулентности и адиабатически низких температур сажа формируется в виде наноразмерных углеродных частиц точно так же, как это происходит в технологических реакторах по производству высококачественного технического углерода. По своей природе сажа гидрофобна, но при окислении её поверхности она быстро становится гидрофильной. Поэтому в относительно «влажной» нижней атмосфере, тропосфере, она как губка впитывает воду, набухает, увеличивается в размерах и массе и быстро оседает на поверхность Земли. В «сухой» разреженной стратосфере наноразмерная сажа может существовать годами. Появление в стратосфере наноразмерной сажи позволяет объяснить и температурные, и озоновые аномалии, возникающие после мощных извержений тропических вулканов.

Как «абсолютно черное тело», сажа активно поглощает и коротковолновую солнечную радиацию, и тепловую радиацию Земли, обеспечивая эффективный прогрев тропической стратосферы. За период повышенной активности тропических вулканов, с 1963 по 1993 годы, произошло не менее 20 значимых вулканогенных аэрозольных возмущений тропической стратосферы. Неудивительно, что её температура оказалась в среднем на $2-3^\circ\text{C}$ выше, чем в последние два десятилетия, в течение которых произошло не более 3 вулканогенных стратосферных возмущений, к тому же весьма незначительных.

Существенное повышение содержания серникоислотного аэрозоля в стратосфере вследствие мощных извержений тропических вулканов не объясняет появления длительных депрессий стратосферного озона. Вероятность исчезновения молекулы озона при ее взаимодействии с поверхностью серникоислотного аэрозоля крайне мала, она значительно ниже вероятностного уровня, определяющего значимые деструктивные воздействия на стратосферный озоновый слой. Другое дело сажа. Вероятность разрушения озона на её поверхности почти на два порядка величины превышает вероятностный уровень значимых воздействий на озоновый слой. Таким образом, вулканические выбросы в тропическую стратосферу наноразмерного сажевого аэрозоля должны приводить к длительной депрессии стратосферного озона, что позволяет объяснить многолетний отрицательный тренд общего содержания озона в период повышенной активности тропических вулканов, и его восстановление в современный период, характеризующийся значительным ослаблением вулканической активности в тропическом поясе.

Поскольку наличие озона в стратосфере в значительной степени определяет её температурный режим благодаря поглощению им УФ солнечной радиации, постольку его уменьшение, наиболее заметное в полярной стратосфере, приводит к её охлаждению. Таким образом, стратосферные выбросы наноразмерной сажи тропическими вулканами обуславливают и нагревание тропической стратосферы, и

охлаждение полярной стратосферы. Появление новых температурных контрастов вызывает значительные и длительные возмущения общей циркуляции атмосферы (ОЦА).

Моделирование пояса тепла в тропической стратосфере с помощью спектральной модели ОЦА промежуточной сложности позволило показать, что в течение 10 лет после отключения стратосферного нагрева, у поверхности Земли происходит разогрев регионов высоких широт за счет нагнетания тепла из прогретых субтропических регионов. В период повышенной активности тропических вулканов с 1963 по 1994 годы вулканогенные возмущения тропической стратосферы происходили в среднем каждые 1,5 года. Кумулятивное сложение периодов нагнетания тепла из низких в высокие широты после каждого извержения повышало скорость роста глобальных температур. Аналогичный эффект, определивший «период потепления 30-х годов», наблюдался на рубеже XIX и XX веков. В этот период потепление также происходило на фоне повышенной активности тропических вулканов. С 1883 по 1932 годы произошло 18 мощных извержений, (в среднем каждые 2,8 года), в том числе таких, как Кракатау, Санта-Мария и Колима. В периоды редких и незначительных извержений, напротив, регистрируется либо похолодание, подобное похолоданию 1940-1950-х годов, либо стабилизация температур, которая проявляется в течение последнего десятилетия.

Tropical volcanoes, global ozone depletion, and climate change

Zuev V.V.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia
E-mail: vvzuev@imces.ru

Two major global environmental problems were actively discussed at the turn of the 80s and 90s of the last century: the depletion of the ozone layer and global warming. Anthropogenic emissions of CFCs and greenhouse gases, especially CO₂, have been identified as the main causes of these problems. Other reasons of natural character have been declared irrelevant. The priority of human impact on global climate change and ozone depletion remains unshakeable, although the actual behavior of the ozone layer and the surface temperature in the last 10-15 years does not fit the situation.

The lifetime of CFCs already emitted to the atmosphere is up to hundred years, so the termination of their emission under the Montreal Protocol was to affect the ozone layer not earlier than 2050. Nevertheless, since the mid 90's there has been rapid ozone layer recovery. The size and depth of the Antarctic ozone hole has also begun to decrease steadily. For a long time, almost the entire last quarter of the 20th century, there has been a consistent accelerating growth of global temperatures and atmospheric CO₂ concentrations, which confirmed the significance of the anthropogenic "greenhouse effect". However, during the first decade of the XXI century, there is a clear mismatch in changes of these parameters. In spite of the rapid CO₂ growth in the atmosphere, there has been global atmospheric temperature stabilization at the Earth's surface. It is clearly seen that the human impact cannot fully effect the global climate change and ozone depletion.

However, the dynamics of these changes is consistent with the activity of the volcanogenic aerosol perturbations of the tropical stratosphere, which was high till mid 90s. This activity significantly decreased in the last 15 years. At the time of Plinian tropical volcano eruptions an eruption column of gas and ash is formed. Thermal decomposition of methane contained in volcanic emissions takes place in the centre of this column at about 1000 °C and at low oxygen content with the formation of carbon black. At the top of the eruption column in the stratosphere the jet spreads out horizontally, extending in the form of an eruptive cloud. Under the conditions of high turbulence and adiabatic low temperatures the carbon black is formed in nanosized carbon particles. This process is similar to the production of high quality carbon black in industrial reactors. The carbon black is hydrophobic by its nature, but with the oxidation of its surface it rapidly becomes hydrophilic. Therefore, in relatively "wet" lower atmosphere and in the troposphere, it absorbs water like a sponge, swells, grows in size and weight, and quickly settles on the Earth's surface. Nanosized carbon black may exist for years in the "dry" rarefied stratosphere. The presence of nanosized carbon black in the stratosphere explains temperature and ozone anomalies that occur after strong tropical volcanic eruptions.

As a "black body", carbon black absorbs shortwave solar radiation and thermal radiation of the Earth as well, providing efficient heating of the tropical stratosphere. Over a period of the increased activity of tropical volcanoes, 1963- 1993, there were at least 20 significant volcanogenic aerosol perturbations of the tropical stratosphere. No wonder that its temperature was on average 2-3 °C higher than in the last two decades, when there were no more than 3 insignificant stratospheric volcanic disturbances.

A significant increase in the content of sulfuric acid aerosol in the stratosphere, as a result of strong tropical volcanic eruptions, does not explain the long-term depression of stratospheric ozone. The probability

of the ozone molecule disappearance at the time of its interaction with the surface of the sulfuric acid aerosol is very low. It is much lower than the probability level determining significant destructive impact on the stratospheric ozone layer. Another thing is carbon black. The probability of ozone depletion on its surface is of almost two orders of magnitude higher than the probability level of significant effects on the ozone layer. Thus, volcanic emissions of nanosized carbon-black aerosol in the tropical stratosphere should lead to a prolonged depression of the stratospheric ozone. So it allows to explain the long-term negative trend of total ozone in the period of the increased activity of tropical volcanoes, and its recovery at present, characterized by a significant weakening of the volcanic activity in the tropics.

Since the presence of ozone in the stratosphere largely determines its temperature due to the absorption of solar UV radiation by ozone, so its reduction, mostly noticeable in the polar stratosphere, results in stratospheric cooling. Thus, stratospheric emissions of nanosized carbon black from tropical volcanoes determine the heating of tropical stratosphere, and the cooling of the polar stratosphere. New temperature contrasts cause significant and prolonged disturbances of the general circulation of the atmosphere (GCA).

Simulation of the heat belt in the tropical stratosphere using an intermediate complexity spectral model of GCA made it possible to show that within 10 years after the shutdown of the stratospheric heating there is warming of high latitude regions at the Earth's surface due to the heat injection from the warmed subtropical regions. During the period of the increased activity of tropical volcanoes from 1963 to 1994 volcanogenic disturbances of tropical stratosphere occurred on average every 1.5 years. The cumulative addition of the heat-injection periods from low to high latitudes after each eruption increased the rate of global temperature growth. A similar effect that defined the "period of warming of the 30s", was observed at the turn of the XIX and XX centuries. The warming during this period also occurred against the background of the increased activity of tropical volcanoes. The period 1883 - 1932 was characterized by 18 powerful eruptions (on average every 2.8 years), including such eruptions as Krakatau, Santa Maria, and Colima. In contrast, during the periods of rare and minor eruptions, either cooling, like the cooling of 1940-1950's, or the temperature stabilization, manifested in the last decade, is registered.

Алгоритм многомерного вариационного усвоения данных для моделей конвекции-диффузии

Пененко А.В.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: aleks@ommgr.sscs.ru

В работе рассматривается подход к разработке схем усвоения данных на основе добавления в жесткую структуру используемых моделей физических процессов специальных функций управления – функции неопределенности. Для учета данных измерений для такой расширенной модели рассматривается целевой функционал, описывающий расхождение между измеренными и вычисленными значениями. Введенные управляющие переменные выступают в роли переменных для задачи минимизации функционала на фазовом пространстве расширенной модели. Расширенный функционал для задачи усвоения данных строится добавлением математической модели физических процессов в обобщенной постановке к целевому функционалу.

Посредством декомпозиции, расщепления и методов конечного объема, конструируются дискретные аналоги рассматриваемых агрегатов. Из условий стационарности для расширенного функционала получаются системы прямых и сопряженных уравнений, а также уравнения на неопределенность [1,2,3]. В общем случае полученная система может быть решена итерационно при определенных ограничениях на параметры.

На стадии конвекции-диффузии и окна усвоения длиной в один временной шаг дискретной модели, многомерная модель может быть декомпозирована с помощью методов расщепления на набор нестационарных одномерных моделей. Каждый результирующий одномерный фрагмент задачи усвоения, порождаемый расщеплением исходной модели, имеет вид трехдиагональной матричной задачи и может быть решен методом матричной прогонки [3,4]. Так как используется схема расщепления, то мы предлагаем усваивать посредством прямых алгоритмов всю доступную информацию на одном модельном шаге по времени и соответствующих отдельных стадиях расщепления. Такие версии алгоритмов экономичны с вычислительной точки зрения, эффективно распараллеливаются, и могут быть полезны для интегрированных моделей динамики и химии атмосферы.

Литература:

1. V. Penenko, N. Obraztsov, *A variational initialization method for the fields of meteorological elements*, *Soviet Meteor and Hydr N 1*, (1976) 1-11.
2. V. Penenko, A. Baklanov, E. Tsvetova, A. Mahura *Direct and Inverse Problems in a Variational Concept of Environmental Modeling*, *Pure Appl. Geophys.* (2012) 169:447-465
3. V. V. Penenko *Variational methods of data assimilation and inverse problems for studying the atmosphere, ocean, and environment* *Num. Anal. and Appl.*, 2009 V 2 No 4, 341-351.
4. A. Penenko *Some theoretical and applied aspects of sequential variational data assimilation (In Russian)*, *Comp. tech.* v.11, Part 2, (2006) 35-40.

Multidimensional variational data assimilation algorithm for convection-diffusion models

Penenko A.V.

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia
E-mail: aleks@ommgp.sccc.ru

Introduction

We consider an approach to data-assimilation schemes design based on introduction of the special control functions into the structure of the model equations to take into account various uncertainties. In the presence of measurement data this augmented model is treated with variation technique for the functional describing the misfit between measured and calculated values with the introduced control functions as the quantities to be minimized in the phase space of the augmented model state functions. Due to uncertainty, the weak-constraint variational principle is formulated. Then a discrete analogue of the variational principle functional is constructed by means of decomposition, splitting and finite volume methods. From the stationary conditions for the variational principle functional the systems of direct and adjoint equations as well as the uncertainty equations are obtained [1,2,3]. In general case the systems can be solved iteratively with some conditions imposed to the parameters.

In the case of convection-diffusion stage and one time step analysis window the multidimensional model can be further decomposed with the splitting technique to a set of one-dimensional models. Each resulting one-dimensional fragment has the form of tridiagonal block-matrix linear problem that can be solved with the matrix sweep method [3,4]. In the case of assimilation windows longer than one time step the result of fine-grained algorithm analysis can be used as initial guess.

Data assimilation problem for convection-diffusion-reaction model

The 4D models describing the processes of heat, moisture, radiation, and pollutants transport and transformation in the atmosphere have the generic structure:

$$L(\vec{\phi}, \vec{Y}) \equiv \frac{\partial \rho \vec{\phi}}{\partial t} + \text{div} \rho (\vec{\phi} \vec{u} - \mu \text{grad} \vec{\phi}) + \rho ((S \vec{\phi}) - \vec{f}_a - \vec{r}) = 0,$$

$$\vec{\phi}^0 = \vec{\phi}_a^0 + \vec{\xi}, \quad R_{\text{bound}}(\vec{\phi}) = \vec{g}_a + \vec{\varepsilon}, \quad \vec{Y} = \vec{Y}_a + \vec{\zeta}.$$

Incoming measurement data is connected with the state function by means of observation operator \mathbf{H} :

$$\vec{\Psi}_m = [\mathbf{H}(\vec{\phi})]_m + \vec{\eta},$$

Here $\vec{\phi}$ is model state function, $\{\rho, \vec{u}, \mu\} = \vec{Y}\{\rho, \vec{u}, \mu\} = \vec{Y}$ are model parameters that can be calculated with a hydrodynamics model, SS is transformation operator, $\vec{f}_a, \vec{g}_a, \vec{\phi}_a^0$ are *a priori* values of sources and initial data, $\vec{r}, \vec{\xi}, \vec{\varepsilon}, \vec{\zeta}, \vec{\eta}$ are flexibility (uncertainty/control) functions introduced in the rigid model structure.

One-dimensional convection-diffusion implicit data assimilation algorithm

Nonstationary 1D convection-diffusion model can be discretized to the matrix equation on a spatio-temporal grid:

$$\phi^0 = 0,$$

$$(E + \tau L)\phi^{j+1} = \phi^j + \Delta tr^{j+1}.$$

For the sake of computational efficiency we use approximations that produce tridiagonal matrix problems

$$-a_i\phi_{i+1}^{j+1} + b_i\phi_i^{j+1} = \phi_i^j + \Delta tr_i^{j+1}, i = 0, \quad (1)$$

$$-a_i\phi_{i+1}^{j+1} + b_i\phi_i^{j+1} - c_i\phi_{i-1}^{j+1} = \phi_i^j + \Delta tr_i^{j+1}, i = 1, \dots, N-2, \quad (2)$$

$$b_i\phi_i^{j+1} - c_i\phi_{i-1}^{j+1} = \phi_i^j + \Delta tr_i^{j+1}, i = N-1, \quad (3)$$

The assimilated state is the solution of the minimization problem

$$\Phi(\phi^{j+1}, r) = \left(\gamma \sum_{i=1}^{N+1} \left(\frac{\phi_i^{j+1} - \psi_i^{j+1}}{\sigma_i} \right)^2 M_i^{j+1} + \sum_{i=1}^{N+1} (r_i^{j+1})^2 \right) \frac{\Delta t}{2},$$

WRT (1)-(3) where M_i^{j+1} is the spatial-temporal measurement mask and σ_i are measurement device standard deviations. Introducing Lagrange multipliers we obtain non-constrained optimization problem:

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}(\phi^{j+1}, r, \phi^*) &= \left(\gamma \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{\phi_i^{j+1} - \psi_i^{j+1}}{\sigma_i} \right)^2 M_i^{j+1} + \sum_{i=0}^{N-1} (r_i^{j+1})^2 \right) \frac{\Delta t}{2} + \\ &+ \sum_{i=0}^{N-1} (-a_i\phi_{i+1}^{j+1} + b_i\phi_i^{j+1} - c_i\phi_{i-1}^{j+1} - \phi_i^j - \Delta tr_i^{j+1}) \phi_i^*. \end{aligned}$$

Taking the first variations of the augmented functional equal to zero, we obtain the following algorithm.

$$\partial_{\phi_i^*} \bar{\Phi}(\phi^{j+1}, r^{j+1}, \phi^{*j+1}) = 0$$

is equivalent to (1)-(3).

$$\partial_{\phi_{i+1}^{j+1}} \bar{\Phi}(\phi^{j+1}, r^{j+1}, \phi^{*j+1}) = 0$$

is equivalent to

$$-c_{i+1}\phi_{i+1}^{*j+1} + b_i\phi_i^{*j+1} = -\gamma \frac{M_i}{\sigma_i^2} (\phi_i^{j+1} - \psi_i^{j+1}) \Delta t, i = 0,$$

$$-c_{i+1}\phi_{i+1}^{*j+1} + b_i\phi_i^{*j+1} - a_{i-1}\phi_{i-1}^{*j+1} = -\gamma \frac{M_i}{\sigma_i^2} (\phi_i^{j+1} - \psi_i^{j+1}) \Delta t, i = 1, \dots, N-2,$$

$$b_i\phi_i^{*j+1} - a_{i-1}\phi_{i-1}^{*j+1} = -\gamma \frac{M_i}{\sigma_i^2} (\phi_i^{j+1} - \psi_i^{j+1}) \Delta t, i = N-1.$$

and

$$\partial_{r_i^{j+1}} \bar{\Phi}(\phi^{j+1}, r^{j+1}, \phi^{*j+1}) = 0$$

is equivalent to

$$r_i^{j+1} - \phi_i^{*j+1} = 0, i = 0, \dots, N-1.$$

The systems obtained can be merged into tridiagonal matrix equation [3,4]

$$-\begin{pmatrix} a_i & 0 \\ 0 & c_{i+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{i+1}^{j+1} \\ \phi_{i+1}^{*j+1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_i & -\Delta t \\ \gamma M_i \Delta t & b_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_i^{j+1} \\ \phi_i^{*j+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_i^j \\ \frac{\gamma M_i \Delta t}{\sigma_i^2} \psi_i^{j+1} \end{pmatrix},$$

$$-\begin{pmatrix} a_i & 0 \\ 0 & c_{i+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{i+1}^{j+1} \\ \phi_{i+1}^{*j+1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_i & -\Delta t \\ \gamma M_i \Delta t & b_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_i^{j+1} \\ \phi_i^{*j+1} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} c_i & 0 \\ 0 & a_{i-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{i-1}^{j+1} \\ \phi_{i-1}^{*j+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_i^j \\ \frac{\gamma M_i \Delta t}{\sigma_i^2} \psi_i^{j+1} \end{pmatrix},$$

$$-\begin{pmatrix} a_i & 0 \\ 0 & c_{i+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{i+1}^{j+1} \\ \phi_{i+1}^{*j+1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_i & -\Delta t \\ \gamma M_i \Delta t & b_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_i^{j+1} \\ \phi_i^{*j+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_i^j \\ \frac{\gamma M_i \Delta t}{\sigma_i^2} \psi_i^{j+1} \end{pmatrix},$$

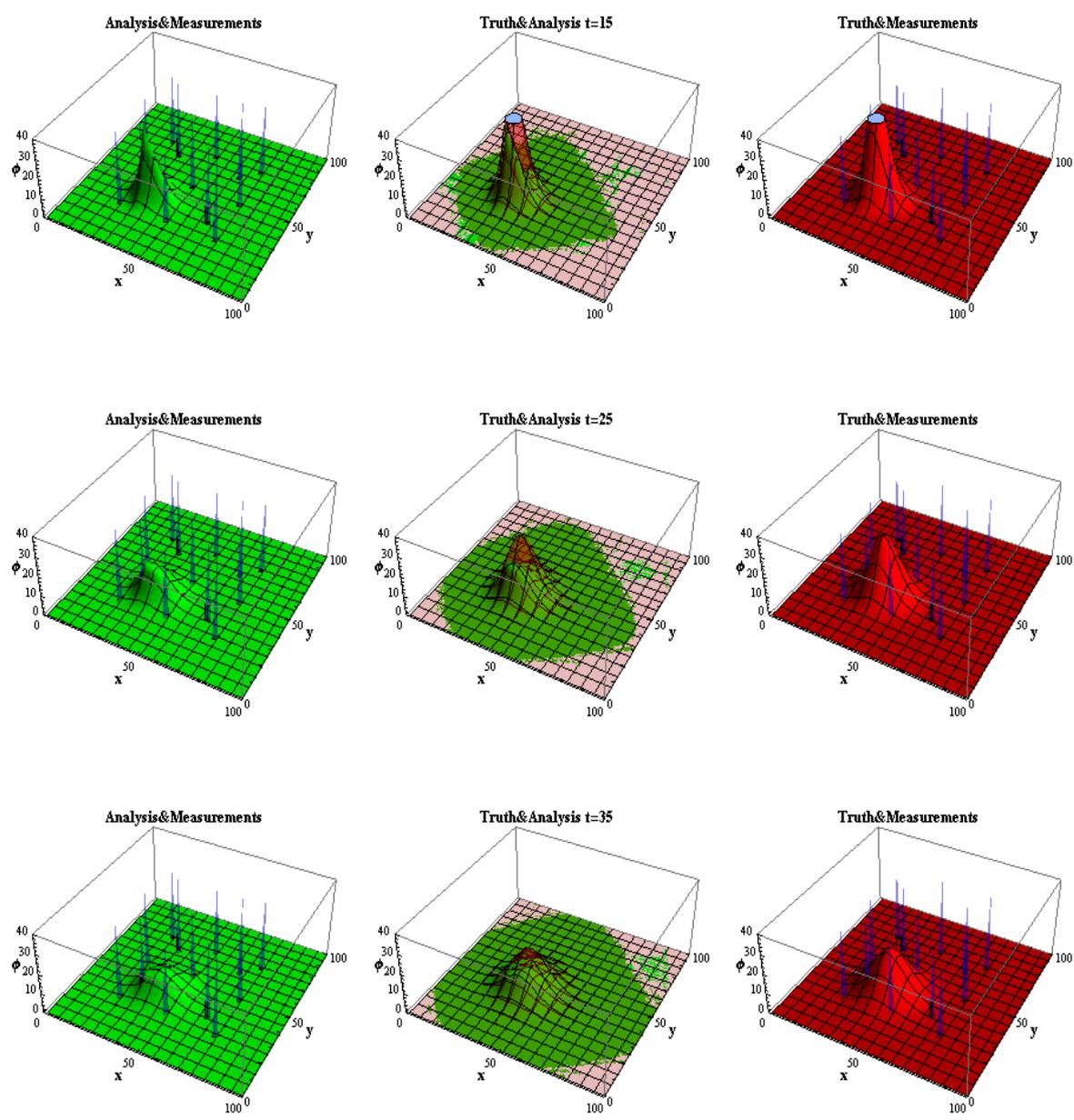


Fig. 1 Data assimilation scenario with 13 regularly placed stationary measurement devices to the model with zero sources. Assimilated solution - green with measurement positions - blue (left). "Truth" - red with measurement positions - blue (right) and superposition of the "True" and assimilated solution (center).

which is solved with the matrix sweep method.

Assimilation parameter is chosen according to the discrepancy principle. First we choose the target level δ_* of discrepancy.

$$\|\phi^{j+1} - \Psi^{j+1}\|_{\sigma} = \sqrt{\sum_{l=1}^M \left(\frac{\phi_{m(l)}^{j+1} - \psi_{m(l)}^{j+1}}{\sigma_l} \right)^2} \approx \delta_*$$

The assimilation parameter is calculated with the following algorithm

$$\gamma_1 = 1, \quad \gamma_{k+1} = \frac{\|\phi^{j+1} - \Psi^{j+1}\|_{\sigma}}{\delta_*} \gamma_k$$

Fine-grained data assimilation in multidimensional case

In two dimensional case the problem can approximated with the following matrix equation

$$\begin{aligned} \phi^0 &= 0, \\ \frac{\bar{\phi}^{j+1} - \bar{\phi}^j}{\tau} + L_x \bar{\phi}^{j+1} + L_y \bar{\phi}^{j+1} &= f^{j+1}. \end{aligned}$$

With the use of additive splitting scheme the model can be decomposed to a set of one-dimensional matrix equations.

$$\frac{\phi_x^{j+1} - \phi^j}{2\tau} + L_x \phi_x^{j+1} = f_1^{j+1}, \quad \frac{\phi_y^{j+1} - \phi^j}{2\tau} + L_y \phi_y^{j+1} = f_y^{j+1}, \quad (4)$$

$$\phi^{j+1} = \frac{1}{2}(\phi_x^{j+1} + \phi_y^{j+1}). \quad (5)$$

Data assimilation is done on each splitting step. On the grid lines containing measurement data the standard forward step (4) is replaced with the result of the corresponding augmented functional minimization

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_x(\phi_x^{j+1}, r, \phi^*) &= \left(\gamma \sum_{i=0}^{N_x-1} \left(\frac{(\phi_x^{j+1})_i - \Psi_i^{j+1}}{\sigma_i} \right)^2 M_i^{j+1} + \sum_{i=0}^{N_x-1} (r_i^{j+1})^2 \right) \Delta t + \\ &+ \left\langle \left((I + 2\tau L_x) \phi_1^{j+1} - \phi^j - \Delta t r^{j+1} \right)_l, \phi^* \right\rangle. \\ \bar{\Phi}_y(\phi_y^{j+1}, r, \phi^*) &= \left(\gamma \sum_{i=0}^{N_y-1} \left(\frac{(\phi_y^{j+1})_i - \Psi_i^{j+1}}{\sigma_i} \right)^2 M_i^{j+1} + \sum_{i=0}^{N_y-1} (r_i^{j+1})^2 \right) \Delta t + \\ &+ \left\langle \left((I + 2\tau L_y) \phi_y^{j+1} - \phi^j - \Delta t r^{j+1} \right)_i, \phi^* \right\rangle. \end{aligned}$$

Conclusion

As the splitting schemes is used, we propose to assimilate all available data at one model time step but on the corresponding splitting stages by means of direct algorithms without iterations. The approach can be called fine-grained data-assimilation. Such versions of algorithms are cost-effective, easy to be parallelized and may be useful for integrated models of atmospheric dynamics and chemistry.

References:

1. V. Penenko, N. Obraztsov, *A variational initialization method for the fields of meteorological elements*, *Soviet Meteor and Hydr N 1*, (1976) 1-11.
2. V. Penenko, A. Baklanov, E. Tsvetova, A. Mahura *Direct and Inverse Problems in a Variational Concept of Environmental Modeling*, *Pure Appl. Geophys.* (2012) 169:447-465
3. V. V. Penenko *Variational methods of data assimilation and inverse problems for studying the atmosphere, ocean, and environment* *Num. Anal. and Appl.*, 2009 V 2 No 4, 341-351.
4. A. Penenko *Some theoretical and applied aspects of sequential variational data assimilation (In Russian)*, *Comp. tech. v.11, Part 2*, (2006) 35-40.

Новые подходы к моделированию процессов теплообмена в пограничном слое атмосферы над Московским мегаполисом

Константинов П.И., Варенцов М.И., Самсонов Т.Е.

Московский государственный университет, Россия

E-mail: kostadini@mail.ru, mvar91@gmail.com, iamste@yandex.ru

Одной из актуальных задач современной метеорологии является улучшение качества прогноза погоды для урбанизированных территорий, которые оказывают существенное влияние на состояние пограничного слоя атмосферы. Давно известным явлением является так называемый городской остров тепла [2]: в определенных ситуациях крупный город может быть более чем на 10°C теплее окружающих его естественных территорий. Данный эффект обуславливается большим количеством факторов, далеко не все из которых учитываются в современных атмосферных моделях, используемых для прогноза погоды.

Также существенные различия метеорологических величин могут существовать в пределах мегаполиса. Так, эксперимент UrbEx-2011 показал, что разница температуры между городской улицей и расположенным на расстоянии всего 100 метров лесопарком могут достигать 2°C [1]. И если в случае нормальных условий погоды подобная разница не является существенной, то в условиях экстремальной жары каждое повышение температуры на каждый лишний градус может сказаться на самочувствии и здоровье людей.

Подобные различия внутри города связаны с пестротой и мозаичностью городского ландшафта и определяются соотношением площадей застроенных территорий, дорог, водоемов и участков с растительным покровом в конкретной точке. Также существенную роль могут играть морфологические характеристики застройки, такие как высота зданий, ширина и направление улиц. В данном исследовании была предпринята попытка учесть мозаичность и неоднородность городской подстилающей поверхности при прогнозировании погоды для Московского мегаполиса. Для этого была применена технология даунскейлинга (от англ. downscaling): данные прогноза мезомасштабной оперативной модели COSMO-RU использовались в качестве начальных и граничных условий для авторской модели городского пограничного слоя атмосферы Urb_Mos с горизонтальным шагом по сетке, равным 500 м, то есть относящейся к классу микромасштабных моделей.

Разработанная модель Urb_Mos позволяет более детально, чем существующие прогностические модели, учитывать влияние подстилающей поверхности на основании концепции городского каньона – идеализированной схемы улицы с вытянутой вдоль нее зданиями [5]. Данная концепция позволяет учесть переотражение и переизлучение солнечной и длинноволновой радиации между зданиями, а также их влияния на турбулентную диффузию и адвекцию [3, 4]. Для задания параметров городских каньонов в ячейках модели использовалась база данных, разработанная на Кафедре картографии и геоинформатики, содержащая большой набор характеристик подстилающей поверхности, включая морфологические характеристик городских каньонов, рассчитанные на основе оригинальных алгоритмов «осреднения» реальной застройки.

С использованием связки моделей COSMO-RU и Urb_Mos было проведено два численных эксперимента. Первый эксперимент был проведен для периода проведения эксперимента UrbEx-2011 с целью валидации модели на основании сравнения модельных и экспериментальных данных. Второй эксперимент был проведен с целью изучения распределения температуры воздуха в мегаполисе в условиях экстремальной жары.

Как хорошо заметно на рис.1, для рассматриваемого периода модель URB-MOS в значительной степени исправила ошибки исходного прогноза COSMO-RU по всем параметрам, что характеризуется уменьшением среднеквадратичной ошибки прогноза (СКО), а также уменьшением абсолютных ошибок предсказания максимума и минимума за весь период. Наиболее существенным изменениям подвергся прогноз ночных температур для Балчуга и ВВЦ, в результате которого были практически полностью исправлены ошибки занижения ночных температур в исходном прогнозе. Ошибка занижения дневных температур полностью днем была исправлена не полностью, но стала несколько меньше. Также были исправлен прогноз относительной влажности для Балчуга, расположенного непосредственно в пределах районов застройки. Для расположенной в парковой зоне станции ВВЦ необходимо признать факт ухудшения исходного прогноза, что связано с недостаточной точностью прогноза потока скрытого тепла в лесопарковых ландшафтах. При этом для станции Балчуг для 28 апреля было воспроизведено кратковременное усиление ветра, связанное с совпадением направления ветра и каньона. К сожалению, низкая частота и точность измерений скорости ветра на метеостанциях не позволяют проверить, наблюдалось ли оно в реальности.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК-1497.2013.5

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-05-33090 мол_а_вед.

Литература:

1. Варенцов М.И. Экспериментальное изучение и моделирование внутрисуточной динамики метеорологических параметров приземного слоя атмосферы внутри городской застройки// *Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2012* — М.: МАКС Пресс. 2012.
2. Howard L. *The climate of London // deduced from meteorological observations.* London: W. Phillips. 1818.
3. Martilli A., Clappier A., Rotach M.W. *An urban surface exchange parameterization for mesoscale models // Bound. Layer Meteor.* 2002. N. 104. P. 261–304.
4. Masson V. *A Physically-Based Scheme for the Urban Energy Budget in Atmospheric models// Bound. Layer Meteor.* 2000. V. 94 (3). P. 357-397.
5. Nunez M., Oke T.R. *The energy balance of an urban canyon// J. Appl. Meteor.* 1977. V. 16. P. 11-19.

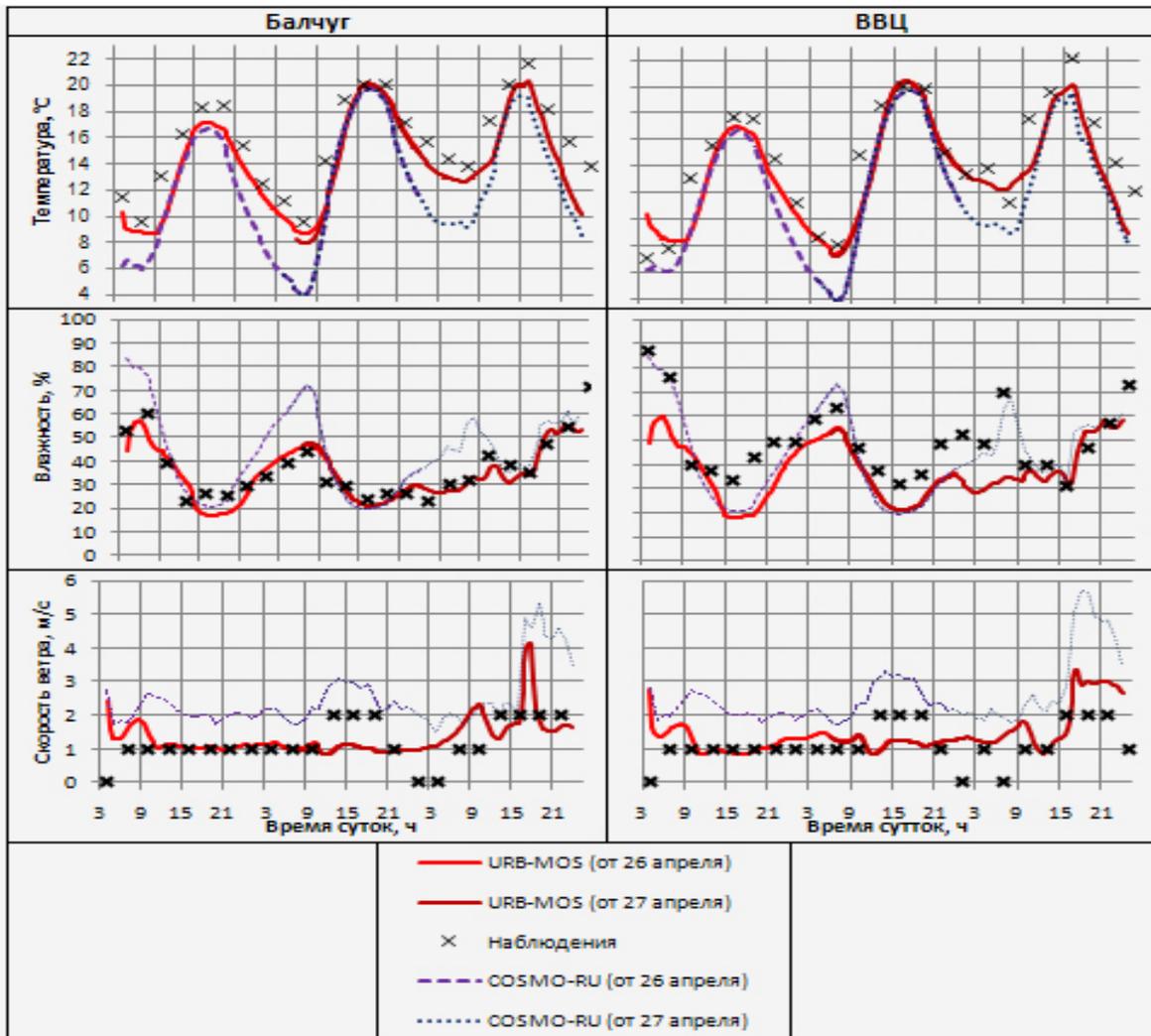


Рис 1. Сравнение прогноза URB-MOS с COSMO-RU и данными измерений

New approaches for thermal exchange processes simulation in Moscow's atmospheric boundary layer

Konstantinov P.I., Varentzov M.I., Samsonov T.E.

E-mail: kostadini@mail.ru, mvar91@gmail.com, iamste@yandex.ru

The principal task of modern urban meteorology is to elaborate the technology for weather forecast in building area with high spatial resolution. It is not simply allowed by regional models – urban surface is very complicated area, where well-known parametrisations of turbulent fluxes (Monin-Obukhov theory) may not work properly.

In current work the urban canopy model URB_MOS based on urban canyon concept were elaborated. Main parametrizations of turbulence were verified by UrbEx-2011 - this experiment involved a wide spectrum of observations, including the surfaces and air temperatures measurement at the different parts of the canyon and the sensible heat flux measurement by the acoustic anemometer. New approaches for horizontal advection and diffusion were included in modeling technology.

As source of initial and boundary conditions we used main regional model of Russian Hydrometeorological Service COSMO-RU.

Experiments with simulation of main meteorological parameters in surface layer (temperature, humidity and wind speed) showed that process-based model URB_MOS simulates well the fluxes of water,

energy and momentum between the land surface and the atmosphere in urbanized areas. Errors with reproduction of night temperatures at 2 meters above ground level shown by COSMO-RU were corrected by URB_MOS in center and sud-ouest of Moscow. Relative humidity were successfully simulated by URB_MOS only in building areas.

Гравитационные течения в атмосфере: модели конечных разностей и конечных элементов

Юдин М.С.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: yudin@ommfao.sccc.ru

Двухмерная версия трехмерной негидростатической конечно-разностной модели сравнивается с двумерной конечно-элементной моделью при расчете эффектов распространения атмосферного фронта над горной долиной. В этих моделях поверхность фронта описывается специальным уравнением для адвекции скалярной субстанции, которое решается с помощью полу-Лагранжевой схемы третьего порядка. Для дискретизации по времени используется комбинация схемы чехарда с фильтром Асселина. В конечно-разностной модели пространственные дискретизации сохраняют момент и скаляры. В конечно-элементной модели используются треугольные элементы. Обе модели удовлетворительно описывают распространение холодного атмосферного фронта над долиной. Конечно-разностная модель по-видимому более универсальна при сложной подстилающей поверхности, однако в конечно-разностной модели легче сохранить инварианты исходных уравнений.

Работа поддержана программами № 4 Президиума СО РАН, № 3 Отделения математических наук РАН, и грантом 11-01-00187 РФФИ.

Gravity currents in the atmosphere: FDM and FEM models

Yudin M.S.

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS
Novosibirsk, Russia
E-mail: yudin@ommfao.sccc.ru

A 2D version of a 3D nonhydrostatic finite-difference meteorological model is compared with a 2D finite-element model used to simulate the effects of atmospheric front propagation over a 2D valley. The front surface is described in the models by an equation for advection of a scalar substance, which is solved by a third-order semi-Lagrangian procedure. A leap-frog type scheme in combination with an Asselin filter is used for time discretization.

Special operators of space discretization are used to provide conservation of momentum and scalars in the finite-difference model. Triangular elements are used in the finite-element model.

The results of 2D model simulations show reasonable behavior of cold front propagation over a valley as calculated by both models. The FEM model seems more universal in describing complicated surfaces, and with the FDM model it is easier to conserve the invariants of the initial differential equation system.

Introduction

Atmospheric phenomena take place on a wide range of horizontal length scales. The flows are divided into some categories ranging from micro to macroscales. Flows ranging from several to thousands of kilometers are called mesoscale ones. Atmospheric fronts over complex terrain are examples of mesoscale gravity flows. A terrain-following coordinate system is most often used to describe numerically a local topography of complicated shape. The domain becomes a rectangular one that can be easily discretized into a finite-difference

grid. However, the transformed equations are more complicated than the original ones. In addition, it can be shown that the transformation function must satisfy some smoothness restrictions. In the present paper a finite-element model is used as an alternative to the above approach. Specifically, a 2D version of a 3D nonhydrostatic finite-difference meteorological model is compared with a 2D finite-element model used to simulate the effects of atmospheric front propagation over a 2D valley.

The propagation of an atmospheric front over steep terrain is a phenomenon of great practical importance in meteorology [1-4]. This is also a subject matter of interest for numerical modelers, since atmospheric fronts can be considered as surfaces of discontinuity in the atmosphere. To simulate the deformation of these surfaces by spacial obstacles like mountains and valleys with good accuracy, efficient numerical methods are needed. The literature on theoretical studies of atmospheric fronts is not extensive (e.g. [5]). Two distinct approaches can be recognized in the numerical simulation of front propagation. In one approach, the front to be calculated is considered as a gravity current driven by a cold air source [6]. In the other, the front surface is considered as a passive scalar, a tracer to distinguish between warm and cold air masses [7].

In the present paper, a preliminary investigation is carried out to simulate cold front propagation over a steep valley in two dimensions with a finite-difference model. Specifically, a 2D version of a 3D nonhydrostatic meteorological model is used. The model is based on spacial discretizations that conserve some important quantities of the phenomena under study like momentum and scalars. Also, an efficient procedure is used to calculate the advection of scalars. A 2D finite-element model based on triangular elements is used to simulate the same phenomenon of cold front propagation over an idealized valley and the results are compared.

Governing equations

A small-scale nonhydrostatic model developed for simulations in meso- and microscales in two-dimensional statement with basic equations in a terrain-following coordinate system is considered (see, for example, [8]).

Orographic stability restrictions

The above system of equations is reduced to a 2D form and discretized by using numerical schemes with central differences in time and space, on grids for the scalar and vector quantities shifted half-grid size from each other in all three space variables (see, for example, [8]). The terms in the left-hand side of the linearized system are taken by central differences in time and space, while the terms in the right-hand side are taken at half-time grid levels [9]. The basic equations system is linearized around a constant basic state wind velocity vector (U, V) .

To perform a von Neumann stability analysis procedure, one needs to estimate the amplification factor of the total grid operator. Because of the high complexity of the linearized equations, this is not a simple task, and one has to perform some simplifications.

In paper [9], a two-dimensional stability analysis was carried out by solving a characteristic equation analytically with Ferrari's method. In this paper, instead of calculating the characteristic equation, an eigenvalue problem for the amplification matrix is solved by using a procedure for matrices in Hessenberg form described by Wilkinson and Reinsch [11] (see also [12]).

Calculations have shown that, similar to the two-dimensional case considered in [9], the necessary stability limitation is as follows:

$$0 \leq \Delta G \leq \gamma < 1,$$

where ΔG is a measure of mountain steepness and γ is about 0.25.

Comparison of FDM and FEM models for an idealized front over a valley The above model is compared with a finite-element model. The FEM model is described in [15]. The model is a continuation of a previous version developed in collaboration with K. Wilderotter. The front surface is treated by an efficient semi-Lagrangian finite difference scheme [13, 14]. A third-order scheme was used as a reasonable compromise between cost and accuracy. To apply the above constructions to simulating the propagation of an idealized cold atmospheric front over a valley in two dimensions the following input parameters are taken from [6]: the obstacle is a circular valley with an axially symmetric Gaussian shaped height profile of 600 m. The computational domain is 25×2 km. In contrast to [6], the front was not driven by a cold air source, but given initially as a step-function. Figures 1, 2 and 3, 4 show the results produced by the FDM and FEM models, respectively.

Figure 1 shows the FDM front as it enters the valley.

In Figure 2 the FDM front climbs the opposite side of the valley.

In Figures 3 and 4 the FEM front enters and exits the valley, respectively. A reasonable front propagation behavior is obtained, as compared to the results of [6].

Conclusions

The general patterns of meteorological fields calculated by the FDM and FEM models are very close to each other. It should be noted that the FEM model seems more universal in describing complicated surfaces,

although with the FDM model it is easier to conserve the invariants of the initial differential equation system. The results of calculations presented above are preliminary. They will be extended to more realistic situations described by more sophisticated physical parameterizations. In forthcoming papers the effects of stratification and valley shape on front propagation will be studied. Also, comparison will be made with simulation results on atmospheric front deformation by mountains and hills.

The work was supported by the Presidium, RAS, under Program N 4, the Department of Mathematical Sciences, RAS, under Program N 3, and the Russian Foundation for Basic Research under Grant 11-01-00187.

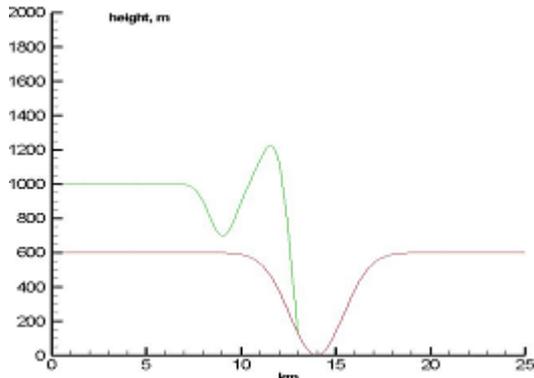


Figure 1

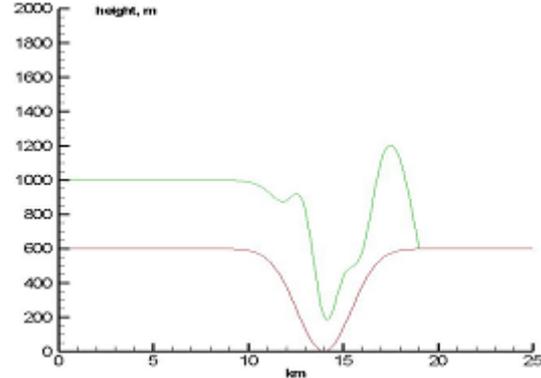


Figure 2

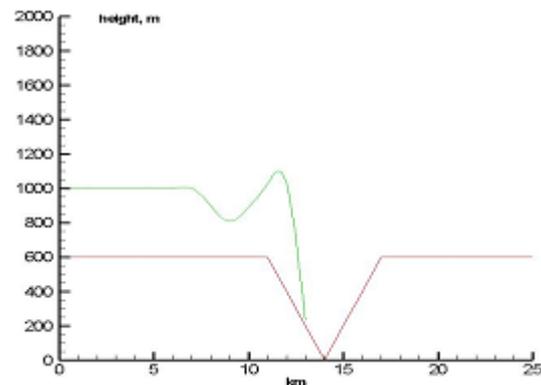


Figure 3

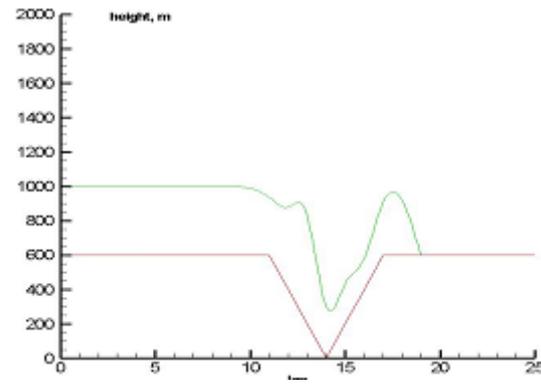


Figure 4

References:

1. Pielke R.A. *Mesoscale Meteorological Modeling*. Orlando: Academic Press, 1984.
2. Marchuk G.I. *Mathematical Modelling in the Problem of the Environment*. North Holland, Amsterdam, 1982.
3. Marchuk G.I., *Numerical Methods in Weather Prediction*, Academic Press, 1974.
4. Penenko V.V., Aloyan A.E. *Models and methods for environmental problems*. Novosibirsk: Nauka, 1985 (in Russian).
5. Davies, H. C., *On the orographic retardation of a cold front // Beitr. Phys. Atmos.* 1984. \ Vol.57, \ P.409--418.
6. Bischoff-Gauss, I., Gross, G., Wippermann, F. *Numerical studies on cold fronts. Part 2: Orographic effects on gravity flows // Meteorol. Atmos. P.* 1989. \ Vol.40. \ P.159--169.
7. Schumann U. *Influence of mesoscale orography on idealized cold fronts // J. Atmos. Sci.* 1987. \ Vol.44, \ No23. \ P.3423--3441.
8. Yudin M.S. *A splitting algorithm for a compressible atmospheric model*. In: V.V. Penenko (ed.) "Methods of Math. Modeling for Problems of Environmental Protection and Ecology", Novosibirsk, Comp. Center, 1991 (in Russian).
9. Ikawa M., *Comparison of some schemes for nonhydrostatic models with orography // J. Meteor. Soc. Japan*. 1988 Vol. 66, No. 5, pp. 753-776.
10. Yudin M.S. *Estimation of topography constraints on the numerical stability of mountain wave simulation // NCC Bull., Num. Model. Atm.*, 2004, No. 9, P. 51-56.
11. Wilkinson J.H., Reinsch C., *Handbook for Automatic Computation, Linear Algebra II*, Springer, New York, 1971.
12. Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. *Numerical Recipes*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1986.
13. Ritchie H. *Semi-Lagrangian advection on a Gaussian grid // Mon. Wea. Rev.* 1987. \ Vol.115. \ P.136--146.

14. Krupchatnikoff V.N., Fomenko A.A. *Semi-Lagrangian semi-implicit scheme of transport in the climatic model ECSib. Novosibirsk, 1997.* (Preprint / ICMMG).

15. Yudin M.S., Wilderotter K. *Simulating atmospheric flows in the vicinity of a water basin. \\Computational Technologies. Vol. 11, No. 3, pp. 128*

Use of a planetary boundary layer model to estimate wind power potential of the Gulf of Finland

¹Monzikova A.K. , ¹Kudryavtsev V.N., ²Soren E. Larsen

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

² Technical University of Denmark, Department of Wind Energy, Denmark

E-mail: monzik@rshu.ru, kudr@rshu.ru, sola@dtu.dk

This work is dedicated to the analysis of offshore wind power available at the Gulf of Finland. The most central wind climatology is the annual wind resource, that is understood as the expected annual wind production, P , at a given site and a given turbine height. The power in the wind is proportional to the cube of the wind speed, i.e. double the wind speed and the power will increase by a factor of eight.

The relevant wind climate is often obtained from nearby measurements that are transferred to the site and height of interest, using existing boundary layer models, here denoted the so called wind atlas method, correcting the measured data for local features like roughness, terrain elevation changes, and obstacles. Using boundary layer theory the data are afterwards converted to predicted wind climatology for a potential wind turbine site.

In this work about 10 years measurement data from meteorological stations near coastline was used to obtain wind climatology of the Gulf of Finland. Two-layer model of the equilibrium planetary boundary layer (PBL) was used as PBL model in wind atlas methodology.

Additionally an average difference between land and sea was involved to consider effect of heat flux on the model results. Since the Gulf of Finland is covered by ice for several months in the year, the factor of changeable surface roughness condition due to ice or snow was included in the model.

This research resulted in the first approach of wind atlas for Gulf of Finland area, which contains information about wind distribution and wind power density at different hub heights.

Использование модели пограничного слоя для оценки ветроэнергетического потенциала Финского залива

¹Монзикова А.К., ¹Кудрявцев В.Н., ²Soren E. Larsen

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

² Technical University of Denmark, Department of Wind Energy, Denmark

E-mail: monzik@rshu.ru, kudr@rshu.ru, sola@dtu.dk

Ветроэнергетика является перспективной областью энергетики, за счет своей экологичности и неиссякаемости. В Европе строительство ветряных парков идет полным ходом, и вклад ветровой энергии в энергетику стран Европы достигает 20%, а в России эта цифра составляет менее 0,1%.

Финский залив достаточно мелководен и большая часть его территории непригодна для судоходства и остается неиспользуемой. Однако такие условия хорошо подходят для установки ветрогенераторов. Для оценки экономической целесообразности постройки ветрового парка в том или ином месте необходимо исследование потенциальной ветровой энергии на выбранной территории, ее сезонных и климатических изменчивостей.

В работе был проведен анализ ветрового потенциала Финского залива с использованием модели планетарного пограничного слоя основанной на теории подобия.

За основу брался стандартный, широко распространенный в мировой практике, метод оценки доступной ветровой энергии, разработанный в Датском Техническом Университете (DTU Risø). Его идея заключается в том, что ветровой климат изучаемой области определяется на основе данных измерений с ближайших метеорологических станций, с использованием существующих моделей пограничного слоя и с учетом местных орографических особенностей. На основе данных измеренных на стан-

ции рассчитывается ветер в свободной атмосфере, а затем географический ветер пересчитывается для пограничного слоя в другой точке пространства

Для расчетов использовались данные измерений с метеорологических станций расположенных в прибрежной зоне Финского залива. Экстраполяция данных измеренных на станциях на область Финского залива осуществлялась при помощи двухслойной равновесной модели планетарного пограничного слоя.

Модель базируется на следующих уравнениях:

$$\frac{\kappa U_g \cos \alpha}{u_*} = -A + \ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\kappa U_g \sin \alpha}{u_*} = -B \quad (2)$$

$$\frac{\Delta \theta_{PBL} \kappa_T}{\theta_*} = \ln \left(\frac{h}{z_0} \right) - C \quad (3)$$

А, В, С – коэффициенты, зависящие от стратификации атмосферы.

Для ветровой энергетики особый интерес представляет нейтрально стратифицированный атмосферный пограничный слой, поскольку именно такие условия чаще наблюдаются во время сильных ветров. При нейтральной стратификации коэффициенты А, В – константы, а коэффициент С равен нулю. Существуют различные эмпирические значения этих коэффициентов для нейтрального пограничного слоя. В ходе выполнения данной работы, в качестве констант брались значения, используемые в стандартном методе используемые в «стандартном» методе Risø [1], и значения, предложенные в модели пограничного слоя Брауна [2].

В ходе анализа был выявлен ряд особенностей ветрового режима в области Финского залива. Это преобладание ЮЮЗ и ЮЗ ветров, годовой ход скорости ветра с максимумом в зимние месяцы и минимумом в летние. Также была отмечена особенность трансформации ветрового потока, связанная с прохождением его над водной поверхностью, было замечено, что ветровой поток после прохождения над акваторией Финского залива имеет в среднем большие значения скорости ветра.

В результате модельных расчетов получены среднесуточные значения плотности кинетической энергии ветрового потока для Финского залива на высоте 50 метров.

На графике хорошо виден годовой ход мощности ветрового потока, с минимальными значениями в летние месяцы и максимальными в зимние. Штриховкой на графике показано возможное увеличение ветровой энергии, вызванное присутствием ледового покрова в зимнее время года.

Ветровые турбины работают в определенных диапазонах скоростей ветра. Обычно минимальное пороговое значение, ниже которого энергия не вырабатывается, составляет 3-4,5 м/с. Верхний порог составляет 20-36 м/с. А максимальная вырабатываемая энергия приходится на значения скоростей 11-16 м/с.

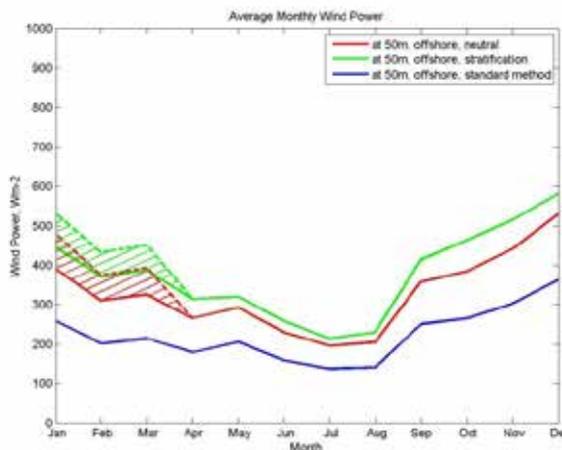


Рис 1. График среднесуточных значений кинетической энергии ветра P [Вт/м²] на высоте 50 метров. Синей цветом обозначены результаты рассчитанные «стандартным» методом; красным – при помощи двухслойной модели, без учета стратификации; зеленым – при помощи двухслойной модели, с учетом стратификации над водой. Пунктирной линией обозначены результаты с учетом ледового покрова.

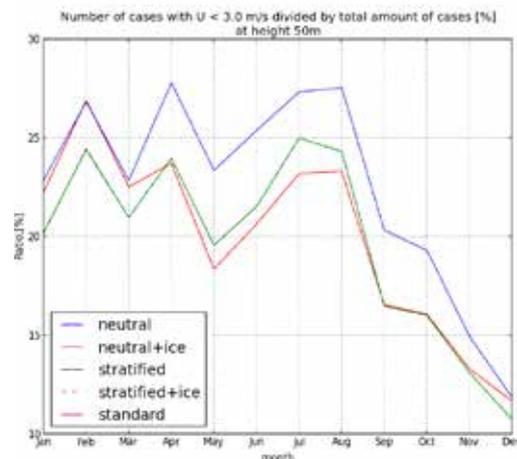


Рис 2. Процентное отношение количества дней в месяце, когда скорость ветра на высоте 50 метров меньше порогового значения ветрогенератора. Обозначения те же что на рис 1.

На рис показано количество случаев в месяце, когда рассчитанный ветер на высоте 50 м меньше порогового значения в 3.5 м/с. Выражено в процентах относительно к общему количеству случаев.

Анализируя эти результаты, можно сделать вывод, что период с сентября по март наиболее эффективен для ветроэнергетического потенциала. Поскольку именно в холодное время года потребление электроэнергии максимально, такая особенность ветрового режима, несомненно, является благоприятной для данного региона.

Литература:

1. N.G. Mortensen, L. Landberg, I. Troen, and E.L. Petersen.: 1993, 'Wind atlas analysis and application program (WAsP), user's guide.', Technical Report Risoe-I-666(EN), Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.
2. Brown, R. A.: 1982, 'On two-layer models and the similarity functions for the PBL', *Boundary-Layer Meteorol.*, 24, 451-463.

Влияние волновых цепочек на активность планетарных волн в нижней стратосфере Антарктики в сентябре 2002 г.

¹Варгин П.Н., ²Петерс Д., ²Габриэль А.

¹Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, Долгопрудный, Россия

²Институт физики атмосферы, Университет г. Росток, Германия

E-mail: p_vargin@mail.ru, peters@iap-kborn.de, gabriel@iap-kborn.de

Web: <http://www.cao-rhms.ru/ofvsa/> <http://www.iap-kborn.de>

В начале сентября 2002 г. на юго-востоке Индонезии и вблизи юго-восточного побережья Африки (южнее о.Мадагаскар) наблюдались сильные конвекционные процессы, которые привели к генерации в средней тропосфере двух волновых цепочек. Эти волновые цепочки распространялись в юго-восточном направлении в определенных условиях зонального течения. Распространение волновых цепочек привело к усилению двух антициклонов в верхней тропосфере – нижней стратосфере Антарктики [1-2], которое в свою очередь привело через несколько дней к разделению стратосферного полярного вихря в ходе впервые зарегистрированного и единственного в Антарктике Главного Внезапного Стратосферного Потепления (ВСП) 22-25 сентября 2002 г.

В настоящей работе исследуется возможное влияние волновых цепочек на активность планетарных волн в нижней стратосфере Антарктики. С использованием упрощенной версии модели циркуляции атмосферы ECHAM4 (с использованием параметризации Ньютоновского выхолаживания и верхней границей на 10 гПа) проведены расчеты для среднемесячного зонального течения, соответствующего сентябрю 2002 г. Для генерации волновых цепочек в модельных расчетах в верхней тропосфере были заданы два источника на юго-востоке Индонезии и вблизи юго-восточного побережья Африки, расположение, интенсивность и временная изменчивость которых были заданы в соответствие с результатами анализа данных наблюдений.

Модельные расчеты выявили распространение двух волновых цепочек в юго-восточном направлении, которое привело через 10-12 дней к усилению планетарной волны с зональным волновым числом $k=2$ в нижней стратосфере Антарктики, сопровождавшееся усилением распространения волновой активности в направлении полюса по сравнению с расчетом без волновых источников. Полученные результаты моделирования подтверждают результаты анализа данных наблюдений, свидетельствующих о возможности усиления волновыми цепочками планетарной волны волной $k=2$.

Литература:

1. Nishii, K., Nakamura, H., 2004: Tropospheric influence on Antarctic ozone hole split 2002, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L16103, doi:10.1029/2004GL019532
2. Peters, D., Vargin, P., Körnich, H., 2007: A Study of the Zonally Asymmetric Tropospheric Forcing of the Austral Vortex Splitting During September 2002. *Tellus*, 59A, 384–394.

Impact of extratropical Rossby wave trains on planetary wave activity in the polar southern lower stratosphere in September 2002

¹Vargin P.N., ²Peters D., ²Gabriel A.

¹Central Aerological Observatory, Dolgoprudnyi, Russia

²Leibniz-Institute of Atmospheric Physics, Germany

E-mail: p_vargin@mail.ru, peters@iap-kborn.de, gabriel@iap-kborn.de

Web: <http://www.cao-rhms.ru/ofvsa/> <http://www.iap-kborn.de>

At the beginning of September 2002 strong convection processes in the south-eastern Indonesian and African subtropical regions have been observed. They generated two Rossby wave trains in the middle troposphere that propagated east-southward under the specific conditions of a mean large-scale flow. The propagation of these wave trains lead to enhancing of two anticyclonic anomalies in the southern upper troposphere – lower stratosphere of polar region [1-2]. Later on increase of these two anticyclones lead to the splitting of polar vortex into two parts in the lower-middle stratosphere which occurs as a result of the first observed Major Stratospheric Warming in the Antarctica on 22-25 September 2002.

In our model study we examined the possible impact of subtropical Rossby waves on the planetary wave activity in the lower stratosphere over the Antarctica. With a simplified GCM ECHAM4 (the thermodynamic equation contains so-called Newtonian cooling parameterization resulting in temperature relaxation toward equilibrium state - e.g. September 2002; upper boundary - 10 hPa), sensitivity experiments were performed for the mean basic state of September 2002. We use the wave maker approach for the generation of Rossby waves in the subtropical upper troposphere at distinct two locations which corresponded to observed regions with strong convection nearby the south-eastern Indonesia and Africa. Two Rossby wave trains with east- southward propagation have been identified in performed model experiment. Propagation of these two wave trains after 10—12 days lead to amplification of the planetary wave number two in the upper troposphere and higher up to the middle stratosphere in the polar latitudes. This increase was attended by an enhanced poleward wave activity flux in comparison with the control run without wave maker forcing. Obtained model results confirm the observational analysis showing that subtropical generation of Rossby wave's trains could contribute to the amplifying of planetary wavenumber 2 in the southern polar lower stratosphere.

References:

1. Nishii, K., Nakamura, H., 2004: *Tropospheric influence on Antarctic ozone hole split 2002*, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L16103, doi:10.1029/2004GL019532
2. Peters, D., Vargin, P., Körnich, H., 2007: *A Study of the Zonally Asymmetric Tropospheric Forcing of the Austral Vortex Splitting During September 2002*. *Tellus*, 59A, 384–394.

Чувствительность прогнозов WRF ARW к выбору карт землепользования

^{1,2,4}Мартынова Ю.В., ⁵Зарипов Р.Б., ^{1,3,4}Крупчатников В.Н.

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

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

³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁴ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

⁵ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

E-mail: FoxyJ13@gmail.com

В настоящее время в ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт» (<http://sibnigmi.ru>) организован автоматизированный расчет численных прогнозов погоды с помощью модели WRF ARW для территории Западной Сибири с заблаговременностью до 48 часов. Разработчики заложили в модель WRF возможность гибкой ее настройки на конкретный регион и, в том числе, выбор карты землепользования. Типовой набор карт землепользования, предоставляемый разработчиками модели и доступный для скачивания на ее сайте (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>), включает в себя карты U.S. Geological Survey (USGS) с горизонтальным разрешением 30", 10 м, 5 м и 2 м, а также карты с разрешением 30", полученные по спутниковым снимкам спектрорадиометра

среднего пространственного разрешения MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Оба типа карт с разрешением 30'' представлены в двух видах: с категорией «озеро» и без нее.

Территория Западной Сибири достаточно обширная и представлена большим разнообразием типов поверхности. В данном случае, разрешение карты землепользования может оказать значительное влияние на качество прогнозов. В то же время, рассматриваемая территория достаточно однородна, что может исключить необходимость использования карты высокого разрешения. Помимо разрешения карт, также важна их точность в плане определения типов подстилающей поверхности. Поскольку карты USGS и MODIS имеют некоторые различия в классификации поверхности рассматриваемого региона, необходимо провести их сравнение и анализ.

Целью данной работы является определение степени зависимости качества численных прогнозов погоды, полученных с помощью модели WRF ARW для территории Западной Сибири с заблаговременностью до 48 часов, от выбора карты землепользования.

Sensitivity of WRF ARW forecasts to choice of landuse maps

^{1,2,4}Martynova Yu.V., ⁵Zaripov R.B., ^{1,3,4}Krupchatnikov V.N.

¹ Siberian Regional Hydrometeorological Research Institute, Novosibirsk, Russia

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

³ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

⁴ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

⁵ Hydrometeorological Research Centre of Russian Federation, Moscow, Russia

E-mail: FoxyJ13@gmail.com

At present, in Siberian Regional Hydrometeorological Research Institute (<http://sibnigmi.ru>) automated calculation of up to 48-hours term numerical weather forecasts for the Western Siberia is organized using WRF ARW model. Model developers provided some set of options to configure the model for a selected region. In particular, it is possible to select a land-use map. A typical set of land-use maps provided by the model developers and available for downloading from the site of the model (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>) includes U.S. Geological Survey (USGS) land-use maps with horizontal resolution 30'', 10 m, 5 m, 2 m and land-use maps from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) with horizontal resolution 30''. Both USGS and MODIS land-use maps with resolution 30'' are presented in two kinds: with a category "Lake" and without it.

Western Siberia is a spacious region, which represented by different surface types. Resolution of maps used can have significant impact on the forecasts quality. At the same time, the territory of Western Siberia is fairly homogeneous that could make using of high-resolution map unnecessary. In addition, not only the map resolution, but also their accuracy in terms of determining types of underlying surface is important. USGS and MODIS maps have some discrepancies in the land-use classification and additional comparison and analysis is needed for the selected region.

The aim of our work is to estimate the relation between quality of WRF ARW numerical weather forecasts for Western Siberia and selection of a land-use map.

Секция 2

Моделирование и анализ состояния подстилающей поверхности и ее гидрологического режима

Session 2

Modeling and analysis of land surface state and its hydrological regime

Речной сток в бассейнах крупнейших рек южного макросклона Русской равнины в теплые климатические эпохи прошлого, настоящего и будущего

Георгиади А.Г., Милюкова И.П.,
Кашутина Е.А., Бородин О.О.

Институт географии РАН, Москва, Россия
E-mail: galex50@gmail.com

Изменения и колебания климата – один из основных факторов динамики водных систем крупнейших речных бассейнов, которая характеризуется ритмами различной длительности и амплитуды. Наблюдаемое глобальное потепление климата зачастую связывают с выбросами в атмосферу парниковых газов в результате деятельности человека и считают это ведущим фактором, определяющим современную и особенно будущую динамику процессов в бассейнах крупнейших рек, если судить по результатам расчетов на глобальных климатических моделях (IPCC Fourth ..., 2007).

Именно в этой связи примерно около 30 лет назад возрос интерес к теплым палеоклиматическим эпохам (Будыко, 1980; 1986), которые с разной продолжительностью и интенсивностью неоднократно наблюдались в геологическом и историческом прошлом. Ряд ученых предложил рассматривать прошлые теплые климатические эпохи в качестве аналогов, возможного антропогенного потепления в будущем (Будыко, 1980; Величко и др., 1988; Величко и др., 1992).

Тогда же были начаты разработки методических основ гидрологических реконструкций для условий прошлых геологических и исторических эпох (Величко и др., 1988; Величко и др., 1992; Георгиади, 1992 и др.), основанные на палеоклиматических реконструкциях, исходящих из традиционных методов (Климанов, 1976; Палеоклиматы ..., 2009) и глобальных климатических моделях (Paleoclimate Modeling Intercomparison Project – PIMP; Кислов, 1993).

Представлены результаты оценки отклонений речного стока в бассейнах крупнейших рек южного макросклона Русской равнины (Волга, Дон, Днепр) от их современных значений, наблюдавшихся в период теплых климатических эпох голоцена (раннебореальное (9 тыс. лет назад) и субатлантическое (3 тыс. лет назад) потепление,

оптимум голоцена-5-6 тыс. лет назад), Микулинского межледниковья (120 тыс. лет назад), на последовательных стадиях потепления, возможного в текущем столетии (Meehl et al., 2007).

Для оценки гидрологических изменений используется модель месячного водного баланса, разработанная в Институте географии РАН (Georgiadi, Milyukova, 2000; Георгиади, Милукова, 2002 и др.) для оценки гидрологических последствий глобальных климатических изменений в крупных речных бассейнах, которая может быть отнесена к классу макромасштабных гидрологических моделей, которые активно разрабатываются в последние годы.

Полученные результаты сравниваются с современными изменениями стока, которые исследуются на основе анализа их многолетних рядов.

Water temperature, ice and albedo dynamics in a shallow ice-covered lake in spring

Zdorovennova G., Zdorovennov R., Palshin N., Terzhevnik A.

Institute of Northern Water Problems KarRC, Petrozavodsk, Russia
E-mail: zdorovennova@gmail.com

The dynamics of ice, albedo, and water temperature in shallow ice-covered Lake Vendyurskoe (Karelia, Russia) in the spring is considered on the basis of long-term observations (1995-2012). The water temperature, thickness of the snow and ice, incident, reflected and penetrating through the ice solar radiation were measured. The main features of the temperature dynamics in the upper convective layer during the spring convection period are described. The significant inter-annual differences in ice regime of the lake are shown. The duration of ice cover varied from 150 to 190 days; the date of freezing can differ by more than a month and the date of ice-break – by more than two weeks. Substantial inter-annual and spatial variability of the structure and thickness of ice cover is considered. The thickness of the snow-ice cover in mid-April ranged from 40 to 80 cm in different years. The main features of the albedo dynamics during the spring melting are described. The spatial variability of the albedo in the spring is up to 40%. The flux of solar radiation at the lower boundary of ice grows rapidly, as the snow cover disappears, from 2-20 in mid-April to 50-190 W m⁻² in the end of April. Spatial heterogeneity of the solar radiation flux at the lower boundary of ice can reach 30%.

Динамика температуры воды, ледового режима и альbedo поверхности мелководного покрытого льдом озера весной

Здоровеннова Г., Здоровеннов Р., Пальшин Н., Тержевик А.

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия
E-mail: zdorovennova@gmail.com

Объект исследования.

Исследование термического и радиационного режима озера Вендюрского проводилось в 1994-2012 гг. Озеро Вендюрское – это небольшой водоем ледникового происхождения, расположенный на юге Карелии (62°10'-62°20'N, 33°10'-33°20'E) между двумя великими озерами Ладожским и Онежским. Площадь зеркала озера Вендюрского 10.4 км², объем вод ~5.5 · 10⁷ м³, средняя глубина 5.3, максимальная 13.4 м, площадь водосборного бассейна 82.8 км². Озеро принадлежит к бассейну водной системы р. Суны. Котловина озера ледникового происхождения (длина ~7.0, ширина ~1.5-2.0 км) вытянута с запада на восток. В озеро впадает р. Риндозерка и несколько небольших ручьев, вытекает р. Кулапдеги, однако объем их стока невелик. Сток с собственного водосбора озера и атмосферные осадки оказывают определяющее влияние на изменения объема озерных вод в течение года. Коэффициент условного водообмена озера равен 0.4 год⁻¹. Прозрачность воды по диску Секки 3-4 м.

Методика измерений.

Измерения температуры воды, солнечной радиации и толщины ледового покрова проводились в зимние месяцы 1994-2012 гг. Измерения обычно проводились в апреле, и дополнительно в некоторые годы с ноября по май. Измерения толщины льда осуществлялись на 22 станциях продольного и поперечного разрезов. Термокосы (в 1994-2007 гг. использовались термодатчики TR-1 норвежской фирмы «Aanderaa Instruments», в 2007-2012 гг. TR-1050 канадской фирмы «RBR Ltd») и вертикальные зондирования (зонды CTD-48M и CTD-90M «Sea & Sun Technology») использовались для измерения температуры воды. Визуальные наблюдения за ледовыми явлениями на озере Вендюрском в годы исследований не проводились. Даты начала и окончания ледостава определялись по данным термокос. Измерения толщины озерного снега и льда проводились на станциях поперечного и продольного разрезов при помощи гидрологической линейки. Метеостанция чешской фирмы «EMS» использовалась для получения данных о температуре и влажности воздуха, скорости и направлении ветра в 2004-2012 гг. Для характеристики погодных условий района исследований в 1994-2012 гг. использовались также данные метеостанции Федеральной службы РФ по гидрометеорологии и мониторингу природной среды – ГМС «Петрозаводск» (<http://www.gismeteo.ru/synarc.htm>). Радиационная станция, оснащенная пиранометрами «Star-shaped pyranometer» немецкой фирмы «Theodor Friderich & Co, Meteorologische Geräte und Systeme» использовалась для измерения падающей и отраженной солнечной радиации. Для измерения подледной радиации также применялся прибор, сконструированный на базе универсального отечественного пиранометра «М-80м». Продолжительность непрерывных измерений солнечной радиации обычно составляла 1-2 недели с шагом по времени 1-5 минут. Альbedo поверхности озера вычислялось как отношение потоков отраженной и падающей радиации по измерениям на радиационной станции. Кроме того, измерения радиации и оценки альbedo осуществлялись в феврале-апреле 2002 и апреле 2006 и 2007 гг. вдоль поперечного разреза в центральной части озера.

Результаты и выводы.

Зимы в районе исследований обычно теплые с частыми оттепелями, но бывают и суровые зимы практически без оттепелей. Количество оттепелей в теплую зиму может достигать 10. Даты замерзания озера и взлома льда существенно изменяются от года к году: наиболее рано озеро замерзло в 1994 и 1995 гг. (7 ноября), наиболее поздно в 1996, 2005 и 2008 гг. (начало декабря). Взлом льда происходит с 1 по 19 мая. Продолжительность ледостава в разные годы изменяется от 150 до 190 суток.

Измерение толщины и описание структуры снежно-ледового покрова озера Вендюрского проводилось на 1-4-х поперечных разрезах (количество станций измерений изменялось от 16 до 40) в ноябре-декабре 1995, декабре 1996, 1998 и 2002, январе 2002, феврале 1998, 1999 и 2002, марте 1999 и 2002, а также во все годы исследований в апреле. Ледовый покров озера Вендюрского включал слои кристаллического и белого льда, иногда между верхним и нижним льдом наблюдалась прослойка влажного снега. В кристаллическом льду зачастую можно было выделить несколько подслоев, различающихся по количеству пузырьков воздуха, длине и количеству вертикальных каналов. В белом льду также выделялись подслои, отличающиеся размером и формой кристаллов или крупинок льда, плотностью, и, как следствие, оптическими свойствами (Петров и др., 2005). Максимальной толщины снежно-ледовый покров достигал обычно в конце марта - начале апреля. В апреле в годы исследований общая толщина снежно-ледового покрова составляла 0.4-0.8 м, при этом слой снега редко превышал 10 см, слой белого льда (0.1-0.25 м) обычно был тоньше кристаллического (0.25-0.55 м). В годы наблюдений отмечалась существенная пространственная изменчивость как общей толщины льда, так и отдельных его слоев по площади озера. По измерениям толщины льда в последовательные съемки была оценена примерная скорость его нарастания и таяния в разные периоды зимы. Скорость увеличения толщины льда была максимальной в начале зимы и достигала 2-4 см·сут⁻¹. В феврале-марте толщина льда увеличивалась в среднем на 0.3-0.5 см·сут⁻¹, а в середине апреля начиналось таяние. Скорость таяния определялась погодными условиями и в начальный период составляла в среднем 0.2-0.5 см·сут⁻¹. По мере развития процесса скорость таяния льда увеличивалась до 1-2 см·сут⁻¹ (Leppäranta et al., 2010), а в отдельные годы на фоне теплой солнечной погоды достигала 3-5 см·сут⁻¹.

По данным актинометрических измерений 1995-2012 гг. установлено, что дневные максимумы потоков падающей и отраженной солнечной радиации на верхней границе снежно-ледового покрова в середине апреля составляли 500-800 и 200-500 Вт·м⁻², соответственно. По мере таяния снега и льда и понижения альbedo поверхности озера, быстро увеличивался поток радиации на нижней границе льда: в середине апреля его дневной максимум составлял 2-50, в конце апреля – 50-120, в отдельные годы достигал 190 Вт·м⁻². Измерения подледной радиации, выполненные в мае 1998 г. на двух станциях, находящихся вблизи северного и южного берегов озера на расстоянии более 1.5 км друг от друга, показали отличие накопленного за день потока солнечной радиации более чем на 30% (Петров и др., 2005), что было связано как с отличиями в состоянии поверхности озера, его альbedo, так и с различной толщиной и структурой ледового покрова на станциях.

Альbedo озера весной зависит от состояния поверхности, структуры снежно-ледового покрова, высоты Солнца, метеорологических условий. Как показывают многолетние исследования, альbedo поверхности оз. Вендюрского весной изменяется в широких пределах от 0.8 ± 0.15 (свежевыпавший снег) до 0.2 ± 0.1 (мокрая поверхность белого и кристаллического льда) (Петров и др., 2005; Zdorovenov et al., 2013). При интенсивном таянии наблюдается хорошо выраженная изменчивость альbedo в течение суток с максимумом в утренние часы и минимумом в вечерние, обусловленная изменением состояния поверхности озера в течение дня (появление на поверхности талой воды). Пространственные съемки для оценки альbedo в апреле 1998, 2002, 2006 и 2007 гг. показали, что его изменчивость по площади озера весной может достигать 40%, что оказывает существенное влияние на формирование пространственной неоднородности подледного температурного поля и может способствовать развитию адвективного переноса подо льдом.

Количество накопленного за дневное время тепла в подледном слое быстро увеличивается по мере таяния. Наиболее быстрый рост температуры воды в подледном слое наблюдался в апреле 1999, 2006 и 2007 гг. Весенняя подледная конвекция обычно начинается в середине апреля и продолжается 3-4 недели. Температурный профиль зимой до начала весеннего подледного прогрева характеризуется непрерывным увеличением значений от нижней поверхности льда до дна. С началом конвекции подо льдом формируется термическая структура, состоящая из нескольких слоев: подледного градиентного, конвективного перемешанного слоя (КПС), слоя вовлечения и стратифицированного (Farmer, 1975; Петров, Сутырин, 1985). По многолетним измерениям температуры на оз. Вендюрском в середине апреля установлено, что толщина подледного слоя составляет несколько десятков см, градиент температуры в нем достигает $5-10^\circ\text{C}\cdot\text{м}^{-1}$. Толщина и температура КПС при развитой конвекции увеличиваются в сутки на 0.1-0.8 м и $0.05-0.25^\circ\text{C}$, соответственно. Однако иногда температура воды в верхней части КПС превышает 4°C , что приводит к приостановке заглужения его нижней границы. Такое явление наблюдалось 24 апреля 1999 г., когда температура воды в верхней части КПС превысила 5°C (Kirillin, Terzhevnik, 2011).

Измерения температуры воды в режиме вертикального зондирования, выполненные на поперечных разрезах в апреле в годы исследований, позволили оценить пространственно-временную неоднородность распределения температуры в КПС. Разница температуры воды в КПС между центральной частью озера и прибрежными районами могла достигать 0.1°C . Характер распределения изотерм в КПС (подъем в центральной части озера и опускание в прибрежных районах либо формирование устойчивых во времени (более трех суток) локальных максимумов температуры вблизи северного берега озера, позволял предполагать развитие в КПС циркуляций, адвективного переноса. Измерения течений, выполнявшиеся на озере Вендюрском в зимние месяцы 1995-1996 гг. подтверждают это предположение (Malm et al., 1998). Обычно к моменту взлома ледового покрова конвективное перемешивание на мелководьях и в области средних глубин проникает до дна, в глубоководной части озера – до глубин 8-9 м. Температура КПС при этом составляет $3.7-4.2^\circ\text{C}$.

Полученные результаты требуют дальнейшего анализа и доработки для получения количественных оценок связи внутрисуточной динамики температуры воды в КПС и изменения во времени состояния поверхности озера (в первую очередь, его альbedo) и потока солнечной радиации на нижней границе льда.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-00338).

Литература:

1. Петров М. П., Сутырин Г. Г. Суточный ход конвекции в озере подо льдом // *Метеорология и гидрология*, 1985, 1: 91–99.
2. Петров М. П., Терзевик А. Ю., Пальшин Н. И., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э. Поглощение солнечной радиации снежно-ледовым покровом // *Водные ресурсы*, 2005, 32(5): 546–554.
3. Leppäranta M., Terzhevnik K., Shirasawa A. Solar radiation and ice melting in Lake Vendyurskoe, Russian Karelia // *Hydrology Research*, 2010, 41(1): 50–62.
4. Farmer D.H. Penetrative convection in the absence of mean shear // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1975, 101: 869–891.
5. Malm J., Bengtsson L., Terzhevnik A., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study on currents in a shallow ice-covered lake // *Limnol. Oceanogr.*, 1998, 43(7): 1669-1679.
6. Kirillin G., Terzhevnik A. Thermal instability in freshwater lakes under ice: Effect of salt gradients or solar radiation? // *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 65: 184-190.
7. Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovennova G., Efremova T., Terzhevnik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // *Estonian Journal of Earth Sciences*, 2013, 62(1): 26–32.

Идентификация, описание и функциональная оценка изолированных болот

¹Дюкарев Е.А., ¹Гордов Е.П., ¹Дюкарев А.Г., ²Аутрей Б., ²Лэйн Ч.Р.

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

² Агентство по защите окружающей среды США, Цинциннати, Огайо, США

E-mail: egor@imces.ru, Lane.Charles@epa.gov

Web: www.imces.ru, www.epa.gov

Область исследования находится в южно-таежной зоне Западной Сибири на юге Томской области и ограничена с запада, востока и севера реками Обь и Томь а с юга – сельскохозяйственными комплексами Новосибирской области. Особенностью Обь-Томского междуречья является высокая неоднородность ландшафтной структуры (сочетание древних равнин сложенных суглинками с ложбинами древнего стока, сложенными песчаными отложениями), значительные антропогенные и техногенные нагрузки на природную среду. Для изучения пространственной структуры лесоболотных комплексов Обь-Томского междуречья были подобраны космоснимки высокого пространственного разрешения Quickbird, которые были тщательно исследованы и контуры болот были нанесены вручную. Болотные комплексы имеют четкие и ясно различимые диагностические признаки. Таким образом, было выполнено оконтуривание всех болот Обь-Томского междуречья. Всего на территории выделено 595 болот общей площадью более 25 тыс. гектар. Из них 567 болот были отнесены к классу изолированных, занимающих общую площадь около 10 тыс. гектар, или 2,5 % территории. Изолированные болота не имеют явных водотоков, связывающих их с другими водными объектами. В среднем заболоченность территории Западной Сибири составляет около 30%. Заболоченность участка исследований значительно меньше (3.5%), что обусловлено геоморфологической структурой подстилающей поверхности.

Работа выполнена при поддержке гранта МНТЦ № 4079.

Identification, characterization, and functional assessments of isolated wetlands

¹Dyukarev E.A., ¹Gordov E.P., ¹Dyukarev A.G., ²Autrey B., ²Lane C.R.

¹ Institute of monitoring of climatic and ecological systems SB RAS, Tomsk, Russia

² US Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio USA

E-mail: egor@imces.ru, Lane.Charles@epa.gov

Web: www.imces.ru, www.epa.gov

Wetlands are integral components of landscapes with specific nutrient dynamics, pollution sequestration, which essentially differ by water quality and quantity, and they are wildlife habitat. Wetlands are especially vulnerable to anthropogenic disturbances affecting functions and conditions because, due to their typical settings within the landscape, they often act as sinks for landscape processes. In agricultural areas, for example, nitrogen and phosphorous fertilizer applications and the subsequent runoff can cause the eutrophication of wetlands. Eutrophication can significantly alter ecosystems by generally decreasing biodiversity, increasing the numbers of exotic organisms, and changing ecosystem functions.

Wetland ecosystems have an important role in the global balance of greenhouse gases. Through respiration and decomposition, wetland ecosystems both accept and release atmospheric carbon while accumulating a portion of it in peat organic matter. Changes in climatic and hydrological conditions caused by both anthropogenic and natural conditions may be influencing the carbon balance and converting bog ecosystems from carbon sinks into carbon sources. Small isolated peatlands that have many of the same properties as large bog ecosystems (e.g., vegetation cover, hydrological regime) may respond more quickly to climate changes and anthropogenic impacts. As a result, these small peatlands are well suited as, and can be used for, modeling and forecasting the long-term responses of large bog massifs to climate changes.

Isolated wetlands, which are aquatic water bodies completely surrounded by upland with, "...no apparent surface-water connection to perennial rivers and streams, estuaries, or the ocean...", are located throughout the U.S., with high densities in areas such as the Prairie Pothole Region of the upper Midwest, flatwoods ponds, and pocosins of the Southeast, playas and rainwater basins of Texas and the lower Midwest, and vernal pools of New England.

Despite the importance of isolated wetlands in attenuating floodwaters, cycling nutrients, and providing habitat, no accurate measures exist of their extent. No more than 20% of the wetland acreage in the U.S. is isolated. A recent GIS analysis of isolated wetlands of the Atlantic and Gulf Coastal Plains by Lane determined that Florida, Georgia, and South Carolina have over 433,000 isolated wetlands averaging 1.8 ha and covering approximately 789,000 ha, or 1.8% of the conterminous U.S. total.

Difficulties exist in identifying the extent and location of isolated wetlands because they are generally small and possess various hydro patterns and, depending upon where and when viewed, can appear to be lake-like or forested, or can actually be under cultivation. Isolated wetlands express cyclical and varied hydro periods, becoming saturated or having standing water during the rainy season, then gradually losing water throughout the remainder of the year to groundwater recharge, evaporation and transpiration, and interstitial flow. This varied hydroperiod affects emission of CO₂, N₂O, and CH₄ to the atmosphere, influencing global climate change.

Russia's wetlands cover approximately 161 bill. ha, and comprise almost 80% of the land area of western Siberia. Like wetlands throughout the U.S., Russian peatlands vary in size and hydrologic connectivity to other aquatic systems. The world's largest bog, the Great Vasyugan Mires (5 300 000 ha), which grows by 1,800 ha yr⁻¹, is located within the Western Siberian Plain. Peatlands – which form through positive water balances, hydrophytic vegetation growth (typically Sphagnum sp., grasses, sedges, reeds, and woody plants), and low decomposition rates – are the most common Russian wetland type and occur worldwide in the boreal regions. Interest in the worldwide extent of boreal peatlands has recently increased due to their ability to function as atmospheric carbon sinks.

The research in this study focuses on determining the extent, function, and condition of isolated peatlands within Ob-Tom Interfluve. Bog massifs are common throughout western Siberia, and numerous studies by Russian wetland experts have been conducted in the Ob and Tom Rivers Interfluve, an area of approximately 7000 km², West of Tomsk. This research will focus on isolated wetlands that are 5 ha or less in area and are located in various land-use types (e.g., urban, agricultural, reference).

A feature of the Ob-Tom interfluve are the high nonuniformity of the landscape structure (combination of old plains composed of loam and old drainage lines composed of sand deposits), significant anthropogenic and anthropogenic pressure on the environment. The environmental situation in the Ob-Tom' interfluve area is a result of a complex of transforming factors, including deforestation, land tillage, and bog reclamation, which occur against the background of climate variability. However, the most important factor is the development of the groundwater deposit. The Tomsk intake is a unique construction for Russia, which includes 177 linearly arranged wells. The water intake line is 54 km long. The total volume of the water intake is about 250 thous. m³ per day. Sequential installation of the water intake began in 1972, and since 1990, the intake has been the only source of drinking water for the city of Tomsk. During its operation, an extensive cone of depression has formed in aquifers, stretching from the Tom' River to the Ob River. For the first stage of the intake, the depth of drawdown of the aquifers reaches 9–10 m, and for individual wells, it is up to 15 m. The operation of the water intake structure for more than 35 years has led to a change in the hydrogeological conditions, which affected the natural environment.

Using the remote sensing data for integrated study of natural objects is actual for investigation of difficult to access areas of West Siberia. Wetland structure can be recognized at space images due to specific texture of wetland vegetation and wetlands shape. Ground data on wetlands location and properties are increases the accuracy of wetland mapping. Maps of wetlands composed using satellite data can be used for estimation of areas occupied by different ecosystems and analyze disturbances in ecosystem functioning.

High-resolution QuickBird space images were collected for analysis of spatial structure of the forest-bog complexes at Ob-Tom interfluve area. QuickBird is a high-resolution commercial earth observation satellite, owned by DigitalGlobe and launched in 2001 as the first satellite in a constellation of three scheduled to be in orbit by 2008. The satellite collects panchromatic (black and white) imagery at 60 centimeter resolution and multispectral imagery at 2.4- and 2.8-meter resolutions. Images were obtained from a web mapping service Bing Maps (<http://www.bing.com/maps>) provided as a part of Microsoft's Bing suite of search engines. Images at 17 level of magnification were joined and saved as a single image at SASPlanet software (<http://sasgis.ru>). The combined image was cut at 40 segments (11008x6937 pixels) to reduce size of a single image for processing. Central part of the area is presented by early spring satellite images. Snow patches are recognizable at open spaces within forest. Right and left parts of the area are covered by summer time images, and some amount of clouds exists at the left side.

Space images were carefully examined and wetlands were manually delineated. Wetlands have clear visible signs at the high resolution space images. Light spots within dark forest area usually related with open wetland or glade. Texture of forested wetland is finer than at mature pine forest due to smaller size of trees. Dark spots at light green (summer) of light brown (spring) areas can be identified as a very wet areas (fens) at open wetlands. Wetland edge is a sharp curve line usually. Mapping of wetlands for the Ob-Tom interfluve area was done manually. Automatic processing of the images is very difficult due to high noise in the cloudy images and different spectral characteristics of images in spring and summer. 595 wetlands were delineated in total.

Wetlands area is more than 25 000 ha. 567 wetlands were recognized as isolated wetlands with the area about 10 000 ha (of 2.5% of the study area). Isolated wetlands have no visible surface channels or streams connecting them with other water bodies. Large wetlands usually have a connection with creeks or rivers and cannot be related to isolated wetlands.

Average wetland content for West Siberia is about 30%. Small amount of wetlands (3.5%) at the study area is determined by the geomorphological structure of underlying rocks.

Analysis of distribution of isolated wetlands by size has shown that wetlands with area less 2 ha are the most frequent. It was found 128 wetlands with the total area 127 ha at the study area. Frequency of wetland appearance is decreases with wetland size increase. Only 13 wetlands have area from 26 to 28 ha. Half of the total amount of wetlands has area less than 6.4 ha. The largest isolated wetland occupies 797 ha, and only 5% have area more than 50 ha.

Route studies were made for survey about 100 isolated wetlands to assess the quality of classification isolated wetlands. Botanical descriptions sensing the depth of peat deposits was made. The variety of isolated wetlands exist on the territory was reduced to three basic classes: forested bogs (pine-shrub-sphagnum communities with varying height and density of the tree layer), open fens (peat moss and sedge-sphagnum fens with water level near the surface) and the dried bogs with substantially transformed vegetation and degraded peat deposit. Free water in degraded peat deposits during summer time is not available. Peat density is approximately twice higher than in wet condition. Peat thickness reduces and at the contact of bog and upland is observed failing landforms and inrush old trees. There is a high risk of fires.

A detailed analysis of the structure of each wetland complex of the study area allows us to estimate the ratio of bogs and fens. Forested and open wetlands differ in their characteristics, response to decline in bog water and also have a different ratio of components of the carbon balance. It was found that the largest part of isolated wetlands in the study area is occupied by forested wetlands (bogs) (69%), and fens and dried bogs occupy almost equal parts (18% - fens, 13% - dried).

The work was supported by grants ISTC № 4079.

Land-use and land-cover changes and their effects on carbon and water cycling in Northern Eurasia

Qianlai Zhuang

Purdue University, West Lafayette, USA
E-mail: qzhuang@purdue.edu

In recent decades, the largest increase of surface air temperature and related climate extremes have occurred in northern Eurasia. This temperature increase and extreme climate change are projected to continue during the 21st century according to climate models. The changing climate is likely to affect land cover and the biogeochemical cycles in the region. These changes in biogeography and biogeochemistry, in turn, will affect how land use evolves in the future as humans attempt to mitigate and adapt to future climate change. Regional land-use changes, however, also depend on pressures imposed by the global economy. Feedbacks from future land-use change will further modify regional and global biogeochemistry and climate. Using a suite of linked biogeography, biogeochemical, economic, and climate models, we explore how climate-induced vegetation shifts in Northern Eurasia influences land-use change and carbon cycling across the globe during the 21st century. We find that, by the end of the 21st century, the vegetation shift due to climate is a more important factor than the climate itself in driving land use change in Northern Eurasia. While climate policy appears to have little influence on the cumulative release of about 20 Pg C from Northern Eurasia over the 21st century, the redistribution of global land use causes the global terrestrial biosphere to sequester less carbon (43 Pg C) with implementation of a climate policy than without a policy (65 Pg C). The vegetation shift in Northern Eurasia induced from changing climate and demands of global economic growth significantly affect both regional and global

land use and decreases carbon sink activities at both regional and global scales. In the presentation, I will also present how regional water and methane cycling is modeled considering the effects of climate, plant physiology, and snow and permafrost dynamics in the region during the last 50 years and the 21st century.

Modeling hydrological processes across Northern Eurasia with a new Water Balance Model- Transport from Anthropogenic and Natural Systems (WBM-TrANS)

Shiklomanov A.I., Prusevich A.A.

Water Systems Analysis Group, Complex Systems Research Center, Institute for the Study of Earth, Ocean, and Space, University of New Hampshire, USA
E-mail: alex.shiklomanov@unh.edu
Web: <http://www.wsag.unh.edu/>

The Water Balance Model (WBM) was first developed at the University of New Hampshire, Durham, by Charles J. Vorosmarty in the 1990s. Since then, it has branched into a family of models including WBMplus and a new the PDL version of WBM called Water Balance Model- Transport from Anthropogenic and Natural Systems (WBM-TrANS).

WBM is a global-scale, gridded model that simulates both the vertical exchange of water between the ground and the atmosphere, and the horizontal transport of water through runoff and stream networks. The WBM-TrANS model, is an extended re-design (to be more feature reach, computationally efficient, manageable, and input data friendly) of the existing modeling Framework for Aquatic Modeling in the Earth System. While FrAMES focus was coupling of hydrological/biogeochemical models, the WBM-TrANS extends it to sub-pixel land cover types, anthropogenic water use (e.g. irrigation for most of existing crop types), inter-basin water transfer, reservoir operating rules based on dam purpose (e.g. hydropower, water supply, irrigation, etc.), utilization of parallel computing, mixed programming environment (modules can be in various programming languages), etc.. Modeling frameworks have been designed to increase the inter-operability and portability of software among developers, and to increase the efficiency of software development through a set of shared software systems, standards, and utilities, and the use of such frameworks have recently received considerable attention for hydrological models as well as for more complex Earth system and climate models (Dickonson et al., 2002; Wollheim et al., 2008). Besides the structural changes compared to the previous versions of WBM/WTM (Vörösmarty et al., 1998), the most important new elements in WBM-TrANS are modules that explicitly account for the human activities such as irrigation water abstractions (Wisser et al., 2008) and reservoir operation directly affecting the water cycle processes. General scheme of water balance computations in the UNH model is shown on Figure 1.

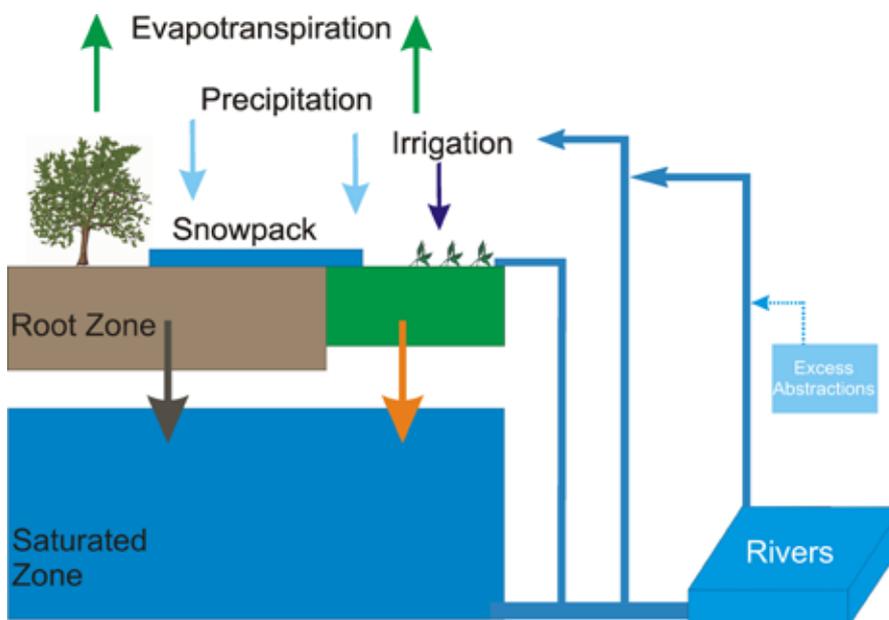


Fig. 1 General scheme of UNH water balance model (WBM)

Spatially, WBM can work using any resolution simulated river network, however, for global or regional scale studies we usually use UNH developed gridded river networks with spatial resolution at 6 min by 6min or 30 min by 30 min . WBM uses daily time steps, and future development may also enable sub-daily time steps. The model has a flexible structure for computation of evapotranspiration which allows to use various set of input data and apply different computational schemes including such methods of potential evapotranspiration evaluation as Penman Monteith (Monteith, 1965) , Shuttleworth-Wallace (Shuttleworth and Wallace, 1985) and Hamon (Hamon, 1964).

To better simulate freeze-thaw processes in cold regions of the world and to take into account dynamic of permafrost WBM have been recently coupled with the Geophysical Institute Permafrost Laboratory (GIPL) University of Alaska Fairbanks model (Marchenko et al. 2008) which simulates soil temperature dynamics and the depth of seasonal freezing and thawing by numerically solving a nonlinear heat equation with phase change. In this model the process of soil freezing/thawing occurs in accordance with the unfrozen water content curve and soil thermal properties, which are specific for each soil layer and for each geographical location. The finite difference numerical scheme implemented in GIPL makes it possible to use coarse vertical resolution without loss of latent-heat effects in the phase transition zone, even under rapid or abrupt changes in the temperature fields.

The GIPL model captures physical processes essential to robust and appropriate modeling of permafrost dynamics. Specifically, soil thermal properties are parameterized according to soil texture and organic matter. Additionally, GIPL includes thermal insulation of the snow cover, and geothermal heating at the appropriately-selected depth. The GIPL model also incorporates an efficient algorithm to estimate soil thermal properties using in-situ temperature measurements in the active layer and in permafrost. This simplifies model calibration for specific sites.

Presently, GIPL code has been already adopted into UNH computing environments as a standalone module for single station and/or gridded domain simulations. In nearest future we are going to have these two models completely coupled.

UNH Water Balance Model has been widely used for many regional and global studies to evaluate historical, contemporary and future water resources (Wisser et al, 2010, Shiklomanov et al 2012). Multiple estimates for gridded runoff, river discharge, irrigation water demand and reservoir regulation have been made across different North Eurasian landscapes using various input data, temporal and spatial resolutions, and computational schemes. The simulated hydrological data were compared with observational data to demonstrate the model uncertainties in various climatic and geographical conditions. Several different potential driving forcings for modeling of historical and contemporary hydrological characteristics and their uncertainties were used, including the University of Delaware monthly gridded observational precipitation and air temperature (Willmott and Matsuura, 1995; Willmott and Robeson, 1995), daily NCEP (Kistler et al, 2001) and MERRA (Rienecker et al, 2011) reanalysis outputs, the University of Princeton combined re-analysis/observations daily climate data (Sheffield et al, 2006). Unfortunately, existing observational data fields do not incorporate the precipitation corrections and for cold regions underestimation of precipitation strongly effect on hydrological simulations.

According to future projections of anthropogenic climate change based on Global Climate Models (GCMs), the largest changes in air temperature and precipitation will take place in northern Eurasia, particularly in Eastern Siberia (IPCC report, 2007). Regional warming is expected to lead to substantial changes in regional hydrology as a result of soil temperature increases and consequent permafrost thawing. Changes in the magnitude and seasonality of precipitation may also alter river runoff characteristics and their intra-annual distribution with possible impacts on freshwater and heat flux to the Arctic Ocean, which have potentially important implications for the ocean circulation and climate outside the region (Peterson et al, 2002, Shiklomanov et al, 2011).

We applied UNH WBM to project future changes in regional hydrology based on eight AR 4 IPCC AO GCMs climate data covering contemporary (1959-1999) and future scenarios (SRES A1b, A2, B1; 2001-2099). The results indicate a tendency toward increases in river runoff across the European North and Siberia although the projected changes are not spatially uniform (Shiklomanov et al, 2012). More significant increases in runoff across Siberia by 2040-2060 are expected based on output from MPI ECHAM5 and NCAR CCSM3. Runoff changes evaluated for UKMO HadleyCM3 and for the ensemble of 8 AO GCMs have a less noticeable increasing tendency across Siberia with some regions showing a decline in river runoff. Wetter conditions are expected in northern and eastern regions of Siberia in the Yenisey, Lena, Kolyma basins. At the same time, runoff across western and southern Siberia is projected to change less significantly with both positive and negative alterations.

Recently we started running WBM TrANS using new AR 5 IPCC climate RCPs scenarios (IPCC, 2007) and first preliminary results for large Russian river basins will be also presented.

References:

1. Dickonson, R. E., Zebiak, S. E., Anderson, J. L., Blackmon, M. L., Luca, C. D., Hogan, T. F., Iredell, M., Ji, M., Rood, R. B., Suarez, M. J., and Taylor, K. E., (2002): *How can we advance our weather and climate model as a community?*, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 83, 431– 434, 2002.

2. Hamon W.R. (1963), *Computation of direct runoff amounts from storm rainfall*, *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ.*, v. 63, p.52-62, 1963.
3. IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Working Group I Report "The Physical Science Basis"*, *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY.
4. Kistler, R., E. Kalnay, W. Collins, S. Saha, G. White, J. Woollen, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, M. Kanamitsu, V. Kousky, H. van den Dool, R. Jenne, and M. Fiorino, (2001), *The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation*. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82, 247-267.
5. Marchenko, S., V. Romanovsky, and G. Tzipenko, (2008), *Numerical Modeling of Spatial Permafrost Dynamics in Alaska*, *In Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, June 29-July 3, Fairbanks, Alaska, 2008, Vol. 2, pp. 1125-1130, 2008.*
6. Monteith J. L., (1965), *Evaporation and the environment. the state and movement of water in living organisms*, *Symposium of the Society of Experimental Biologists, XIX, 1965.*
7. Peterson, B.J., R.M. Holmes, J.W. McClelland, C.J. Vorosmarty, R.B. Lammers, A.I. Shiklomanov, I.A. Shiklomanov, and S. Rahmstorf, (2002). *Increasing River Discharge to the Arctic Ocean*, *Science*, 298:2171-2173.
8. Rienecker, M.M., M.J. Suarez, R. Gelaro, R. Todling, J. Bacmeister, E. Liu, M.G. Bosilovich, S.D. Schubert, L. Takaes, G.-K. Kim, S. Bloom, J. Chen, D. Collins, A. Conaty, A. da Silva, et al. (2011), *MERRA - NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications*. *J. Climate*, 24, 3624-3648, doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
9. Sheffield, J., G. Goteti, and E. F. Wood, (2006), *Development of a 50-yr high-resolution global data set of meteorological forcings for land surface modeling*, *J. Climate*, 19 (13), 3088-3111.
10. Shiklomanov I.A., V.Yu. Georgievsky, A.I. Shiklomanov, O.Ph. Golovanov, 2011: *New data about the discharge of the largest rivers contributing to the Arctic Ocean*. *In: Polar Cryosphere and Continental Waters*, Ed. Kotlyakov, Paulsen Editions, Moscow – St.Petersburg, 265-287.
11. Shiklomanov, A.I. R.B. Lammers, D. Lettenmaier, Yu. Polischuk, O. Savichev, L.C. Smith, 2012: *Hydrological changes: historical analysis, contemporary status and future projections* [Chapter 4 in "Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences", Ed. Gutman and Groisman], Springer; 111-155.
12. Shuttleworth W.J. and J.S. Wallace (1985), *Evaporation from sparse crops – an energy combination theory*, (1985), *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.111, p.839-855.
13. Vorosmarty, C. J., Federer, C. A., and Schloss, A. L. (1998), *Potential evaporation functions compared on US watersheds: Implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling*, *J. Hydrol.*, 207, 147–169, 1998.
14. Willmott, C.J. and K. Matsuura, (1995), *Smart Interpolation of Annually Averaged Air Temperature in the United States*. *Journal of Applied Meteorology*, 34(12): 2577-2586.
15. Willmott, C.J. and S.M. Robeson, (1995), *Climatologically Aided Interpolation (CAI) of Terrestrial Air Temperature*. *International Journal of Climatology*, 15: 221-229.
16. Wisser, D., Frolking, S., Douglas, E. M., Fekete, B. M., Vorosmarty, C. J., and Schumann, A. H., *Global irrigation water demand: Variability and uncertainties arising from agricultural and climate data sets*, (2008), *Geophys. Res. Lett.*, 35, L24408, doi:10.1029/2008GL035296, 2008.
17. Wisser, D., B. M. Fekete, C. J. Vorosmarty, and A. H. Schumann (2010), *Reconstructing 20th century global hydrography: a contribution to the Global Terrestrial Network- Hydrology (GTN-H)*, *Hydrology and Earth System Science*, 14,1-24.
18. Wollheim, W. M., Vorosmarty, C. J., Bouwman, A. F., Green, P., Harrison, J., Linder, E., Peterson, B. J., Seitzinger, S. P., and Syvitski, J. P. M. (2008), *Global N removal by freshwater aquatic systems using a spatially distributed, within-basin approach*, *Global Biogeochem. Cy.*, 22, GB2026, doi:10.1029/2007GB002963.

Application of a process-based Mixfor-SVAT model to estimate a sensitivity of net CO₂ exchange and evapotranspiration of boreal forests to climate changes

Olchev A.

A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS, Moscow, Russia

E-mail: aoltche@gmail.com,

Web: <https://sites.google.com/site/aoltchev/> https://www.researchgate.net/profile/Alexander_Olchev/?ev=hdr_xprf

The main goal of the study is to analyze a sensitivity of net CO₂ exchange (NEE) and evapotranspiration (ET) of spruce forest ecosystems of European Russia to projected future changes of climatic conditions and forest species composition using results of modeling experiments. The results of the study allow to estimate both the possible response of boreal forest ecosystems to projected future environmental changes and to quantify the potential contribution of the forests of the South-European taiga to balance of greenhouse gases in the atmosphere in the 21 century.

To simulate the NEE and ET between forests and the atmosphere a process-based MixFor-SVAT model (Olchev et al. 2008, Olchev et al. 2002) was applied. Process-based models are unique tool to study CO₂ and H₂O exchange between terrestrial ecosystems and the atmosphere. They allow to estimate total ecosystem fluxes, to characterize their spatial and temporal variability and to solve different applied tasks (e.g. to predict the possible response of different vegetation communities to changes of environmental conditions) that cannot be provided using only results of experimental studies. The main advantage of the MixFor-SVAT model is its ability not only to describe the seasonal and daily variability of NEE and ET at ecosystem level but also to estimate adequately a contribution of the soil and forest understorey into total ecosystem fluxes as well as to quantify the flux partitioning among different tree species in the forest stand taking into account their specific biophysical properties. This feature can be very important for modeling of exchange processes between mixed forest stands (widespread in European Russia) and the atmosphere. The model was validated using results of field measurements in various types of forest and grass ecosystems and showed a good agreement of model and experimental results under various environmental and soil moisture conditions (Olchev et al. 2002, 2008, Falge et al 2005).

Results of provided modeling experiment showed that projected climate changes (scenario A1B IPCC) and changes of forest species composition at the end of 21 century can lead to insignificant increase of annual ET as well as to growth of NEE of the forests in case if the projected increase in temperature and CO₂ in the atmosphere will be strictly balanced with growth of available amounts of soil nutrients and water. Exhaustion of available nitrogen in soil and above-ground biomass in the future can result in reduction of rates of NEE and ET of forest ecosystems. Minor changes of ET of spruce forests in comparison with projected growth of precipitation amount in the area can lead to increase in soil moistening and for waterlogged areas with peaty soils even to intensification of paludification processes.

Применение процесс-ориентированной Mixfor-SVAT модели для оценки чувствительности нетто CO₂ обмена и эвапотранспирации бореальных лесов к климатическим изменениям

Ольчев А.В.

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

E-mail: aoltche@gmail.com,

Web: <https://sites.google.com/site/aoltchev/> https://www.researchgate.net/profile/Alexander_Olchev/?ev=hdr_xprf

Структура, видовой состав и продуктивность лесов определяются комплексом факторов, основная роль среди которых принадлежит климату. Приходящая солнечная радиация, температура и влажность воздуха, условия почвенного увлажнения регулируют процессы фотосинтеза, дыхания и транспирации, определяя закономерности роста и развития растений. Современные изменения климата, сопровождающиеся ростом температуры воздуха, изменениями условий увлажнения земной поверхности и газового состава атмосферы, очевидно, могут оказать существенное влияние на течение

биофизических и биохимических процессов в растениях и почве, и как следствие привести к изменениям интенсивности H_2O и CO_2 обмена между растениями и окружающим воздухом (IPCC 2007). В долгосрочной перспективе это может повлиять на устойчивое развитие лесов, привести к изменениям их видового состава и ареалов распространения различных видов. Обладая высокой чувствительностью к изменениям условий внешней среды, леса, в свою очередь, оказывают существенное обратное влияние на климат. Активно поглощая CO_2 из атмосферы в процессе фотосинтеза, аккумулируя углерод в надземной и подземной биомассе, и удерживая его в связанном состоянии на протяжении значительного промежутка времени, леса поддерживают естественный баланс CO_2 в атмосфере, снижая негативное влияние парникового эффекта. Они оказывают также существенное влияние на тепловой и водный режим земной поверхности и приземного слоя воздуха, защищая земную поверхность от излишнего перегрева в летнее время и регулируя процессы испарения. Сохраняя влагу, поступившую с атмосферными осадками, леса способствуют формированию устойчивого речного стока.

В рамках исследования на примере еловых лесов южной тайги Европейской территории России выполнена оценка чувствительности составляющих CO_2 и H_2O обмена лесных экосистем к прогнозируемым изменениям климатических условий в 21 веке по результатам модельных расчетов. Данные об изменении нетто-обмена CO_2 (NEE) и суммарного испарения (эвапотранспирации, E) при изменении условий внешней среды позволяют оценить возможную реакцию исследуемых лесных экосистем на внешние воздействия, а также определить потенциальный вклад лесов южной тайги в изменение баланса парниковых газов в атмосфере к концу 21 века.

Для решения поставленной задачи в исследовании используется математическая процесс-ориентированная модель MixFor-SVAT (Ольчев с соавт. 2008, Oltchev et al. 2002). Данный класс моделей является уникальным инструментом в исследованиях CO_2 и H_2O обмена между земной поверхностью и атмосферой, позволяющим не только оценить потоки и охарактеризовать их пространственно-временную изменчивость, но также и спрогнозировать возможную реакцию растительных сообществ на изменения внешних условий, что не может быть выполнено с использованием лишь результатов экспериментальных наблюдений. Основным преимуществом MixFor-SVAT модели является ее способность не только описать сезонную и суточную изменчивость интегральных потоков H_2O и CO_2 на уровне всей экосистемы, но также и адекватно оценить вклад почвы, лесной подстилки, а также деревьев разных пород в суммарные потоки с учетом их индивидуальных биофизических особенностей. Применение в модели для описания процесса фотосинтеза подхода Фаркхара (Farquhar et al 2008) позволяет проводить расчеты скорости ассимиляции CO_2 растениями с учетом возможных изменений запасов минеральных веществ в растениях и почве, а также содержания CO_2 в воздухе. Проверка адекватности модели была выполнена с использованием результатов полевых измерений потоков тепла, H_2O и CO_2 в различных типах лесных и травянистых экосистем и показала хорошее согласование модельных и экспериментальных результатов для различных условий внешней среды и почвенного увлажнения (Oltchev et al. 2002, Olchev et al. 2008).

В качестве модельного объекта в исследовании были выбраны монодоминантные спелые еловые леса подзоны южной тайги, произрастающие на хорошо дренированных дерново-подзолистых почвах в верховьях Волги на юге Валдайской возвышенности в центральной части Европейской территории России.

Расчеты годовой динамики CO_2 и H_2O обмена для модельного елового леса при современных климатических условиях были выполнены с использованием осредненного для исследуемой территории годового хода метеорологических параметров. Среднегодовые значения температуры ($5^{\circ}C$), удельной влажности (4.6 г кг^{-1}) и осадков (700 мм) соответствовали средним климатическим величинам, полученным для исследуемой территории в период с 2000 по 2010 год. Для прогноза будущих климатических условий в исследовании были использованы данные расчетов по глобальной модели ECHAM5. В качестве базового сценария будущих климатических изменений был выбран умеренный эмиссионный сценарий A1B МГЭИК. Возможные изменения видового состава растительности, вызванные изменениями климата к концу 21 века, были оценены с использованием метода палеоаналогов, позволяющим на основе реконструкций климатических условий и растительности в прошлые эпохи, оценить возможные изменения структуры и видового состава растительности в будущем. Предполагалось, что прогнозируемое увеличение среднегодовой температуры воздуха на исследуемой территории к концу 21 века на $3.4^{\circ}C$ и количества осадков на 20% может привести к частичному замещению ели в древостоях мелколиственными (береза, осина) и широколиственными (липа, дуб, вяз) породами деревьев (Oltchev et al. 2009). Для учета влияния изменения минерального состава почв на продуктивность древостоев в модельных экспериментах было использовано также несколько сценариев, предполагающих уменьшение количества необходимого для сбалансированного питания растений доступного почвенного азота. Возможные изменения количества надземной и подземной биомассы древесных растений, вызванных изменениями внешней среды к концу 21 века, в численных экспериментах учитывались через изменения величины листового индекса (LAI), диаметра стволов и плотности тонких корней деревьев. При расчетах также было сделано предположение, что значения основных биофизических параметров, характе-

ризирующих процессы CO_2 и H_2O обмена древесных пород при будущих климатических условиях будут соответствовать их современным значениям.

Результаты проведенных экспериментов показали высокую чувствительность составляющих CO_2 и H_2O обмена исследуемых еловых лесов к прогнозируемым изменениям климатических условий, возможным изменениям видового состава древостоев и запасов минеральных веществ в растениях к концу 21 века. При условии, если прогнозируемый рост содержания CO_2 в воздухе будет сбалансирован увеличением запасов минеральных веществ и, прежде всего, азота в почвенном покрове и надземной биомассе, изменения климатических условий к концу 21 века могут привести к существенному росту NEE (на 30-65%) и E (на 3-10%), особенно в случае замещения ели лиственными породами деревьев. Данная закономерность обусловлена, как увеличением скорости ассимиляции углерода деревьями при увеличении содержания CO_2 и росте температуры, так и более высокой скоростью фотосинтеза лиственных пород деревьев. Прогнозируемое относительно небольшое увеличение E лесных экосистем южной тайги к концу 21 века не превышающее 10% по сравнению с ожидаемым ростом количества осадков (около 20%) может привести для ельников, произрастающих на хорошо дренированных почвах, к некоторому увеличению влагосодержания почвы и поверхностного речного стока, а также несколько снизить риски возникновения сильных атмосферных засух в исследуемом регионе.

Постепенное истощение запасов минеральных веществ в почвенном покрове и снижение их содержания в листьях растений, вызванное увеличением потребления минеральных веществ для поддержания нормального течения биохимических реакций при прогнозируемом удвоении содержания CO_2 в воздухе к концу 21 века, может привести к уменьшению скорости фотосинтеза, дыхания, устьичной проводимости листьев деревьев в исследуемых древостоях, и как следствие, к уменьшению NEE и E лесных экосистем. В частности, расчеты показали, что 20% снижение запасов доступного азота в листьях деревьев при условии сохранения видового состава древостоя (участие ели 100%) может вызвать уменьшение NEE на 14%, NPP - на 8%, а E - на 4%. Снижение содержания доступного азота в хвое ели до 50-60% практически полностью нивелирует эффект увеличения скорости фотосинтеза за счет прогнозируемого удвоения CO_2 в воздухе и роста температуры на NEE к концу 21 века. Данные результаты хорошо согласуются с результатами экспериментов, полученными в рамках проекта Free-air CO_2 enrichment, FACE (Norby et al. 2010).

Очевидно, что представленные модельные результаты демонстрируют лишь несколько частных сценариев возможного отклика составляющих CO_2 и H_2O обмена лесных экосистем южной тайги на будущие изменения климатических условий. Решение поставленной задачи требует продолжение комплексных исследований процессов взаимодействия лесной растительности и климата, чтобы более точно спрогнозировать динамику лесных экосистем в будущем и оценить роль лесов в глобальной климатической системе. Исследование было выполнено при поддержке грантов Правительства РФ (11-G34.31.0079) и РФФИ (11-04-01622-а, 11-05-00854-а).

Литература:

1. Ольчев А.В., Курбатова Ю.А., Варлагин А.В., Выгодская Н.Н. Модельный подход для описания переноса CO_2 между лесными экосистемами и атмосферой // *Лесоведение*, 2008. - № 3. - С. 3-13.
2. IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. - Cambridge: Cambridge University Press, 2007. - 960 p.
3. Farquhar G.D., von Caemmere S., Berry J.A. A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C3 species // *Planta*, 1980. - V. 149. - P. 78-90.
4. Norby R.J., Warren J.M., Iversen C.M., Medlyn B.E., McMurtrie R.E. CO_2 enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010. - V.107. - P. 19368-19373.
5. Oltchev A., Cermak J., Nadezhdina N., Tatarinov F., Tishenko A., Ibrom A., Gravenhorst G. Transpiration of a mixed forest stand: field measurements and simulation using SVAT models // *Boreal Environmental Research*, 2002. - V.7(4). - P.389-397.
6. Olchev A., Ibrom A., Ross T., Falk U., Rakkibu G., Radler K., Grote S., Kreilein H., Gravenhorst G. A modelling approach for simulation of water and carbon dioxide exchange between multi-species tropical rain forest and the atmosphere // *Ecological Modelling*, 2008. - V.212. - P. 122-130.
7. Olchev A., Novenko E., Desherevskaya O., Krasnorutskaya K., Kurbatova J. Effects of climatic changes on carbon dioxide and water vapor fluxes in boreal forest ecosystems of European part of Russia // *Environ. Res. Lett.*, 2009. - V.4. - P. 045007.

Гидротермическое моделирование состояния многолетнемерзлых пород и сезонно-талого слоя для оценки углеродного цикла в Северной Евразии.

¹Марченко С., ²Виссер Д., ¹Романовский В.Е., ³Чапман В., ⁴Фроллинг С., ⁵Волш Д.

¹ Геофизический институт, Университет Аляска, США

² Университет Бонн, Германия

³ Отделение атмосферных наук, Университет Урбана-Шампань, США

⁴ Институт изучения Земли, океана и космоса, Университет Нью Хампшир, США

⁵ Международный арктический исследовательский Центр, Университет Аляска, США

E-mail: ssmarchenko@alaska.edu, veromanovsky@alaska.edu, chapman@atmos.uiuc.edu, steve.frolking@unh.edu, jwalsh@iarc.uaf.edu

Web: <http://permafrost.gi.alaska.edu/users/sergei>, www.permafrostwatch.org, <http://www.zef.de/staff/1224.html>, <http://arctic.atmos.uiuc.edu>, <http://www.eos.unh.edu/Faculty/Frolking>, <http://www.iarc.uaf.edu/people/jwalsh>

В течение 1881-2006 периода времени средняя годовая температура в Северной Евразии увеличилась на 1.5°C, среднезимняя на 3°C (Lugina et al., 2007). Водный эквивалент снега значительно увеличился по всей территории России (Bulygina et al., 2009). Наблюдения за температурой вечной мерзлоты в течение последних 30-40 лет в Северной Евразии выявили восходящий тренд на 0.5-3°C (Romanovsky et al., 2010).

Наши наблюдения показали:

- Температура многолетней мерзлоты повысилась во всех районах Северного Полушария на 0.5-3°C;
- Глубина сезонного протаивания увеличилась в некоторых районах Северного Полушария на 10-60% по сравнению с 1970-1980. В Западной Сибири, центральной Аляске и на юге Евразии в некоторых районах не происходит смыкания сезонно-мерзлого слоя с кровлей многолетней мерзлоты (образуется талик).

Последние оценки запасов органического углерода показали, что 50% глобального содержания углерода содержится в многолетней мерзлоте (Tarnocai et al., 2009).

Для исследования изменений в многолетней мерзлоте и гидрогеологических процессах в Северной Евразии в Геофизическом Институте Университета Аляски совместно с учеными Университета Нью Хамшир была создана численная модель GIPL+WBM-Plus (Marchenko et al., 2008; Visser et al., 2011). Входные данные для модели есть температура воздуха, осадки, наземная растительность, термические свойства многослойных горных пород (теплопроводность и теплоёмкость в талом и мерзлом состоянии), начальное содержание влаги в почве и тепловой поток на нижней границе расчетной области. Климатический сценарий был взят из пяти осредненных IPCC моделей глобальной циркуляции атмосферы: ECHAM5, GFDL21, CCSM, HADcm3 and CCCMA для углеродного сценария A1B.

Наш вычислительный эксперимент показал:

- Последние два десятилетия прошлого века было 1200 км³ сезонно-талых горных пород в верхних 2 метров на территории 1080000 км² занимаемой многолетней мерзлотой в северной Евразии, в 2050 году этот объём может увеличиться до 3500 км³, а к концу текущего века может достичь объёма 9500 км³ в соответствии с принимаемым климатическим сценарием. Это даст дополнительное влияние на высвобождение углерода в атмосферу из почвы, и, в целом влияние на углеродный цикл.

- Общее содержание талого углерода (87 Pg) есть 8% от общего содержания углерода в северном Полушарии которое оценивается в 1024 Pg (Tarnocai et al., 2009). Если мы предположим такое же распространение углерода с глубиной, то 20% увеличение в объеме протаившего торфа в Северной Евразии реализует дополнительные 32 Pg из общего 163 Pg содержащегося в торфяниках Северной Евразии

Coupled Hydrological and Thermal Modeling of Permafrost and Active Layer Dynamics: Implications to Permafrost Carbon Pool in Northern Eurasia

¹Marchenko S., ²Wisser D., ¹Romanovsky V., ³Chapman W., ⁴Frolking S., ⁵Walsh J.E.

¹ Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks, USA

² Center for Development Research (ZEFc), University of Bonn, Germany

³ Department of Atmospheric Sciences, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA

⁴ Institute for the Study of Earth, Oceans, and Space, University of New Hampshire, USA

⁵ International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks, USA

E-mail: smarchenko@alaska.edu, veromanovsky@alaska.edu, chapman@atmos.uiuc.edu, steve.frolking@unh.edu, jwalsh@iarc.uaf.edu

Web: <http://permafrost.gi.alaska.edu/users/sergei>, www.permafrostwatch.org, <http://www.zef.de/staff/1224.html>, <http://arctic.atmos.uiuc.edu>, <http://www.eos.unh.edu/Faculty/Frolking>, <http://www.iarc.uaf.edu/people/jwalsh>

Recent Climate and Permafrost Trends over Northern Eurasia

Permafrost is defined as ground (soil or rock and included ice or organic material) that remains at or below 0°C for at least two consecutive years (van Everdingen, ed. 1998). High-latitude permafrost regions are traditionally divided into several zones based on estimated geographic continuity in the landscape. A typical classification recognizes continuous permafrost (underlying 90-100% of the landscape); discontinuous permafrost (50-90%); sporadic permafrost (10-50%), and isolated patches of permafrost (0-10%). Permafrost regions occupy approximately 24% (approximately 23 million km²) of the exposed land area of the Northern Hemisphere (Zhang et al., 2000). The thickness of permafrost varies from about one meter to more than 1500 meters.

During 1881-2006, the annual surface air temperature averaged over Northern Eurasia has increased by 1.5°C and in the winter season by 3°C (Lugina et al., 2007). In the nearby Arctic Ocean, the late summer sea ice extent decreased by 40% during the last 30 years exposing a source of water vapor for the dry arctic atmosphere in the early months of the cold season. As a result of these processes the maximum snow depth and snow water equivalent (SWE) have increased over most of Russia (Bulygina et al., 2009). Recent observations indicate a warming of permafrost in many northern regions with the resulting degradation of ice-rich and carbon-rich permafrost. Permafrost temperature has increased by 0.5 to 3°C in northern Eurasia during the last 30-40 years (Romanovsky et al., 2010). Warming in permafrost temperatures observed in the Russian North has resulted in the thawing of permafrost in natural, undisturbed conditions in areas close to the southern boundary of the permafrost zone.

To summarize the recent (last 30 to 40 years) trends in permafrost we can state:

- Permafrost temperature is increasing in most locations in the Arctic and Sub-Arctic;
- There are some places where we don't see a noticeable increase, but there are no known sites where permafrost temperature is decreasing;
 - Typical increase in permafrost temperature is 0.5 to 3°C;
 - Active layer depth is increasing at some locations. There are some locations in the West Siberia where active layer does not refreeze completely every year anymore;
 - The long-term permafrost thawing already started at some locations in natural undisturbed conditions;
 - The nature and rate of permafrost degradation are different for regions with continuous and discontinuous permafrost.

Coupled Hydrological and Thermal Modeling

Thawing and freezing of Arctic soils is affected by many factors, with air temperature, vegetation, snow accumulation, and soil moisture among the most significant. To investigate how changes in these factors influence permafrost dynamics in the Arctic, we developed a Geophysical Institute Permafrost Lab (GIPL) permafrost dynamics model (Marchenko, 2001; Marchenko et al., 2008). The GIPL model simulates soil temperature dynamics and the depth of seasonal freezing and thawing by solving a nonlinear heat equation with phase change numerically. In this model the process of soil freezing/thawing occurs in accordance with the unfrozen water content curve and soil thermal properties, which are specific for each soil layer and for each geographical location. The GIPL model captures physical processes essential to robust and appropriate modeling of permafrost dynamics. Specifically, soil thermal properties are parameterized according to soil texture and organic matter. Additionally, GIPL includes thermal insulation of the snow cover, and geothermal heating at the appropriately-selected depth. The GIPL model also incorporates an efficient algorithm to estimate soil thermal properties using in-situ temperature measurements in the active layer and in permafrost.

Although the GIPL model is helpful for understanding the effects of climatic and landscape factors on heat flow and phase change in soil retrospectively and prognostically, it does not simulate soil moisture dynamics and storage across diverse landscapes. To assess possible changes in the permafrost and the active layer dy-

namics we developed a robust fully coupled modified version of the pan-Arctic Water Balance Model (P/WBM) developed at the University of New Hampshire (Federer et al., 2003; Rawlins et al., 2003; Vörösmarty et al., 1998, Wisser et al., 2008) and heat transfer model GIPL. Through explicit coupling of the Permafrost Model with the Water Balance Model we are able to simulate the vertical water exchange between the land surface and the atmosphere, horizontal water transport, lake / reservoirs, snow melt, temporal and spatial variability in soil water/ice content, active layer thickness, soil temperature dynamics, depth of seasonal freezing and thawing, time of freeze up, and associated large-scale hydrology that are driven by contemporary and future climate variability and change. Coupling of the GIPL model with a suitably-scaled hydrological model captures thresholds and highly non-linear feedback processes induced by changes in hydrology and the temperature regime over the pan-Arctic. The model takes into account the geographic distribution of organic soils and peatlands, vegetation cover and soil properties, and is tested against a number of permafrost temperature records for the last century. To prescribe the initial soil thermal properties we used the map of soil characteristics for all of Russia (Stolbovoi & Savin, 2002) and the map of Soil Carbon Pools, CO₂ and CH₄ Emissions (Tarnocai et al., 2009) and also the soil structure descriptions available for some locations.

Input parameters to the model are spatial datasets of mean monthly air temperature, snow properties or SWE (Snow Water Equivalent), prescribed vegetation and thermal properties of the multilayered soil column, and water content. The climate scenario was derived from an ensemble of five IPCC Global Circulation Models (GCM) ECHAM5, GFDL21, CCSM, HADcm3 and CCCMA. The outputs from these five models have been scaled down to 25 km spatial resolution with monthly temporal resolution, based on the composite (mean) output of the five models, using the IPCC SRES A1B CO₂ emission scenario through the end of current century.

We estimated dynamics of the seasonally thawed volume of soils within the two upper meters for the entire North Eurasia using a coupled, large scale, grid-based water balance/permafrost model. According to this specific climate scenario, projections of future changes in permafrost suggest that by the end of the 21st century, late-Holocene permafrost in Northern Eurasia may be actively thawing at all locations and some Late Pleistocene carbon-rich peatlands underlying by permafrost also could start to thaw at some locations. At the same time, the modeling results show how different types of ecosystems affect the thermal state of permafrost and its stability.

Implications for carbon cycling

A recent estimate indicates that the total soil organic carbon is stocked in permafrost contains as much as 50% of the global belowground organic carbon pool (Tarnocai et al., 2009). Carbon stocked in permafrost is now regarded as one of the most important carbon-climate feedbacks because of the size of the carbon pool and the intensity of climate change at high latitudes (Schuur et al., 2009). Increasing soil temperatures, and the deepening of the active layer as a result of increasing air temperatures and changing snow dynamics will have implications for the cycling of carbon in peatlands and for the fluxes of carbon to the atmosphere and to the hydrosphere, as biogeochemical processes in peatlands are partly controlled by the freeze/thaw state of the (peat) soil. The net effect of warming will depend on the balance of increased respiration and productivity (Schuur et al., 2009; Dorrepaal et al., 2009) as a result of warmer soils, and increased export of dissolved organic carbon (DOC) in rivers and streams in catchments with thawed peatlands (Frey & Smith, 2005). The total amount of thawed carbon (87 Pg) represents 8% of the entire carbon pool in the upper three meters of the soil the Northern Hemisphere, estimated to be around 1024 Pg (Tarnocai et al., 2009). If we assume the same distribution of carbon with depth and a similar response of soil temperature (20% increase in the thawed peat volume) to warming in the Eurasian peatlands, an additional 32 Pg of the estimated 163 Pg stored in Eurasian peatlands (Tarnocai et al., 2009) could become biogeochemically active.

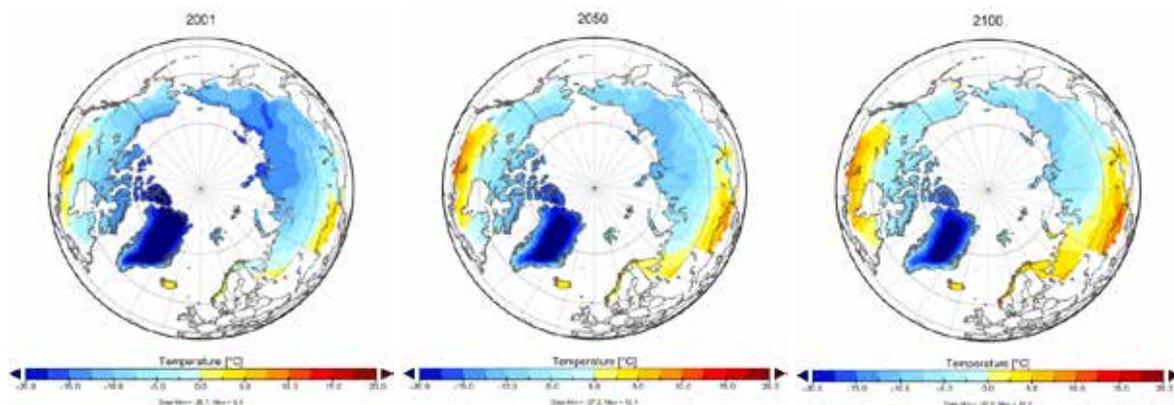
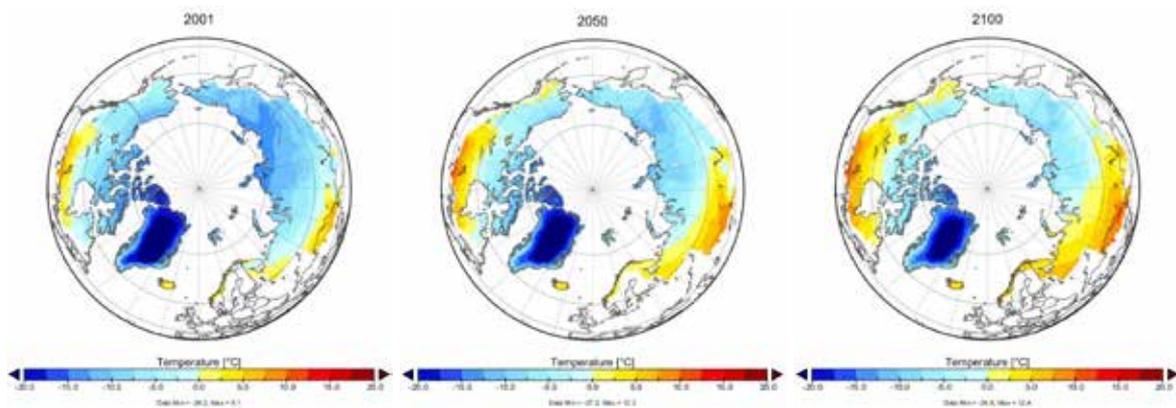


Figure 1. Mean annual air temperature (five IPCC GCM composite in the upper row) and soil temperature at 2 m depth (low row) reconstructed for 2001 and predicted for 2050 and 2100



Conclusions

Consistent with observations for the recent decades and with other model simulations of soil temperatures under future climate conditions, we find a widespread degradation of permafrost in Northern regions by the end of the century. Explicitly considering the distribution and depth of Northern peatlands showed that the insulating properties of peat lead to a considerably higher persistence of permafrost in peat soil compared to mineral soils and consequently delayed degradation of permafrost in peatland areas.

- The model results indicate 1,200 km³ of seasonally unfrozen soils within the two upper meters across 10,800,000 km² of northern Eurasian permafrost domain during the last two decades of the 20th century. Our projections have shown that unfrozen volume of soil within two upper meters increases to 3,500 km³ by 2050 and to 9,500 km³ by the last decade of the 21st century due to active layer deepening. According to this specific climate scenario, the area of permafrost with active layer shallower than 2 m in depth could decrease from 10,800,000 km² in 2000 to 9,000,000 km² by 2050 and to 6,000,000 km² by the end of current century. Despite the slower rate of soil warming in peatland areas and a slower degradation of permafrost under peat soils, a considerable volume of peat (approximately 20% of the total volume of peat in Northern Eurasia) could be thawed by the end of the current century. The potential release of carbon and the net effect of this thawing will depend on the balance between increased productivity and respiration, and will be mitigated by peat moisture.

- Coupled Hydrologic-Permafrost Model gives a satisfactory results, however to capture correct temperature dynamics in the Arctic regions several improvements mostly addressed to soil thermal properties parameterization and input datasets are required.

- Peatlands have unique thermal and hydraulic properties that need to be explicitly considered in coupled permafrost-hydrology models.

- Sensitivity Analysis shown increase in run-off is about 10-20% if Stefan solution (thawing/freezing module) is incorporated

Acknowledgements. Funding was provided by the National Science Foundation (NSF-ATM #0628399 and ARC-0856864), NASA(#NNX09AQ36G), NASA-UNH Research&Discover Program, and by the State of Alaska.

References:

1. Bulygina, O.N., Razuvaev, V.N. and Korshunova, N.N. 2009. Focus on Climatic and Environmental Change in Northern Eurasia Changes in snow cover over Northern Eurasia in the last few decades. *Environ. Res. Lett.* 4. doi: 10.1088/1748-9326/4/4/045026
2. Dorrepaal, E., Toet, S., van Logtestijn, R. S. P., Swart, E., van de Weg, M. J., Callaghan, T. V., and Aerts, R.: Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic, *Nature*, 460(7255), 616–619, 2009.
3. Federer, C. A., Vörösmarty, C., and Fekete, B.: Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity, *Journal of Hydrometeorology*, 4, 1276-1290, 2003.
4. Frey, K. E. and Smith, L. C.: Amplified carbon release from vast West Siberian peatlands by 2100, *Geophys. Res. Lett.*, 32(7), L09401, doi:10.1029/2004GL022025, 2005.
5. Lugina, K. M., P. Ya. Groisman, K. Ya. Vinnikov, V. V. Koknaeva, and N. A. Speranskaya, 2007: Monthly surface air temperature time series area-averaged over the 30-degree latitudinal belts of the globe, 1881-2006. Trends: A Compendium of Data on Global Change, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Dept. of Energy.
6. Marchenko, S. (2001). A model of permafrost formation and occurrences in the intracontinental mountains. *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography*. 55: 230-234. Oslo. ISSN 0029-1951.

7. Marchenko, S., Romanovsky, V. & Tipenko, G. (2008). *Numerical Modeling of Spatial Permafrost Dynamics in Alaska. Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, University of Alaska Fairbanks, Jun 29 - July 3, 2008, 2: 1125-1130.*
8. Schuur, E. A. G., J. G. Vogel, K. G. Crummer, H. Lee, J. O. Sickman, and T. E. Osterkamp. 2009. *The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra. Nature 459:556-559*
9. Stolbovoi, V. and I. Savin. 2002. *Maps of soil characteristics. In Stolbovoi V. and I. McCallum. 2002. CD-ROM Land Resources of Russia. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science. CD-ROM. Distrib. by NSIDC, Boulder.*
10. T. Zhang , J. A. Heginbottom , R. G. Barry & J. Brown (2000): *Further statistics on the distribution of permafrost and ground ice in the Northern Hemisphere , Polar Geography , 24:2, 126-131*
11. Tarnocai, C., J. G. Canadell, E. A. G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova, and S. Zimov (2009), *Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region, Global Biogeochem. Cycles, 23, GB2023, doi:10.1029/2008GB003327.*
12. V. E. Romanovsky, D. S. Drozdov, N. G. Oberman , G. V. Malkova , A. L. Kholodov, S. S. Marchenko, N. G. Moskalenko, D. O. Sergeev, N. G. Ukraintseva, A. A. Abramov, D. A. Gilichinsky and A. A. Vasiliev. (2010). *Thermal State of Permafrost in Russia. Permafrost and Periglacial Process. 21: 136–155. DOI: 10.1002*
13. van Everdingen, Robert, ed. 1998 revised May 2005. *Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology.*
14. Vörösmarty, C. J., Federer, C. A., and Schloss, A. L.: *Potential evaporation functions compared on US watersheds: Implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling, Journal of Hydrology, 207, 147-169, 1998.*
15. Wisser, D., Frohling, S., Douglas, E. M., Fekete, B. M., Vörösmarty, C. J., and Schumann, A. H.: *Global irrigation water demand: Variability and uncertainties arising from agricultural and climate data sets, Geophysical Research Letters, 35, 2008. Wollheim, W. M., Vörösmarty, C. J., Bouwman, A. F., Green, P., Harrison, J., Linder, E., Peterson, B. J., Seitzinger, S. P., and Syvitski, J. P. M.: Global N removal by freshwater aquatic systems using a spatially distributed, within-basin approach, Global Biogeochemical Cycles, 22, 2008.*

Relationship of nature and socio-economic development

Druzhinin P.V., Shkiperova G.T.

Institute of Economics KRC RAS, Petrozavodsk, Russia
E-mail: pdruzhinin@mail.ru

Two problems identified in the report: assessment of the impact of climate change on the development of certain sectors of the regional economy and assessment of impact of economic development on the global environment.

New models allow you to assess the ecological status of the territory, depending on various factors, reflecting the development of the economy. New types of relationships that reflect the link between economic and environmental performance, have been proposed. They differ from traditional models of IPAT and STIRPAT. They are easy to predict and take into account the impact of new factors (environmental management and modernization of the economy.) Model identification technique has been developed. The method of predicting the environmental state of the area was developed. It is based on the construction of policy scenarios of federal and regional authorities (economic, investment, structural, and environmental innovation). On the proposed functions of the calculations were carried out according to the Russian Republic of Karelia as a whole and for individual activities. The possibility of constructing models of the 2000s, has been shown. Study previously introduced the concept of a neutral environmental progress has been conducted. Calculations show that it means using two-factor functions of pollution. The task of finding the optimal allocation of factors has been proposed. The method of its solution for two-factor and three-way function has been proposed. Sector of Russia and the Republic of Karelia, significantly different in their effect on the environment, have been allocated. calculation functions for pollution were conducted. For selected sectors of experimental calculations to determine the optimal allocation of investments were held. For the three-way investment functions performed experimental calculation of optimal distribution of investments were held.

In this paper the effects of climate change on agriculture in Karelia investigated. Global warming may increase yield, especially in the central and northern areas. As the climatic characteristics of the summer and winter mean temperature and total precipitation by season or month considered. Investigated three crops - cereals, potatoes and vegetables. To construct a multiplicative functions yield climatic characteristics (deviation from the optimal average temperature and precipitation), agronomic (mineral and organic fertilizers) and socio-economic indicators (investment in agriculture, the development of the regional economy, the dynamics of economic development of the region) are considered. In summary, the expected warming for agriculture Karelia will bring significant benefits, increase in yields due to this factor in the preservation of traditional cultures will be negligible.

Взаимосвязь природы и социально-экономического развития регионов

Дружинин П.В., Шкиперова Г.Т.

Институт экономики КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия
E-mail: pdruzhinin@mail.ru

Из множества задач относящихся к рассматриваемой тематике в докладе выделены две: оценка влияния климатических изменений на развитие отдельных секторов региональной экономики и оценка влияния развития экономики региона на окружающую среду. По каждой задаче описываются предлагаемые модели, которые на основе имеющейся статистической информации позволяют получить количественные оценки за ретроспективный период и строить прогнозы на перспективу. Для отдельных регионов проведено исследование взаимосвязи экономических и экологических показателей и идентификация моделей, описывающих это взаимодействие. Исследование влияния происходящих сейчас климатических изменений проведено на примере сельского хозяйства. Построены модели, позволяющие выявить влияние различных факторов, прежде всего температуры и осадков на урожайность различных сельскохозяйственных культур. Проведены расчеты на данных отдельных регионов Северо-Запада России. Исследование степени влияния данных факторов на экономику регионов и путей адаптации к ним выполняется по проекту №12-22-18005a/Fin, который поддержан и финансируется РГНФ.

Для оценки влияния развития экономики на окружающую среду предложен подход, связанный с построением относительно простых моделей, понятных и имеющих определенный экологический и экономический смысл, расчеты по которым за ретроспективный период позволяют делать разумные выводы и способны привести к относительно небольшому количеству сценариев. Данный подход в значительной степени основан на работах по теории производственных функций. Основное достоинство предлагаемых трехфакторных экологических инвестиционных функций, связывающих экономические и экологические показатели состоит в том, что они позволяют исследовать динамику экологической эффективности инвестиций, анализировать влияние изменения структуры инвестиций и экономики и учесть возможность компенсации одного фактора другим. Введено понятие нейтрального экологического прогресса, который отражает влияние структурных сдвигов и модернизации производства.

Было проведено исследование предложенных ранее функции, позволяющие оценивать экологическое состояние территории в зависимости от различных факторов, отражающих развитие экономики. Были предложены новые виды зависимостей, отражающих связь экономических и экологических показателей. Их принципиальное отличие от традиционных моделей IPAT и STIRPAT – удобство для прогнозирования и возможность учета влияния новых факторов, прежде всего характеризующих природоохранную деятельность и модернизацию экономики. Были разработаны методика идентификации моделей и методика прогнозирования экологического состояния территории на основе построения сценариев политики федеральных и региональных властей (экономической, инвестиционной, структурной, инновационной и экологической).

По предложенным функциям были проведены расчеты по данным РФ и Республики Карелия в целом и по отдельным видам деятельности по двум видам загрязнений - выбросам в атмосферу и сбросам сточных вод. Показано влияние модернизации на динамику экологических показателей, отражающих загрязнение окружающей среды. Были выведены формулы, определяющие зависимость нейтрального экологического прогресса от структурных сдвигов и проведены расчеты по оценке влияния структурных сдвигов в экономике на динамику загрязнений. Проведенные расчеты показали невысокую эффективность природоохранных инвестиций, основное влияние на снижение загрязнений оказали структурные сдвиги и модернизация экономики российских регионов.

Была осуществлена постановка задачи поиска оптимального распределения факторов и предложена методика ее решения для двухфакторных и трехфакторных функций. Были выделены сектора экономики РФ и Республики Карелия, существенно различающиеся по влиянию на окружающую среду и проведены расчеты функций загрязнения для них. Для выделенных секторов были проведены экспериментальные расчеты по определению оптимального распределения инвестиций.

Влияние климатических изменений на развитие российских регионов неоднозначно и для получения точных оценок необходимо на основе системного описания объекта построить модель и проанализировать влияние данного фактора. Экономические исследования последствий изменения климата показали, что наибольшее влияние ожидается в следующих секторах региональной экономики: сельское хозяйство, использование прибрежных ресурсов, энергетика, лесное хозяйство, туризм, рыбное хозяйство и водоснабжение.

В работах Ч.Чанга, О.Дечинеса, М.Гринстоуна, Р.Мендельсона, В.Нордхауса и Д.Шоу изучалась урожайность различных культур на региональном уровне, для оценки изменения которой рассматривались различные виды уравнений, аналогичных производственным функциям. Было показано, что влияние изменения средних по сезонам осадков и температуры значительно и нелинейно. Был отмечен положительный эффект замены одной культуры на другую, более урожайную, при повышении средней температуры в регионе. Исследования в других странах показали, что условия для роста урожайности появляются в более северных регионах, в них возможен рост урожайности за счет улучшения климатических условий и смены культур на более урожайные и требовательные к теплу, в то же время в южных регионах условия ухудшаются.

Влияние климатических изменений на сельскохозяйственное производство в РФ, прежде всего на урожайность, исследовалось еще в 80-х годах в работах С.Сиптица, С.Огнивцева, Ф.Ерешко, О.Сиротенко, Х.Абашиной, В.Павловой и других. Исследования, проводившиеся в ВЦ АН СССР, показали, что отклонения от сложившейся тенденции были связаны именно с погодными аномалиями. Заметные климатические изменения последних лет способствовали росту количества исследований. Положительные сдвиги связаны с ростом продолжительности вегетационного периода и расширением зоны земледелия, а также косвенно может повлиять сокращение отопительного сезона и увеличение сроков навигации. Мягкие зимы способствуют повышению урожайности озимых, а при дальнейшем повышении температуры большее распространение могут получить такие теплолюбивые культуры, как подсолнечник. Соответственно могут снизиться затраты и увеличиться сельскохозяйственное производство, и по оценкам некоторых экспертов, РФ может получить прибавку до 0.6% роста ВВП.

В России по аналогии с результатами, полученными для американских регионов, выигрыш должны получить центральные и северные регион, в частности регионы Северо-Западного федерального округа. Для оценки данного влияния строится системное описание происходящих процессов, изучаются особенности развития региона, выделяются и описываются основные факторы, определяющие изменение показателей сельского хозяйства, прежде всего урожайности, собираются и анализируются данные по факторам и урожайности, строятся графики показателей, позволяющие выявить существующие зависимости.

После проведенного анализа данных разрабатываются модели, основу которых составляют регрессионные уравнения, в которых урожайность по регионам рассматривается в зависимости от выделенных факторов: климатических, агротехнических, состояния почвы, социально-экономических характеристик, уровня менеджмента, технологического уровня и особенностей конкретной культуры. Уравнения урожайности по регионам строятся по временным рядам для одного региона или кросс-секшн по регионам за один год. Общая форма функций урожайности Y (обычно используют мультипликативные или линейные функции):

$$Y = f(C, M, L, X),$$

где: C – климатические характеристики, M – агротехнические, L – почвенные, X – социально-экономические и прочие характеристики.

Климатические характеристики были представлены в виде полиномов второй степени или модуля отклонений от оптимальных значений. В качестве климатических характеристик рассматриваются средняя температура, сумма активных температур и суммарные осадки за разные периоды (за год, за сезон, между уборками урожая, от посева до уборки, за июнь, за июль и за третью декаду июня). Поскольку временные ряды короткие, и количество факторов должно быть минимальным, то можно использовать гидротермический коэффициент за разные периоды, на практике наилучшая связь с урожайностью при рассмотрении периода от посева до уборки. Агротехнические показатели – внесение минеральных и органических удобрений на гектар посевов. Социально-экономические показатели позволяют учитывать состояние сельского хозяйства региона (объем и динамика инвестиций в сельское хозяйство), уровень развития экономики регионов, динамику развития экономики регионов (ВРП в сопоставимых ценах) и некоторые другие особенности. Проблемой является учет почвенных характеристик для региона, почвенно-экологический индекс и другие показатели рассчитываются по локальным территориям и построить средний по региону показатель сложно. К числу прочих показателей относятся, в том

числе и числа Вольфа, связь которых с урожайностью исследовалась в работах по дореформенному периоду.

В статье представлено исследование влияния различных факторов на урожайность основных культур, выращиваемых в регионах Северо-Запада – Карелии, Вологодской, Ленинградской и Калининградской областях. Часть информации была получена из статистических справочников ФСГС и данных различных ведомств. Для расчетов использовалась также информация, собранная институтами РАН и другими ведомствами. Проводившиеся ранее исследования позволили выделить три периода в динамике урожайности – предстагнационный до 1982 г., стагнационный до 1999 г. и современный. Расчеты проводились по второму и третьему периодам и отдельно по третьему периоду.

В рассматриваемых регионах сельское хозяйство занимает разную долю в структуре экономики. В более южных регионах производство растет, в более северных спад преодолеть не удалось. Инвестиции в сельское хозяйство стабильно растут только в Ленинградской области. Внесение минеральных удобрений падает только в Карелии. ВВП рос до кризиса, после него во всех регионах в 2010 г. ВВП вырос. Во всех четырех рассматриваемых регионах преобладают подзолистые почвы, в Вологодской области присутствуют каштановые солонцеватые и солончаковатые, в Ленинградской – дерново-карбонатные. Детальное изучение данных и расчеты проводились по трем культурам (зерновые, картофель и овощи), динамика урожайности которых заметно отличалась.

Выделить влияние климатических факторов оказалось достаточно сложно. Для построения функций урожайности для климатических характеристик рассматривалось отклонение от оптимальных значений. Вводилось понятие нейтрального технического прогресса, которое, как и в производственных функциях было представлено временной зависимостью. Расчеты проводились по всем регионам отдельно и по четырем регионам одновременно.

Для выбранных регионов расчеты проводились по линейной функции:

$$Y(t) = A(t) + T^2(t) + T(t) + R^2(t) + R(t) + M(t) + X_i(t) + K \quad (2)$$

где: A - нейтральный технический прогресс; T – температура; R – осадки; M – объем внесенных удобрений относительно 1990 г.; X_i – социально-экономические и прочие характеристики; K – константа; t - год.

На основе проведенных расчетов можно сказать, что автоматического роста сельскохозяйственного производства не произойдет, ожидаемое потепление создаст потенциал для роста, для использования которого потребуются определенные усилия. Рост урожайности за счет потепления при сохранении традиционных культур будет незначителен, не превысит 10%. Большой эффект дадут повышение уровня менеджмента и переход к более современным технологиям. Также оказать положительное влияние может изменение структуры посевных площадей, переход к позднеспелым и более урожайным сортам и к новым, более теплолюбивым культурам, что требует уже сейчас увеличения вложений в сельскохозяйственную науку. Для того чтобы использовать открывающиеся возможности, и минимизировать ожидаемые потери, необходима адаптация регионов к ожидаемым климатическим изменениям и ориентация сельскохозяйственной науки на адаптационные проекты.

Using high-resolution multispectral WorldView-2 imagery and Indicator Species Analysis to map freshwater deltaic wetlands

¹Charles R. Lane, ^{2,3}Hongxing Liu, ⁴Oleg Anenkhonov, ¹Brad Autrey, ^{5,6}Victor Chepinoga

¹ US Environmental Protection Agency (EPA), Office of Research and Development, Cincinnati Ohio, USA

² Dynamac Corporation c/o US EPA, Cincinnati Ohio, USA

³ University of Cincinnati, Department of Geography, Cincinnati Ohio, USA

⁴ Institute of General and Experimental Biology SB RAS, Ulan-Ude, Russia

⁵ Irkutsk State University, Department of Botany and Genetics, Irkutsk, Russia

⁶ Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

E-mail: Lane.Charles@epa.gov

Remote sensing technology has long been used in wetland inventory and monitoring though derived wetland maps were limited in applicability and often unsatisfactory largely due to the relatively coarse spatial resolution of conventional satellite imagery. The advent of high-resolution multispectral satellite systems presents new and exciting capabilities in mapping wetland systems with unprecedented accuracy and spatial detail. This research explores and evaluates the use of high-resolution WorldView-2 (WV2) multispectral

imagery in identifying and classifying freshwater deltaic wetland vegetation and aquatic habitats in the Selenga River Delta, a Ramsar Wetland of International Importance that drains into Lake Baikal, Russia – a United Nations World Heritage site. A hybrid approach was designed and applied for WV2 image classification consisting of initial unsupervised classification, training data acquisition and analysis, indicator species analysis, and final supervised classification. A hierarchical scheme was defined and adopted for classifying aquatic habitats and wetland vegetation at genus and community levels at a fine scale, while at a coarser scale representing wetland systems as broad substrate and vegetation classes for regional comparisons under various existing wetland classification systems. Rigorous radiometric correction of WV2 images and orthorectification based on GPS-derived ground control points and an ASTER global digital elevation model resulted in 2- to 3-m positional accuracy. We achieved overall classification accuracy of 86.5% for 22 classes of wetland and aquatic habitats at the finest scale and >91% accuracy for broad vegetation and aquatic classes at more generalized scales. At the finest scale, the addition of four new WV2 spectral bands contributed to a classification accuracy increase of 3.5%. The coastal band of WV2 was found to increase the separation between different open water and aquatic habitats, while yellow, red-edge, and near-infrared 2 bands were more useful for discriminating between different vegetated habitats. Analyses demonstrated that the Normalized Difference Vegetation Index was valuable for improving the classification accuracy and image texture was particularly useful for separating scrub/shrub wetland from various emergent herbaceous wetlands. Our analysis resulted in the first-ever detailed, quantitative wetland inventory map of the Selenga River Delta, and provides a benchmark for future wetland change detection studies and baseline information for wetland conservation and management efforts for this region.

Влияние глобальных изменений климата на гидрологический режим рек юга Западной Сибири

Зиновьев А.Т., Галахов В.П., Кошелева Е.Д., Ловцкая О.В.

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

E-mail: lgg-iwep@yandex.ru

Web: <http://www.iwep.ru/ru/struct/lgg/atz.html>

Для изучения влияния климатических изменений на формирование стока рек юга Западной Сибири в данном исследовании были решены следующие задачи: 1) выявление характера изменения увлажнения на территории Западной Сибири за последние 2000 лет; 2) обнаружение существующих тенденции в изменении норм стока рек указанной территории; 3) моделирование стока рек таежной и лесостепной зон Западной Сибири при различных сценариях изменения метеорологических характеристик.

Применяемые методы исследования – статистический анализ рядов среднемесячных и среднегодовых расходов, имитационное моделирование на основе уравнений водного баланса а) замкнутого водоема б) стока в модельных бассейнах; в) объема и границ ледника.

1 задача. Для оценки динамики изменений климата на юге Западной Сибири использовались палеолимнологические реконструкции уровня воды озера Чаны (Новосибирская область, РФ) и имитационная балансовая модель ледника Малого Актру (Алтай, РФ). При моделировании водного баланса оз. Чаны выполнен расчет изменения увлажнения в данном регионе за последние 2 тысячи лет. Рассчитана динамика изменения увлажнения и температур теплого периода за последние 2 тысячи лет на юге Западной Сибири, дана оценка и прогноз на ближайшие столетия. График изменения увлажнения и среднегодовых температур для юга Западной Сибири находятся в фазе роста: в пределах предыдущего и текущего столетий имеется растущий положительный тренд. Начало роста увлажнения в данном регионе приходится на 1910 г., экстремум функции прогнозируется к 2100 году. Существующий тренд будет продолжаться до последней четверти XXI века. Для функции изменения температур максимум (положительный экстремум) следует ожидать к 2170 году. 2013 г. находится в области квазилинейного растущего тренда.

2 задача. При анализе изменения водности рек на изучаемой территории обрабатывались гидрологические данные для створов с периодом наблюдений не менее 50 лет. Отобрано 69 гидрологических постов на реках Обь-Иртышского бассейна. По разностным интегральным кривым для каждого ряда установлен расчетный репрезентативный период, включающий в себя полные циклы водности. Выполнен статистический анализ рядов среднегодовых расходов основных рек юга Западной Сибири и рас-

считаны их линейные тренды. Оценена скорость изменений норм стока, даны прогнозы на ближайшие 10–20 лет. На исследуемой территории выделено 11 зон изменения стока.

3 задача. Для изучения условий формирования поверхностного стока рассмотрены следующие бассейны: типичный заболоченный водосбор таежной зоны р. Васюган (с. Майск) и нетипичный для территории Большого Васюганского болота водосбор лесостепной зоны р. Каргат (с. Здвинск). Выполнены вариативные балансовые расчеты стока для ряда лет, среднемноголетнего по водности года и со сценарным изменением режимов температур и осадков.

Моделирование стока на основе уравнений водного баланса для рек таежной и лесостепной зон Большого Васюганского болота при различных сценариях изменения метеорологических характеристик показало, что наиболее значительное влияние на поверхностный сток оказывает изменение увлажнения, а не температуры воздуха. При потеплении на 1°C сток уменьшится на 7–12%, а при потеплении на 4°C – на 43%. Уменьшение же осадков на 50% вызывает уменьшение поверхностного стока на 80%, а увеличение осадков на 50% ведет к увеличению стока более чем в 2 раза.

Работа выполнена в рамках междисциплинарного интеграционного проекта Президиума СО РАН №69 «Интегрированные исследования климатических, гидрологических и экосистемных процессов на территории болот Западной Сибири» и проекта ФНИ VIII.76.1.1 «Исследование процессов формирования стока и разработка информационно-моделирующих систем оперативного прогнозирования опасных гидрологических ситуаций для крупных речных систем Сибири».

Influence of global climate changes on hydrological regime of rivers in the south West Siberia

Zinoviev A., Galakhov V., Kosheleva E., Lovtskaya O.

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia

E-mail: lgg-iwep@yandex.ru

Web: <http://www.iwep.ru/ru/struct/lgg/atz.html>

Introduction

Undoubtedly, the global increase of air temperature has an effect both on the World Ocean and the surface water. Over a period from 1976 to 2006 (30 years), the warming of the air temperature over Russia was 1.4°C (Malinin, 2009). The interannual variation of the World Ocean level shows a pronounced upward trend of about 200 mm for past 180 years (Shiklomanov, 2008). A sinusoidal harmonic of the World Ocean level in reference to the trend line with the points of transition in 1882 and 1954, and the current positive sinusoidal branch is observed. The phase of the upward branch gives a steeper local linear trend for the period from 1954 to 2000 as compared to the general trend of increase of World Ocean level in 1860-2000.

The need to assess the water content due to climate change poses the following research objectives: 1) to identify the nature of variations in precipitation in West Siberia over the last 2000 years; 2) to reveal the existing discharge trends in the area under study over the past decades, and 3) to simulate the surface runoff in taiga and forest-steppe zones of West Siberia under different scenarios of weather variation.



Fig. 1 Location of objects under study: West Siberia, the Ob-Irtysh basin, Lake Chany, Great Vasyugan Mire, Glacier Maly Aktru (Gorny Altai)

Objects of research

For each of the tasks within the south of West Siberia (Fig. 1) the following objects of research were selected:

For the reconstruction of precipitation in the south West Siberia – Lake Chany;

To assess the change in the discharge in the south of West Siberia over the past decades – 69 hydrological stations on the rivers of the Ob-Irtysh basin with long series of observations of daily and monthly mean discharge;

To simulate the surface runoff formation a typical bogged catchment of River Vasyugan (Maisk village) in the taiga zone and atypical for the territory of Great Vasyugan Mire, the catchment of River Kargat (Zdvinsk village) situated in the forest-steppe zone were selected.

Background

Task 1

The basis for modeling precipitation in Lake Chany was formed by the long-term study of the reconstruction of fluctuations of its mirror for the last 2000 years with a 50-year time step, conducted by the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (Zykin et al., 2009). The simulation is based on the equation of water balance for individual water basin. The results of estimation of annual precipitation variation by the fluctuation of the Lake Chany table were compared with the ones obtained with sporo-pollen spectra (Klimanov et al., 1987). The calculation of the thermal regime and precipitation is based on the simulation model of glacier balance previously developed by the IWEP (Galakhov, 2001).

Task 2

The State Hydrological Institute was engaged in the study of water discharge variation due to climate warming. The complex statistical analysis was used to study the dynamics of the spring, summer-fall and winter discharge of large, medium-size and small rivers of Russia as well as the intra-annual discharge distribution (Shiklomanov, 2008). Currently, the foreign practice in hydrology has been also focused on the study of trends in water flow occurring due to the climate change. For instance, the trends of seasonal, average, minimal and maximal water flow were analyzed for natural river basins of Canada, the natural zones of which are similar to the ones in West Siberia (Adamowski & Bocci, 2001; Burn & Hag Elnur, 2002; Cunderlik & Burn, 2002; Pilon & Yue, 2002; Whitfield & Cannon, 2000; Yue et al., 2002; Zhang et al., 2001).

Task 3

The modeling of surface runoff in the catchments with clear boundaries of watersheds is based on the water-balance equation with consideration for precipitation, evaporation, runoff, water loss and changes of moisture capacity in the area (Giants, 1964).

Methods

Task 1

To assess changes in annual precipitation in the south of West Siberia, the results of paleolimnological reconstructions of water levels of Lake Chany were used (Galakhov, 2011).

The change in thermal regime (the magnitude of cooling) was defined with the use of a simulation model for calculating the ice balance components of the Maly Aktru glacier based on the climatic conditions (i.e. temperature of the warm period) dependence of the glacier tongue location. The values of a warming period were calculated by the extension of an ancient forest boundary compared to the modern one.

The assessment of cooling in the second half of the Holocene was based on determining the position of the moraine complexes and their radiocarbon dating. The evaluation of the warming period was made by the position of the upper forest boundary and by radiocarbon dating as well. The radiocarbon dating of organic debris (wood and peat) sampled in the moraine complexes and in lacustrine sediments located ahead of the moraines was performed using QUANTULUS 1220 in the laboratory of Cenozoic Geology and Paleoclimatology of the V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS. The results of dating were used to estimate the time of moraine complexes formation with regard to the time of the glaciers response to the cooling period and the time of the glacier's tongue advancement up to the moraine complex (Galakhov, 2001).

Task 2

For analytical presentation of scenario forecast based on linear trends, the approximate equality of discharge, calculated from the series of observations Q_0 (m^3/s), and the average value of series of the calculated linear trend Q_0^T (m^3/s) was used.

Task 3

For modeling of a surface runoff in the swampy catchments, a simulation model of a water balance is used (Galakhov & Belova, 2008). For the rivers with clear boundaries of watersheds, water balance (including water loss) is calculated by the Velikanov's formula (Velikanov, 1964): $X - E - POT - Y = W$, where X – the average precipitation in the basin, mm; E – the average (for the basin) evaporation, mm; Y – runoff, mm; POT – the average (for the basin) water loss, mm; W – the change of precipitation in the basin, mm.

Data

To carry out the climatic research we used the baseline climatological data sets from the (All-Russian Research ..., 2012) as well as the mentioned above reconstruction of the Lake Chany table fluctuation conducted by the Institute of Geology and Mineralogy (Zykin V.S. et al., 2009).

Results and conclusions

Task 1

When modeling the water balance of Lake Chany, the variation of precipitation in the region over the past 2000 years was calculated. To determine the periodic dependence of series, the spectral analysis based on the Fourier one-dimensional transformation was used. The main frequencies contributing significantly to the periodic behavior of the whole series were identified. The curve calculated with the selected periods is shown in Fig.2.

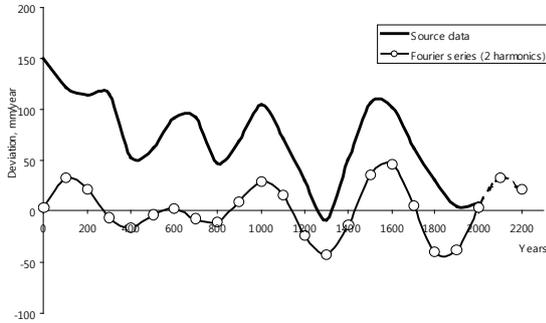


Fig. 2 Precipitation fluctuation in the south West Siberia (mm/year) for the last two thousand years (based on the results of paleolimnological reconstructions of Lake Chany)

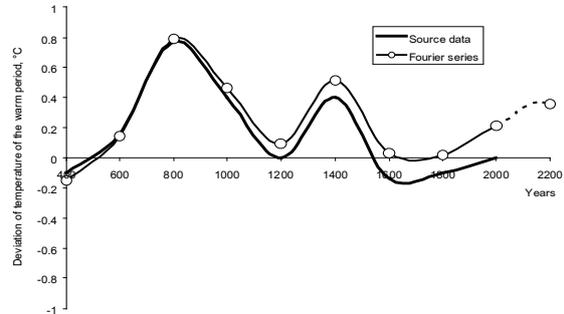


Fig. 3 Deviation of temperature of the warm period from the mean (°C) in the south West Siberia for the last two thousand years (based on the glacier fluctuations in the alpine Altai)

The current upward positive sinusoidal branch on the graph of precipitation originated in the first half of the 20th century (1910), and the extremum of the function is forecasted by the year 2100. The existing trend will be observed up to the last quarter of the 21st century.

The study of glacier fluctuations in the alpine Altai allows the graphing of thermal variations in the warm season of the appropriate time period (Fig. 3). Similar to the precipitation series, the spectral analysis based on the Fourier one-dimensional transformation was used to reveal the main harmonics. On the graph, the average annual temperature fluctuation has a slightly larger oscillation than the one for precipitation, but the local situation within the last and the present century is also distinguished by a growing positive trend. The inflection point of the function of air temperature fluctuation fell on the early 20th century and, according to the forecast, a positive extremum is expected by the year 2170. Last year (2012) was within the quasi-linear upward trend; in the future, the temperature increase will take place with a decrease in the growth rate.

Rise of air temperature and precipitation, taken as a whole, influences the formation of the surface runoff in the south of West Siberia.

When making a hydrological forecast the term “scenario”, i.e. a plausible and often simplified description of events in the future, based on the consistent set of assumptions about driving forces and key relationships, was used. The basic requirement in scenario forecast is the maintenance of the current long-term trend in the annual flow in the rivers under consideration. This condition is acceptable for a 10 – 20 year forecast, as the surface runoff is mostly subject to precipitation fluctuation, which currently shows a quasi-linear upward trend.

Task 2

The analysis of changes in water content of rivers involved the processing of data from hydrological gages with full observation period of at least 50 years. Using the residual mass curves of discharge modular coefficients for each series, the calculation of representative period including the full cycles of water content was determined. Based on the results of the forecast, the following zones of discharges change are identified in the area under study (Fig. 4):

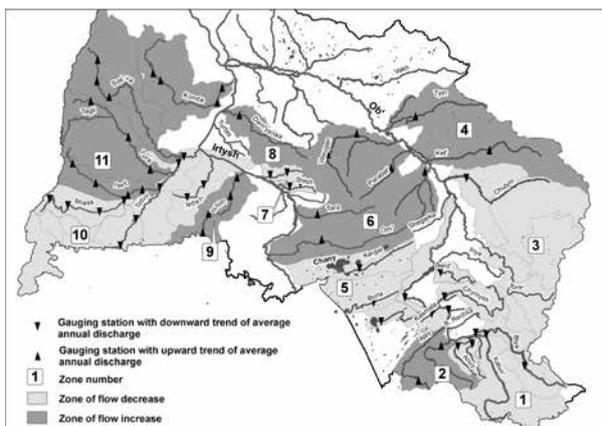


Fig. 4 Schematic map of changes in rivers discharge in the south of West Siberia

Zone 1 (-). By the year 2030, the decrease of discharges in rivers Anui (-2.2 % / 10 years), Katun (6.2 % /10 years), Biya (0.54 % /10 years) will lead to a decrease in the discharges of Ob River at the Fominskoye water gage by 3.1% as compared to 2010.

Zone 2 (+). By the year 2030, the increased discharges of the left tributaries of the Ob, in particular, river Aley (0.40% / 10 years) and river Charysh (0.85% / 10 years) leads to the increased discharges in Ob River by 1.1% (Barnaul water gage) and 1.2% (Kamen-on-Ob water gage) as opposed to 2010.

Zone 3 (-). Right-bank tributaries of River Ob with decreasing discharges (rivers Chumysh, Berd, Tom, Chulyrn) produce the decrease in discharge of Ob River at Kolpashevo water gage by 3.1% as against 2010.

Zone 4 (+). Right-bank tributaries of Ob River, rivers Ket' and Tym, show the increasing discharges. By the year 2030, the relative increase will make up 0.5% and 1.3%, respectively.

Zone 5 (-). The left tributary of Ob River, river Kasmala, and the rivers of the Ob-Irtysh interfluvium (rivers Kulunda, Burla, and Kargat) will show the discharge decrease by 5.2%, 3.15, 0.85, and 3.9%, respectively, for 10 years.

Zone 6 (+). Within the Great Vasyugan Mire a steady increase in the discharges takes place. This area demonstrates the maximum relative change of the discharge by the year 2030: river Om – 11.5% (south-west), and river Parabel' – 11.0% (east).

Zone 7 (-). Right tributaries of the Irtysh, Rivers Shish and Tui, will reduce water content at a rate from -0.9 to - 3.1% for 10 years.

Zone 8 (+). The right tributary of river Irtysh – river Demyanka (its catchment area is a forested territory (50%) and wetlands (30%)) has a 5.4% increase discharge every 10 years.

Zone 9 (+). Running through the Russian territory river Ishim – the left tributary of river Irtysh, increases its water content by 6 –7% every 10 years due to its forest-covered and wetland basin. From the Russian-Kazakhstan border up to Omsk and Tyumen regions, forests cover 62% and bogs – 8% of the total basin area of 27 000 km². The river site from the Tyumen region up to the river's mouth near village Orekhovo (the catchment area is of 20 000 km²) is forested by 45% and waterlogged by 30%.

Zone 10 (-). According to the forecast, left-bank tributaries of river Irtysh in the forest-steppe and steppe zones of river Miass (waterlogged by 5% or less), river Tobol (waterlogged in selected sites by 7 – 16%) and adjacent river Vagai running in the taiga zone will reduce their discharge.

Zone 11 (+). Tributaries of the left-bank Irtysh from the taiga zone will increase their water content (tributaries of river Tobol are rivers Iset', Sos'va, Tura, and river Konda – a tributary of river Irtysh).

Task 3

To study the conditions for surface runoff formation in wetlands, the following basins were considered: a typical bogged catchment of river Vasyugan (village Maisk) in the taiga zone, and atypical for the territory of the Great Vasyugan Mire the catchment of river Kargat (village Zdvinsk) situated in the forest-steppe zone. Alternative balance calculations of the runoff in the model basins were performed for several years: a long-term average annual year by water content, and the years with scenario changes in temperature and precipitation regimes.

The flow simulation in the rivers of taiga and steppe zones of Great Vasyugan Mire under different scenarios of meteorological parameters with the use of the water balance equation clearly shows that precipitation, not air temperature, has the most significant effect on the surface runoff. At warming of 1°C, the runoff is reduced by 7-12%, and at warming of 4°C – by 43%. A 50% reduction of precipitation will result in 80% decrease of the surface runoff, while a 50% increase in precipitation will lead to a twofold increase in the runoff.

Acknowledgments

The work was supported by the interdisciplinary integration project of the SB RAS 69 “The integrated study of climatic, hydrological and ecosystem processes in the swamps' territory of West Siberia” and project VIII.76.1.1 “The study of surface runoff formation processes and the development of information and modeling systems for operational forecasting of hazardous hydrological situations on the large river systems of Siberia”.

References:

1. Adamowski, K. & Bocci, C. (2001) *Geostatistical regional trend detection in river flow data. Hydrolog. Processes* 15: 3331-3341.
2. All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center (2012) *Baseline Climatological Data Sets. Source. Available from http://www.meteo.ru/climate/sp_clim.php.*
3. Burn, D.H. & Hag Elnur, M.A. (2002) *Detection of hydrologic trend and variability. J. Hydrol.* 255: 107-122.
3. Cunderlik, J.M. & Burn, D.H. (2002) *Local and regional trends in monthly maximum flows in southern British Columbia. Can. Water Resour. J.* 27: 191-212.

4. Galakhov, V.P. & Belova, O.V. (2008) *Formation of surface runoff under climate changes (the Upper Ob River basin as a case study)*. Barnaul, ASU Publishers.
5. Galakhov, V.P. (2001) *Simulation as a method for glaciological reconstruction of mountain glaciers (studies of Altai)*. Nauka, Novosibirsk, 2001: 136.
6. Galakhov, V.P. (2011) *Assessment of humidity in the south of West Siberia using paleolimnological reconstructions of Lake Chany*. Barnaul, ASU Publishers.
7. Klimanov, V.A., Levina, T.P., Orlova, L.A. & Panychev, V.A. (1987) *Climate change in Baraba Lowland in the Holocene Sub-Atlantic period according to data on the Suminskoye floodplain peat bog*. In: *Regional Geochronology J.*: 143-149. Novosibirsk, Nauka Publ.
8. Malinin, V.N. (2009) *Variability of global water exchanges under climate changes*. *Water Resources J.*, 36(1), 15-28.
9. Pilon, P.J. & Yue, S. (2002) *Detecting climate-related trends in streamflow data*. *Water Sci. Technol.* 8(45): 89-104.
10. Shiklomanov, I.A. (2008) *Global hydrological cycle*. In: *Water resources of Russia and their use* (ed. by I.A. Shiklomanov): 52-98. St. Peterburg, State Hydrological Institute.
11. Velikanov, M.A. (1964) *Land Hydrology*. Leningrad, Gidrometeoizdat.
- Yue, S., Pilon, P.J., Phinney, B., & Cavadias, G (2002) *The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series*. *Hydrolog. Process.* 16(9): 1807-1829.
12. Zhang, X., Harvey, K.D., Hogg, W.D. & Yuzyk, T.R. (2001) *Trends in Canadian streamflow*. *Water Resour. Res.* 37(4): 987-998.
13. Zysin, V.V., Zykina V.S., Orlova L.A., Chirkin, K.A., Balakin, P.V. & Smolyaninova L.G. (2009) *On the development of lake Chany in the Late Neopleistocene-Holocene*. In: *Geography – Theory and Practice: Modern Issues and Prospects*. – Barnaul, Altai University Publishing House: 95-98.

Секция 3

Моделирование и анализ климата

Session 3

Climate modeling and analysis

Advanced variational modeling technologies for environmental studies

Penenko V.V., Tsvetova E.A., Penenko A.V.

Institute of Computational Mathematics and Mathematical
Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia
E-mail: penenko@sscc.ru

We have developed a set of mathematical tools for construction of integrated models for solution of interconnected problem of ecology and climate. The central point is a variational approach for solving direct and inverse problems of atmospheric hydrodynamics and chemistry. It is important that the accurate matching of numerical schemes has to be provided in the chain of objects: direct/adjoint problems – sensitivity relations – inverse problems for finding parameters and sources, including assimilation of all available measurement data. To solve the problems we have developed a new enhanced set of cost-effective algorithms.

The matched description of the multi-scale processes is provided by a specific choice of the variational principle functionals for the whole set of integrated models. Then all functionals of variational principle are approximated in space and time by splitting and decomposition methods [1]-[6].

Such approach allows us to separately consider, for example, the space-time problems of atmospheric chemistry in the frames of decomposition schemes for the integral identity sum analogs of the variational principle at each time step and in each of 3D finite-volumes. To enhance the realization efficiency, the set of chemical reactions is divided on the subsets related to the operators of production and destruction. Then the idea of the Euler's integrating factors is applied in the frames of the global and local adjoint problems technique [1]-[5]. The analytical solutions of local adjoint problems play the role of integrating factors for differential equations describing atmospheric chemistry. With their help, the system of differential equations is transformed to the equivalent system of integral equations. In a similar manner we treat the integro-differential operators of the transformation models describing dynamics of multi-component aerosol populations. As a result, we avoid the construction and inversion of preconditioning operators containing the Jacobi matrixes which arise in traditional implicit schemes for ODE solution. This is the main advantage of our schemes.

At the same time step but on the different stages of the "global" splitting scheme, the system of atmospheric dynamic equations is solved. For convection –

diffusion equations for all state functions in the integrated models we have developed the monotone and stable discrete-analytical numerical schemes [3]-[5] conserving the positivity of the chemical substance concentrations and possessing the properties of energy and mass balance that are postulated in the general variational principle for integrated models. All algorithms for solution of transport, diffusion and transformation problems are direct (without iterations). This is a very valuable property of variational technique for modeling non-uniformly scaled processes synchronizing the algorithms in different sub-models of the integrated system. From this point of view, the technique of the local adjoint problems in the frames of variational principles is an efficient tool for decomposition of scales in the models of processes. In essence, this completes the methodology, early developed by us [6], which separate the processes with respect to the scales of disturbances by means of the orthogonal decomposition of multidimensional phase spaces of the state functions. Here we mean the functions generated by non-linear dynamical models of the processes, as well as the functions from the data bases constructed on the results of measurements in reanalyses. Such technique is necessary for analysis and synthesis of the situation as a whole and for organizing the forecast scenarios and risk assesment.

The work is partially supported by the Programs No 4 of Presidium RAS and No 3 of Mathematical Department of RAS, by RFBR project 11-01-00187 and Integrating projects of SD RAS No 8 and 35.

Перспективные вариационные технологии моделирования для изучения окружающей среды

Пененко В.В., Цветова Е.А., Пененко А.В.

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

Мы разрабатываем математический аппарат для создания интегрированных моделей для решения взаимосвязанных задач экологии и климата, в том числе для задач природоохранного направления. Теоретическую основу современных технологий для решения природоохранных задач составляют совместные модели гидротермодинамики и химии атмосферы. Задачи атмосферной динамики и химии чрезвычайно сложны: в современных моделях учитывается порядка сотни различных субстанций, механизмы трансформации которых включают несколько сотен химических реакций.

Математически такие задачи относятся к классу задач конвекции-диффузии-реакции. В технологиях их реализации значительная часть алгоритмической и вычислительной работы приходится на численное решение систем «жестких» дифференциальных уравнений, описывающих процессы химической трансформации газовых примесей и динамики аэрозольных популяций. Свойство «жесткости» соответствующих систем уравнений является следствием широкого диапазона характерных времен жизни различных субстанций, участвующих в реакциях.

Динамика аэрозольных популяций играет значительную роль в изменении качества атмосферы и термодинамических процессов. Популяции аэрозольных частиц взаимодействуют между собой. В значительной степени скорости их изменений формируются за счет переноса массы различных материалов и взаимодействий типа газ-частица в режиме прямых и обратных связей.

В последние 20 лет повышенный интерес проявляется к динамике углерод-содержащих фракций аэрозольных субстанций.

Учитывая большое разнообразие аэрозольных примесей как по материальному составу, так и по физико-химическим свойствам и набор взаимосвязанных процессов, в которых они участвуют (коагуляция, конденсация, испарение, нуклеация и др.), в базовых моделях мы классифицируем их по некоторым общим закономерностям, рассматривая, например, четыре основных типа аэрозолей:

1) нелетучие аэрозоли, в которых преобладают процессы коагуляции; процессы конденсации и испарения малозначимы; это, например, аэрозоли нелетучих материалов типа почвенная пыль, твердые производственные пыли, морская соль и углеродные фракции;

2) аэрозоли, в динамике которых преобладают процессы конденсации и испарения, например, капли воды, аэрозоли оксидов серы и др. Эти аэрозоли формируются за счет нуклеации или непосредственным инжектированием из источников и за счет конвективно-диффузионного переноса;

3) аэрозоли-смеси из субстанций первых двух типов; в них участвуют все перечисленные выше процессы;

4) объемные фракции аэрозолей третьего типа в различных композициях с аэрозолями первого типа.

Математические модели аэрозольных популяций описываются системами нелинейных нестационарных интегро-дифференциальных уравнений. В них процессы коагуляции описываются интеграль-

ными операторами, а процессы конденсации, испарения и диффузии - дифференциальными, типа конвекции-диффузии-реакции, по переменной, отвечающей за распределение частиц по размерам.

Для численного решения задач атмосферной химии используются методы расщепления по физическим процессам и декомпозиции по пространству. Они позволяют свести многомерные задачи к менее сложным и меньшей размерности. Выделение химического блока в методе расщепления позволяет выполнять интегрирование уравнений химии атмосферы формально независимо для каждой точки трехмерной пространственной области на соответствующих этапах расщепления в пределах каждого шага по времени.

Известно, что явные схемы для интегрирования жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) мало пригодны для практических целей, так как в них, вследствие требований аппроксимации и устойчивости, очень сильны ограничения на величину шагов по времени. Поэтому в настоящее время наиболее употребительными для решения жестких систем дифференциальных уравнений являются многошаговые неявные методы: Рунге-Кутты в сочетании с модификациями итерационного метода Ньютона для нелинейных систем, методы Гира и Розенброка, а также комбинированные методы Рунге-Кутты и Розенброка, методы квазистационарных концентраций и др. Ещё более сложные проблемы возникают при интегрировании разномасштабных уравнений трансформации аэрозолей.

С позиций вычислительной эффективности наиболее затратными элементами технологий с неявными численными схемами являются обращения на каждом этапе вычислений предобуславливающих матриц высокой размерности, содержащих матрицы Якоби линеаризованных систем уравнений. Дополнительные заботы представляет также необходимость обеспечения положительности искомых функций в процессе вычислений.

В настоящее время в технологии природоохранного прогнозирования тенденции развития направлены на решение обратных задач с усвоением данных наблюдений. Эти задачи, по сравнению с прямыми, требуют качественно новых методов прямого - обратного моделирования. Поэтому необходимость дальнейшего поиска более экономичных и универсальных по функциональному содержанию методов остается весьма актуальной.

В работе [5] представлен новый метод построения экономичных численных схем для решения основных и сопряженных задач для систем дифференциальных уравнений переноса и химической трансформации примесей. Для этих целей используется вариационный принцип в сочетании с методами декомпозиции и расщепления. В нем реализуется идея интегрирующих множителей Эйлера с помощью развитого нами аппарата локальных сопряженных задач [3]. Такой подход позволяет рассматривать пространственно-временные задачи динамики и химии атмосферы в рамках глобальной схемы декомпозиции сумматорных аналогов вариационных функционалов отдельно на каждом временном шаге и в каждом трехмерном элементе области по пространственным переменным. На этом же шаге по времени в рамках метода расщепления решаются также системы уравнений конвекции - диффузии, описывающие процессы переноса субстанций. Для этих целей используются монотонные устойчивые дискретно-аналитические численные схемы, сохраняющие свойства положительности искомых функций состояния и обладающие свойствами сохранения энергии и количества вещества, постулируемые в формулировке общего вариационного принципа, используемого авторами для решения задач рассматриваемого класса [3]-[4].

Сделаем несколько замечаний по поводу преимуществ предлагаемого подхода и особенностей численной реализации.

1. Благодаря использованию идеи интегрирующих множителей, алгоритмы решения основных и сопряженных задач атмосферной химии являются прямыми. Аналитические решения локальных сопряженных задач в рамках вариационного принципа играют роль интегрирующих множителей для дифференциальных уравнений химической трансформации примесей. С их помощью декомпозированная система исходных дифференциальных уравнений преобразуется в эквивалентную систему интегральных уравнений. В результате исключается необходимость построения и обращения предобуславливающих операторов, содержащих матрицы Якоби нелинейных операторов трансформации, возникающих в традиционных неявных схемах для решения ОДУ. В этом принципиальное отличие вариационных интегральных уравнений, которые мы получаем, от неявных методов Гира, Рунге-Кутты-Розенброка и других неявных решателей. Следует заметить, что в нашем подходе интегрирующие множители играют роль функций устойчивости в полученных интегральных уравнениях и в аппроксимирующих их численных схемах. Для аппроксимации подынтегральных выражений, взвешенных с экспоненциальными функциями интегрирующих множителей Эйлера, использованы идея и структуры схемы многошаговых рекурсивных вычислений типа Рунге - Кутты - Розенброка для обеспечения требуемой точности численных схем.

2. Заметим, что операции дифференцирования операторов относительно их функциональных аргументов в алгоритмах моделей трансформации выполняются аналитически. Это исключает неопределенности, связанные с приближенными вычислениями дифференциалов сложных нелинейных операторов.

3. В силу выполнения условий монотонности и устойчивости, выбор шагов по времени при аппроксимации операторов получаемых интегральных уравнений определяется критерием репрезентативности

вычисления значений экспоненциальных функций в формулах операторов перехода на шагах по времени без потери точности при больших значениях аргументов. Конкретно, это величины в диапазоне значений по меньшей мере в 10 раз больше, чем это позволяют условия аппроксимации в перечисленных выше неявных методах. Такой широкий диапазон интервалов времени позволяет достаточную степень селективного выбора локальных аппроксимаций для описания разномасштабных механизмов реакций.

4. При формировании вариационных принципов для исследования сложных многостадийных процессов проявились замечательные свойства множителей Лагранжа. С их участием самые сложные алгоритмические конструкции рекурсивного характера с помощью сопряженных задач разворачиваются на элементарные стадии. Это делает прозрачными соотношения чувствительности целевых функционалов к вариациям входных данных, источников и параметров моделей, необходимые для решения обратных задач с усвоением данных наблюдений.

5. Построенные алгоритмы допускают многовариантное естественное распараллеливание.

Все алгоритмы, построенные с помощью вариационного принципа, являются согласованными. Это очень ценное свойство для моделирования разномасштабных процессов с синхронизацией работы алгоритмов в различных подмоделях интегрированной системы. С этих позиций аппарат локальных сопряженных задач в рамках вариационных принципов является эффективным инструментом разделения масштабов в моделях процессов по заданным критериям. По существу, он дополняет, «со стороны моделей», разработанную нами методику разделения процессов по масштабам возмущений с помощью ортогональных разложений многомерных фазовых пространств функций состояния [6]. Здесь мы имеем в виду функции, порождаемые нелинейными динамическими моделями процессов, а также функции из баз данных, сформированных на основе результатов наблюдений, и из гибридных пространств, сформированных в базах данных реанализов. Эта техника необходима для анализа и синтеза ситуаций в целом, а также для формирования прогностических сценариев и оценок рисков.

Работа поддержана Программами 4 Президиума РАН и 3 ОМН РАН, проектом РФФИ № 11-01-00187, а также Интеграционными проектами СО РАН №8 и №35.

Литература:

1. Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1981.
2. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
3. Penenko V., Tsvetova E. Discrete-analytical methods for the implementation of variational principles in environmental applications // *Journal of computational and applied mathematics*, 2009, v. 226, 319-330.
4. Penenko A.V. Discrete-analytic schemes for solving an inverse coefficient heat conduction problem in a layered medium with gradient methods // *Numerical Analysis and Applications*, 2012, V. 5, pp 326-341.
5. Пененко В.В., Цветова Е.А. Вариационные методы построения монотонных аппроксимаций для моделей химии атмосферы // *Сибирский журнал вычислительной математики*. 2013. Т.16. №3. С. 239-252.
6. V. Penenko, E. Tsvetova. Orthogonal decomposition methods for inclusion of climatic data into environmental studies // *Ecol.modelling*, 2008, v.217, 279-291.

On the operative hydrodynamic-statistical forecast of summer storm winds and heavy precipitation over the North West territory of Russia including territory of Karelia

Perekhodtseva E.V.

Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia E-mail: perekhod@mecom.ru

The development of successful method for automated statistical well-in-advance forecast (from 12 hours to two days) of storm summer winds, squalls, tornadoes and heavy precipitation could allow to take proper measures against destruction of buildings and to protect people and to mitigate the losses. Prediction of the phenomena involved is a very difficult problem for synoptic till recently. The synoptic forecast of these phenomena using existing graphic and calculation methods still depend on subjective decision of an operator. The synoptic gives the storm warning of this dangerous phenomenon with the earliness only 3 hours.

Nowadays in Russia there is no successful hydrodynamic model for the forecast of such storm wind (with the velocity $V > 19 \text{ m/s}$, $V > 24 \text{ m/s}$) and dangerous precipitation ($Q > 14 \text{ mm/12h}$, $Q > 29 \text{ mm/12h}$), hence the main tools for objective forecast development are the methods using the statistical model of these phenomena recognition.

The statistical model of summer storm wind ($V > 19 \text{ m/s}$) recognition.

The meteorological situation involved the dangerous phenomena – the squalls and tornadoes and wind with the velocity $V > 20 \text{ m/s}$ is submitted as the vector $X(A) = (x_1(A), x_2(A), \dots, x_n(A))$, where n – the quantity of the empiric potential atmospheric parameters (predictors). The values of these predictors for the dates and towns, where are these phenomena, were accumulated in the set $\{X(A)\}$ – the learned sample of the phenomena A presence. The learned sample of the phenomena A absence or the phenomena B presence ($\{X(B)\}$) was obtained for such towns, where the atmosphere was instability and often the thunderstorms and the rainfalls were, but the velocity values were not so high ($V < 8 \text{ m/s}$). The recognition model of the sets $\{X(A)\}$ and $\{X(B)\}$ was constructed with the help of Byes approach [1,3].

Before the problem of the sets $\{X(A)\}$ and $\{X(B)\}$ recognition it was necessary to decide the problem of the compressing the predictors space without the information losses and it was necessary to choose the informative vector-predictor. It was made with the help of a transmutation of a sample matrix R columns and lines algorithm. For this purpose the sample matrix R was corresponded to connected graph G; 26 predictors are corresponded to the graph vertices, and the binary coefficients are corresponded to ribs of the graph G. Let us give the threshold of the connection r . Then we'll to keep only the ribs in graph G corresponding to the binary coefficient $r_{ij} \geq r$. The connected graph G breaks up to several connected subgraphs G_i in this case. Each sub-graph G_i is corresponded to some diagonal block of depend predictors of the matrix R. Given optimal threshold $r = 0.5$ we obtained three blocks of dependent predictors and several isolated vertices, corresponding almost independent predictors. The informative predictors - representatives from each of blocks and two independent predictors are given vector-predictor of dimension $n = 6$ [3]. For this purpose we have estimated the most informative predictors using the criterion by Mahalanobis distance Δ^2

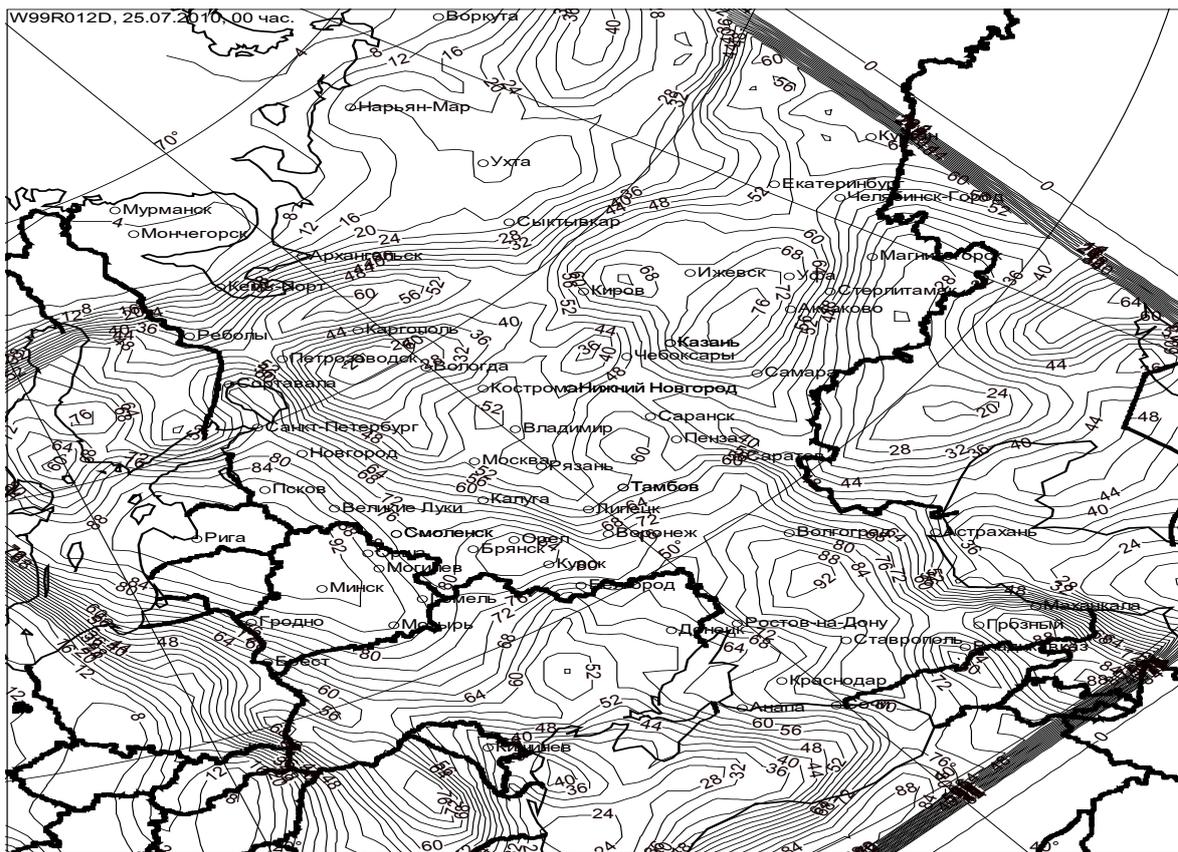


Fig.1 The forecast areal of the wind $V > 24 \text{ m/s}$ on the date 25.07.10. This area is occurred by isoline of the probability $P = 65\%$, ($V = 26 \text{ m/s}$ was observed near St.-Petersburg and in Tula, where $P > 70\%$.)

$$\Delta^2 = (m_i(A) - m_i(B))^2 / \sigma_i^2$$

Here $m_i(A)$ and $m_i(B)$ are the components of $M(A)$ and $M(B)$ - of the vectors of empiric expectation of the presence and absence of A respectively, σ_i^2 - the mean variance of predictor i . Also the nonparametric criterion of entropy minimum by Vapnik-Chervonenkis H_{\min} was used for the assessment of the informativition of predictors [3]. As a result, the informative vector-predictor has been composed from six atmospheric parameters after this selection [1,2,3]:

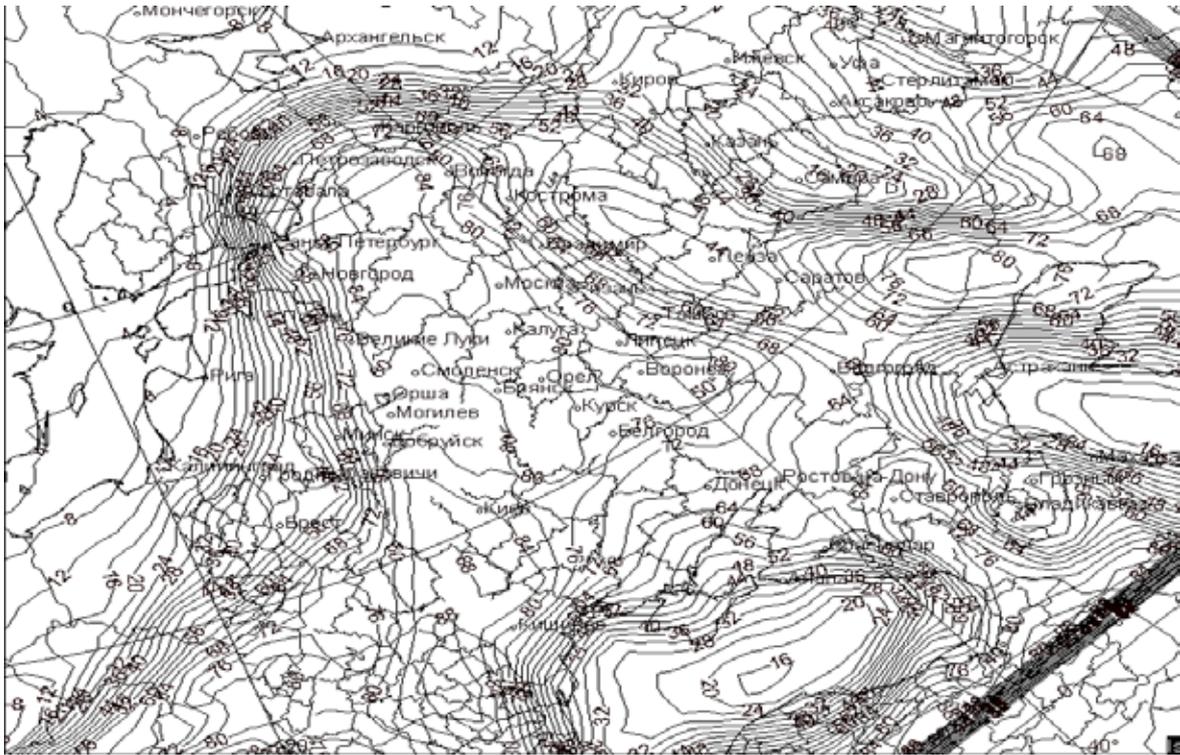


Fig.2 The area of the forecast to 36h ahead of the wind $V > 24 \text{ m/s}$ on 12.06.12. to 36h ahead. This area is occurred by isoline $P=60\%$, of the storm wind – is occurred by isoline $P=70\%$ ($V=24-26 \text{ m/s}$ was observed in Vologda, St.-Petersburg, Kostroma and other towns)

$$(V_{700}, H_0, (T-T')_{500}, dT/dn_{ea}, T_{ea}, Td_{ea}).$$

Here V_{700} – is the value of the mean velocity of the wind on the level 700 hPa, m/s; H_0 – is the level of the isotherm of 0°C , hPa; $(T-T')_{500}$ – is the difference between the values of the stratification curve and the moist adiabatic on the level 500 hPa, $^\circ \text{C}$; dT/dn_{ea} – is the maximal difference between temperatures over the front on the earth level near the forecast point, $^\circ \text{C}$; T_{ea} – the maximal temperature on the earth level, $^\circ \text{C}$; Td_{ea} – the maximal temperature of the dew point on the earth level, $^\circ \text{C}$.

This method was recommended for the territory of ETR, the best tests results were obtained for the North West territory of Russia (the value of Pirsy-Obukhov criterion was equal $T=0,68$. If the value of $U(X)$ is $U(X) > 3$ then the forecast of the wind with the velocity $V > 24 \text{ m/c}$ has very high probability, this case the tornadoes are probably [5].

The automated hydrodynamic-statistical forecast of storm wind and heavy precipitation on the base of the hemispheric model forecasts

The successful development of hydrodynamic models for short- and mid-term forecast allow us to use the prognostic fields of those models for calculation of the discriminant functions and the values of probabilities of dangerous precipitation and winds in the nodes of the mesh and thus to get fully automated forecasts. Statistical decisive rules for the alternative and probability forecasts for each of the phenomena involved were obtained in accordance with the concept of “perfect prognosis” using the data of objective analysis. For this purpose the teaching samples were automatically arranged that include the values of $n=38$ physically substantiated potential predictors.

Then the same empirical statistical method was used for the diagonalization of the new mean correlation matrix R of the $n=38$ predictors and extraction of diagonal blocks of strongly correlated predictors. Thus the matrix R for each phenomenon was calculated and the most informative predictors were selected without losing information.

The values of statistical rules - discriminant functions $F_1(X)$ and $F_2(X)$ (for two classes of wind) were calculated in the nodes of the grid and the values of the probability of dangerous winds of two classes $P_1(X)$ and $P_2(X)$ (included squalls and tornadoes) were calculated there by the formulas: $P_1(X) = 100 / (1 + \exp(-F_1(X)))$; $P_2(X) = 100 / (1 + \exp(-F_2(X)))$.

As a result we have gotten the fully automated forecast of these phenomena. The prognostic area is the area with the probability values $P > P_{thr}$ (in rectangular mesh $150 \times 150 \text{ km}$). The author proposes the empirical threshold values P_{thr} specified for each phenomenon and each advance forecast period 12-24-36h. The forecast assessments for the advance period 36h for the North West territory are the best ($T=0,9$) [4,5]. The heavy precipitation forecast assessments are the best too ($T=0,62$).

The model of the hydrodynamic-statistical forecast on the regional model base and examples of the storm wind and heavy precipitation forecast over the North West territory of Russia.

The values of the prognostic fields of the new region hydrodynamic model of short-term forecast (the author – Losev V.M.) are calculated in the nodes of the degree 75x75km into operative system of Hydrometcenter two times per day. Nowadays we use the values of these prognostic fields in same discriminant functions $F_1(X)$ and $F_2(X)$ for the forecast of squalls and tornadoes and storm wind of two classes. Also the new values of the probabilities $P_1(X)$ and $P_2(X)$ are calculating in the nodes of degree 75x75km .

Conclusion

The successful assessments of new forecast hydrodynamic-statistical methods were best in European Part of Russia. They have shown also the stability of statistical forecast model of heavy precipitation, squalls, tornadoes and storm wind forecast over the North West territory including Karelia. These forecast methods to two days ahead are operative and very comfortable for synoptic. They are the effective help in synoptic practice.

References:

1. Anderson T. *The introduction in the polydimensional statistical analysis*. – M.: Fizmatgiz, 1963 – 500p.
2. Vapnik V.N. *Reconstruction of the dependents with the help of the empiric data*. M.: Science, 1979 – 448p.
3. Perekhodtseva E.V. *The forecast of the squalls by statistical methods of classification on the base of the diagnostic and prognostic connections. The proceedings of Hydrometcenter of USSR, 1985, vol. 271, p. 37-60.*
4. Perekhodtseva E.V. *Hydrodynamic- statistical model of forecast to 36 hours ahead of dangerous convective daytime and nighttime phenomena – squalls, tornadoes and rainfalls. Research activities in atmospheric and oceanic modeling, Report 32, 2003.*
5. Perekhodtseva E.V., Zolin L.V. *Hydrodynamic-statistical forecast and the expert system of the tornado forecast over the European part of Russia. // The proceedings of Hydrometcenter of Russia. – 2008. – vol. 342. – p. 45. – 54.*
6. Perekhodtseva E.V, Ablamskaya L.V. *On the development of the automated forecast method of the precipitation connected with convection.//The proceedings of Hydrometcenter of USSR. 1990, N308, p.76-83.*

Динамика общей циркуляции атмосферы Северного полушария при климатических изменениях

^{1,3}Крупчатников В.Н., ^{1,2}Мартынова Ю.В.

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

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

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: vkрупчатnikov@yandex.ru

Показателем нашего понимания общей циркуляции атмосферы является ответ на вопрос, можем ли мы прогнозировать изменения общей циркуляции, которые могут быть связаны с прошлым или будущим изменениями климата. Это было бы особенно полезно для прогнозирования изменений, вызванных глобальным потеплением. В нашей работе мы рассмотрели климатические проекции некоторых характеристик общей циркуляции, уделив особое внимание изменениям местоположения и амплитуды траекторий шторм треков, покрова морского льда. Для исследования мы использовали глобальную крупномасштабную модель климатической системы и наиболее агрессивный климатический сценарий RCP8.5.

В ходе исследований мы обнаружили, что в условиях климатических изменений (согласно сценарию RCP8.5) происходит сдвиг шторм треков Северного полушария по направлению к Северному полюсу. Кроме того, в условиях рассматриваемой климатической проекции изменения активности нестационарных вихрей и интенсивности потоков тепла согласуется с изменениями бароклиновой неустойчивости.

Dynamics of general circulation atmosphere in Northern Hemisphere under climate changes

^{1,3}Krupchatnikov V., ^{1,2}Martynova Yu.

¹ Siberian Regional Hydrometeorological Research Institute, Novosibirsk, Russia

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

³ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

E-mail: vkrupchatnikov@yandex.ru

Introduction

An evidence of our understanding of the general circulation is whether we can predict changes in the general circulation that might be associated with past or future climate changes. It would be especially useful to predict changes associated with global warming. Changes in the location, intensity or seasonality of major climatological features of the general circulation could be more important than average temperature changes, particularly where these changes might affect local hydrology, energy balances and etc.

Dynamics of General Circulation Atmosphere and Climate. There are important distinctions between tropical and extratropical circulation regimes. The Hadley Cell (HC) is the prominent tropical circulation feature. It extends through the entire depth of the troposphere from the equator to the subtropics (30° latitude) over both hemispheres. The cell develops in response to intense solar heating in the Inter Tropical Convergence Zone (ITCZ) near the equator.

The extratropical circulation is dominated by baroclinic turbulence, which are called eddies. These eddies are the product of baroclinic instability, which develops particularly strongly during winter as a consequence of the strong pole-to-equator temperature gradient during that season. The western parts of the Pacific and Atlantic oceans are the preferred locations for the development of storm-tracks.

The poleward of expansion of the tropical circulation (HC). This discussion will focus on the tropical widening phenomenon. We will present some of the mechanisms that have been put forward in the literature to explain the widening.

In the works (I. Held, A. Hou, 1980; I. Held, 2000) theory was proposed that establishes a relations between static stability and tropical width. The theory assumes that poleward moving upper branch of the HC is angular momentum conserving. The moving air increases its zonal wind speed until it becomes baroclinically unstable and breaks down under the growing vertical wind shear. This marks the latitude of boundary HC. Global warming related increases in static stability and decay baroclinic instability in atmosphere. As a consequence, the HC expands towards higher latitudes.

The poleward extent of the tropics, therefore, depends on the definition of specific indicators of tropical width. For example, the work (T.Reichler, 2009) focused on the structure of the global tropopause as indicator of tropical width. This indicator is based on the well-known distinction between the tropics, where the tropopause is high, and the extratropics, where the tropopause is low. The advantage of this method is that the tropopause is a relatively well observed atmospheric feature that can be easily derived from three-dimensional temperature fields. Using data from radiosondes and reanalysis, it was found that the tropics have been expanding by about 0.4° latitude per decade since 1979. The same study arrived at very similar results by examining the separation distance between the two subtropical jets.

The observed expansion is also reproduced by climate models that are driven with the observed history of forcings over the past decades, for example, twentieth century scenario integrations of IPCC-AR4. We use both the 20th and the 21st century simulations in this study. For the 21st century simulation, we use the data from the A2 and RCP 8.5 scenario.

It was revealed the twenty-first century trend in zonal mean tropospheric temperature. It shows a strong upper tropospheric warming in both seasons and an enhanced Arctic warming in northern winter. The tropical upper tropospheric warming is caused by enhanced tropical convection which transports heat trapped by the additional greenhouse gases upward with the tropical atmosphere retaining a moist adiabatic lapse rate under a warmer condition. The large warming located in the Arctic in winter, where the ice-albedo feedback is weak, is largely a result of large atmospheric static stability concentrating the warming at low levels (Hansen J. et al., 1984; Hansen, J., et al., 2005, etc).

Extratropical Eddies. The recent increase in global tropopause heights is closely associated with systematic temperature changes below and above the tropopause temperatures have been warming in the troposphere and cooling in the stratosphere. The pattern of warming and cooling also affects the zonal wind structure in the region of the subtropical upper troposphere and lower stratosphere (UTLS). At intermediate heights of the UTLS region (12–16 km) the tropics warm and the extratropics cool, leading to an increase in meridional temperature gradients, and, by the thermal wind relationship, to an increase of zonal wind speeds above. Extratropical tropospheric eddies play a central role in this mechanism. The eddies tend to move eastward with the

zonal flow and equator-ward toward the subtropics until they approach their critical latitudes, where their phase speed equals the speed of the background zonal flow.

One question is whether climate change will significantly affect the location and intensity of midlatitude storm tracks and associated jets. Because the wave, mean-flow interaction in midlatitudes produces low-frequency variations in the latitude of the jets, it is reasonable to think that a modest climate change might significantly affect the position of jets and their associated storm tracks. The storm tracks are defined as the region of strong baroclinicity (maximum meridional temperature gradient), which are determined on the basis of eddy statistics like eddy fluxes of angular momentum, energy, and water (with the use of high band pass - filter). In the Northern Hemisphere, there are two major storms in the region Atlantic and Pacific. The role of the storm - tracks in the dynamics of weather and climate:

- bring heavy rains and other hazardous weather phenomena in the middle latitudes;
- play an important role in the global energy cycle and the hydrological cycle.

Example: The winter climate of Europe and the Mediterranean is dominated by the weather systems of the midlatitude storm tracks. The behavior of the storm tracks is highly variable, particularly in the eastern North Atlantic, and has a profound impact on the climate of the Mediterranean region (D. J. Brayshaw et al., 2011).

The Role of SST Forcing. Surface temperatures over the tropical oceans undergo changes over time, which have been shown to have important consequences for the global atmospheric circulation. These SST changes are primarily related to the natural ENSO phenomenon and to anthropogenic climate change. ENSO related SST fluctuations are periodic in nature and mainly affect the equatorial Pacific. Besides, global SSTs exhibit significant long-term trends that are associated with anthropogenic climate change. Various studies have demonstrated that the tropics are contracting during the warm phase of ENSO (El Niño), as indicated by equator-ward displacements of the jet, storm track, eddy momentum divergence, and edge of the HC. One way to understand the contraction is the intensification of the thermally driven Hadley circulation as the equatorial SSTs become warmer. The stronger HC leads to a westerly acceleration in its upper, poleward moving branch and thus to a strengthening of the subtropical jet, this moves the critical latitude for extratropical wave propagation equator-ward, allowing the extratropical eddies to penetrate deeper into the tropics than during normal or cold ENSO conditions. As a result, elements of the circulation, including the tropical edge, shift equator-ward.

Sea ice extent. The Northern Hemisphere sea ice cover has decreased in recent years and is projected to continue to decrease in the future. The observed changes can be compared with the global warming projections from atmosphere-ocean general circulation models that were carried out for the Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (CMIP3), the results of which were used for the IPCC AR4 (Solomon et al. 2007). GCM projections vary widely in terms of the rate of Arctic sea ice loss. We have discussed here some problems about that.

Water vapor and climate changes. Through radiative forcing by increased atmospheric carbon dioxide and water vapor and increased solar absorption due to less low cloud cover in the subtropics, more energy is gained within the tropics and subtropics, while in the middle and high latitudes energy is reduced through increased outgoing terrestrial radiation in the Northern Hemisphere and increased ocean heat uptake in the Southern Hemisphere. This enhanced energy imbalance in the future climate requires larger poleward atmospheric energy transports in the midlatitudes which are partially accomplished by the intensified storm tracks. This strong connection between intensified storm track energy transports and intensified energy imbalance in the atmosphere is also confirmed in CMIP3/IPCC AR4 models. Recent studies have indicated a poleward shift of the storm tracks and midlatitude precipitation zone in the warming world that will contribute to subtropical drying and higher latitude moistening.

In our study we have examined the future projections of some feature general circulation, in particularly, location and amplitude of the storm tracks, sea – ice cover, from the global coupled climate model simulations. The RCP8.5 is used. We have identified a poleward expansion, and intensification on the poleward flank, of storm tracks in the future climate from band-pass filtered transient eddy statistics. The future projections in transient eddy activity and its heat transport well correspond to the changes in baroclinic instability.

Experiments

Model. We provide our study using the idealized climatic system model (Fraedrich K., Jansen H., et al., 2005). This model consists of several modules: atmosphere, ocean, land surface module, module of soil, sea ice and biosphere. In the experiment horizontal resolution was T42, it is approximately 2.5 x 2.5 degrees. Vertical resolution for atmosphere was 10 equidistant σ -levels with the highest level at 10 mb, and for soil it was 5 depth levels at 0.4 m, 0.8 m, 1.6 m, 3.2 m, 6.4 m from surface. Time step was 20 minutes.

Experimental design. To identify the response of the storm tracks to climate change we used climatic scenario reproduced both the atmospheric CO₂ concentration increase due the anthropogenic effect and following its decrease with the return it to preindustrial value (<http://climate.uvic.ca/EMICAR5>). Thus, the scenario of the atmospheric CO₂ concentration change is consists of four parts: for a time period from 850 to 2005 CO₂ concentration was set according to the protocol “Historical simulations” of CMIP5; during the 21-23 century CO₂ concentration was set according to the most aggressive scenario RCP 8.5; then for the period 24-29 century CO₂ was fixed on the level of the year 2300; and during 30-31 century CO₂ was returned to the

preindustrial value. At this last period during the first 100 years CO₂ concentration was decrease linearly to preindustrial value and then fixed. For the study of storm-track dynamics we selected following 9 time periods. First period (1751-1760) is characterized by the equilibrium state of the climate system before the CO₂ increase. Second period (1991-2000) was selected at the beginning of CO₂ concentration increase time period, third (2101-2110) was in the middle of this period, fourth (2191-2200) was at the end of this period. Next fifth period (2691-2700) was selected for the conditions of equilibrium state of climate system with the extremely high CO₂ concentration. Sixth (3011-3020), seventh (3051-3060) and eighth (3111-3120) periods were selected for the atmospheric conditions at the beginning of CO₂ concentration decrease, in the middle of this period and at the end of this period, respectively. The last, ninth, period (3191-3200) was selected for the climate system conditions at the end of the simulation when CO₂ concentration has returned to the preindustrial state. We analysed storm track dynamics using Hovmöller diagrams of some transient eddy statistics.

A standard band-pass filter is applied to daily data to retain the variability on synoptic time scales of 2–8 days (Blackmon, 1976). All transient eddy statistics computed in this study are based on band-pass filtered data.

Results

Storm tracks. On a basis of simulation using climatic scenario RCP8.5, we constructed Hovmöller diagrams of 10-years mean variance of meridional velocity (v). In these diagrams X axes presents the numbers of our time-slices, Y axes is the latitude. The diagrams show for a both seasons area of maximal storm track activity shifts to high latitudes when CO₂ concentration increases, and returns back when CO₂ concentration decreases. But there is a feature for a winter season at the end of simulation. Here CO₂ concentration has returned to preindustrial value, but storm-track activity has not and it continues to decline.

Also diagrams show maximal storm-track activity occurs between 51 and 57 latitudes. we constructed another Hovmöller diagrams of 10-years mean v -variance for 3 different latitudes. X axes presents the longitudes, Y axes is the numbers of the time-slices. It was shown response of Atlantic storm-track to CO₂ concentration change more then response of Pacific storm-track. For a winter season Atlantic storm-track amplitude raises with the increase of CO₂ concentration, and it reduces with the decrease of CO₂ concentration. Here the feature appeared again. Atlantic storm-track amplitude doesn't return back to preindustrial value, and it continues to decline. Pacific storm-track amplitude reduces with the CO₂ concentration increase and it raises with the CO₂ concentration decrease. And like Atlantic storm-track, Pacific storm-track amplitude doesn't return to preindustrial value. For a summer season both Atlantic and Pacific storm-track amplitude reduces with the CO₂ concentration increase and it raises with the CO₂ concentration decrease.

Hovmöller diagrams of eddies momentum flux was demonstrated that the influence of the CO₂ concentration change to these fluxes for a winter season stronger then for a summer. Absolute value of these fluxes raises with the CO₂ concentration increase and it reduces with the CO₂ concentration decrease.

Sea ice extent. The decline in Arctic sea ice can be best explained from a combination of natural climate variability, such as variability in air temperature, atmospheric and oceanic circulation, and from external forcing due to rising concentrations of atmospheric greenhouse gases.

Global climate models have predicted the rise in atmospheric air temperatures as CO₂ concentrations in the atmosphere increase (in Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report (AR4), 2007) and simulations from the coupled GCMs that incorporate the observed record of CO₂ show that the increase in global temperature results in a decline in the Arctic sea ice cover. While the qualitative agreement between the simulations and the observations provides evidence for a role of CO₂ radiative forcing on the observed decline ice cover, the disagreement on the rate of decline could indicate a natural variability component. We finds that model loses of its Arctic sea ice in near linear manner and we also find no evidence of summer Arctic sea ice tipping points.

Summary

In this report demonstrates that there exists considerable evidence that key-elements of the atmospheric circulation have been moving poleward during the last few decades. Current theories as well as model experiments indicate that greenhouse gas increases and stratospheric ozone depletion is the most likely cause for the trends. However, there are many other aspects of these shifts that are not well understood. We find that sea ice loss is reversible in climate system model over a range of CO₂ concentrations in RCP-8.5 scenario. We find no evidence of possibility sea ice hysteresis between difference states in climate regimes with ice cover.

Acknowledgments. This work is partially supported by the Ministry of education and science of the Russian Federation (contract #8345), SB RAS project VIII.80.2.1, RFBR grants #11-05-01190a, 13-05-00480, and integrated project SB RAS #131.

References:

1. Blackmon M.L. *A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere // J. Atmos. Sci.* 1976. V. 33, N. 8. P. 1607–1623.

2. Brayshaw, David James, Brian Hoskins, Michael Blackburn, 2011: *The Basic Ingredients of the North Atlantic Storm Track. Part II: Sea Surface Temperatures*. *J. Atmos. Sci.*, 68, 1784–1805.
3. Fraedrich K., Jansen H., Kirk E., Luksch U., and Lunkeit F., 2005, *The Planet Simulator: Towards a user friendly model* // *Meteorol. Zeitschrift*, 14, 299-304.
4. Hansen, J., A. Lacis, D. Rind, G. Russell, P. Stone, I. Fung, R. Ruedy, J. Lerner, 1984: *Climate sensitivity: analysis of feedback mechanisms*, *Geophys. Mono. Series 29*, American Geophysical Union, Washington, pp 130-163.
5. Hansen, J., et al. (2005), *Efficacy of climate forcings*, *J. Geophys. Res.*, 110.
6. Held I.M., and Hou A.Y. (1980), *Nonlinear axially symmetric circulations in a nearly inviscid atmosphere* // *J. Atmos. Sci.*, 37, 515-533.
7. Held I., *Woods Hole Geophysical Fluid Dynamics Program*, Woods Hole Oceanographic Institute, Woods Hole, MA, 2000, 54pp.
8. Reichler T. *Changes in the Atmospheric Circulation as Indicator of Climate Change*. // In Trevor M. Letcher, editor: *Climate Change: Observed impacts on Planet Earth*, The Netherlands, 2009, pp. 145-164.
9. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L.: *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: *IPCC 2007: Climate Change 2007*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. (2007). URL <http://www.ipcc.ch/publications/data/ar4/wg1/en/contents.html>

Изменчивость трендов температуры поверхности океана, тепловых потоков и эффективного излучения в северной Атлантике за период глобального потепления 1975-2011 гг.

Морару Е.И., Логинов С.В., Ипполитов И.И.

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

E-mail: janey@sibmail.com

Web: www.imces.ru

Процессы взаимодействия океана и атмосферы играют важную роль в изменении климата. Атмосфера влияет на характеристики поверхностного слоя океана главным образом через воздействие ветра и изменение в облачности. Влияние океана на атмосферу осуществляется через турбулентные потоки тепла и влаги, и потоки эффективного излучения с поверхности. Возмущение температуры поверхности океана приводит к изменениям потоков скрытого и явного тепла и, тем самым, к воздействию на циркуляцию и облачность (Gillett N.P., 2003). Исследование межгодовой изменчивости температуры поверхности океана, потоков явного и скрытого тепла, а так же эффективного излучения имеет существенное значение для решения проблемы изменения климата.

Изменчивость гидрометеорологических величин на акватории Атлантического океана за интервал 1948 - 1972гг., была исследована Bunker A.F (1984). Карта линейных трендов температуры поверхности (ТПО) океана, приведённая в его работе, показывает снижение ТПО в целом на акватории Северной Атлантики и это снижение наиболее выражено в регионе океана, прилегающем к северу-востоку побережья США и Канады, и в Северном море. Карта трендов потоков явного тепла указывает на существенное убывание потоков вблизи северо-восточного побережья США и Канады и меньший по величине рост потоков в районе западного побережья Скандинавии. Тренды потока скрытого тепла, по характеру распределения, подобны трендам явного тепла, но с меньшими значениями вблизи северо-восточного побережья США и Канады.

Целью данной работы являлось исследование временной изменчивости температуры поверхности океана, тепловых потоков, эффективного излучения, а также их трендов, в Северной Атлантике в период глобального потепления 1975 - 2011гг.

Исследование гидрометеорологических величин в Северной Атлантики, таких как температура поверхности океана (ТПО), потоки скрытого (LE) и явного (S) тепла, проводилось по данным судовых

наблюдений реанализа ICOADS (International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ и месячным временным разрешением за период 1975 ÷ 2011 гг. (<http://icoads.noaa.gov/data.icoads.html>). Расчет эффективного излучения в Северной Атлантике осуществлялся по данным реанализа JRA-25 (Japanese 25-year ReAnalysis) за период 1979 ÷ 2011 гг. с пространственным разрешением $1,25^\circ \times 1,25^\circ$ (<http://jra.kishou.go.jp>).

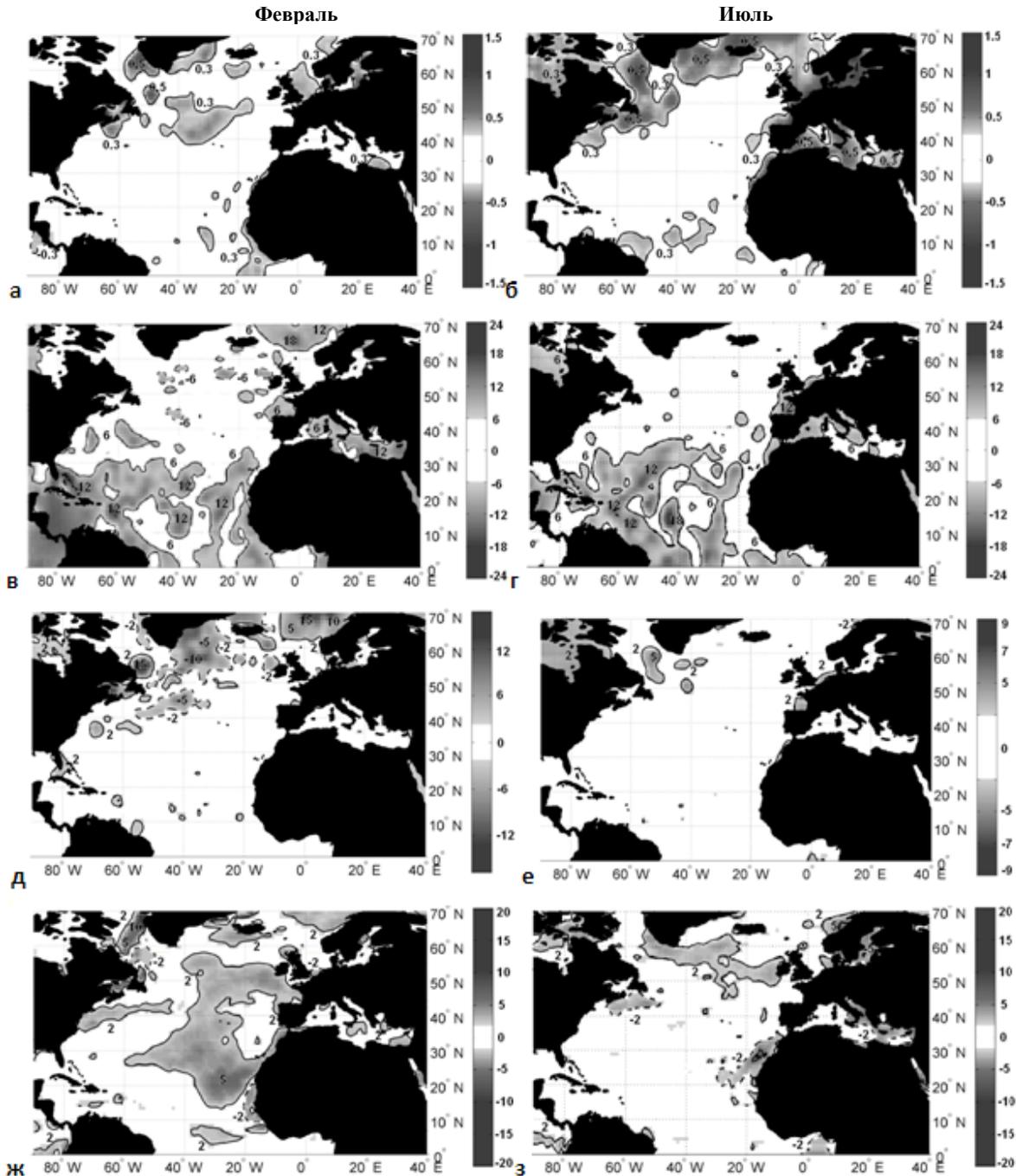


Рис.1 – Распределение трендов ТПО, $^\circ\text{C}$ (а, б); LE, $\text{Вт}/\text{м}^2/10\text{лет}$ (в, г); S, $\text{Вт}/\text{м}^2/10\text{лет}$ (д, е); $E_{\text{эф}}$, $\text{Вт}/\text{м}^2/10\text{лет}$ (ж, з) по территории Северной Атлантики за период 1975 – 2011 гг. для февраля (а, в, д, ж) и июля (б, г, е, з). Пунктирная линия показывает область отрицательных значений трендов. Сплошная линия показывает область положительных значений.

При анализе трендов температуры поверхности океана было замечено, что за период 1975 – 2011 гг., как в зимние (рис. 1а) так и в летние (рис. 1б) месяцы, преобладали положительные тренды ТПО по всей территории, с максимальным потеплением вод в северных районах Северной Атлантики (Ньюфаундлендская ЭАЭО, Североатлантическое течение, юг Гренландии, Северное море). В июле помимо северных районов потепление наблюдалось и в районе Средиземного моря. В летние месяцы потепление вод Северной Атлантики распространялось по большей территории, по сравнению с зимними. Согласно Bunker A.F (1984), в северных районах Северной Атлантики наблюдались отрицательные тренды ТПО в течение 1948 – 1972 гг., с максимальным охлаждением вод у восточных берегов Канады (за-

лив Мэн) и в районе Северного моря. Отмечалось лишь несколько разбросанных по Атлантике областей с положительными трендами ТПО. F.G. Taboada и R. Anadon (2012) показали, что линейные тренды средней температуры поверхности океана в Северной Атлантике за период 1982 – 2010 гг. положительны. В районе Гольфстрима, на западной периферии Лабрадорского моря и на Европейском континентальном шельфе наблюдались самые высокие скорости потепления вод. Таким образом, в период 1948 – 1972 гг. было замечено охлаждение вод Северной Атлантики, а в период глобального потепления, начиная с 1975 г. до 2011 г. наблюдалось их потепление.

Рисунки 1в. и 1г. показывают распределение трендов потока скрытого тепла по территории Северной Атлантики за исследуемый период. Как в феврале (рис. 1в), так и в июле (рис. 1г) выше 40° с.ш. прослеживалось чередование небольших очагов положительных и отрицательных трендов, не превышающих -6 и 6 Вт/м²/10лет. Южнее 40° с.ш., а также в районе Средиземного моря наблюдались аномально высокие положительные величины тренда LE. В зимние месяцы положительные тенденции потока скрытого тепла распространялись по большей территории, по сравнению с летними. Согласно Bunker A.F (1984), тренды LE уменьшались в течение периода 1948 – 1972 гг. практически на всей территории. Таким образом, в период 1948 – 1972 гг. тренды уменьшались, а начиная с 1975 г. преобладали положительные тренды с максимальным увеличением в южных районах.

Распределение трендов потока явного тепла (S) по территории Северной Атлантики за период 1975 – 2011 гг. приведено на рис. 1 д, е. В зимний период (рис. 1д) высокие по величине, как положительные, так и отрицательные, тренды наблюдались в северной части Северной Атлантики выше 40° с.ш. Вдоль Североатлантического течения и на юге Гренландии отмечались отрицательные тренды S, а севернее Скандинавского полуострова и в районе полуострова Лабрадор преобладали аномально высокие положительные тенденции потока явного тепла. В летний период (рис. 1е) тренды положительные и невысокие. На юге Северной Атлантики в течении всего года тренды не высокие и не превышали значений, находящихся в диапазоне -2 – 2 Вт/м²/10лет. Согласно Bunker A.F (1984), тренды S за период 1948 – 1972 гг. были отрицательными с Северо-западной части Северной Атлантики, с максимальным уменьшением потока явного тепла у восточных берегов Канады в районе залива Мэн. В юго-западных районах преобладали отрицательные тренды, а на юге положительные. Таким образом, было замечено, что на протяжении второй половины 20 века преобладали отрицательные тенденции потока явного тепла в северных районах Северной Атлантики, а в южных районах небольшие по величине тренды.

На территории Северной Атлантики в феврале преобладали положительные тренды эффективного излучения за период 1975 – 2011 гг. (рис. 1ж), с максимальным увеличением у берегов Африки между 18 и 26° с.ш. и у западного побережья Гренландии (до 7 - 8 Вт/м²/10лет). Отмечался небольшой очаг отрицательных трендов в районе полуострова Лабрадор (до -4 Вт/м²/10лет). В зимние месяцы положительные тенденции эффективного излучения распространялись по большей территории, по сравнению с летними. В июле (рис. 1з) на севере района отмечались положительные тенденции (2 - 3 Вт/м²/10лет), а в районе Ньюфаундлендской ЭАЗО и у берегов Африки между 20 и 35° с.ш. – отрицательные (до -4 Вт/м²/10лет у берегов Африки между 18 и 26° с.ш.). На остальной территории Северной Атлантики тренды не высокие и не превышали значений, находящихся в диапазоне -2 – 2 Вт/м²/10лет.

Таким образом, на акватории Северной Атлантики в период 1975 – 2011 гг. преобладало увеличение температуры поверхности океана, потока скрытого тепла и эффективного излучения, и лишь в данных потока явного тепла преобладало его уменьшение.

Simulation of the World Ocean climate by means of the INM – IO RAS numerical model

¹Ushakov K., ²Ibrayev R.

¹ P.P Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

² Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: ushakovkv@mail.ru, ibrayev@mail.ru

Web: www.ocean.ru, www.inm.ras.ru

The World Ocean model developed at INM RAS and IO RAS is designed for research of marine hydrothermodynamic processes in a wide range of spatial and temporal scales [1]. The 3DPEM equations are approximated by the box-method on the three-polar B-type grid with z-type vertical coordinates. We use

explicit difference time schemes (except for vertical viscosity and diffusion) with decomposition of the solution into barotropic and baroclinic components, free ocean surface with explicit description of salt and water fluxes, Boussinesq and hydrostatic approximations. In order to maintain the total salt conservation in single-precision calculations we treat S as a deviation from the reference value of 35 psu.

In the current work we consider the results of the numerical experiment performed with the model in accordance with the CORE-I protocol [2]. Comparison with results of other CORE-I models suggests that coarse-resolution simulations usually produce the climate which is warmer than observational data. During the 500-year experiment the INM – IO model shows a slight increase of the global mean ocean potential temperature with stabilization at about 3.6°C. The temperature curves of our model and some CORE-I models show a maximum located in the 100–200 years interval from the beginning of integration which might be interpreted as a switch of global dynamic regime.

A more detailed spinup inspection shows that our surface and thermocline properties stabilize during the first 50–100 years while the temperature and salinity of deeper waters change during the whole experiment. Most of the considered z -coordinate models show the development of a warm anomaly in the 500m sub-surface layer and 3000–5000m waters generally cooling while for isopycnal and hybrid coordinates the pattern is different. The distribution of surface temperature and salinity anomalies show general drawbacks of coarse-resolution simulations including the spurious extension of warm boundary currents to the north, poorly resolved coastal upwelling and a cold anomaly in the Eastern Tropical Pacific.

This work is supported by RFBR grants 13-05-01141-a and 12-05-31317-mol_a.

References:

1. Ibrayev, R.A. et al., 2012. Eddy-Resolving $1/10^\circ$ Model of the World Ocean. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 48(1), 37–46.
2. Griffies S.M. et al., 2009. Coordinated Ocean-ice Reference Experiments (COREs). *Ocean Modelling*, 26 (1-2), 1–46.

Воспроизведение климата Мирового океана с помощью численной модели ИВМ – ИО РАН

¹Ушаков К.В., ^{2,1}Ибраев Р.А.

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

E-mail: ushakovkv@mail.ru, ibrayev@mail.ru

Web: www.ocean.ru, www.inm.ras.ru

1. Модель Мирового океана

Стандартным методом проверки, сравнения и исследования свойств численных моделей океана является выполнение экспериментов с группой моделей при заданном атмосферном воздействии. Подобные работы выполнялись с конца прошлого века [1], приобретя со временем форму крупных международных интеркалибрационных проектов (AOMIP [2], CORE's [3]). В настоящей работе мы рассмотрим результаты экспериментов с моделью Мирового океана ИВМ – ИО РАН [4], выполнявшихся в соответствии с протоколом CORE-I.

Разработанная в ИВМ РАН и ИО РАН модель Мирового океана предназначена для исследований морских и океанских процессов в широком диапазоне пространственно-временных масштабов. Трёхмерная система примитивных уравнений термогидродинамики аппроксимируется методом конечных объёмов на трёхполярной сетке типа В в вертикальных z -координатах с явным описанием потоков воды, тепла, соли и импульса на свободной поверхности океана. Разделение решения на бароклинную и баротропную составляющие позволяет использовать при горизонтальной дискретизации уравнений только явные схемы и, как следствие, эффективно масштабировать расчёты (вплоть до нескольких тысяч вычислительных ядер в высокоразрешающих экспериментах). В данной работе термодинамика льда описывается подмоделью [5], горизонтальное перемешивание параметризуется с помощью операторов Лапласа и бигармонического, вертикальное – с помощью схемы Манка-Андерсона. Для вычисления плотности морской воды используется уравнение состояния [6]. При возникновении неустойчивой стратификации происходит гидростатическое перемешивание водяной колонны с сохранением тепла и соли. Более подробно применяемые методы и параметризации описаны в статье [4].

2. Постановка эксперимента

Проведённый эксперимент представляет собой расчёты на установление модельного океанского климата. Они выполняются на период 500 лет с заданным циклически повторяющимся «нормальным» годовым ходом атмосферных параметров и расчётом потоков воды, тепла и импульса на границе океан-атмосфера с помощью подмодели атмосферного пограничного слоя CCSM [3]. Во избежание дрейфа модельного решения применяются также коррекция глобальной суммарной величины поверхностного потока воды (нормализация гидрологии) и релаксация поверхностной солёности к климатологическим данным.

Горизонтальное разрешение сетки в сферической части системы координат (южнее 61° с.ш.) составляет 1° в зональном и 0.5° в меридиональном направлении. Это соответствует размерам ячеек от $112 \times 56 \text{ км}^2$ на экваторе до приблизительно $40 \times 20 \text{ км}^2$ в Северном Ледовитом океане вблизи побережья Канады и Центральной Сибири. Глубина расчётной области кусочно-постоянна и лежит в пределах от 16 м до 6000 м. Вертикальная дискретизация включает 32 горизонта с шагом от 8 м в верхнем слое до 500 м в глубине. Коэффициенты при операторах Лапласа и бигармоническом в уравнениях переноса импульса взяты равными соответственно $5000 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ и от $10^{13} \text{ м}^4 \text{ с}^{-1}$ на экваторе до $10^{10} - 10^{11} \text{ м}^4 \text{ с}^{-1}$ в полярных областях (пропорционально квадрату горизонтального шага сетки). Временной шаг интегрирования равен 20 мин. для бароклинных движений и 2 мин. для баротропных.

3. Результаты расчётов

Приведём результаты расчётов модели ИВМ – ИО в сравнении с моделями, участвовавшими в эксперименте CORE-I [3]. Хотя окончательная оценка точности воспроизведения моделями реального океана и идентификация механизмов возникновения различий в решениях пока не представляются возможными, их анализ позволяет выдвинуть гипотезы относительно таких механизмов.

Одной из основных диагностических характеристик решения являются средние по объёму Мирового океана значения температуры и солёности (под температурой будет пониматься потенциальная температура по отношению к поверхности океана). Графики средней температуры для различных моделей представлены на рис. 1. Начальные значения различаются между моделями, что может быть вызвано различиями в постановке начальных условий для океана и льда, а также различиями вертикальной дискретизации. Модель ИВМ – ИО показывает небольшой нагрев с приходом к равновесию в районе 3.6°C . Отметим, что собственный климат большинства моделей оказывается теплее начального состояния, как правило, полученного из климатологических баз данных. Кроме того, для моделей NCAR-POP, FSU-HYCOM и (в меньшей степени) Kiel-ORCA и ИВМ – ИО заметен максимум температуры в районе 100 – 200 лет с начала интегрирования. При неизменности внешнего форсинга это может свидетельствовать о генерации моделями океана различных глобальных динамических режимов и переключении между ними в указанный промежуток времени.

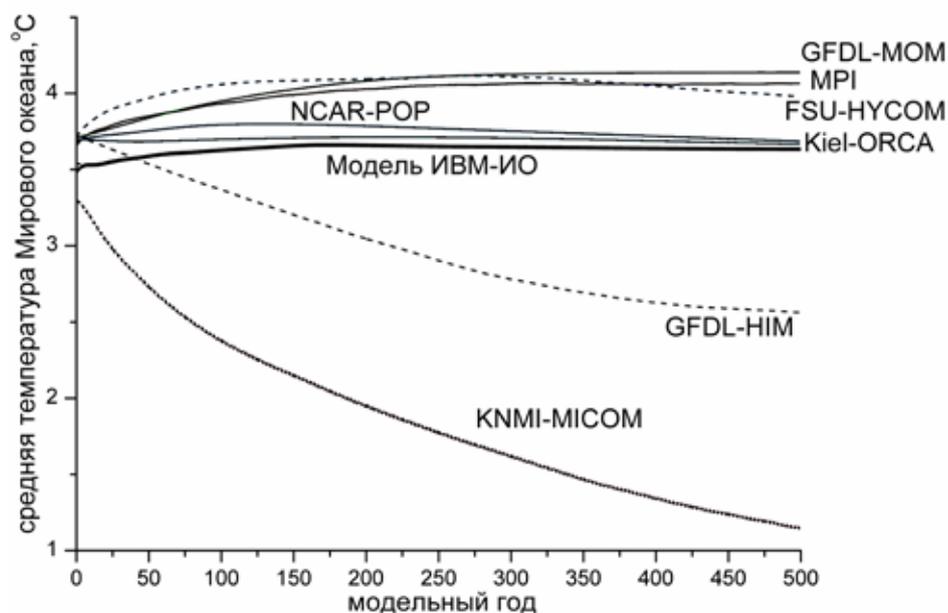


Рис. 1. Временной ход средней глобальной температуры океана по расчётам модели ИВМ – ИО РАН в сравнении с моделями, участвовавшими в эксперименте CORE-I.

Поскольку постановка эксперимента предполагает нулевой суммарный поверхностный поток воды и соли (аналогично моделям NCAR-POP, MPI, GFDL-MOM и GFDL-HIM), то средняя глобальная солёность практически не имеет тренда. Её разброс за время эксперимента составляет 10^{-3} psu, что выз-

вано обменом солью между океаном и льдом, а также ошибками округления численной схемы. Последний фактор первоначально представлял собой существенный фиктивный источник соли, поэтому для обеспечения указанного уровня консервативности по соли мы стали использовать в качестве расчётной переменной отклонение солёности от величины $S_0=35$ psu.

Более детальную картину разгона модели можно получить, построив графики изменения свойств вод в зависимости от времени и глубины. На рис. 2 представлен временной ход горизонтально осреднённой аномалии среднегодовой модельной температуры относительно среднегодовых климатологических данных РНС3.0. Состояние приповерхностных вод и термоклина практически стабилизируется в течение первых 50-100 лет, в то время как глубинные свойства продолжают испытывать дрейф на протяжении всего эксперимента. Для модели ИВМ – ИО виден нагрев верхнего слоя вод, наиболее выраженный в конце второго столетия на глубине около 400 метров, с ослаблением в последующие годы, что соответствует понижению средней температуры после 200-ого года на рис. 1. Воды ниже 2000 м испытывают непрерывное охлаждение вплоть до величины аномалии -0.5°C на глубине 4000 м в конце эксперимента. Схожее распределение трендов температуры наблюдается в расчётах моделей NCAR-POP, Kiel-ORCA и MPI, с тем отличием, что у NCAR-POP наиболее выраженная холодная аномалия находится на дне. Все эти модели, включая модель ИВМ – ИО, используют вертикальные z-координаты, а у моделей с изопикническими или гибридными координатами температурные графики качественно другие [3]. Поэтому можно предположить, что указанные распределения аномалии являются следствием занижения вертикального переноса тепла классическими численными схемами, использующими z-координаты. Также в наших расчётах почти на градус превышает климатологические данные температура самого верхнего горизонта, что говорит о необходимости уточнения описания процессов в пограничном слое в сторону повышения разрешения и/или использования более совершенных параметризаций перемешивания.

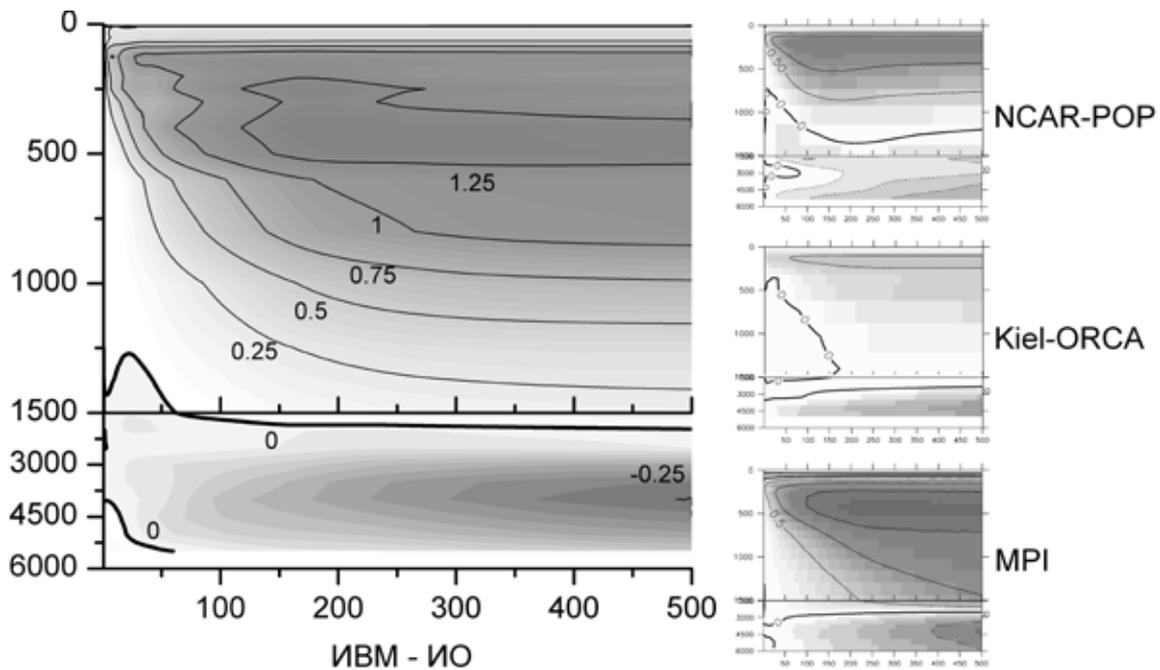


Рис. 2. Изменение горизонтально осреднённой температуры в зависимости от времени и глубины для разных моделей (аномалия относительно среднегодовой климатологии РНС3.0). На трёх правых рисунках изолинии проведены через каждые 0.5°C , сплошные для положительных величин, пунктирные – для отрицательных. Масштаб для верхнего 1500-метрового слоя увеличен.

Аналогичный график для солёности показывает заметное распреснение в верхнем 90-метровом слое и слабое – на больших глубинах, в основном компенсируемое областью осолонения с ядром на 500 метрах. Как и в случае с температурой, эта картина аналогична результатам расчётов по моделям NCAR-POP, MPI и (в меньшей степени) Kiel-ORCA. Отметим, что помимо схожести дискретизации, в расчётах NCAR-POP, MPI и ИВМ – ИО применялась релаксация солёности с одним и тем же коэффициентом $(50\text{м})/(4\text{ года})$.

Уравнения динамики океана существенно нелинейны, поэтому при расчётах с низким разрешением даже крупномасштабные характеристики решения могут заметно отличаться от наблюдаемой в природе картины. На рис. 3 показана аномалия модельной среднегодовой температуры поверхности океана (ТПО) за 491-500 годы интегрирования по сравнению с полем среднегодовых климатологических значений РНС3.0.

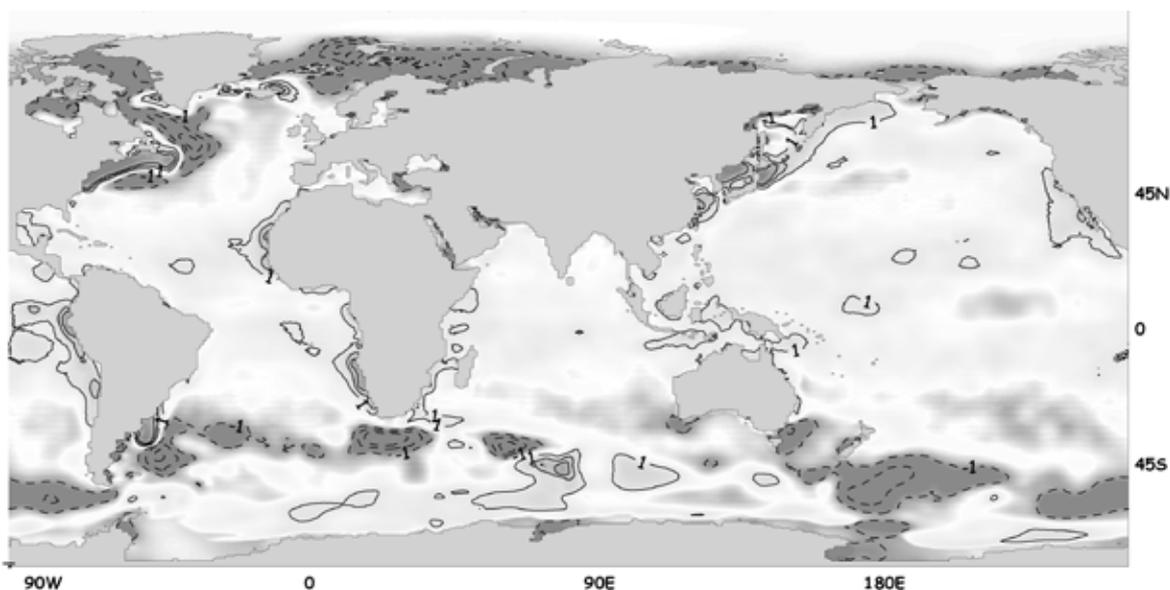


Рис. 3. Аномалия среднегодовой ТПО ($^{\circ}\text{C}$) за 491-500 годы численного эксперимента с моделью ИВМ – ИО по отношению к среднегодовым климатологическим значениям РНС3.0. Проведены изолинии $\pm 1, 2, 3^{\circ}\text{C}$ (положительные сплошной линией, отрицательные пунктиром).

Несмотря на неопределённость в климатологических данных (для серии районов различные источники дают отличие на $0.5-1^{\circ}\text{C}$), можно увидеть характерные недостатки данного типа моделей. Так, большие аномалии проявляются вдоль фронтальных зон, связанных с западными прибрежными течениями в Атлантике и Тихом океане. Известно [4], что пространственное разрешение порядка 0.1° определяет верное положение точки отрыва Гольфстрима от континентального шельфа у мыса Гаттерас. При недостаточном разрешении мы получаем смещение точек отрыва тёплых течений Гольфстрима и Куроисио на север с одновременным размывом фронта, что наблюдается в модельных решениях в виде дипольных аномалий ТПО в соответствующих районах. Аналогичные трудности наша модель испытывает вблизи южного побережья Бразилии и к югу от Новой Зеландии. Недостаточное разрешение не позволяет правильно воспроизвести процессы апвеллинга, что, по-видимому, является причиной возникновения тёплых аномалий у западных побережий Южной Америки и Африки. Также многие модели [3] показывают холодную аномалию на востоке экваториальной зоны Тихого океана. Детальное объяснение механизмов этих ошибок требует дальнейшего исследования и проведения множества экспериментов на чувствительность.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 13-05-01141-а и 12-05-31317-мол_а).

Литература:

1. Саркисян А.С., Демин Ю.Л. (под ред.), 1992. Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. Атмосфера-Океан-Космос-Программа «Разрезы». М: ИВМ РАН.
2. Holland D. Arctic Ocean Model Intercomparison Project. http://efdl.cims.nyu.edu/project_aomip/overview.html
3. Griffies S.M. et al., 2009. Coordinated Ocean-ice Reference Experiments (COREs). *Ocean Modelling*, 26 (1-2), 1-46.
4. Ибраев Р.А. и др., 2012. Вихреразрешающая $1/10^{\circ}$ модель Мирового океана. *Изв. РАН. ФАУО*, 48(1), 45-55.
5. Schrum C., Backhaus J., 1999. Sensitivity of atmosphere-ocean heat exchange and heat content in North Sea and Baltic Sea. *A comparative Assessment*, *Tellus*, 51A, 526-549.
6. McDougall T. J. et al., 2003. Accurate and computationally efficient algorithms for potential temperature and density of seawater. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 20, 730-741.

Studying different sources of uncertainty in the projection of the future climate change over Northern Eurasia

Andrei Sokolov, Erwan Monier, Adam Schlosser, Jeff Scott and Xiang Gao

Joint Program on Science and Policy of Global Change, MIT, USA
E-mail: sokolov@MIT.EDU

In this study we focus on four sources of uncertainties in climate projections: anthropogenic greenhouse gas emission scenarios (climate policy); climate system response to external forcing (climate sensitivity, strength of the aerosol forcing); natural variability (initial conditions) and structural uncertainty (inter-models difference in the pattern of regional climate change).

Contributions of the first three courses are evaluated using the MIT IGSM-CAM framework, which links MIT Integrated Global System Model to the NCAR Community Atmospheric Model. The MIT IGSM couples model of world economy (Emission Prediction and Policy Analysis model, EPPA) with MIT Earth System Model of intermediate complexity (MESM). Version of the MESM, used in this study, consist of 2-dimensional (zonally averaged) atmospheric model with interactive chemistry, ocean global circulation model and land system model, which simulates both physical and biogeochemical processes.

Simulations with the IGSM were carried out using three different emission scenarios and three sets of climate parameters from five different initial conditions. Following emission scenarios were used: reference scenario with unconstrained emissions and two scenarios with different climate policies leading to total radiative forcing stabilization by year 2100 at 4.5 and 3.7W/m², respectively. In the reference case radiative forcing reaches 9.7 w/m² at 2100. Values of climate sensitivity were set to 2.0, 3.0 and 4.5C for CO₂ doubling, which represent 5th, 50th and 95th percentiles of the probability distributions implied by the observed changes in air temperature. Values of the aerosol forcing were chosen so that to ensure consistency between simulated and observed climate change over 20th century.

Sea surface temperature and concentrations of different GHGs and aerosols obtained in the simulations with the MIT IGSM were then used to force CAM is AMIP style simulations. Climate sensitivity of the CAM was set to the value matching climate sensitivity of the IGSM. Results from the CAM simulations were used to evaluate uncertainty in the climate change over NEESPI region associated with different climate policies, uncertainty in climate system response and natural variability.

Uncertainties associated with the inter-models difference in the pattern of regional climate change were evaluated applying pattern scaling approach. Namely, possible changes in surface air temperature and precipitation over Northern Eurasia were obtained by scaling changes in the zonal mean simulated by the IGSM using regional pattern from simulations with different AR4 AOGCMs.

Results of above described simulations show that relative contributions of different sources of uncertainty in the total uncertainties of projected changes in surface air temperature and precipitation over Northern Eurasia are changing with time. Such on short time scales uncertainty in surface warming are primarily caused by uncertainty in climate system response and natural variability. In contrast uncertainties in the changes in surface temperature on a century scale are almost exclusively associated with different emission scenario. Different sources play more equal roles in the uncertainties in projected precipitations. In particular natural variability and inter-models differences have much large effect on changes in precipitation than on simulated surface warming.

Simulation of the present and future climate change with the GISS ModelE2

Larissa Nazarenko, Nick Tausnev, Gavin Schmidt

NASA Goddard Institute for Space Studies, Center for Climate Systems Research, Columbia University, USA
E-mail: larissa.s.nazarenko@nasa.gov

Global warming resulting from anthropogenic emissions of greenhouse gases may be linked with the effects of fluctuations in atmospheric circulation systems on precipitation distributions. The human-influenced global warming increases the atmospheric water-holding capacity roughly exponentially with temperature (approximately 6-7% more water vapor is carried per 1°C of warming near Earth's surface, as

determined by the Clausius-Clapeyron equation). The convergence of moisture-laden air masses leads to air updraft, formation of clouds and increase in precipitation. Here it is shown that human-induced increases in greenhouse gases have contributed to the intensification of liquid precipitation and reduction of snow fall of the Northern Hemisphere.

Using the GISS climate model [Schmidt et al., 2006], we analyse the historical simulations from 1850 to 2005 with (1) only anthropogenic forcing (ANT, blues line in Fig. 2), (2) only natural forcing (NAT, green line in Fig.2), and (3) a combination of both anthropogenic and natural forcings (ALL, red line in Fig. 2). The anthropogenic forcings include time-varying well-mixed greenhouse gases (GHGs), ozone (O_3), tropospheric aerosols (sulfates, nitrates, black carbon and organic carbon), stratospheric water vapor from methane oxidation, a parameterized indirect effect of aerosols on clouds, soot effect on snow and ice albedos, and land use changes. The natural forcings arise from changing volcanic aerosols, solar irradiance, and Earth orbital parameters (Fig. 1).

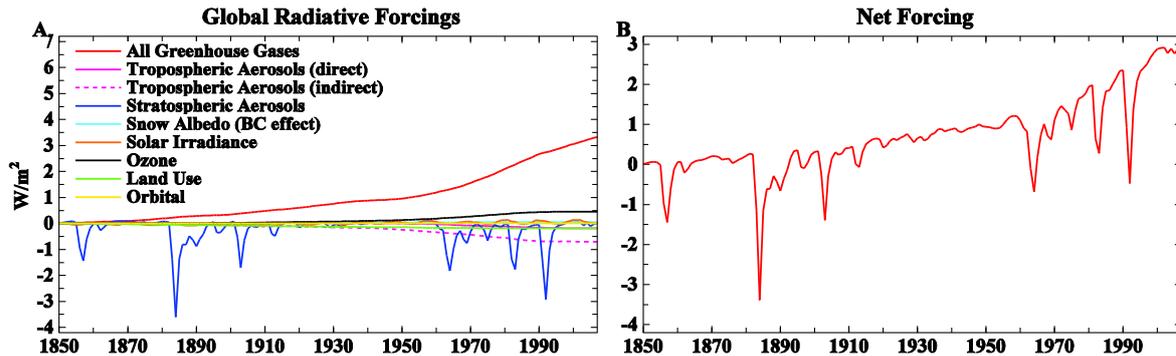


Figure 1. Instantaneous global radiative forcing at the tropopause (W/m^2). (A) Individual forcings; (B) Total forcings.

The model equilibrium sensitivity to doubled CO_2 is $2.7^\circ C$ ($\sim 2/3^\circ C$ per $1 W/m^2$). The total natural and anthropogenic forcing is about $1.8 W/m^2$ between 1850 and 2005 (with some uncertainty of $\pm 0.85 W/m^2$ due to aerosols). The observed global surface air temperature increase from 1850 to 2005 is about $0.75^\circ C$ [IPCC AR4 SYR, 2007], which is the response to $\sim 1.1 W/m^2$ of forcing. The unrealized forcing of about $0.7 W/m^2$ remains, and the additional warming of $0.5^\circ C$ will take place in the future even if the anthropogenic components in the atmosphere and total forcings stay unchanged at the values of the year 2005.

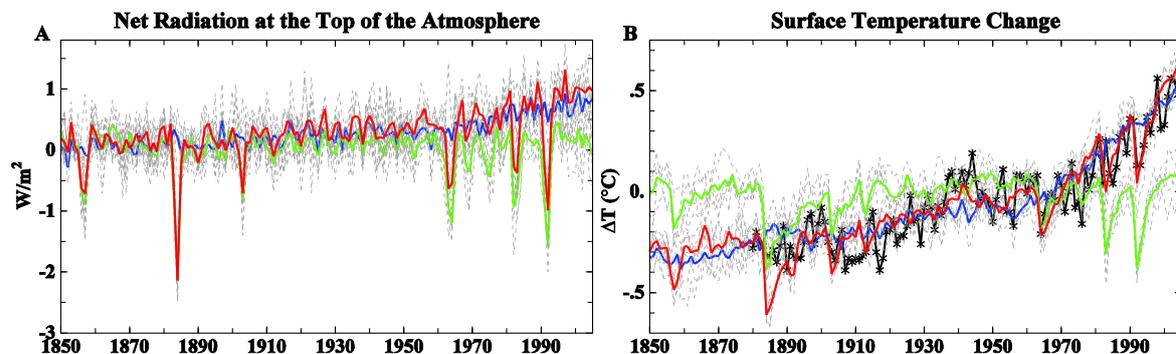


Figure 2. (A) Net radiation at the top of the atmosphere in the climate simulations. The drift of the control experiment (with 1850 atmospheric compositions) was subtracted from each experiment. (B) Simulated and observed surface air temperature anomalies relative to the base period 1951-1980.

The red line is the temperature anomaly of the ensemble mean of the experiment with both natural and anthropogenic forcings (ALL); the blue line – of the experiment with only anthropogenic forcings (ANT); the green line – of the experiment with only natural forcings (NAT); the black line with stars – the temperature anomalies from observations [Hansen et al., 2001]. Five climate simulations (grey thin broken lines) are carried out for each experiment that differ only in initial conditions.

The simulated planetary energy imbalance of about $0.7 W/m^2$ (Fig. 2a) and the global surface air temperature warming of $+0.7^\circ C$ (temperature change based on linear trend, Fig. 2b) from 1850 to 2005 in the experiment with both natural and anthropogenic forcings (ALL) are quite consistent with estimated increases of climate forcings and temperature from observations over the past 150 years. The modeled energy imbalance in the experiment with only anthropogenic forcings (ANT) is stronger (about $0.8 W/m^2$) reflecting the constantly increasing strong positive forcing of the greenhouse gases over the whole period of 150 years (Fig. 2a) while in the ALL experiment the energy imbalance of about $0.7 W/m^2$ is reduced by negative energy imbalance due to natural forcings (NAT) ($-0.05 W/m^2$).

The Northern Hemisphere surface air temperature warming is $+0.8^{\circ}\text{C}$ (again based on linear trend, Fig. 3a) from 1850 to 2005 in the experiment with ALL climate forcings. The greater surface warming over the Northern Hemisphere than over the whole globe, the so-called Arctic amplification, is largely due to strong positive sea ice albedo feedback. The reduction of the sea ice cover in the Arctic is considered to be the largest contributor to the Arctic amplification [Serrese et al., 2009; Screen and Simmonds, 2010]. Our model shows strong negative correlation of -0.8 between the Northern Hemisphere surface air temperature and sea ice area. During the last century and half, the Arctic Ocean ice area decreased by 11% (Fig. 3b) in the historical 1850-2005 experiment with ALL forcings.

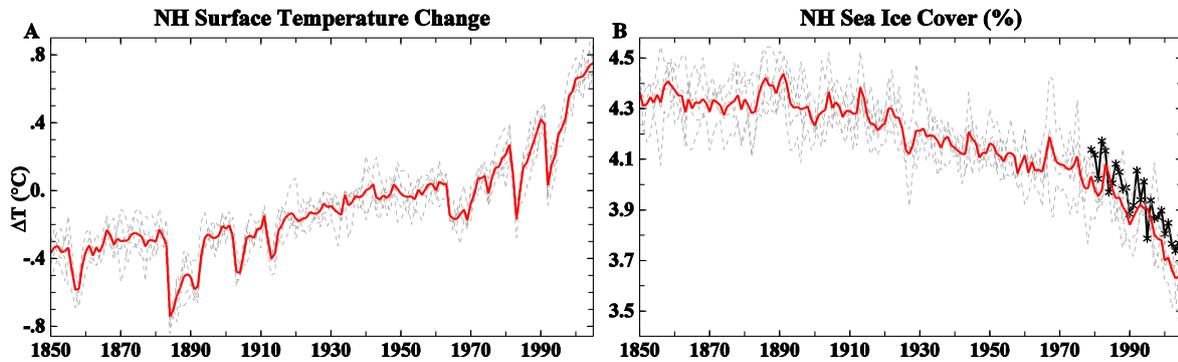


Figure 3. (A) Simulated Northern Hemisphere surface air temperature anomalies relative to the base period 1951-1980. (B) Simulated and observed Northern Hemisphere sea ice cover in per cent of the Northern Hemisphere area. The black line with stars – the Northern Hemisphere sea ice area from National Snow and Ice Data Center (NSIDC) [Fetterer et al., 2011]. The grey thin broken lines – five run ensemble with ALL climate forcings; the red line – the ensemble mean.

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) requested the scientific communities to develop a new set of scenarios to facilitate integrated analysis of climate change across the main scientific communities [IPCC, 2007]. A set of four new future scenarios, the so called the Representative Concentration Pathways (RCPs), developed as a basis for long-term and short-term modeling experiments [van Vuuren et al., 2011a]. Each of the RCPs covers the 2006-2100 period. The four RCPs reflect the range of year-2100 radiative forcing values from 2.6 to 8.5 W/m^2 and are named accordingly. The net forcing is determined by both positive forcing from greenhouse gases and negative forcing from aerosols though the dominant factor across the scenarios is the forcing from CO_2 . Radiative forcings from the land-use scenarios are relatively small compared to radiative forcings from greenhouse gases, although deforestation is an important element in the CO_2 emissions. Note that the actual radiative forcing values at 2100 for different RCP scenario will depend on the climate model and on included feedbacks (Fig. 4).

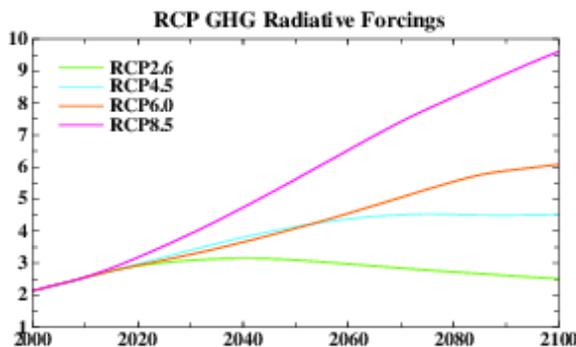


Fig. 4. Instantaneous global GHG climate forcings used in global future climate simulations relative to their values in 1950. The green line – the RCP scenario 2.6 [van Vuuren et al., 2011b]; the light blue line - the RCP scenario 4.5 [Thomson et al., 2011]; the orange line - the RCP scenario 6.0 [Masui et al., 2011]; the pink line - the RCP scenario 8.5 [Riahi et al., 2011].

The geographical patterns of future surface temperature warming are similar to those obtained in previous model versions [Hansen et al., 2007] and other models [Meehl et al., 2007; Meehl et al., 2012] and are similar in the four RCP scenarios (Fig. 5). The warming over all continents in the RCP2.6 scenario (Fig. 5a) is 4-5 times smaller than in the RCP8.5 case (Fig. 5d), and 2-3 times smaller than in the RCP4.5 (Fig. 5b) and RCP6.0 (Fig. 5c) experiments.

In all four RCP simulations, the warming is larger over land areas than over oceans. The greatest warming is over the Arctic and over the Northern Hemisphere high latitude regions. The northern area of the North Atlantic and over the large area of the Southern Ocean have warming of less than the global average. The simulation with the smallest forcing RCP2.6 produces a small area of surface air temperature cooling of about -0.5°C over a small area to the south of Greenland. This area is a region of strong vertical convection in the North Atlantic where warm and salty water brought from tropics and sub-tropics cools from the cold Arctic air, becomes denser, and sub-merges to the lower ocean layers, the Northern section of the North Atlantic meridio-

nal overturning circulation. Due to the large scale warming, there is a decrease in the overturning stream function by 9-13 Sv in the RCP8.5 experiments in the end of the 21st century. In the case with the smallest forcing RCP2.6, the weakening of the North Atlantic overturning is 1-3 Sv, which is within the range of the ocean internal variability. In the experiments with moderate radiative forcings RCP4.5 and RCP6.0, the North Atlantic stream function decreases by 4-10 Sv by 2100 with complete recovery by 2500 in the coupled models with the NINT atmosphere and with partial recovery by 2500 in all other coupled models for both RCP4.5 and RCP6.0.

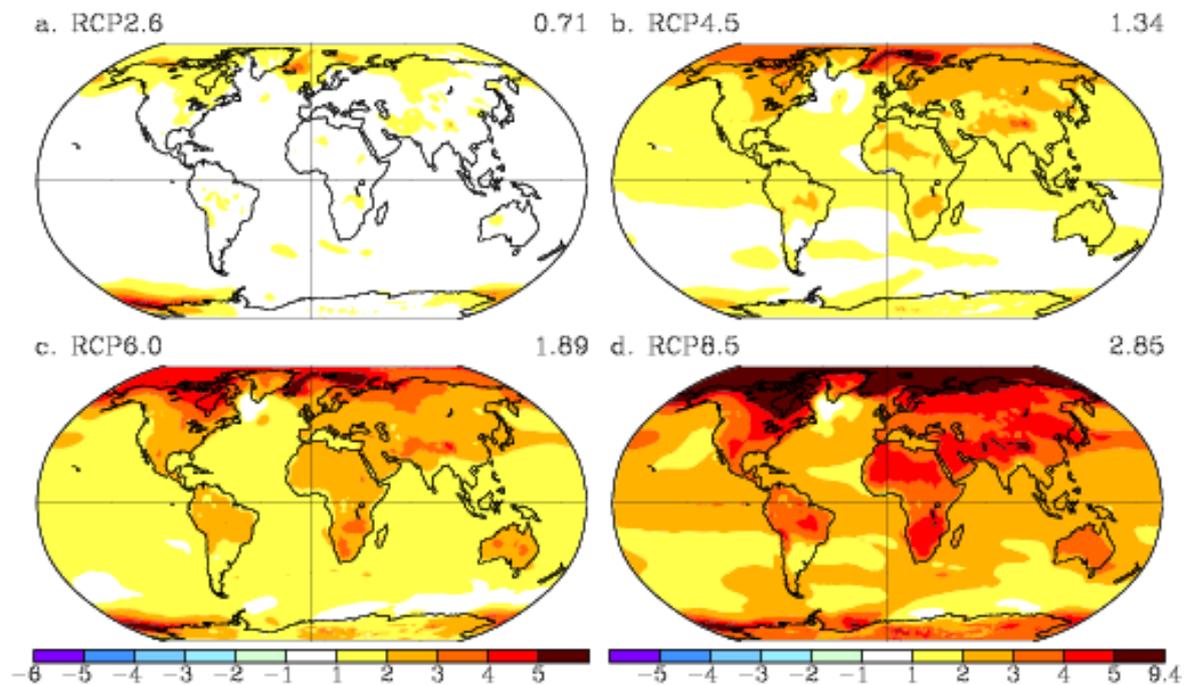


Fig. 5. Surface air temperature differences (°C) for late twenty-first century 2081-2100 minus 1986-2005 of the correspondent historical ensemble member for the NINT climate model. (a) RCP2.6; (b) RCP4.5; (c) RCP6.0; (d) RCP8.5.

References:

1. Fetterer, F., K. Knowles, W. Meier, and M. Savoie (2011), *Sea ice index*, National Snow and Ice Data Center, Boulder, Colorado, USA: Digital media.
2. Hansen, J., R. Ruedy, M. Sato, M. Imhoff, W. Lawrence, D. Easterling, T. Peterson, and T. Karl (2001), A closer look at United States and global surface temperature change, *J. Geophys. Res.*, 106, 23,947-23,963.
3. Hansen, J., Mki. Sato, R. Ruedy, P. Kharecha, A. Lacis, R.L. Miller, L. Nazarenko, K. Lo, G.A. Schmidt, G. Russell, I. Aleinov, S. Bauer, E. Baum, B. Cairns, V. Canuto, M. Chandler, Y. Cheng, A. Cohen, A. Del Genio, G. Faluvegi, E. Fleming, A. Friend, T. Hall, C. Jackman, J. Jonas, M. Kelley, N.Y. Kiang, D. Koch, G. Labow, J. Lerner, S. Menon, T. Novakov, V. Oinas, J.P. Perlwitz, Ju. Perlwitz, D. Rind, A. Romanou, R. Schmunk, D. Shindell, P. Stone, S. Sun, D. Streets, N. Tausnev, D. Thresher, N. Unger, M. Yao, and S. Zhang (2007), *Dangerous human-made interference with climate: A GISS modelE study*. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2287-2312, doi:10.5194/acp-7-2287-2007.
4. IPCC AR4 SYR (2007), Core Writing Team; Pachauri, R.K; and Reisinger, A., ed., *Climate Change 2007: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, ISBN 92-9169-122-4.
5. Masui, T., K. Matsumoto, Y. Hijioka, T. Kinoshita, T. Nozawa, S. Ishiwatari, E. Kato, P.R. Shukla, Y. Yamagata, and M. Kainuma (2011), An emission pathway for stabilization at 6 Wm⁻² radiative forcing, *Clim. Change*, 109: 59-76, doi 10.1007/s10584-011-0150-5.
6. Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao (2007), *Global Climate Projections*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
7. Meehl, G.A., W.M. Washington, J.M. Arblaster, A. Hu, H. Teng, C. Tebaldi, B.N. Sanderson, J.-F. Lamarque, A. Conley, W.G. Strand, J.B. White III (2012), *Climate System Response to External Forcings and Climate Change Projections in CCSM4*, *J. Clim.*, 19, 3661-3683.

8. Riahi, K., S. Rao, V. Krey, C. Cho, V. Chirkov, G. Fisher, G. Kindermann, N. Nakicenovic, and P. Rafaj (2011), RCP8.5 – A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions, *Clim. Change*, 109:33-57, doi 10.1007/s10584-011-0149-y.
9. Schmidt, G. A., Ruedy, R., Hansen, J. E., Aleinov, I., Bell, N., Bauer, M., Bauer, S., Cairns, B., Canuto, V., Cheng, Y., Del Genio, A., Faluvegi, G., Friend, A. D., Hall, T. M., Hu, Y., Kelley, M., Kiang, N. Y., Koch, D., Lacis, A. A., Lerner, J., Lo, K. K., Miller, R. L., Nazarenko, L., Oinas, V., Perlwitz, J., Perlwitz, J., Rind, D., Romanou, A., Russell, G. L., Sato, M., Shindell, D. T., Stone, P. H., Sun, S., Tausnev, N., Thresher, D., and Yao, M.-S. (2006), Present day atmospheric simulations using GISS ModelE: Comparison to in-situ, satellite and reanalysis data, *J. Climate*, 19, 153–192.
10. Screen, J.A. and I. Simmonds (2010), The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification, *Nature*, 464, 1334-1337.
11. Serrese, M.C., A.P. Barrett, J.C. Stroeve, D.N. Kindig, M.M. Holland (2009), The emergence of surface-based Arctic amplification, *Cryosphere*, 3, 11-19.
12. Thomson, A.M., K.V. Calvin, S.J. Smith, G.P. Kyla, A. Volke, P. Patel, S. Delgado-Arias, B. Bond-Lamberty, M.A. Wise, L.E. Clarke, and J.A. Edmonds (2011), RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100, *Clim. Change*, 109: 77-94, doi 10.1007/s10584-011-0151-4.
13. van Vuuren, D.P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G.C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S.J. Smith, S.K. Rose (2011a), The representative concentration pathways: an overview, *Clim. Change*, 109: 5-31, doi 10.1007/s10584-011-0148-z.
14. van Vuuren, D.P., E. Stehfest, M.G.J. den Elzen, T. Kram, J. van Vliet, S. Deetman, M. Isaac, K. Klein Goldewijk, A. Hof, A. Mendoza Bertran, R. Oostenrijk, and B. van Ruijven (2011b), RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C, *Clim. Change*, 109: 95-116, doi 10.1007/s10584-011-0152-3.

Investigation of natural methane emission over the territory of Northern Eurasia in the late XX and XXI centuries using the MGO regional climate model

Pikaleva A.A., Nadyozhina E.D., Shkolnik I.M.

Voeikov Main Geophysical Observatory, St. Petersburg, Russia
E-mail: pikaleva@main.mgo.rssi.ru

The investigation is aimed at the modeling of future changes in the methane emission from marsh ecosystems using the ensemble simulations with high resolution regional climate model (RCM, 25 km). Firstly, a series of RCM (50 km) climate simulations (differing by the lateral boundary conditions derived from ERA-40, JRA-25 and NCEP-DOE reanalyses) have been performed with the purpose to estimate the methane fluxes for the period 1981-2000. Numerous studies revealed significant differences between the reanalysis in reproducing climatologies over the north-eastern Eurasia owing to sparse observational network in the region. It has been shown that (1) the spatial distribution of model methane fluxes is generally in agreement with the observation analysis and (2) the reanalysis-to-reanalysis differences weakly affect the methane emissions estimates that appear to be mainly determined by local variations of the heat and moisture balances rather than by large scale atmospheric circulations. The ensemble of future climate change based on RCM simulations (with different boundary conditions derived from MGO Global Climate Model) according to SRES A2 anthropogenic emission scenario provided the estimates of future methane changes for the period 2041-2060 and allowed to assess the influence of the intraensemble variance on the credibility of the methane emission changes. According to the RCM projections the «explosive» changes in the methane emission are not projected at least by the mid 21st century.

Исследование естественной эмиссии метана на территории Северной Евразии в XX и XXI веках с помощью региональной климатической модели ГГО

А.А. Пикалёва, Е.Д. Надёжина, И.М. Школьник

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейнова, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: pikaleva@main.mgo.rssi.ru

В настоящее время значительное количество исследований направлено на анализ отклика климатической системы в ответ на увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере. В последние несколько лет внимание исследователей все больше обращается на второй по важности парниковый газ — метан, основным естественным источником которого являются болотные экосистемы. Однако, имеющиеся оценки эмиссии метана характеризуются значительной неопределенностью, связанной с недостаточным пониманием механизмов его образования и взаимодействия с атмосферой, отсутствием регулярных данных наблюдений, неточностью параметризаций эмиссии метана и ошибками расчетов климатических характеристик необходимых для его моделирования.

Большинство исследований, направленных на оценку потоков метана, основывается на использовании данных глобальных климатических моделей (ГКМ) сравнительно невысокого пространственного разрешения (100-300 км). В то же время хорошо известно, что процессы метанообразования в значительной степени зависят от локальных свойств подстилающей поверхности. Разрешение порядка нескольких сотен километров явно недостаточное для описания пространственной изменчивости потоков метана с территории водно-болотных угодий (ВБУ). Использование региональной климатической модели (РКМ) высокого разрешения (50 и 25 км) позволяет детализировать пространственное положение болотных экосистем на территории Северной Евразии и уточнить распределение потоков метана.

В данном исследовании получены оценки современной и ожидаемой в будущем эмиссии метана с помощью ансамблевых расчетов по РКМ и проанализировано влияние внутренней климатической изменчивости на его потоки. Для этого были проведены три расчета по РКМ (горизонтальное разрешение 50 км) за период 1981-2000 гг. с заданием разных реанализов (ERA-40, JRA-25 и NCAR-DOE) на боковых границах модельной области. Поскольку качество реанализов на территории Сибири существенно различается, то представляет интерес выяснить, насколько расхождения между ними сказываются на расчетном термическом и влажностном режиме региона и, в конечном счете, на эмиссии метана с поверхности болот. Затем выполнена серия численных экспериментов по моделированию потоков метана на основе данных ансамблевых расчетов по глобальной климатической модели атмосферы и встроенной в нее региональной модели ГГО (горизонтальное разрешение 25 км). Ансамбли формировались с учетом варьирования начальных условий в атмосфере и граничных условий на поверхности океана. В качестве таких условий использовались глобальные поля температуры поверхности океана и концентрации морского льда, полученные ранее из расчетов по совместным моделям атмосферы и океана СМIP3 для сценария эмиссии парниковых газов A2 МГЭИК. Таким образом, каждый эксперимент включал разные реализации внутренней изменчивости климата. Расчеты проводились для двух временных периодов: 1981-2000 и 2041-2060 гг.

Оценка потоков метана выполнена на основе использования параметризации, связывающей поток метана с температурой почвы и уровнем болотных вод (УБВ). В режиме офф-лайн была задействована модель теплопередачи в грунтах, построенная с учетом фазовых переходов влаги, которая позволяет рассчитать мощность слоя сезонного протаивания/промерзания и определить среднюю температуру в этом слое. Уровень болотных вод определялся в зависимости от степени насыщения почвы влагой. На основе распределения УБВ были выделены регионы избыточного увлажнения. В качестве входной информации для расчета указанных характеристик использовались среднемесячные данные РКМ о распределении температуры поверхности, влажности почвы и водного эквивалента снежного покрова.

Модельные оценки пространственного положения ВБУ сравнивались с распределением территорий, занятых болотными экосистемами по данным Института лесоведения РАН. По оценкам РКМ (с разным разрешением и разными граничными условиями) основные болотные экосистемы располагаются на территории Восточно-Европейской равнины, в Западной Сибири, в дельтах рек Лена, Анадырь и Амур, в Северо-Сибирской и Колымской низменностях. Модельное распределение болот в целом удовлетворительно согласуется с данными наблюдений как при разрешении 50 км, так и при разрешении 25 км, но в последнем случае пространственное распределение болотных ландшафтов описывается с заметно большей пространственной детализацией. Было установлено, что задание разных граничных условий в РКМ слабо влияет на положение ВБУ.

Проведено сравнение среднего по ансамблю распределения потока метана по данным РКМ (50 и 25 км) и эмиссии этого газа, восстановленной по данным наблюдений за его приповерхностной концентрацией. Показано, что используемая параметризация потоков метана в большинстве регионов позво-

ляет воспроизвести его фактическое пространственное распределение. Однако, необходимо отметить, что степень согласованности с данными наблюдений в восточных регионах выше, чем на европейской территории. Часть расхождений может быть обусловлена разными периодами осреднения, которые представлены для модельных расчетов 20-ти летним периодом, а для оценок наблюдений - существенно меньшим интервалом (6 лет), недостаточно полно характеризующим климатологию потоков метана.

Проведена оценка неопределенности в расчетах эмиссии метана по РКМ (горизонтальное разрешение 50 км) в зависимости от того, насколько реалистично современные реанализы описывают динамические и термодинамические характеристики атмосферы на территории региона. Известно, что в силу слабой освещенности метеорологической информацией территории северо-восточной Евразии, реанализы могут там существенно различаться в оценках влажностного и термического режимов тропосферы. Поэтому они по-разному могут влиять на численное решение уравнений РКМ и, в результате - на расчетные потоки метана. Ансамблевый разброс оценок метана в расчете по РКМ с реанализами за период 1981-2000 гг. оказался малым. Интегральный поток метана с территории ВБУ в конце XX века составил в среднем 28 Мт/год, при величине стандартного отклонения в ансамбле 0.7 Мт/год. Малая величина стандартного отклонения указывает на слабую зависимость интенсивности потока метана от колебаний крупномасштабной атмосферной циркуляции, а в большей степени определяется мезомасштабными особенностями региона, которые явно описываются с помощью РКМ.

Близкий результат по разбросу был получен для базового периода (1981-2000 гг.) и в экспериментах с версией РКМ более высокого разрешения (25 км) и разными граничными условиями из глобальной модели по пяти членам ансамбля, включающим разные начальные условия в атмосфере. Таким образом, внутренняя изменчивость климатической системы, которая по-разному описывается каждым членом ансамбля, так же как и при расчетах с реанализами, слабо сказывается на оценках потоков метана за двадцатилетний период. Эмиссия этого газа зависит, преимущественно, от установившегося локального термического режима и влажности почвы. Отсюда следует, что основной вклад в неопределенность прогнозов будущих изменений потоков метана в Северной Евразии будет оказывать эволюция указанных факторов в рамках принятых МГЭИК сценариев радиационного воздействия на климат.

Данные ансамблевых расчетов по региональной климатической модели позволили получить вероятностную картину изменений климата и проанализировать влияние разных прогнозов климата на степень достоверности прогностических оценок эмиссии метана в середине XXI века.

Анализ экспериментов показал, что к середине XXI века (1) значительных изменений в пространственном распределении уровня болотных вод не ожидается. Соответственно, положение основных источников эмиссии метана изменится слабо и (2) средняя по ансамблю температура слоя протаивания в период возможной продукции метана может увеличиться на 1.5-2°C, причем наиболее заметные изменения в годовом ходе возможны в мае и сентябре. Максимальное расчетное изменение уровня болотных вод приходится на те же месяцы, что и для температуры, однако амплитуда этих изменений значительно меньше — несколько процентов от современного уровня. Таким образом, основной вклад в будущие изменения эмиссии метана вносит температура слоя протаивания.

Оценка статистической значимости будущих изменений проводилась на основе t-критерия Стьюдента при 10% уровне значимости. Анализ полученных результатов показал, что статистически значимые изменения потоков метана ожидаются в северных регионах в мае и сентябре. В летний сезон достоверность прогнозных оценок заметно ниже, чем в указанные месяцы.

Согласно проведенным расчетам, интегральный поток метана с территории ВБУ при потеплении может увеличиться на 7 ± 0.4 Мт/год, что составляет 30% от современной эмиссии. Выполненные расчеты климатообусловленных изменений потока метана в XXI веке не указывают на возможный «взрывной» характер его эмиссии, по крайней мере, в ближайшие 50 лет.

Changes of climatological conditions of automobile transport functioning in north of European part of Russia

Borzenkova A.V., Shmakin A.B.

Geography Institute RAS, Moscow, Russia
E-mail: alexandra_borzenkova@mail.ru

Automobile transport is very weather-sensitive branch of the economy. Some climatological characteristics which affect the automobile transport functioning were selected for analysis. The investigation results of their spatial distribution in north of European part of Russia (EPR) and changes for 60-years period (from 1950 to 2010) are reported. The studied parameters are:

- the solid precipitation sum
- the number of weak, medium and extreme snowfalls
- the average temperature of the coldest pentad (5 days in a row), parameter used in the design of road and other structures
- the number of days with temperature below -25°C (below this temperature the risk of various automobiles breakdowns increases)
- dates of appearance and destruction of stable snow cover
- number of crossings of the freezing point by the air temperature, parameter characterizing the probability of slipperiness occurrence

The tendency of the solid precipitation sum increase in (1981-2010) as compared with (1951-1980) has been detected in the major part of the investigated territory as well as increasing of number of medium and extreme snowfalls. But the number of weak snowfalls decreased statistically significantly on the entire territory. The increasing of solid precipitation sum and number of medium and extreme snowfalls has negative influence on automobile transport functioning. Herewith tendencies of increasing of the coldest pentad average temperature and decreasing of number of days with temperature below -25°C occurred on investigated territory. These tendencies have positive influence on this branch of the economy. The number of crossings of the freezing point by the air temperature and dates of appearance and destruction of stable snow cover changed irregularly.

Изменения климатических условий функционирования автомобильного транспорта на севере европейской территории России

Борзенкова А.В., Шмакин А.Б.

Институт географии РАН, Москва, Россия
E-mail: alexandra_borzenkova@mail.ru

Автомобильный транспорт является одной из самых «погодозависимых» отраслей экономики. Рост интенсивности движения транспорта на современных дорогах обуславливает повышение требований к транспортно-эксплуатационному состоянию, уровню безопасности дорожного движения и пропускной способности дорог в различные сезоны года. Одним из самых сложных и ответственных в работе дорожных организаций является зимний период, когда происходят сбои в работе транспорта в случаях сильных снегопадов, возникает необходимость ликвидации скользкости и снежных отложений на автомобильных дорогах. Сильный снегопад в городе можно сравнить со стихийным бедствием, парализующим движение на автодорогах, что отражается не только в повседневной жизни людей, но и в более глобальных вопросах, таких, как, например, загрязнение атмосферы. В последнее десятилетие в дорожном хозяйстве России наблюдается тенденция к ужесточению требований к уровню содержания автомобильных дорог.

В данной работе было произведено исследование пространственного распределения и изменений некоторых прикладных климатических характеристик, оказывающих влияние на функционирование автомобильного транспорта, для северной части европейской территории России (ЕТР) за период 1951-2010 гг.

Исследовались следующие параметры:

- Сумма осадков при отрицательной температуре воздуха и число снегопадов различной интенсивности (0-2, 2-5 и более 5 мм в сутки, что соответствует эквивалентным значениям в см свежего снега)
- Число дней с температурой воздуха ниже -25° (в данных условиях возрастает вероятность различных поломок автотранспорта)
- Температура самой холодной пятидневки (параметр, учитываемый при проектировании автодорожных и др. сооружений)
- Даты появления и исчезновения устойчивого снежного покрова
- Число переходов температуры воздуха через 0°C (параметр, характеризующий вероятность возникновения различных видов скользкости)

Указанные выше характеристики были посчитаны для каждого зимнего сезона, вычислены средние за весь исследуемый период (1951-2010) и 2 тридцатилетних периода (1951-1980 и 1981-2010), произведена оценка статистической значимости произошедших изменений.

Количество твердых осадков распределено по территории неравномерно, с максимальными значениями на юго-востоке республики Коми и минимальными в районе Белого моря. За последние 30 лет произошло увеличение твердых осадков практически во всей части исследуемой территории, при этом эти изменения статистически значимые.

Параметр «число снегопадов интенсивностью 0-2 мм/сутки» возрастает с юго-запада на северо-восток, повторяя пространственное распределение температуры воздуха. Это объясняется тем, что эта характеристика больше зависит от количества дней с отрицательной температурой воздуха, чем от факторов, влияющих на выпадение осадков. Среднегодовое число слабых снегопадов сократилось на всей территории северо-запада ЕТР, при этом практически везде это сокращение статистически значимо.

Карты числа снегопадов средней и высокой суточной интенсивности больше сходны с картой распределения твердых осадков, чем карта распределения слабых снегопадов, из чего можно сделать вывод, что общее количество твердых осадков в большей степени зависит от сильных и средних снегопадов, чем от слабых. Их увеличение, как и в случае твердых осадков, произошло на большей части территории региона.

Наблюдается тенденция к более позднему установлению устойчивого снежного покрова на западе исследуемой территории, и, напротив, более раннему на востоке. При этом эти изменения статистически значимы лишь на небольшой части на западе территории.

Снег стал сходить раньше на северо-востоке исследуемой территории, на западе – напротив, немного позже. Таким образом, на западе региона период года с устойчивым снежным покровом смещен в сторону осени, на востоке – напротив, в сторону весны. Общая продолжительность существования снежного покрова при этом меняется слабо.

Среднее число экстремально холодных (с минимальной температурой воздуха ниже -25°C) возрастает с запада на восток с увеличением континентальности климата (рис.1 (а)). В последние 30 лет по сравнению с предыдущими произошло сокращение числа таких дней на всей северной территории ЕТР, в южной и восточной части территории эти изменения статистически значимы (рис.1 (б)).

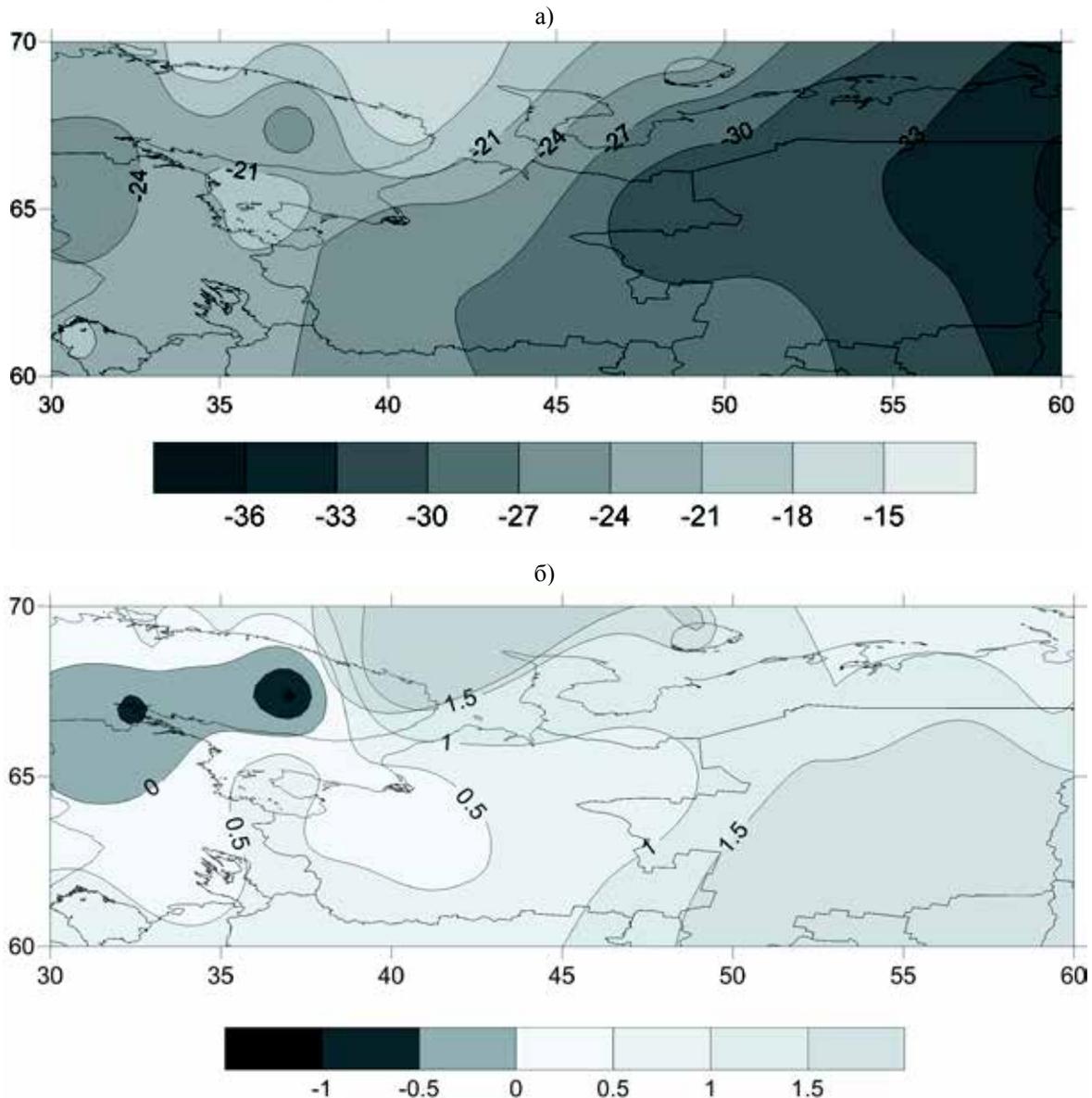


Рис.1 Среднегодовое число дней с минимальной температурой воздуха ниже -25°C за период 1951-2010 гг. (а) и его изменения в 1981-2010 гг. по сравнению с 1951-1980 (б). Заштрихованы статистически значимые изменения.

Среднее количество переходов температуры воздуха через 0°C меняется от более 80 на территории Карелии и Мурманской области до 60-65 на востоке исследуемого региона (рис. 15а). В последние 30 лет наблюдается сокращение числа температуры через 0°C в северной части и, напротив, увеличение в южной (рис. 15б).

Средняя температура самой холодной пятидневки уменьшается с запада на восток, следуя за увеличением континентальности климата, как и количество дней с экстремальными морозами (рис 2 (а)). В целом на севере ЕТР наблюдается тенденция к потеплению и повышению ее температуры, за исключением Мурманской области и Карелии, где есть очаги похолодания (рис. 2(б)).

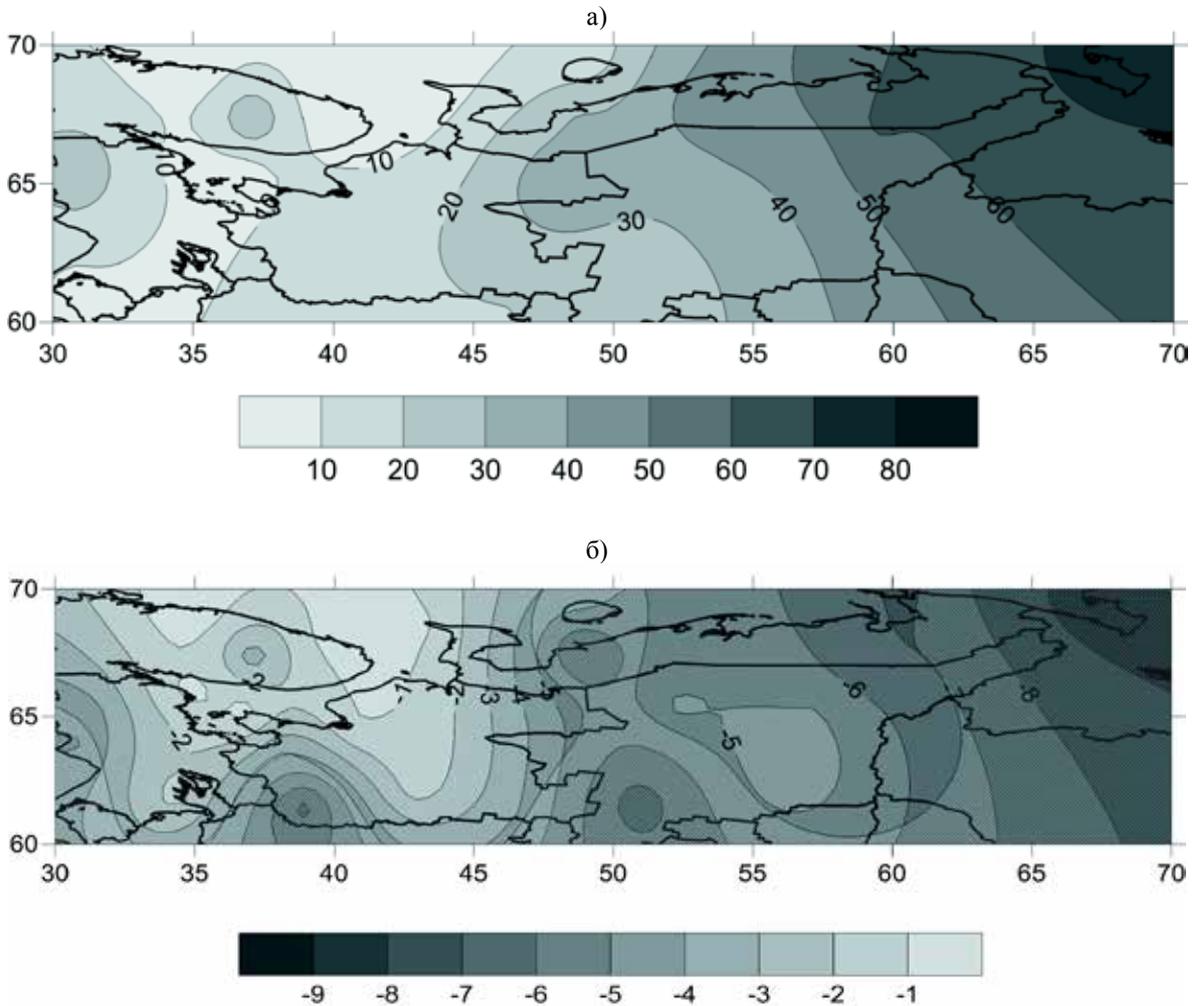


Рис.2 Средняя температура самой холодной пятидневки в 1951-2010 гг. (а) и ее изменение в 1981-2010 гг. по сравнению с 1951-1980 (б).

Влияние изменения климатических условий на функционирование автомобильного транспорта в данном регионе неоднозначно. С одной стороны, повышение температуры самой холодной пятидневки и сокращение числа дней с экстремально низкой температурой воздуха благоприятно сказывается на работе данной отрасли. С другой, наблюдаемый рост количества твердых осадков, в особенности снегопадов средней и большой интенсивности (число слабых осадков при этом, напротив, сокращается) негативно влияет на функционирование автотранспорта.

Temperature and precipitation extreme changes in Siberia

Shulgina T.M.,^{1,2,3} Gordov E.P.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Siberian Center for Environmental Research and Training, Tomsk, Russia

²Institute of Computational Technologies SB RAS, Tomsk Department, Tomsk, Russia

³Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: stm@scert.ru

Last decades studies of surface air temperature and precipitation in Siberia have shown increase of extreme events being consistent with a general warming. However, the most part of investigations are related to analysis of averaged statistics. This paper provides the results of daily temperature and precipitation extreme dynamics in Siberia for the time period from 1979 to 2012. Seasonal dynamics of climatic extremes has been studied in terms of 10th and 90th percentile-based threshold indices related to frequency and intensity of meteorological extreme events. To get geographical pattern of these variations with high spatial resolution the sub-daily temperature data from ECMWF ERA-Interim reanalysis and daily precipitation amounts from APHRODITE JMA dataset was used.

Obtained results show asymmetric behavior of daily temperature extremes according to determined tails of cold and warm temperature extremes distributions. The intensity of warming during cold nights is higher than those during warm nights, especially at high latitudes of Siberia. The similar dynamics is in case of cold and warm day-times. Changes in daily precipitation extremes are more spatial inhomogeneity, where even at short distances, positive and negative trends in extreme precipitation were found. The largest increase in frequency and intensity of heavy precipitations is observed in the north area of East Siberia.

Introduction

Ongoing global climate changes are manifested in atmospheric processes (IPCC, 2007). These processes changes are strongly pronounced over Siberian territory (Kabanov and Lykosov, 2006; Groisman and Guttman, 2012). Recent investigations indicate high temperature trends (more than 0.2 °C per decade; in some regions – up to 0.5 °C per decade) in the second half of the 20th century. Precipitation intensity increases in the northern part of Siberia. Statistically significant changes in climatic extremes also reported in (IPCC, 2012) and namely those have high social and economical impacts on regional level. However, the review of number of papers (such, Bulygina, 2007; Groisman et al., 2013 and etc.) have shown that describing of regional climate extremes dynamics are based on observational data mainly that significant limit capabilities for Siberia case study because of sparse and inhomogeneous observational station network.

In this paper Siberian daily temperature and precipitation extremes have been analyzed based on reanalysis data with high spatial resolution (3rd generation reanalysis). Our previous investigations dialed with comparison reanalyses data and station observations (Shulgina et al., 2011) have shown good agreement of ECMWF reanalysis data with observational one. The set of percentile-based threshold extreme indices defined by the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) (Klein Tank et al., 2009) has been analyzed. In particular, these indices describe the exceedance rates above or below a threshold which is defined as the 10th or 90th percentile derived from the 1961–1990 base period. The study of seasonal dynamics helps us to get the detailed picture of temperature and precipitation extremes behavior happen over the time period 1979 – 2012.

Methodology

The daily minimum and maximum temperatures (TN and TX, respectively) with spatial resolution of 0.75°×0.75° from ECMWF ERA Interim Reanalysis dataset (Dee et al., 2011) were analyzed over the time period 1979 – 2012. To study daily precipitation amounts APHRODITE JMA precipitation data (Kamiguchi et al., 2010) were used. This dataset provides daily precipitation fields calculated by interpolation of station observations and presented on 0.25°×0.25° spatial grid for the time period from 1951 to 2007.

Temporal changes in near surface temperatures during time period 1979 – 2012 in Siberia have been analyzed in terms of the number of days where TN or TX is below/above the 10th or the 90th percentile, respectively (TN10n and TX10n, TN90n and TX90n). Severity of observed TN and TX was studied in terms of temperature increments below/above the 10th or the 90th percentile (TN10p and TX10p, TN90p and TX90p, respectively). Seasonal precipitation dynamic was characterized by the number of days when daily precipitation is greater than the 95th percentile basic threshold. The percentile thresholds have been determined from data in the climatological basic period 1961 – 1990 and calculated using the following formula:

$$PREC = \frac{(100-p) \cdot y_k + p \cdot y_{k+1}}{100}, \text{ with } k = \text{int}\left(\frac{n \cdot p}{100}\right).$$

Here p is percentile, y_k and y_{k+1} are two neighboring positions within the series collected from values of basic period (1961-1990) sorted by ascending, n is the size of the sorted series. For temperature, the percentile thresholds are calculated from 5-day windows centered on each calendar day to account for the mean annual cycle (Klein Tank et al., 2009). Here to get these thresholds we used TN and TX from ECMWF ERA-40 Re-analysis dataset (Kallberg et al., 2007) which are available on $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ spatial grid. Good agreement of data from ERA-40 and ERA Interim are confirmed by number of investigations (Mooney et al., 2010, Dee et al., 2011, and etc.) and special comparison for these data sets for Siberian territory is not required. The index components were calculated directly from selected data and then adjusted to the same grid box of $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. For precipitation, the percentile thresholds are calculated from the sample of all wet days (PRC greater than 1 mm per day) in the period. These indices summarize various aspects of the distribution tails of daily variability of temperature and precipitation and help to assess moderate extremes that typically occur few times every year.

Temporal dynamics of these indices have been estimated using linear trend with 5% significance level. All extreme indices and linear trend coefficients have been calculated using web-GIS information-computational platform Climate (<http://climate.scert.ru/>) supporting collaborative multidisciplinary investigations of regional climatic changes and their impacts.

Results

Trends of minimum night temperature indicate that the intensity of warming of cold nights is higher than those during warm nights especially at Siberia high latitudes. Here over the last decades (1979 – 2012) the number of winter cold nights (TN10n, Fig.1.a) has increased on 10 days in average and intensity of this warming achieved 2.4°C . Whereas, at the same frequency of warming (Fig.2.a) as cold night warming, the growth rate of TN90p is slower and equals 0.9°C . The least changes in night minimum temperatures are detected during fall. The similar dynamics is in case of cold and warm day-times (TX10n/p and TX90n/p; geographical results are not presented in this paper). The trends calculated for winter indicate the increase of number of both cold and warm day-times on 6 – 9 days over the last 34 years, but intensity of this warming achieved 1.5°C in case of cold day-times and 0.7°C in case of warm-day times. Despite of the high latitude considerable warming, slight cooling was observed in the central part of Siberia during summer (associated with warm temperature extreme decrease, Fig.1-2.b) and in the south area of the region during winter (mostly out of cold temperature extremes).

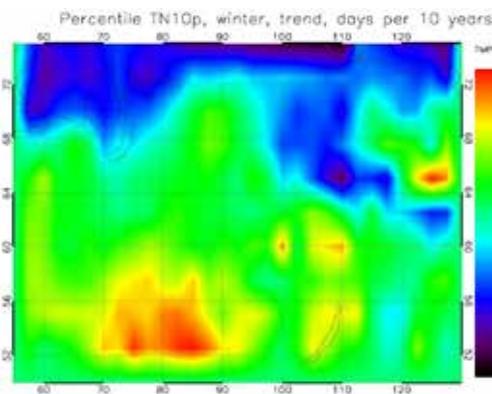


Fig.1.a. TN10n, DJF

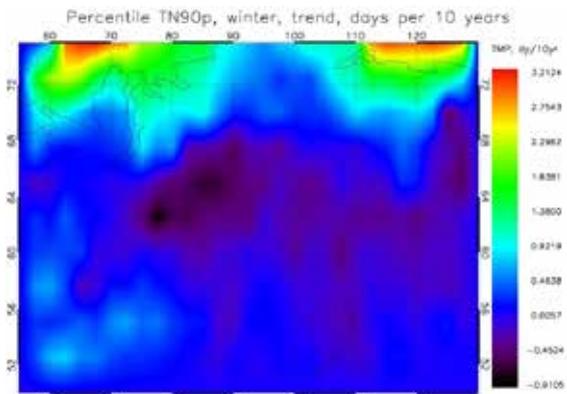


Fig.1.b. TN90n, DJF

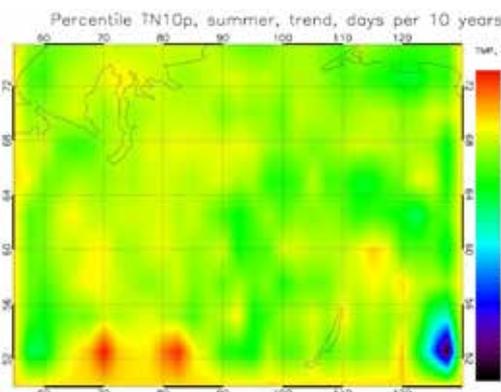


Fig.2.a. TN10n, JJA

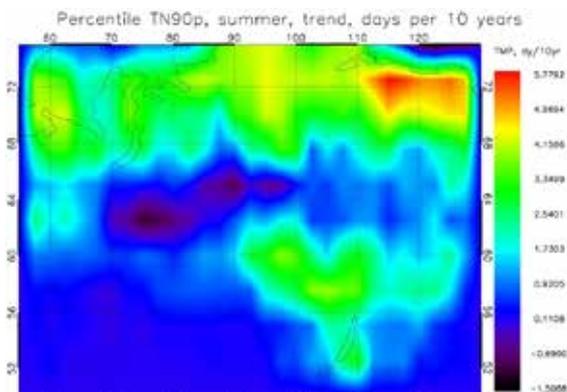


Fig.2.b. TN90n, JJA

Analysis results of precipitation dynamics for the time period 1979–2007 have shown that precipitation extremes (18.a-b) were spatially nonhomogeneous, where even at short distances, positive and negative trends in extreme precipitation were found. Dynamics of number of wet days during winter (fig. 18.a) was insignificant in comparison with changes in summer precipitation extremes (fig.18.b). Substantial increase in summer very wet days was observed over the East Siberia, particularly in middle and high latitudes where trends achieved 2 days per decade. Reduction in the number of wet days was indicated over the West Siberia (about 1 day per decade).

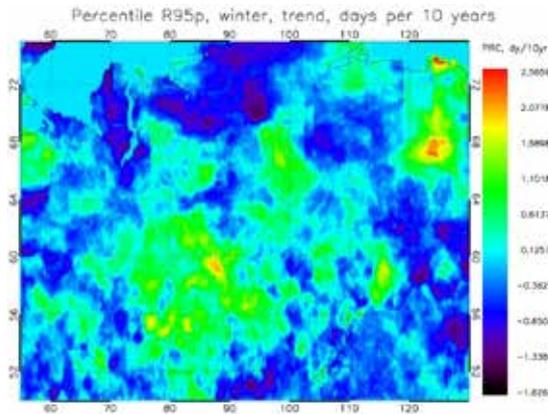


Fig. 18.a. Trends (days per decade, shown as maps) of number of wet days during winter. 1979-2007. APHRODITE JMA data.

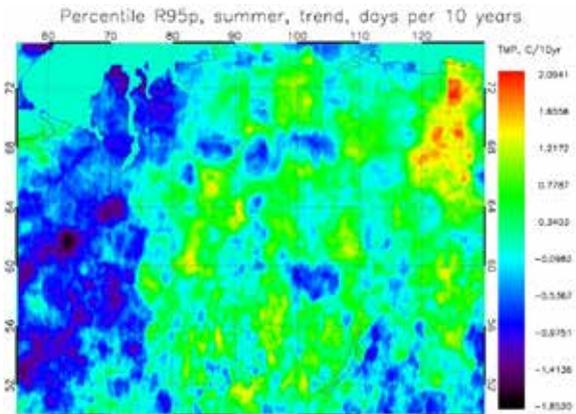


Fig. 18.b. Trends (days per decade, shown as maps) of number of wet days during summer. 1979-2007. APHRODITE JMA data.

Conclusion

Performed analysis of climatic indices has found geographical areas with significant changes in temperature and precipitation extremes and determined seasonal features of observed changes. Changes in the minimum temperatures are more significant than changes in the maximum temperatures. The decrease of number of cold nights is faster than increase of the number of warm day-times. The intensity has the similar dynamics. Thus, the results obtained for seasonal dynamics of daily temperature extremes show asymmetric warming according to determined tails of cold and warm temperature extremes distributions. Changes in daily precipitation amount indicate that spatial inhomogeneity of precipitation extremes is higher than for the temperature extremes. In particular, statistically significant increases of the number of heavy precipitation days are observed in more areas of Siberia than those with statistically significant decreases. The largest increase in frequency and intensity of heavy precipitations is observed in the north area of East Siberia, negative trends - in the central area of Western Siberia and south of East Siberia.

Comparison of obtained results with the results of other investigations (Bulygina et al., 2007, Shvidenko et al., 2012; Groisman et al., 2013) has shown a good agreement. However, on the next stage of study we plan to compare temperature and precipitation extremes behavior based on observational and global and regional modeling data more thoroughly.

Acknowledgements

The authors acknowledge partial financial support for this research from the Russian Foundation for Basic Research projects (11-05-01190a, 13-05-12034), Integration project 131, SB RAS project VIII.80.2.1., the Ministry of Education and Science of the Russian Federation contract (№ 8345) and grant of President of Russian Federation (decree № 181).

References:

1. Kabanov M.V., Lykosov V.N. *Monitoring and modeling of climatic changes in Siberia // Atmospheric and Oceanic Optics. 2006. V. 19, No.09. P. 675-685.*
2. Groisman P.Ya., Gutman G. *Environmental Changes in Siberia: Regional Changes and their Global Consequences / Springer, 2012. – 357 p.*
3. IPCC 2012, SREX: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field C.B. et al. (eds.)]. – Cambridge University Press: Cambridge, UK, and New York, NY, USA. – 2012. – 582 pp.*
4. Bulygina O. N. et al. *Climate variations and changes in extreme climate events in Russia // Environ. Res. Lett. – 2007. V. 2. – 045020 (7pp).*

5. Groisman P.Y., Knight R.W., Zolina O.G. *Recent Trends in Regional and Global Intense Precipitation Patterns // Climate Vulnerability*. – ELSEVIER published. – 2013. – 30 p. [in preparation]
6. Shulgina T.M. et al. *Dynamics of climatic characteristics influencing vegetation in Siberia // Environmental Research Letters*. – 2011. – V.6. – 045210 (7pp). doi:10.1088/1748-9326/6/4/045210.
7. Klein Tank A.M.G. et al. *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation / World Meteorological Organization, Observing and Information Systems Department*. – 2009. – 52p.
8. Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., et al. *The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2011. – Vol. 137. – P. 553–597.
9. Kamiguchi K., Arakawa O., Kitoh A., et al. *Development of APHRO_JP, the first Japanese high-resolution daily precipitation product for more than 100 years. // Hydrological Research Letters*. – 2010. – V.4. – 60–64.
10. Kallberg P., Simmons A., Uppala S., Fuentes M. *ERA-40 Project Report Series. The ERA-40 Archive / Report of European Centre for Medium Range Weather Forecasts*. – England, 2007.
11. Mooney, P.A., F. J. Mulligan, and R. Fealy, 2010: *Comparison of ERA-40, ERA-Interim and NCEP/NCAR reanalysis data with observed surface air temperatures over Ireland. Int. J. Clim.*, 31, 487–632, DOI: 10.1002/joc.2098.
12. Shvidenko A.Z., Gustafson E., McGuire A.D. et al. *Terrestrial Ecosystems and Their Change / Chapter 6 in: Environmental Changes in Siberia: Regional Changes and their Global Consequences / Springer, 2012. – pp. 171 – 250.*

Seasonal variations of CO and NO_x near-surface concentrations in central Siberia: observations and model simulations

Shtabkin Y.A., Moiseenko K.B.

A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia
E-mail: yuryshabkin@gmail.com, konst.dvina@mail.ru

Over the recent decades, changes in air composition have been observed not only near industrial centres, but also in faraway from big towns regions. Air quality monitoring is carried by global observation stations system, but it doesn't work in most of Russian territory. Observational station ZOTTO (Zotino Tall Tower, 60,26 N., 89,24 E, central Siberia) partly improves this situation.

This paper presents the results of analysis of long-term observation of CO and NO_x near-surface concentrations on ZOTTO station. We use chemical-transport model GEOS-Chem to estimate the impact of anthropogenic and fire emissions from Western Europe and different regions of Russia to background near-surface air composition in central Siberia. We calculate the average, maximum and minimum values of the response to emissions of CO and NO_x. According to the results, the primary impact on surface NO_x concentration has industrial cities of southern Siberia, while their impact on the CO concentration is found to be moderate, most likely due to the long atmospheric lifetime of CO. During the cold period CO concentration in the surface layer is largely driven by the influence of air transfer from Western Europe and the south of European Russia. During the warm period it is usually affected by the air transport from eastern regions, where the main contribution to emissions gives wildfires. These results indicate a significant contribution of both natural and anthropogenic sources of pollution, and also air transport from Western Europe and European part of Russia to background near-surface air composition near ZOTTO station. It is important for analysis of further observations and for better understanding of the influence of various natural and anthropogenic factors on air composition in the boreal zone of Siberia.

Сезонные вариации приземных концентраций CO и NOx в центральной Сибири: наблюдения и численное моделирование

Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б.

Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия
E-mail: yuryshabkin@gmail.com, konst.dvina@mail.ru

1. Введение

Исследования состава нижней атмосферы, и особенно приземного слоя воздуха, занимают отдельное место в химии атмосферы, поскольку именно этот слой непосредственно связан с планетарными биологическими процессами и именно в нём сосредоточены наиболее важные природные и антропогенные источники малых атмосферных газов. Наблюдения долговременных вариаций состава приземного воздуха осуществляется с использованием мировой сети станций фоновое комплексного мониторинга, не охватывающих, к сожалению, территорию Российской Федерации; осуществляемые наблюдательные кампании носят эпизодический и ограниченный характер, что сильно затрудняет регионализацию получаемых результатов и их научное обобщение. Отсутствие данных систематических наблюдений значительно затрудняет проведение количественных оценок факторов (природных и антропогенных), определяющих региональный баланс химически активных и парниковых газов, в связи с наблюдаемыми региональными климатическими изменениями и долговременными вариациями экосистем, включая не только индустриальные районы, но и удаленные регионы севера и северо-востока континента.

Частично данный пробел восполняется долговременными наблюдениями на фоновой станции атмосферного мониторинга (высотной мачте) ZOTTO (60.80 с.ш., 89.35 в.д., 300 м н.у.м.), введённой в эксплуатацию в начале 2007 г. Проект ZOTTO осуществляется при партнёрском участии научных коллективов из Института леса им. В.Н. Сукачева РАН (Красноярск), Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (Москва), Института биогеохимии Макса Планка (Йена, Германия) и др. Станция расположена примерно в 600 км к северу от Красноярска в 20 км к западу от реки Енисей в зоне бореальных лесов центральной Сибири. Основной тип растительности — хвойные леса со значительными площадями болот. Фоновый характер станции определяется её удаленностью от климатически значимых антропогенных источников атмосферного загрязнения, что, вместе с достаточной однородностью экосистем и топографии, позволяет обобщать наблюдения на обширный район центральной Сибири в целом [4, 6].

Одной из задач наблюдений, проводимых на станции ZOTTO, является исследование влияния регионального и дальнего переноса от климатически значимых естественных и антропогенных источников эмиссий на химический состав воздуха. Так как интенсивность природных источников окислов азота на единицу площади значительно меньше, чем антропогенных, высокие концентрации NOx можно с достаточной надёжностью использовать в качестве индикатора воздушной массы, за некоторое время (1 – 2 дня) до измерения находившейся под воздействием значительных источников загрязнений. Регулярные наблюдения аномально высоких концентраций NOx при низкой относительной доли NO позволяют предположить, что станция может попадать под влияние удаленных источников, связанных с промышленными городами и юга Сибири [6], что также подтверждается данными многолетних экспедиций TROICA [2].

В отличие от окислов азота, CO выбрасывается в атмосферу как антропогенными (при сгорании ископаемого топлива), так и природными источниками, важнейшими из которых являются природные пожары. Значительное время жизни CO в атмосфере, составляющее от полутора недель летом до года зимой [3], определяет его более сложное поведение как индикатора атмосферного переноса, в частности – более однородное распределение в атмосфере, преобладание сезонной изменчивости над синоптической, а также значительное влияние дальнего переноса на его распределение в атмосфере.

Целью данной работы является обобщение и анализ данных многолетних (2007 - 2011) наблюдений приземных концентраций CO и NOx на станции ZOTTO, а также оценка влияния антропогенных выбросов и эмиссий от горения биомассы в западной Европе и различных регионах России на фоновый состав приземного воздуха в центральной Сибири на основе численного моделирования с помощью химико-транспортной модели GEOS-Chem.

2. Источники данных

2.1. Модель GEOS-Chem

Для проведения численных экспериментов в данной работе использовалась химико-транспортная модель GEOS-Chem версии 9-01-03. GEOS-Chem — глобальная трехмерная модель состава атмос-

феры призванная ассимилировать метеорологические наблюдения Goddard Earth Observing System (GEOS, система наблюдений состояния Земли) of the NASA Global Modeling Assimilation Office (GMAO, управление ассимиляции данных глобального моделирования). Общее описание дано [1]. Мы использовали метеорологические данные GEOS-5, имеющие горизонтальное разрешение 4x5 и 47 уровней по вертикали. Для расчетов использовались антропогенные эмиссии из базы данных EDGAR 3.2 (The Emissions Database for Global Atmospheric Research, база данных эмиссий для глобальных атмосферных исследований), эмиссии от природных пожаров брались из базы данных GFED3 (Global Fire Data, глобальные данные о пожарах). При расчете влияния, которое оказывает отдельно взятый регион (см. Рис.1) эмиссии для этого региона занулялись. Атмосферный отклик рассчитывался как разность между результатами полного и текущего расчетов.

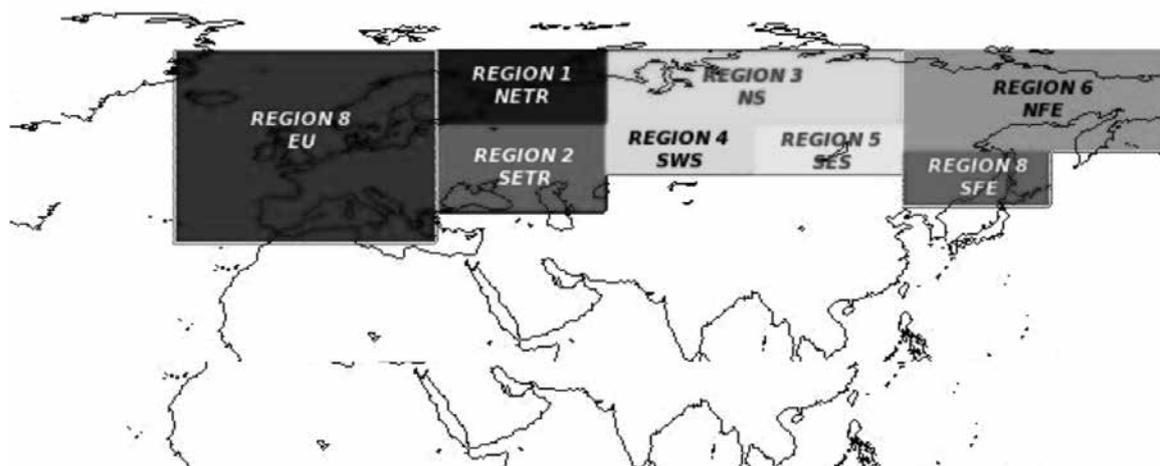


Рис. 1. Географические районы

NETR – север ЕТР (60–75 N, 27–60 E), SETR – юг и средняя полоса ЕТР (41–60 N, 27–60 E), NS – север Сибири (60–75 N, 60–120 E), SWS – юг Западной Сибири (49–60 N, 60–90 E), SES – юг Восточной Сибири (49–60 N, 90–120 E), NFE – север Дальнего Востока (54–75 N, 120–180 E), SFE – юг Дальнего Востока (42–54 N, 120–150 E), EU – Западная Европа (35–75 N, -20–27 E).

2.2. Наблюдения

Наблюдения состава атмосферы на станции ZOTTO осуществляются в непрерывном режиме с помощью автоматизированных приборных комплексов, установленных на 300 м высотной мачте, начиная с 2007 г., и включают измерения приземных концентраций окислов азота (NO, NO₂) и озона (O₃) на высоте 4 м над землей, а также измерения концентраций монооксида углерода (CO), метана (CH₄) и углекислого газа (CO₂) на высотах 50 и 300 м. Измерения приземных концентраций NO и NO₂ выполняются с помощью газоанализатора типа TE42C-TL производства Termo Electron Corporation, в диапазоне концентраций от 0,05 до 400 частиц на миллиард (ppb) с общей погрешностью 1%. Время измерения единичного отсчета концентрации составляет 1 мин. Измерения проводятся в непрерывном режиме с марта 2007 г. по настоящее время, с ежегодными перерывами на несколько месяцев в весенний период, связанными с калибровкой приборов.

Измерения концентраций CO в приземном воздухе на высотах 50 и 300 м осуществлялись с января 2007 г. по май 2008 г. (с перерывами, вызванными техническими и организационными сложностями) с помощью прибора AeroLaser AL5002, в непрерывном режиме с частотой измерений 3 секунды. Калибровка прибора выполнялась на основе стандарта CO, предоставленного компанией Scott-Marrin Inc. (USA) [5].

3. Результаты

В работе использовались данные наблюдений NO_x за период с 15.03.2007 по 31.12.2011. На основе этих рядов были рассчитаны средние трехчасовые концентрации за весь период наблюдений, при этом из исходного ряда были удалены значения меньше порога обнаружения прибора (0.05 ppb) и кратковременные (несколько минут) аномальные скачки приземной концентрации NO_x, достигавшие нескольких десятков ppb при обычных значениях 0.5–1.0 ppb. После этого по данным получившегося ряда были рассчитаны среднемесячные значения и проведено сравнение получившихся данных с результатами численного моделирования (Рис. 2).

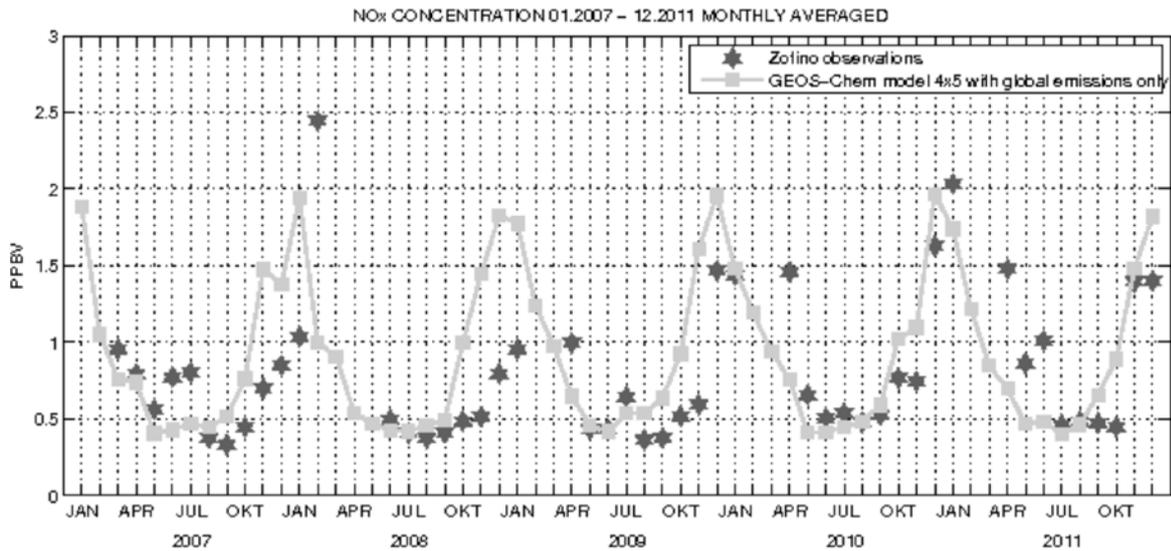


Рис. 2. Сравнение результатов численного моделирования NO_x с данными наблюдений ZOTTO

Также использовались данные наблюдений CO за 2007 — 2008 годы. На основании этих рядов данных были рассчитаны сначала среднесуточные, а потом и среднемесячные значения. Было проведено сравнение получившихся среднемесячных значений с данными численного моделирования (Рис. 3).

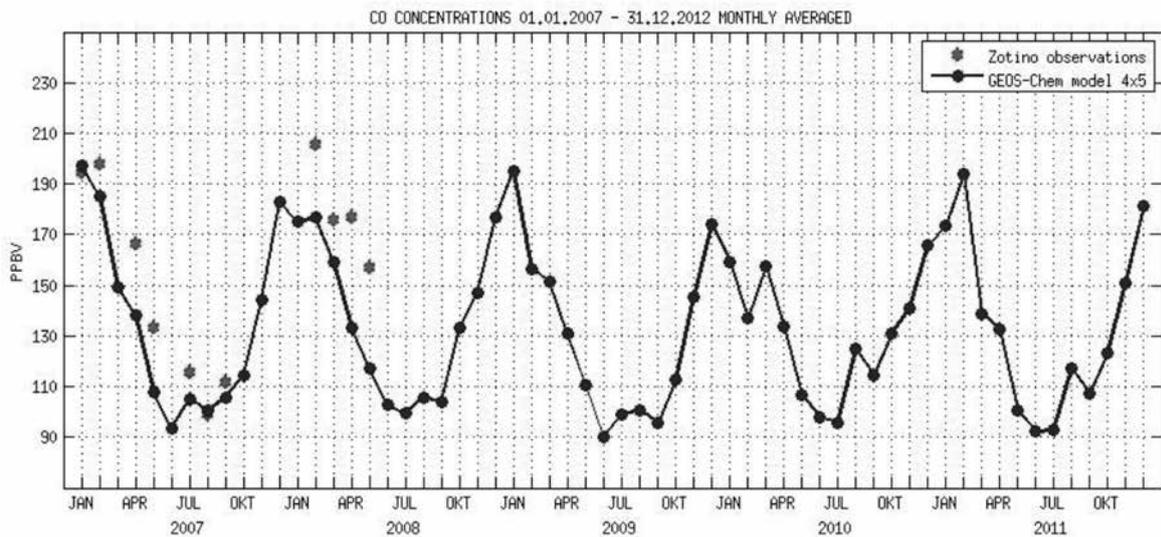


Рис. 3. Сравнение результатов численного моделирования CO с данными наблюдений ZOTTO

Помимо этого, по данным модели был рассчитан атмосферный отклик на эмиссии NO_x от различных регионов. Полученные значения представлены на рисунке 4.

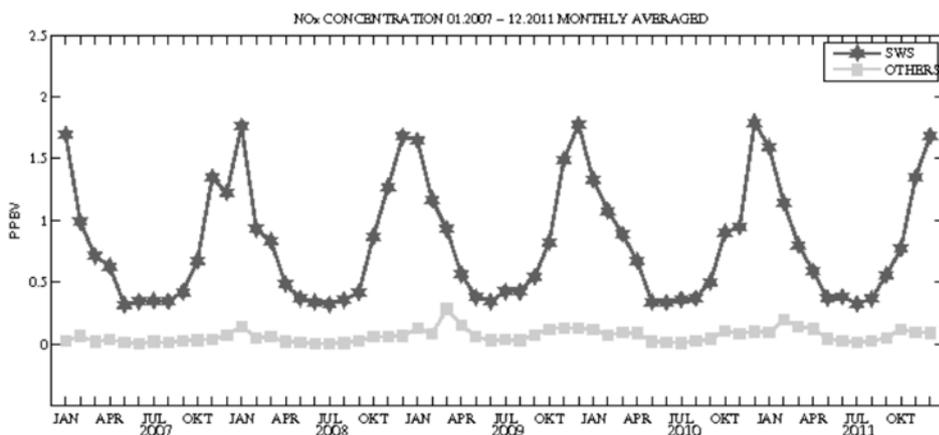


Рис. 4. Атмосферный отклик на эмиссии NO_x от различных регионов

Полученные данные позволяют утверждать, что основной вклад в приземное содержание NO_x вносят промышленные центры юго-западной Сибири, в то время как вклад всех остальных регионов мал. Аналогичные расчеты были сделаны и для CO (см. Рис. 5).

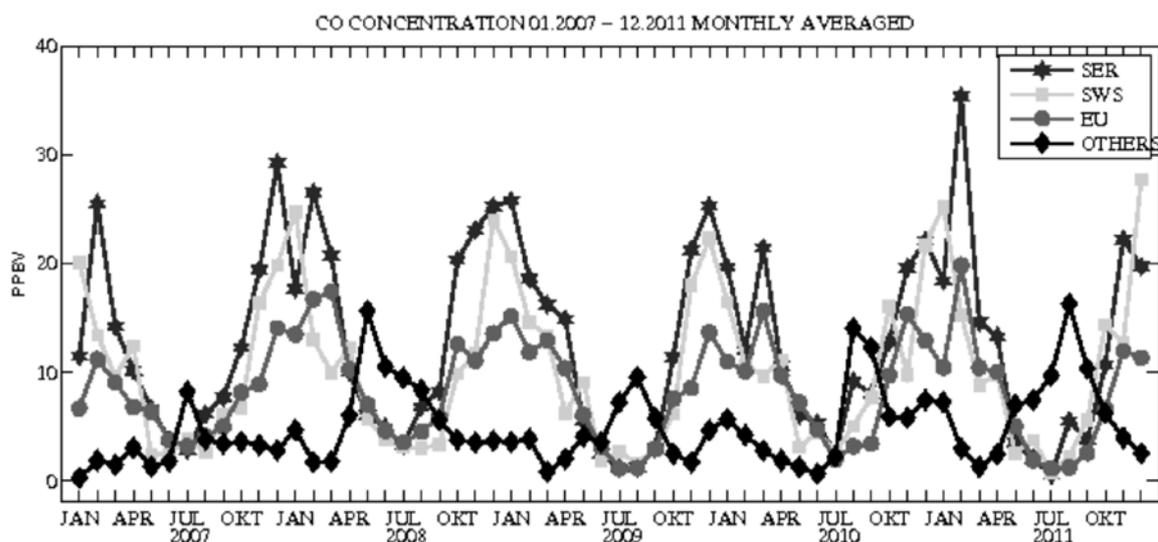


Рис. 5. Атмосферный отклик на эмиссии CO от различных регионов

Исходя из этих результатов, можно сделать вывод, что приземное содержание CO в холодный период в значительной степени обусловлено влиянием процессов переноса воздушных масс не только с юга Сибири, но и из Западной Европы, а также юга Европейской территории России. В теплый период более существенное влияние оказывает перенос воздуха из восточных регионов, где основной вклад в эмиссии дают природные пожары.

4. Заключение

Антропогенные выбросы и эмиссии от природных пожаров оказывают заметное влияние на фоновый состав приземного воздуха даже на значительном удалении от их источника. Полученные в данной работе результаты свидетельствуют о значительном влиянии не только региональных естественных и антропогенных источников загрязнений, но и процессов переноса из Европейской территории России и даже Западной Европы на фоновый состав приземного воздуха в Центральной Сибири и необходимости учета данного фактора для лучшего понимания результатов при анализе дальнейших наблюдений на фоновой станции Зотино.

Литература:

1. Bey, I. et al. *Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation*, *J. Geophys. Res.*, vol. 106, no. d19, pages 23,073 - 23,095, October 16, 2001
2. Elansky, N.F. *Spatial and temporal variations of trace gases surface concentrations over Russia from TROICA observations*, *Proceedings of the International Symposium on Atmospheric Physics and Chemistry*, May 15 - 19, 2007
3. Holloway, T. et al. *Global distribution of carbon monoxide*, *J. Geophys. Res.*, vol. 105, no. d10, pages 12,123 - 12,147, May 27, 2000
4. Kozlova, E. A. et al. *Methodology and calibration for continuous measurements of biogeochemical trace gas and O₂ concentrations from a 300-m tall tower in central Siberia*, *Atmos. Meas. Tech.*, 2, 205-220, 2009
5. Mayer et al., 2009, *Long-Term Measurements of Carbon Monoxide and Aerosols at the ZOTTO tall tower, Siberia*, *Eos Trans. AGU*, 90(52), Fall Meet. Suppl., Abstract GC31A-0686.
6. Вивچار, А.В. и др. *Идентификация антропогенных источников эмиссий окислов азота по расчетам Лагранжевых траекторий и данным наблюдений на высотной мачте в Сибири весной - летом 2007 года*, *Изв. РАН, Физика Атмосферы и Океана*, т. 45(3), с. 325 - 336, 2009

Modeling carbon dioxide emissions dynamics from the West Siberia southern taiga bogs

¹Guzova E.N., ²Zavalishin N.N.

¹Siberian Research Institute of Agriculture and Peat RAAS, Tomsk, Russia

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

E-mail: lichtgestalte@mail.ru, nickolos@ifaran.ru

Web: <http://sibniit.tomsknet.ru>, <http://www.ifaran.ru>

Paper dealt with the test of simulation Wetland-DNDC applicability biogeochemical cycles in Western Siberia by various environmental factors. We have the good agreement between the results of modeling and dynamics data of field observations of emission from the surface of carbon emissions low pine-shrub phytocoenosis and sedge-sphagnum bog. Model generally overestimate emissions compared with observations. Although the nature of its seasonal dynamics is calculated correctly. Analysis of the estimated net ecosystem production (NEE) indicates incomplete adequacy Wetland-DNDC model and methane emissions modeling gives not adequate results for the southern taiga of Western Siberia. It is definite by wrongly implemented algorithm play snow accumulation and melting in the model. Its correction can improve the predictive properties of the model complex. From the point of view of modeling the likely reaction swamps of climate change on the range of tens to hundreds of years, this model is of limited value, since by its nature does not provide simulation capabilities to assess the sustainability of modern states of wetland ecosystems, to formulate criteria for violations of its losses and gain a picture of the transition from one steady state of the other. Its necessary to combine the model of biotic turnover and processes gas, heat and moisture in the peat deposit on a seasonal or annual time scale to implement this goal.

Моделирование динамики эмиссии парниковых газов с верховых болот южной тайги Западной Сибири

¹Гузова Е.Н., ²Завалишин Н.Н.

¹Сибирский Научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа Россельхозакадемии, Томск, Россия

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

E-mail: lichtgestalte@mail.ru, nickolos@ifaran.ru

Web: <http://sibniit.tomsknet.ru>, <http://www.ifaran.ru>

На основе наблюдений за составляющими углеродного баланса в сочетании с моделированием можно оценить эволюцию экосистем при внешних возмущениях. Такая оценка особенно актуальна для торфяных болот бореальной зоны, которые оказывают существенное, но неоднозначное влияние на газовый состав атмосферы. Обладая уникальной способностью долговременного изъятия углекислого газа из атмосферы путем связывания углерода в торфе, они одновременно являются одним из ключевых источников метана, который сильно влияет на фотохимию атмосферы и климат. Поэтому реакция болот на климатические изменения и хозяйственные воздействия обусловлена как биологическим круговоротом, включающим микробную деструкцию мертвого органического вещества и гетеротрофное дыхание, так и процессами генерации, транспорта и поглощения метана в торфяных слоях. Итоговая эмиссия углеродсодержащих газов с болотной поверхности является продуктом сложных биохимических взаимодействий и зависит от типа экосистемы. Поэтому в ходе работы объединены экспериментальные данные СибНИИСХиТ Россельхозакадемии и математические модели ИФА РАН для ее адекватной оценки и прогноза.

Объектом исследования является участок нативного олиготрофного болота в пределах водосборной площади р. Ключ в Бакчарском районе Томской области. Исследуемая территория включает следующие виды биогеоценозов: сосново-кустарничково-сфагновый (высокий рям), сосново-кустарничково-сфагновый с угнетенным древостоем (низкий рям) и открытую осоково-сфагновую топь. Мощность торфяной залежи от периферии болота к центру изменяется от 0,9 м до 3 м.

Имитационная математическая модель Wetland-DNDC состоит из гидрологического блока, считающего эвапотранспирацию растительного покрова и почвы, поверхностный и глубинный сток, уровень болотных вод, блока наземной растительности, в котором рассчитываются основные потоки

углерода, азота и влаги, составляющие биологический круговорот для древесного, кустарникового ярусов, осок и мохового покрова, а также блока биогеохимических циклов в почве, в котором сосредоточены алгоритмы расчета процессов разложения органических остатков, метаногенеза, нитрификации, ферментации и денитрификации, формирующих эмиссионные потоки CO_2 , CH_4 , N_2O , NO и NO_2 [1]. Эта модель позволяет достаточно реалистично рассчитывать продуктивность растительного покрова, изменение содержания углерода в основных пулах экосистемы, эмиссионные потоки парниковых газов под действием вариаций естественных факторов и сценариев антропогенных воздействий (рубки, пожары, дренаж, удобрения, лесопосадки) [2]. Wetland-DNDC представляет собой модель процессного типа, которая вычисляет потоки углерода, азота и влаги в экосистеме согласно массо-балансовым или эмпирическим функциональным зависимостям.

На основе подготовленных данных и установленных коэффициентов с помощью программного комплекса модели Wetland-DNDC [3] проведено имитационное моделирование всех величин, вычисляемых моделью, для периода 2006-2011 г.г. на суточном масштабе времени на трех биогеоценозах верхового болота. Особое внимание уделялось эмиссии углекислого газа, состоящей из дыхания корней растений, гетеротрофного (почвенного) дыхания и разложения мертвого органического вещества [4], поскольку экспедиционные измерения позволяют сравнить реальную эмиссию с результатами моделирования. На рис. 1 показана динамика эмиссии CO_2 с поверхности высокого рьяма в сравнении с данными наблюдений. Видно, что модель в среднем завышает эмиссию по сравнению с реальной, хотя корреляция наблюдений с точками модельных траекторий высока. При сравнении с сезонным ходом климатических характеристик видно, что величины эмиссии в целом соответствуют уровню болотных вод, но тесной связи между ними нет, что указывает на зависимость эмиссии CO_2 от других природных факторов.

Более тесное соответствие модели и данных наблюдений отмечается для низкого рьяма и осоково-сфагнуовой топи, что может объясняться более точным соответствием реальной и модельной величин подземной фитомассы в этих экосистемах, чем для высокого рьяма. Пиковые модельные значения эмиссии для 2011 г. в низком рьяме прекрасно согласуются с данными наблюдений (рис. 2).

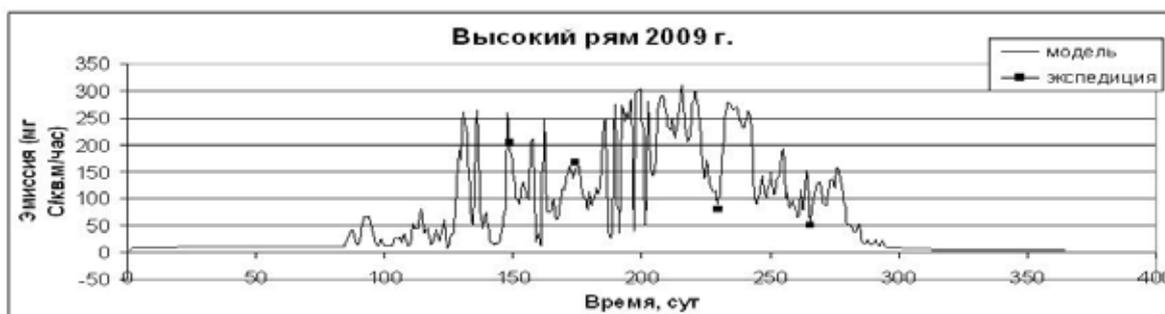


Рис. 1. Динамика эмиссии CO_2 с поверхности высокого рьяма за 2009 г.



Рис. 2. Динамика эмиссии CO_2 с поверхности низкого рьяма за 2009 г.

Наилучшее соответствие модели и наблюдений отмечается в случае осоково-сфагнуовой топи, в которой отсутствует древесный ярус растительности (рис. 3). Этот результат свидетельствует в пользу применимости модели Wetland-DNDC и к травяным болотам лесной зоны.



Рис. 3. Динамика эмиссии CO_2 с поверхности осоково-сфагнуовой топи за 2009 г.

Чистая экосистемная продукция (NEE – Net Ecosystem Exchange) характеризует углеродный бюджет экосистемы и равна разности между полным фотосинтезом и суммой автотрофного и гетеротрофного дыхания $NEE = GPP - R_a - R_g = NPP - R_g$ [5]. В модели Wetland-DNDC величина NEE существенно зависит от параметризации чистой первичной продукции и почвенного дыхания R_g через климатические параметры и уровень болотных вод. Внутрисезонная динамика NEE изменчива и тесно связана с уровнем болотных вод, определяющим толщину анаэробной зоны, температурой торфяной почвы, микробиологической активностью. На рис. 4 показаны результаты модельного расчета чистой экосистемной продукции экосистемы высокого яра за период 2009-2011. Для этого участка характеризуется величина NEE меньше нуля в течение вегетационных сезонов, откуда следует, что экосистема является источником CO_2 – совокупное дыхание превалирует над фотосинтезом. Вероятно, это объясняется низким УБВ (аэробная зона велика, и интенсивность разложения растительных остатков в ней высокая). Для низкого яра и осоково-сфагнуовой топи ситуация противоположна: $NEE > 0$ почти на всех вегетационных периодах, и обе экосистемы являются поглотителями углекислоты.

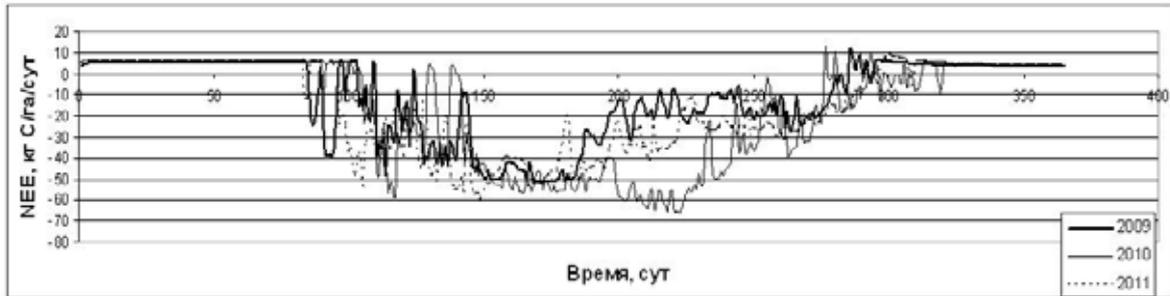


Рис. 4. Чистая экосистемная продукция (NEE) высокого яра за 2009-2011 гг.

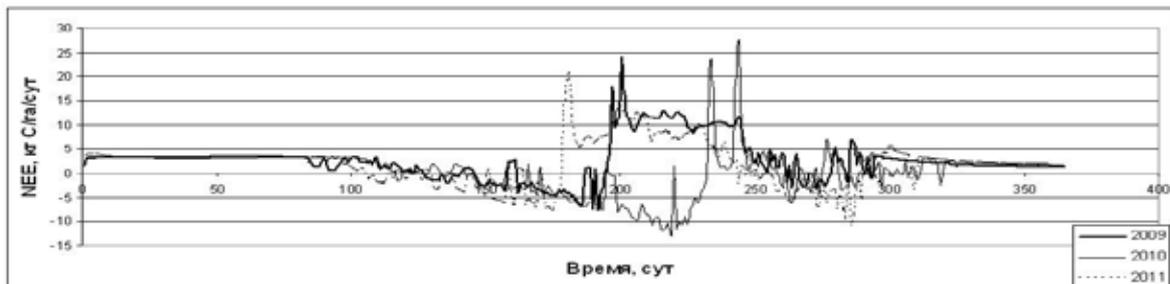


Рис. 5. Динамика чистой экосистемной продукции (NEE) экосистемы низкого яра за 2009-2011 гг.

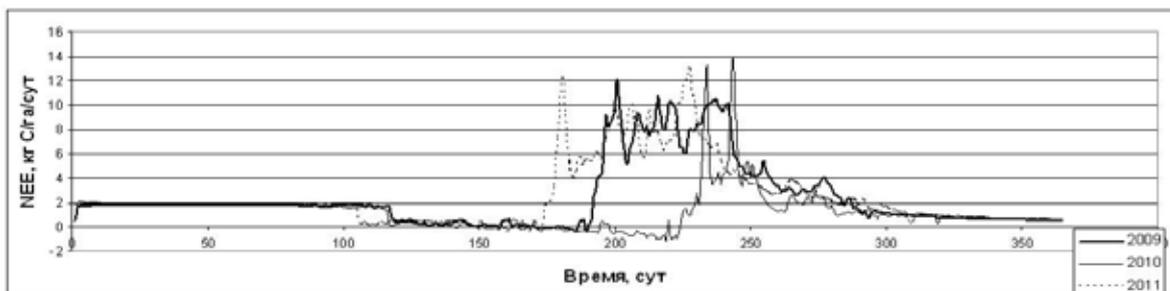


Рис. 6. Динамика чистой экосистемной продукции (NEE) осоково-сфагнуовой топи за 2009-2011 гг.

Являясь более сильным парниковым газом по сравнению с углекислотой, метан образуется в анаэробной зоне торфяной залежи как продукт частичного разложения мертвого органического вещества микроорганизмами и бактериями-метаногенами, поднимается к поверхности, отчасти окисляясь до углекислоты в результате потребления микроорганизмами-метанотрофами. Эта совокупность сложных процессов метаногенеза, транспорта и потребления метана отражена в модели Wetland-DNDC, хотя и скрыта от пользователя внутри программного кода. С помощью модели рассчитаны сезонная динамика эмиссии метана из торфяных залежей трех типов верховых болот южной тайги Западной Сибири и оценки суммарной годовой эмиссии за период 2006-2011 гг. Модельная межгодовая динамика выделения метана в трех видах верховых болот характеризуется сильной изменчивостью – наибольший поток отличается от наименьшего более, чем в 10 раз. Причина этого, по-видимому, также состоит в несовершенстве блока модели Wetland-DNDC, отвечающего за снеготаяние и зимнее снегонакопление во внутриконтинентальных районах. В связи с этим затруднительно использовать данную модель для оценки эмиссии метана из болот при изменении климата, поскольку из-за невозможности управления параметрами

трами снегонакопления невозможно верифицировать модель в части, имитирующей поток метана из торфяной толщи в атмосферу.

В результате работы проверена применимость имитационной модели Wetland-DNDC к моделированию динамики биогеохимических циклов в болотных экосистемах южной тайги Западной Сибири под действием различных природных факторов. Получено хорошее согласование результатов моделирования с данными натурных наблюдений за эмиссией углеродсодержащих газов с поверхности низкого рья и осоково-сфагнутой топи. Для высокого рья модель в целом завышает оценку эмиссии по сравнению с наблюдениями, хотя характер ее сезонной динамики рассчитывается верно. Анализ расчетной чистой экосистемной продукции (NEE) показывает неполную адекватность модели Wetland-DNDC в смысле отражения наземной части биотического круговорота, а моделирование эмиссии метана дает результат, не адекватный для южной тайги Западной Сибири в силу ошибочно реализованного алгоритма воспроизведения снегонакопления и снеготаяния в этой модели. Его исправление может улучшить прогностические свойства модельного комплекса. С точки зрения моделирования реакции болот на вероятные изменения климата на интервале десятков-сотен лет данная модель имеет ограниченную ценность, поскольку в силу своего имитационного характера не дает возможности оценить устойчивость современных состояний болотных экосистем, сформулировать критерии ее потери при нарушениях и получить возможную картину смены одного устойчивого состояния другим. Для осуществления такой цели необходимо объединить модели биотического круговорота и процессов газо-, тепло- и влагообмена в торфяной залежи на сезонном или годовом масштабе времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ мол_рф_нр № 12-05-90815

Литература:

1. Cui J., Li C., Trettin C., *Analyzing the ecosystem carbon and hydrologic characteristics of forested wetland using a biogeochemical process model.* // *Global Change Biology*, 2005, v. 11, pp. 278-289.
2. Li C., Cui J., Sun G., Trettin C., *Modelling impacts of management on carbon sequestration and trace gas emissions in forested wetland ecosystems.* // *Environmental Management*, 2004, v. 33, suppl. 1, pp. S176-S186.
3. <http://www.dndc.sr.unh.edu/>
4. Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Инполитов И.И., Кабанов М.В., *Влияние ландшафтных и гидрометеорологических условий на эмиссию CO₂ в торфоболотных экосистемах.* // *Доклады РАН*, т. 418, 2008, № 4, с. 539-542.
5. Kurbatova J., Li C., Varlagin A., Xiao X., Vygodskaya N., *Modeling carbon dynamics in two adjacent spruce forests with different soil conditions in Russia.* // *Biogeosciences*, 2008, v. 5, pp. 969-980.

Influence of anthropogenic climate forcing on some storm track characteristics in the Northern Hemisphere

^{1,2,4}Martynova Yu.V., ^{1,3,4}Krupchatnikov V.N.

¹ Siberian Regional Hydrometeorological Research Institute, Novosibirsk, Russia

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

³ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

⁴ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: FoxyJ13@gmail.com

The study of the storm track behavior under increasing and further decreasing anthropogenic load is presented. For our study we used global large scale climate system model of intermediate complexity. The climatic scenario RCP 8.5 was used as a scenario of anthropogenic load. We considered dynamics of the seasonal mean (winter – December, January, February; summer – June, July, August) v-variance at 250 mb ($\langle v^2 \rangle$) at 250 mb as an indicator of the storm tracks activity and eddy momentum flux at 250 mb ($\langle u^2 v \rangle$) at 250 mb as an indicator of eddy kinetic energy behavior.

The study showed that areas of maximal storm track activity shift in the meridional direction to high latitude simultaneously with the atmospheric CO₂ concentration increase and shift back with further CO₂ concentration decrease. But the amplitude of the storm track activity doesn't change back to preindustrial value with the CO₂ concentration decrease. Thus the amplitude of the storm track activity exhibits weak hysteresis effect.

This work is partially supported by the Ministry of education and science of the Russian Federation (contract #8345), SB RAS project VIII.80.2.1, RFBR grants #11-05-01190a, 13-05-00480, 13-05-12034, and integrated project SB RAS #131.

Влияние климатических возмущений антропогенного происхождения на некоторые характеристики шторм-треков Северного полушария

^{1,2,4}Мартынова Ю.В., ^{1,3,4}Крупчатников В.Н.

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

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

³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁴ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: FoxyJ13@gmail.com

Введение

В последнее время наблюдается увеличение глобальной высоты тропопавзы, которое тесно связано с систематическим изменением температуры ниже и выше тропопавзы: температура воздуха в тропосфере повышается, а в стратосфере — понижается. Эти температурные изменения оказывают значительное влияние на зональную составляющую скорости ветра верхней тропосферы и нижней стратосферы (12-16 км) субтропиков. Увеличение температуры в тропиках и ее понижение во внетропических широтах на данной высоте приводит к увеличению меридионального градиента температуры и зональной составляющей скорости ветра. Центральную роль в этом механизме играют внетропические тропосферные вихри, которые смещаются на восток (с зональным потоком) и к экватору, пока не достигают своей критической широты, где их фазовая скорость становится равной скорости фонового зонального потока.

Вопрос заключается в следующем: может ли изменение климата оказать существенное воздействие на расположение и интенсивность шторм треков средних широт? Шторм треки определяются, как области сильной бароклинности (максимум меридионального градиента температуры), которые определяются на основе вихревых статистик, таких как вихревые потоки момента импульса, энергии и влаги. Внетропические вихри являются продуктом бароклинной неустойчивости, которая проявляется особенно сильно зимой, как следствие существования в этот сезон сильного градиента температуры между экватором и полюсом. Шторм треки приносят сильные ливни и другие опасные явления погоды в средних широтах, и кроме того они играют важную роль в глобальном круговороте энергии и гидрологическом цикле.

Исследования влияния климатических изменений на шторм треки ведутся в разных направлениях. Исследуются как сравнительно локальные проявления (например, частота, мощность, скорость циклонов и антициклонов), так и более глобальные характеристики (например, вихревые потоки импульса, тепла, влаги) [1-3]. В настоящее время, для имитации глобального климатического воздействия широко используются сценарии SRES. В исследованиях, посвященных шторм трекам часто используются один климатический сценарий (часто SRES A1B) и одна (например, [4]) или ансамбль (например, [5, 6]) климатических моделей. В настоящее время большинство исследований проводится только для условий растущего антропогенного воздействия, но мы считаем, что не менее важно понять, являются ли изменения, которые происходят с параметрами климатической системы вследствие влияния глобальных изменений климата, обратимыми [7]. Некоторые параметры, такие как осадки, облачность, многолетняя мерзлоты, продемонстрируют явное гистерезисное поведение [8, 9]. В своей работе мы исследовали поведение шторм треков в условиях усиления и дальнейшего снижения антропогенной нагрузки.

Эксперимент

Численный эксперимент был поставлен с помощью глобальной крупномасштабной модели климатической системы промежуточной сложности «Planet Simulator» [10]. Для исследований мы использовали сценарий, отражающий как рост концентрации углекислого газа в атмосфере в результате антропогенного воздействия, так и последующее ее падение и возвращение к доиндустриальному значению (<http://climate.uvic.ca/EMICAR5>), который состоит из нескольких частей: с 850 по 2005 годы концентрация CO₂ задавалась в соответствии с протоколом «Historical simulations» проекта сравнения климатических моделей CMIP5, далее, с XXI по XXIII изменение концентрации CO₂ в атмосфере устанавливалось согласно наиболее агрессивному климатическому сценарию RCP 8.5, после чего в течение XXIV — XXIX концентрация углекислого газа в атмосфере была зафиксирована на уровне, которого достигла в 2300 году, а в течение XXX — XXXI концентрация CO₂ возвращалась к доиндустриальному значению, при этом до доиндустриального значения концентрация CO₂ линейно падала в течение XXX, а затем фиксировалась до окончания расчета.

Для сравнения активности шторм треков мы выбрали девять десятилетних временных интервалов со следующими характеристиками состояния концентрации углекислого газа в атмосфере. Первый интервал характеризуется устойчивым доиндустриальным состоянием климатической системы, второй интер-

вал выбран для условий начала роста концентрации CO_2 в атмосфере, третий — в середине периода роста концентрации CO_2 , четвертый — в конце периода роста концентрации CO_2 . Пятый интервал был выбран для условий устойчивого состояния климатической системы с экстремально высоким значением концентрации углекислого газа в атмосфере. Шестой, седьмой и восьмой интервалы соответствуют условиям, соответственно, начала, середины и конца периода падения концентрации атмосферного диоксида углерода. Последнему, девятому периоду, соответствуют климатические условия с доиндустриальным значением концентрации CO_2 , к которому система была возвращена к концу моделирования.

В качестве индикатора активности шторм треков мы использовали среднесезонные (зима — декабрь, январь, февраль, и лето — июнь, июль, август) вариации меридиональной составляющей скорости ветра на высоте 250 мб, последовательность вычисления которой была следующей. Сначала, чтобы дальнейшая работа происходила только с процессами синоптических временных масштабов (2-8 суток), в рамках каждого из девяти интервалов была произведена фильтрация полей значений меридиональной составляющей скорости ветра [11]. Далее, используя отфильтрованные значения отдельно для зимнего и летнего сезонов, была вычислена средняя за сезон вариация указанной величины [1, 2]. Наряду с активностью шторм треков мы рассматривали вихревой поток импульса на 250 мб, как величину характеризующую поведение вихревой кинетической энергии [1, 2]. Его расчет осуществлялся по той же схеме и для тех же временных интервалов и сезонов, что и вариация меридиональной составляющей скорости ветра.

Результаты

Мы сфокусировали наше внимание на областях максимальной активности шторм треков. Чтобы изучить динамику шторм треков в направлении от экватора к Северному полюсу, были построены диаграммы Хофмёллера для осредненных за каждое из девяти десятилетий среднесезональных значений дисперсии v -компоненты ветра на высоте 250 мб, которая является частью вихревой кинетической энергии (рис. 1). Для обоих сезонов, зимнего и летнего, диаграммы демонстрируют смещение областей максимальной активности шторм треков в направлении полюса в условиях роста концентрации углекислого газа в атмосфере. Кроме того, для летнего сезона проявляется снижение активности шторм треков. При снижении концентрации CO_2 в атмосфере области максимальной активности шторм треков смещаются обратно, и активность шторм треков летнего сезона стремится к преиндустриальному значению. Однако, шторм треки зимнего сезона при конечной фиксации значения концентрации углекислого газа проявляют дальнейшее снижение активности.

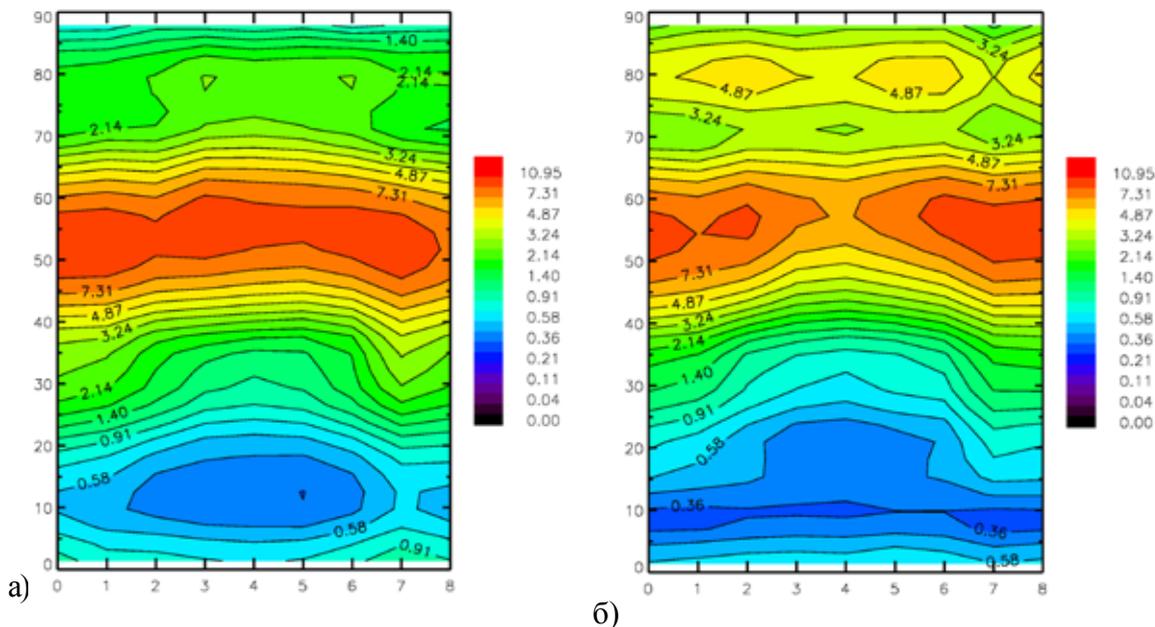


Рис. 1. Диаграммы Хофмёллера для осредненных за каждое из девяти десятилетий среднесезональных значений дисперсии v -компоненты ветра на высоте 250 мб для зимнего (а) и летнего (б) сезонов. Ось X — номер 10-летнего временного отрезка, ось Y — широта.

Как видно на рисунке 1 максимальную активность шторм треки проявляют между 54° и 55° с.ш. При долго-временно-временном рассмотрении на широте $54,4^\circ$ мы получили, что Атлантический шторм трек проявляет больший отклик на варьирование концентрации углекислого газа в атмосфере, чем Тихоокеанский. Кроме того, амплитуда активности, как Атлантического, так и Тихоокеанского шторм треков не возвращается к преиндустриальному значению и продолжает падать при конечной фиксации концентрации CO_2 .

При рассмотрении вихревого потока импульса мы получили схожую картину. Его абсолютное значение возрастает с увеличением антропогенной нагрузки и снижается с ее уменьшением. Для зимне-

го сезона вихревой поток импульса демонстрирует более сильный отклик, чем для летнего. Данное различие в проявлении отклика очевидно следует из различий бароклинной активности этих сезонов.

Заключение

Наши исследования наглядным образом демонстрируют, что вариация концентрации углекислого газа в атмосфере существенным образом влияет на поведение шторм треков Северного полушария. Происходит смещение областей максимальной активности шторм треков, изменение амплитуды их активности. Кроме того, при снижении антропогенной нагрузки и возвращении ее к преиндустриальному состоянию (после ее предварительного увеличения) шторм треки демонстрируют слабое гистерезисное поведение. Полученный эффект очень интересен и требует дальнейшего активного изучения.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки РФ (контракт № 8345), СО РАН (проект № VIII.80.2.1 и интеграционный проект № 131), РФФИ (проекты №№ 11-05-01190а, 13-05-00480, 13-05-12034).

Литература:

1. Hoskins B.J., Paul J. Valdes On the existence of storm-tracks // *J. Atmos. Sci.* 1990. V. 47, N. 15. P. 1854-1864.
2. Chang E.K.M., Yanjuan Guo, Xiaoming Xia, Minghua Zheng Storm-Track Activity in IPCC AR4/CMIP3 Model Simulations // *Journal of Climate*. 2012. Vol. 26, N. 1. P 246-260.
3. Акперов М.Г., Мохов И.И. Оценки чувствительности циклонической активности в тропосфере внетропических широт к изменению температурного режима // *Известия РАН*. 2013. Том 49, № 2. с. 113-120.
4. Bengtsson L., Hodges K.I. Storm tracks and climate change // *J. Climate*. 2006. V.19. P. 3518-3543.
5. Yin, J. H., A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, 32, L18701.
6. Ulbrich, U., J. G. Pinto, H. Kupfer, G. C. Leckebusch, T. Spanghel, M. Meyers, 2008: Changing Northern Hemisphere Storm Tracks in an Ensemble of IPCC Climate Change Simulations. *J. Climate*, 21, 1669–1679.
7. Matthews H.D. Can carbon cycle geoengineering be a useful complement to ambitious climate mitigation? // *Carbon management*. 2010, Vol. 1, No. 1, Pages 135-144
8. Boucher O., Halloran P., Burke E., Doutriaux-Boucher M., Jones C., Lowe J., Ringer M., Robertson E., Wu P. Reversibility in an Earth System model in response to CO₂ concentration changes // *Environ. Res. Lett.* 7 (2012): 124013. doi: 10.1088/1748-9326/7/2/024013
9. Eliseev A.V., Demchenko P.F., Arzhanov M.M., Mokhov I.I. Transient hysteresis of near-surface permafrost response to external forcing // *Climate Dynamics*. 2013. doi: 10.1007/s00382-013-1672-5.
10. Fraedrich K., Jansen H., Kirk E., Luksch U., and Lunkeit F., 2005, *The Planet Simulator: Towards a user friendly model* // *Meteorol. Zeitschrift*, 14, 299-304.
11. Blackmon M.L. A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere // *J. Atmos. Sci.* 1976. V. 33, N. 8. P. 1607–1623.

Reaction of mountain glaciers to climate variability: a stochastic aspect

¹Morozova P., ²Kislov A.

Geography Institute RAS, Moscow, Russia
 Moscow State University, Russia
 E-mail: morozova_polina@mail.ru

It is considered, that fluctuations of glaciers are a reaction to climatic forcing. But glacier length changes are not always correlated with atmospheric conditions changes. Sometimes it can be caused by local effects (e.g., the topography), sometimes it can be a result of the accumulation of small influences during long time and the subsequent significant reaction of the glacier. In these cases it is possible to research the glacier as a complete system and its dynamics as a combination of slow and fast fluctuations. If the slow evolution of the system is representing a result of influence of random processes (independent in time), it is base to use stochastic differential equations. In this work, the theory of Brownian motion was applied to describe dynamics of a mountain glacier as a response to changes in annual atmospheric conditions. Following steps were taken to implement this method:

- the algorithm for GCM-data interpolation on the glacier surface and calculation a climatic equilibrium line altitude (ELA) for every “model” year was created;
- equations of the minimal glacier model (author: J.Oerlemans) were transformed into a Langevin equation (the glacier length change was considered as the “slow” variable; the mass balance change (expressed as variations of the ELA) as the “fast” variable)

Aletschgletscher (The Alps) was chosen as an object of investigation.

As a result, scale of the glacier length fluctuations caused by climate variability (within a climatic period with fixed boundary conditions) was calculated. Measured changes of Aletschgletscher's length during the 20th century exceed the received values. It means that observed changes can't be interpreted as a standard deviation of the glacier length in stationary conditions, and it should be treated as superposition of long and unidirectional climate change (in this case warming) and random influences caused by interannual variability of meteorological conditions.

Реакция горного оледенения на колебания климата: стохастический аспект

¹Морозова П.А., ²Кислов А.В.

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет, Россия

E-mail: morozova_polina@mail.ru

Введение

Представление о том, что ледник есть продукт климата, является общеизвестным и общепринятым. Колебания длины ледников относятся к наиболее легко регистрируемым показателям гляциальных систем на изменение климата. Однако, сведения о перемещении фронтов ледников, полученные инструментальными, геоморфологическими, ботаническими методами и известные по историческим документам, свидетельствуют о том, что периоды их стабилизации, наступания или деградации далеко не всегда совпадают по времени проявления с текущими климатическими изменениями. Иногда это может быть нарушение общих закономерностей под влиянием локальных факторов (например, топография, экспозиция или морфология ледника). Иногда же это может быть результатом накопления малых воздействий в течение достаточно долгого периода времени и последующей значительной реакцией ледника. Рассматриваемый эффект отражает довольно общий механизм функционирования «массивных» инерционных объектов под воздействием мелкомасштабного шума.

Данная работа представляет собой попытку рассмотреть динамику горного оледенения с позиций марковского процесса, причем физической основой выступает известная теория броуновского движения. В рамках такого подхода были оценены масштабы колебаний фронта под влиянием межгодовой изменчивости высоты снеговой линии, которая, в свою очередь, реагирует на изменение метеорологических условий в конкретный год.

Для решения данной задачи был создан алгоритм, который включал в себя несколько основных этапов:

- интерполяция метеорологических величин в орографически сложном районе из узлов модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) на поверхность ледника с разрешением по вертикали 50 м;
- вычисление высоты снеговой линии;
- использование «минимальной» модели ледника в контексте математического аппарата броуновского движения для расчета флуктуаций длины ледника.

В качестве объекта исследования был выбран Алечский ледник (Бернские Альпы). Это связано с хорошей информационной обеспеченностью (в частности, имеются все необходимые значения параметров, которые используются в вычислениях колебаний длины ледника с применением «минимальной» модели Й. Урлеманса).

Стохастическая модель динамики горных ледников

Модель ледника логично должна строиться на основе трехмерной динамики вязко-пластичного тела. Однако, динамический подход, весьма сложно осуществим для горных ледников, поскольку на сегодняшний день еще недостаточно изучены реологические свойства льда, крайне мало информации о скоростях движения внутри ледника, распределении плотности, особенностях ложа и многих других параметрах. Это привело к развитию простых, интегральных (то есть не имеющей пространственного разрешения) моделей, которые, тем не менее, оказались способны воспроизвести многие важные аспекты изменения состояния ледников. В рамках данной работы была использована минимальная модель ледника Й. Урлеманса [11]. В ней основным показателем выступает длина ледника (L), или эффективный радиус, если речь идет о ледниковом щите. Теория базируется на предположении, что ледник всегда имеет равновесный профиль. Это означает, в частности, что длина и средняя по профилю толщина

ледника (H_m) связаны между собой параболической зависимостью (о ее обоснованности - см. [7]) следующего вида: $H_m = \alpha\sqrt{L}/(1 + \mu\nu)$ (в которой α , μ и ν - параметры конкретного ледника). При этом уравнение сохранения массы, связывающее изменение объема ледника во времени с бюджетом массы, трансформируется в уравнение, описывающее изменение протяженности ледника L [11]:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{2(1+\mu\nu)}{3\alpha} \left(-0.5\beta\nu L^{3/2} + \frac{\alpha\beta}{1+\mu\nu} L + \beta(b_0 - E)L^{1/2} \right) \quad (1)$$

Дополнительно сделаны предположения о том, что ледник расположен на склоне постоянной крутизны (ν) (b_0 - высота верхней точки ледника). Кроме того, для простоты считается, что бюджет массы описывается линейной зависимостью от высоты $B = \beta(h - E)$ (h - высота над уровнем моря, E - высота границы питания ледника, на которой аккумуляция и абляция уравниваются, а β - параметр конкретного ледника). В случае Алецкого ледника эта закономерность имеет место.

Уравнение (1) описывает изменение во времени длины ледника в зависимости от изменений высоты границы питания E .

В настоящей работе обращено внимание на то, что это уравнение может быть интерпретировано так, чтобы объяснить генезис динамики ледника в терминах подхода, базирующегося на концепции броуновского движения. Достигается это акцентированием того, что «силы», возбуждающие динамику ледника, флуктуируют очень быстро по сравнению с его медленной реакцией на их воздействие.

Разделим обе части уравнения (1) на \sqrt{L} и запишем его в более удобной форме относительно новой переменной $y = \sqrt{L}$:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{-(1+\mu\nu)\beta\nu}{6\alpha} y^2 + \frac{\beta}{3} y + \frac{(1+\mu\nu)\beta(b_0 - E)}{3\alpha} \quad (2)$$

Это нелинейное обыкновенное дифференциальное уравнение (уравнение Риккати) может быть решено аналитически. Однако в нашем случае оно может быть упрощено путем его линеаризации. Эта процедура применима, как известно, в случае анализа «малых изменений» и, действительно, известно, что по сравнению со средними размерами вариации длины ледников типично малы (для Алецкого ледника - 6%). В результате линеаризации уравнения (2) относительно равновесного значения y_0 получим:

$$\frac{d\Delta y}{dt} = -\lambda\Delta y + \eta \frac{d\Delta y}{dt} = -\lambda\Delta y + \eta \quad (3)$$

В этом уравнении обозначено $\eta = -cE_0\Delta E$. Здесь в формулу введен масштаб изменений (амплитуда) высоты границы питания (E_0), а ΔE представляет собой безразмерную величину порядка единицы. Остальные коэффициенты задаются следующим образом, выражаясь через характеристики конкретного ледника:

$$\lambda = \frac{(1+\mu\nu)\beta\nu y_0 - \alpha\beta}{3\alpha}, \quad c = \frac{(1+\mu\nu)\beta}{3\alpha} \quad (4)$$

Для рассматриваемого ледника Aletschgletscher: $b_0 = 3900$ м, $\mu = 10$, $\nu = 0.1$, $\alpha = 3$ м^{1/2}, $\beta = 0.007$ 1/год, $L_0 = 22000$ м [14]. Соответственно, $c = 0.002$ год⁻¹м^{-1/2} и значение λ^{-1} (представляющее собой характерное время изменений длины ледника) равно приблизительно 50 годам.

Значения высоты границы питания практически не коррелируют между собой на масштабах времени, превышающих $\tau_r = 1$ год [2]. Поэтому при анализе длительных изменений (порядка λ^{-1}) воздействие возмущений ΔE можно с хорошим приближением рассматривать как дельтакоррелированный случайный процесс (белый шум). Тогда уравнение (3) можно трактовать как стохастическое дифференциальное уравнение (так называемое уравнение Ланжевена), описывающее «медленные» приращения длины ледника за счет суммирования многочисленных «быстрых» изменений высоты границы питания [1].

Решение стохастических уравнений строится для определения моментов искомой случайной величины. Так, дисперсия флуктуаций описывается выражением [1]:

$$\sigma_{\sqrt{\Delta L}}^2 = \frac{\tau_r \sigma_\eta^2}{\lambda} (1 - e^{-2\lambda t}), \quad (5)$$

в котором прослеживается зависимость от инерционности ледника (λ^{-1}) и вариаций высоты границы питания (через зависимость σ_η^2 от E). Со временем дисперсия $\sigma_{\sqrt{\Delta L}}^2$ увеличивается, достигая в установившемся режиме ($t \gg \lambda^{-1}$) стационарного значения:

$$\sigma_{\sqrt{\Delta L, st}}^2 = \frac{\tau_r \sigma_\eta^2}{\lambda} \sigma_{\sqrt{\Delta L, st}}^2 = \frac{\tau_r \sigma_\eta^2}{\lambda} \quad (6)$$

Фактически, ответ на поставленный в работе вопрос о роли стохастического возбуждения в динамике ледника зависит от того, каким окажется значение дисперсии, выраженное формулами (5) и (6), сопоставимо ли оно с действительно наблюдающимися вариациями, то есть отражает ли реальные аспекты поведения ледника.

Вариации высоты границы питания

Для определения межгодовой динамики высоты снеговой линии было применено несколько методов. На одном из них, основанном на расчете стаивания/накопления массы снега вдоль профиля лед-

ника остановимся чуть подробнее. Для этих вычислений были использованы данные численных экспериментов, выполненных в рамках проекта РМІР [6]. Для гляциологических вычислений потребовалось совершить перерасчет модельных данных с сетки модели на ту часть территории Альп, которую покрывает изучаемый ледник. Эта процедура была проведена на основе специальной методики микроклиматической детализации, учитывающей изменения высоты, углов наклона, ориентации склонов и закрытости горизонта при расчете температуры, а также и изменений осадков на наветренном и подветренном склонах [4]. Затем полученные величины были использованы для расчета высоты границы питания. Она была определена как тот высотный уровень, на котором в конце сезона абляции разница между количеством выпавших осадков в период аккумуляции и величиной слоя стаивания была наиболее близка к нулю (разграничение периодов абляции и аккумуляции проводилось по достижению 00С [5]). Таким образом, определение двух величин: количества выпавших в твердом виде осадков и количества энергии, затраченной на их таяние, позволило получить данные о высоте снеговой линии за каждый год. Разумеется, в данном случае, когда приходилось настолько детализировать данные глобальной модели, точность подобного расчета может вызывать сомнения. Поэтому диапазон колебаний высоты снеговой линии был оценен еще несколькими методами (при помощи уравнения регрессии, определяемого двумя показателями: величиной осадков холодного периода и высотой изотермы 00С в теплый сезон [10], а также на основании зависимости положения границы снежного покрова от среднемесячных значений температуры и парциального давления водяного пара [3]). Величина E_0 , полученная как стандартное отклонение набора среднегодовых значений, рассчитанных за 50 лет численного эксперимента при помощи данных трех методов, оказалась одного порядка (первые сотни метров).

Дисперсия колебаний длины ледника и его поведение во времени

Представленные выше методы оценки величин E_0 определили диапазон величины дисперсии $\sigma_n^2 = 0.1 - 1.0 \text{ м} (\text{год})^{-2}$. Теперь можно использовать формулу (5) и формулу (6) для расчета дисперсии $\sigma_{\sqrt{\Delta L_{st}}}^2$ (это, фактически, есть оценка стандартного отклонения $\sigma_{\Delta L_{st}}$). Эта последняя величина оказалась равной от 5 до 50 м (в зависимости от использованного значения σ_n^2).

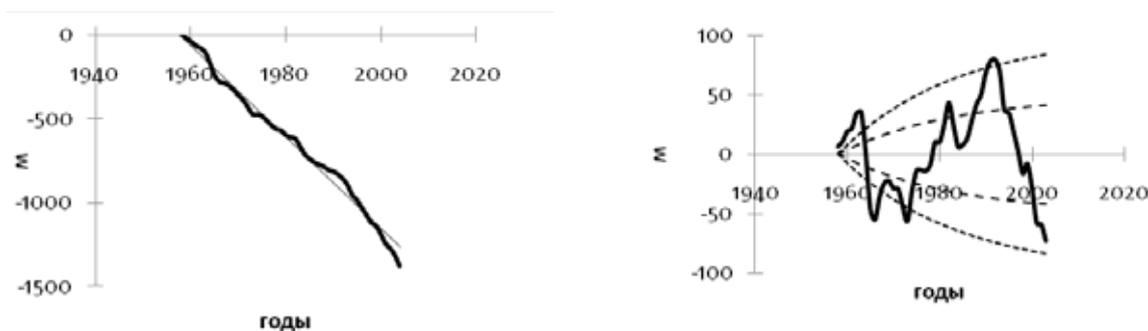


Рис.1. а) Изменение длинны Аледского ледника с 1958 по 2004 г. и линия линейного тренда; б) отклонения изменений длинны Аледского ледника от линии тренда, теоретические оценки диапазона его изменений ($\pm\sigma$ и $\pm 2\sigma$, пунктирные кривые)

Рассмотрим теперь эмпирические данные о динамике Аледского ледника [9]. За последние 50 лет он непрерывно отступал (рис. 1а)) и в итоге суммарное уменьшение его длины составило около 1.5 км. Видимо, причиной такого поведения явилось прогрессирующее потепление климата, наблюдаемое в регионе Альп на протяжении многих десятилетий (фактически, с середины 19 века, с момента завершения последней фазы Малой ледниковой эпохи).

На рис.1б показаны отклонения от линии тренда. Сопоставим их с рассчитанными значениями стандартного отклонения, выбрав в качестве оценки E_0 «среднее» значение из определенного выше диапазона. Из рис.1б) видно, что флуктуации укладываются в диапазон двух стандартных отклонений. Близость теоретической оценки границ изменчивости с реально наблюдавшимися изменениями может означать, что механизм броуновского поведения действительно имеет место. Отметим, что выбор начальной точки, из которой расходятся ветви кривых стандартного отклонения, не совсем правилен. К моменту начала рассматриваемого периода (1958 г.) ледник, естественно, не находился в равновесном состоянии, он уже испытывал флуктуации, поэтому неправильно соотносить первое значение эмпирического ряда наблюдений с областью начального состояния с нулевой дисперсией.

Заключение

Главным в динамике Аледского ледника за последние 50 лет является его отступление. Это, по видимому, реакция на глобальное потепление, которое развивалось достаточно долго для того, чтобы данный ледник, с характерным масштабом памяти в 50 лет, преодолев инерционность, подстроился к

этому процессу. Межгодовые вариации длины ледника, накладывающиеся на этот тренд, есть отклик на флуктуации гидрометеорологического режима. Эти изменения укладываются в диапазон изменчивости, который был теоретически оценен на основе представлений о том, что из-за инерционных свойств ледник интегрирует быстрые аномалии, постепенно формируя медленный значимый отклик.

В то же время пока что рано утверждать, что данный тип поведения играет важную роль в динамике ледника. Прежде всего потому, что данный подход требует дальнейшего развития, возможно, поиска более подходящей модели ледника, апробации на других объектах. Но при этом стоит отметить, что использование модели броуновского движения можно считать перспективным для определения генезиса колебаний горных ледников. Подобный подход к анализу динамики фронта может быть очень полезен при изучении гляциоклиматических связей, поскольку он позволяет выделить пределы естественной изменчивости объекта, тем самым избежать ложных выводов о наличии трендов.

Литература:

1. Демченко П.Ф., Кислов А.В. *Стохастическая динамика природных объектов: броуновское движение и геофизические приложения*. М., ГЕОС, 2010, 190 с.
2. Добровольский С.Г. *Климатические изменения в системе «гидросфера – атмосфера»*. М., ГЕОС, 2002, 232 с.
3. Кислов А.В. *Связь границы сезонного снежного покрова на континентах с температурой и влажностью воздуха*. // *Метеорология и гидрология*. 1994. №8. С.52-56.
4. Кислов А.В., Розинкина И.А., Чернышев А.В. *Технология моделирования микроклиматических особенностей горной территории в рамках модели общей циркуляции атмосферы*. // *Метеорология и гидрология*, 2006, № 10, С.45-53.
5. Кузьмин П.П. *Процесс таянья снежного покрова*. Л., Гидрометеоиздат, 1961
6. *Официальный сайт PMIP2*: <http://pmip2.lsce.ipsl.fr/>
7. Патерсон У.С.Б. *Физика ледников*. М., «Мир», 1984, 472 с.
8. Beniston M. *Mountain weather and climate: A general overview and a focus on climatic change in the Alps* // *Hydrobiologia*, 2006, v. 562, p.3–16
9. *FLUCTUATIONS OF GLACIERS Vol. I – IX, A contribution to the Global Environment Monitoring Service (GEMS)*
10. Greene A. M., Broecker W. S. and Rind D. *Swiss glacier recession since the Little Ice Age: Reconciliation with climate records* // *Geophys. Res. Lett.*, 1999, v. 26, № 13, p. 1909–1912.
11. Oerlemans J. *Minimal glacier models*. Igitur, Utrecht Publishing & Archiving Services, Universiteitsbibliotheek Utrecht. 2008. ISBN 978-90-6701-022-1.

Секция 4

Данные и информационно- вычислительные системы для наук о Земле

Session 4

Data and information- computational systems for the Earth Science

Integrated global carbon cycle modeling system for studies in atmospheric CO₂ data assimilation

¹Maksyutov S., ²Oda T., ¹Saito M., ³Valsala V.K.,
^{1,4}Belikov D.A., ¹Ito A.

¹ National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan

² Colorado State University, Boulder, USA

³ Indian Institute of Tropical Meteorology, Pune, India

⁴ National Institute for Polar Research, Tokyo, Japan

E-mail: shamil@nies.go.jp

Summary. We present an overview of a carbon cycle modeling system that includes components for modeling atmospheric transport, anthropogenic CO₂ emissions, and terrestrial and oceanic CO₂ exchange. The components of the carbon cycle modeling system were developed specifically for processing the GOSAT data, aiming at the capability of utilizing early availability of the GOSAT observations for inverse model analysis. Modeling system components include the component models for simulating atmospheric transport of the CO₂ by winds, the CO₂ exchange between the atmosphere and oceans and between the atmosphere and terrestrial biosphere, and emissions of CO₂ by fossil fuel consumption and cement manufacturing.

Model of the carbon cycling in the terrestrial biosphere. Terrestrial biosphere model VISIT is a prognostic model (Ito, 2010; Saito, M., et al., 2011) that simulates carbon exchanges between the atmosphere and biosphere and among the carbon pools within the terrestrial ecosystems at daily time step. Modeling of plant CO₂ assimilation in VISIT is based on model of light extinction in the canopy, following the formulation of Monsi and Saeki (1953). VISIT is driven by the JRA-25/JCDAS dataset (Onogi et al., 2007). Biases in JRA-25/JCDAS precipitation data were corrected following the method of Saito, M., et al. (2011). The model was initially run for a spin-up of approximately 2000 years to reach equilibrium in the carbon pools, by repeating JRA-25/JCDAS forcing with varying atmospheric CO₂. Global vegetation was classified into 16 plant functional types at a 0.5° × 0.5° grid resolution using the MODIS land cover product. Physiological parameters of the model were optimized to fit the observational data by using a Bayesian inversion approach, extending a method by Nakatsuka and Maksyutov, (2009). The observation data assimilated into VISIT by optimizing physiological parameters were derived from GLOBALVIEW-CO₂ atmospheric CO₂ concentrations, IIASA global

biomass map (Kindermann et al., 2008), and GPPDI NPP dataset (Scurlock et al., 1999; Olson et al., 2001). NIES transport model was used in the computation of atmospheric CO₂ variability.

Variational assimilation system for simulating the global pCO₂ maps and surface ocean-atmosphere fluxes of carbon. The air-sea CO₂ flux component makes optimal estimate of oceanic CO₂ fluxes derived from the original work of Valsala and Maksyutov (2010). This data set was produced by simulating a dissolved inorganic carbon (DIC) with a simple ocean biogeochemical model and constraining the DIC to observations through a variational assimilation method. The data is available from 1996 to near real-time. In Valsala and Maksyutov (2010), a simple offline ocean tracer transport model (OTTM) by Valsala et al. (2008) is coupled with a simple one-component ecosystem model based on phosphate cycling (McKinley et al., 2004) and abiotic carbon cycle model of OCMIP-II (Orr et al., 1999) and were used to simulate the air-to-sea CO₂ fluxes. The model surface ocean DIC is then constrained with the corresponding observational values that are derived from the observed partial pressure of surface ocean CO₂ (pCO₂) obtained via numerous ship-underway sampling as in Takahashi et al., (2009). The assimilation consists of a variational method which minimize the model to observation differences in the surface ocean DIC (or pCO₂), using an assimilation method derived from Ikeda and Sasai (2000). The transport model was run with the offline currents provided by GODAS re-analysis data products (Behringer and Xue, 2004). The model surface ocean pCO₂ are constrained strongly whenever the ship-track underway sampling is available. In addition to this, the climatological maps of monthly mean pCO₂ derived from Takahashi et al. (2009) were also used to constrain the surface ocean pCO₂ as a 'weak' constraint.

Emissions dataset for fossil fuel CO₂ emissions.

To simulate fossil fuel CO₂ emissions, we use ODIAC dataset (Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂, Oda and Maksyutov (2011)). National total emissions are projected up to latest year using British Petroleum, (2011) statistical data and CDIAC's preliminary estimate (Anders et al, 2011). Emissions from solid, liquid and gas and cement production were then spatially distributed using power plants profiles (geographical location and emissions) given by CARMA database and satellite-observed nightlight data collected by DMSP satellites (Elvidge et al. 1999). This distribution method, compared to previous studies such as Andres et al. (2011), allows us to map emissions over land at a high spatial resolution (up to 1km). At spatial resolutions of global transport simulation, the resulting spatial distribution agrees well with that of North American emissions data product Vulcan.

Emissions of CO₂ by biomass burning and forest fires. Satellite based estimates of the carbon emission due to forest fire and biomass burning are provided by Global Fire Emissions Database (GFED 3.1) as described in (van der Werf et al., 2010).

Atmospheric tracer transport model. We use the NIES global atmospheric tracer Transport Model (NIES TM) to simulate atmospheric CO₂. The NIES TM is an off-line model driven by JRA-25/JCDAS re-analysis data. The data used in our model is provided on 40 hybrid σ -p levels and the 6-hour time step. We use flexible hybrid sigma-isentropic (σ - θ) vertical coordinate system which combines terrain following vertical coordinate in the troposphere and isentropic vertical coordinate in the stratosphere above the level of 350K to ensure that isentropic surfaces do not intersect the Earth's surface (Belikov et al., 2013). A scheme based on radiative heating and cooling was implemented to calculate vertical transport in the stratosphere, because such a scheme produces a better representation of the meridional circulation for long-term simulations, as compared with use of vertical winds from reanalysis.

The NIES TM was evaluated against GLOBALVIEW-CO₂, GLOBALVIEW-CH₄, WDCGG, balloon-borne and aircraft observation data (Belikov et al., 2013), as well as through the CONTRAIL and TransCom-CH₄ transport model intercomparison (TMI) studies.

References:

1. Andres, R., and coauthors: *Tellus*, 63B, 3,309-327, 2011.
2. Behringer, D. W., and Xue, Y.: In: *The Pacific Ocean.*, AMS 84th annual meeting, Seattle, Washington, DC, 11-15, 2004.
3. Belikov, D. A., and coauthors: *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 1713-1732, 2013.
4. British Petroleum p.l.c., *Statistical Review of World Energy 2011*, 2011
5. Elvidge, C. D. and coauthors: *Remote Sens. Environ.*, 68, 77-88, 1999.
6. Ikeda, M., and Sasai, Y.: *Mar. Chem.*, 72, 343-358, 2000.
7. Ito, A.: *J. Plant Res.*, 123, 577-588, 2010.
8. Kindermann, R., and coauthors: *Silva Fennica*, 42, 387-396, 2008.
9. McKinley, G. A. and coauthors: *Global Biogeochem. Cy.*, 18, GB2011, doi:10.1029/2003GB002179, 2004.
10. Monsi, M. and Saeki, T.: *Jpn. J. Bot.*, 14, 22-52, 1953.
11. Nakatsuka, Y. and Maksyutov, S.: *Biogeosciences*, 6, 2733-2741, 2009.
12. Oda, T., and Maksyutov, S.: *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 543-556, 2011.
13. Olson, R. J., and coauthors: *Global and Regional Ecosystem Modeling: Databases of Model Drivers and Validation Measurements*, Oak Ridge National Laboratory, 2001.

14. Onogi, K., , and coauthors: *J. Meteorol. Soc. Jap.*, 85, 369-432, 2007.
15. Orr, J. C., , and coauthors: *Abiotic-HOWTO, LSCE/CEA Saclay, Gif-sur-Yvette, France, 25 pp, 1999.*
16. Saito, M., , and coauthors: *J. Climate*, 24, 4109-4125, 2011.
17. Scurlock, J. M. O., and coauthors.: *Ecol. Appl.*, 9, 913-919, 1999.
18. Takahashi, T., and coauthors: *Deep-Sea Res. II*, 56, 554-577, 2009.
19. Valsala, V., and coauthors.: *J. Climate*, 21, 2752-2769, 2008.
20. Valsala, V., and Maksyutov, S.: *Tellus-B*, 62B, 821-840, 2010.
21. van der Werf, and coauthors.: *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 11707-11735, 2010.

Web-GIS application for analysis of georeferenced data

^{1,2}Okladnikov I.G., ^{1,2}Gordov E.P., ^{1,2}Titov A.G., ¹Bogomolov V.Yu., ^{1,3}Martynova Yu.V., ¹Shulgina T.M.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Siberian Center for Environmental Research and Training, Tomsk, Russia

²Institute of Computational Technologies SB RAS, Tomsk Department, Tomsk, Russia

³Siberian Regional Hydrometeorological Research Institute, Novosibirsk, Russia

E-mail: oig@scert.ru

Georeferenced datasets are currently actively used in numerous applications including modeling, interpretation and forecast of climatic and ecosystem changes for various spatial and temporal scales [1]. Due to inherent heterogeneity of environmental datasets as well as their huge size which might constitute up to tens terabytes for a single dataset at present studies in the area of climate and environmental change require a special software support [2]. A dedicated web-GIS information-computational system for analysis of georeferenced climatological and meteorological data has been created. It is based on Open Geospatial Consortium (OGC) standards and involves many modern solutions such as object-oriented programming model, modular composition, and JavaScript libraries based on GeoExt library (<http://www.geoext.org>), ExtJS Framework (<http://www.sencha.com/products/extjs>) and OpenLayers software (<http://openlayers.org>).

The main advantage of the system lies in a possibility, using a modern graphical web-browser installed on a common desktop computer connected to Internet, to perform mathematical and statistical data analysis [3]. Results obtained are available both as layers in a graphical web-interface with GIS-functionality (Fig. 1 and 2), and as downloadable binary files for further processing by the user.

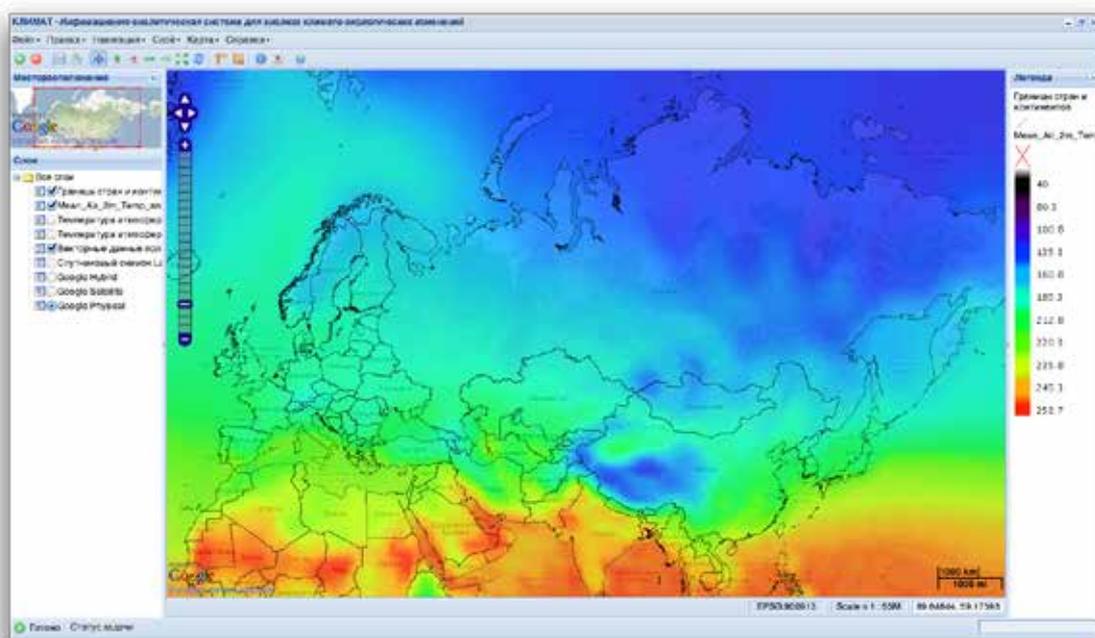


Fig.1. Main window of the system

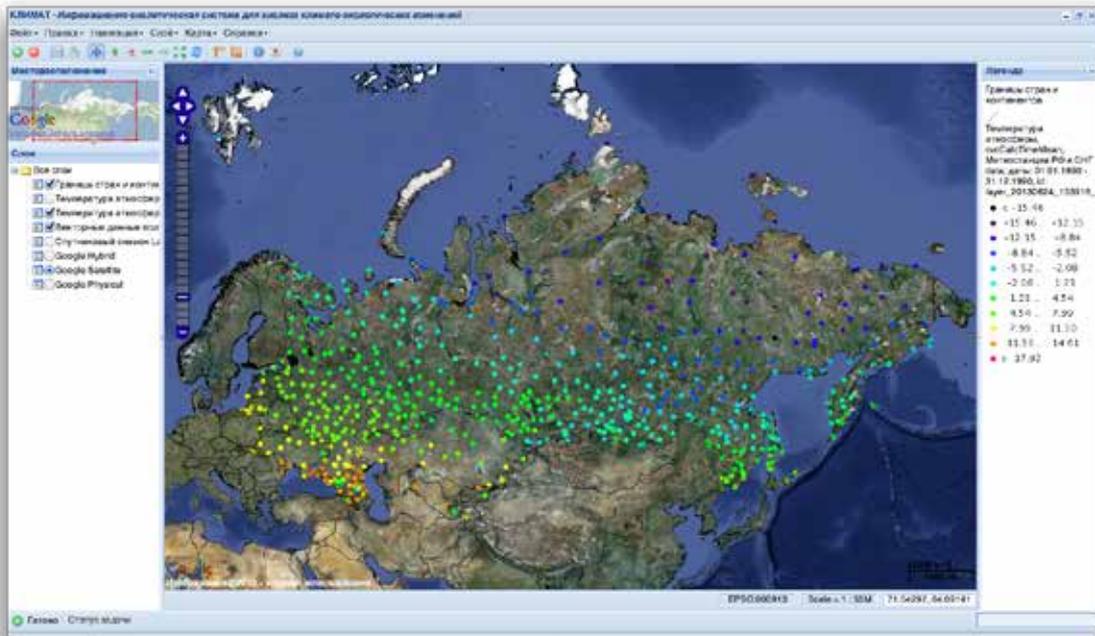


Fig. 2. Visualization of meteorological stations data analysis

Several geophysical datasets represented by NCEP/NCAR Reanalysis II, JMA/CRIEPI JRA-25 Reanalysis, ECMWF ERA-40 Reanalysis, ECMWF ERA Interim Reanalysis, MRI/JMA APHRODITE's Water Resources Project Reanalysis, DWD Global Precipitation Climatology Centre's data, GMAO Modern Era-Retrospective analysis for Research and Applications, reanalysis of Monitoring atmospheric composition and climate (MACC) Collaborated Project, NOAA-CIRES Twentieth Century Global Reanalysis Version II, NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), meteorological observational data for the territory of the former USSR for the 20th century, results of modeling by global and regional climatological models, and others are available for processing by the system. And this list is extending. Also a functionality to run the Weather research and forecasting model (WRF) and "Planet simulator" model by Meteorological Institute of University of Hamburg was implemented in the system. Due to many preset parameters, as well as limited temporal and spatial ranges set in the system these models have low computational power requirements and are used in educational process thus providing better understanding of basic climatological and meteorological processes by students and young scientists [4].

The Web-GIS information-computational system for geophysical data analysis provides specialists involved into multidisciplinary research projects with reliable and practical instruments for complex analysis of climate and ecosystems changes on global and regional scales. Using it even unskilled user without specific knowledge can perform computational processing and visualization of large meteorological, climatological and satellite monitoring datasets through unified web-interface in a common graphical web-browser.

This work is partially supported by the Ministry of education and science of the Russian Federation (contract #8345), SB RAS project VIII.80.2.1, RFBR grants #11-05-01190a, 13-05-12034 and integrated project SB RAS #131.

References:

1. Gordov E.P., Lykosov V.N., Krupchatnikov V.N., Okladnikov I.G., Titov A.G., Shulgina T.M. *Computational and information technologies for monitoring and modeling of climate changes and their consequences*. – Novosibirsk: Nauka, Siberian branch, 2013. – 195 p. (in Russian)
2. Felice Frankel, Rosalind Reid. *Big data: Distilling meaning from data // Nature*. Vol. 455. N. 7209. P. 30.
3. T.M. Shulgina, E.P. Gordov, I.G. Okladnikov, A.G., Titov, E.Yu. Genina, N.P. Gorbatenko, I.V. Kuzhevskaya, A.S. Akhmetshina. *Software complex for a regional climate change analysis*. // *Vestnik NGU. Series: Information technologies*. 2013. Vol. 11. Issue 1. P. 124 – 131. (in Russian)
4. Gordova Yu.E., Genina E.Yu, Gorbatenko V.P., Gordov E.P., Kuzhevskaya I.V., Martyanova Yu.V., Okladnikov I.G., Titov A.G., Shulgina T.M., Barashkova N.K. *Supporting educational process in modern climatology by web-GIS platform "Climate" // Open and remote education. Tomsk*. 2013. N.1 (49). P. 14 – 19.

Roshydromet's specialized hydrometeorological datasets for climate monitoring and climate research

Arzhanova N.M., Bulygina O.N., Razuvaev V.N.

All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Centre (RIHMI-WDC), Obninsk, Russia

The empirical and statistical analysis of observational data, one of the main sources of information on the climate change in the past, provides the basis for estimating possible changes in the future. In Russia, regular meteorological observations began to be conducted in the late 19th century and by now, wealth of information on climate conditions throughout the Russian area has been accumulated for the entire observation period. At different times, the number of meteorological stations over the Russian area was 100 to 2500, with the largest number being in the late 1990s.

At present, Roshydromet is being actively involved in creating climatic databases that are to provide the basis for performing large-scale work on climate research in accordance with the Russian Climate Doctrine.

Within the research topic "Improving the Technologies of Information Climate Databases Creation and Maintenance and Technologies of Climate Data Services Provided to All Groups of Users", ten research institutes of Roshydromet are preparing specialized datasets for climate research and monitoring.

The list of the created datasets is determined according to the requirements of the Global Climate Observation System and includes major climate parameters, such as air temperature, precipitation, free atmosphere parameters, etc. One of the major requirements for the datasets created is their accessibility. To this end, it was decided to place the datasets on the websites of the organizations involved to make these freely available. A complete list of the datasets and their web-addresses are available from the site of RIHMI-WDC, the coordinator of the work. Other requirements are regular data update, metadata and data quality control. The creation of climate databases is smoothly connected with some of the scientific and methodological problems whose solution is to allow integrated climate research in Russia.

In choosing the network of meteorological stations, it is necessary to take into account the uniformity of the territorial data coverage, to determine the required and sufficient number of stations for different climate parameters, to estimate representativeness of stations, etc.

The paper considers the problems of time series creation and data inhomogeneity related to the change in data observation, processing and storage techniques.

Специализированные массивы гидрометеорологических данных Росгидромета для мониторинга климата и климатических исследований

Аржанова Н.М., Булыгина О.Н., Разуваев В.Н.

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

Эмпирико-статистический анализ данных наблюдений является одним из главных источников информации об изменениях состояния климатической системы в прошлом и создает основу для оценки возможных изменений в будущем. В России регулярные метеорологические наблюдения были начаты в конце 19-го века и к настоящему времени накоплен огромный объем данных, содержащий богатейшую информацию о состоянии климатических условий на всей территории России за весь период наблюдений. Количество метеостанций на территории России в разные годы составляло от 100 до 2500 (наибольшее количество в конце 90-х годов).

В настоящее время в Росгидромете активизировались работы по созданию климатических баз данных, которые должны составить основу для проведения широкомасштабных работ по изучению климата в соответствии с Климатической доктриной России.

В рамках темы НИР «Совершенствование технологий формирования и ведения информационных баз климатических данных и обслуживания климатическими данными всех групп пользователей» силами 10 НИУ Росгидромета осуществляется подготовка специализированных массивов для климатических исследований и мониторинга климата.

Перечень создаваемых баз данных определен на основе требований Глобальной системы наблюдений за климатом, и включает основные климатические параметры, такие как температура воздуха,

атмосферные осадки, параметры свободной атмосферы и другие. Одним из главных требований к создаваемым массивам является их доступность. С этой целью было принято решение о размещении массивов на веб-сайтах организаций- участников данной работы для свободного использования. На сайте ВНИИГМИ-МЦД (координатора этой деятельности) размещен полный перечень создаваемых массивов и их web-адреса. Другими требованиями являются регулярное обновление данных, наличие метаданных и контроль качества данных.

Создание баз климатических данных органично связано с решением ряда научно-методических проблем, решение которых позволит в полной мере провести комплексные исследования состояния климата на территории России.

При выборе сети станций необходимо учитывать равномерность освещенности территории, определить необходимое и достаточное количество станций для различных климатических параметров, оценить их репрезентативность и т.д.

В докладе рассматриваются проблемы создания временных рядов, нарушения однородности данных, обусловленные изменением методик наблюдений, обработки и хранения данных.

Organization of access to observational data using web services for monitoring systems the state of the environment

Kadochnikov A.A.

Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
E-mail: scorant@icm.krasn.ru

Current trends in the field of nature protection are monitoring environmental pollution resulting from human impact on nature, and as a result of natural processes. Monitoring the state of the environment in the area of the various industries can reduce costs to eliminate the impact of industrial accidents, which in turn reduces the possibility of contamination soil, surface water, loss of vegetation and wildlife.

Consider the problem of creation of information-analytical systems for environmental monitoring of the natural environment and resources, built on the basis of GIS technologies, Internet, remote sensing data processing and data from monitoring stations. Considerable attention is given to web services, software interfaces and generally accepted standards.

The author were directly involved in the development and implementation of projects of ecological orientation. In developing the software many different software libraries and components were used. Web mapping user interface was created using a number of open source libraries. To create a server-side web application author used GIS platforms MapGuide Open Source and Minnesota MapServer. GeoWebCache was another essential component of distributed web mapping environmental monitoring applications.

In the development of cartographic applications for the monitoring systems the state of the environment now plays an important role detailed map of the region, supported by the up to date. As a result of combining different technologies the web application map transmitted to the user in composed of two layers: the base background map and the thematic layer. The last one generated dynamically as transparent bitmap layer and is defined by application business logic.

As an alternative to raster transparent layer are also considered solutions based on the dynamic generation of vector objects on a Web page – this possibility now is provided by client software like JavaScript with using OpenLayers library. However, in this case there is another problem associated with the restriction on the number of vector objects on a Web page.

Организация доступа к данным наблюдений с помощью веб-сервисов для систем мониторинга состояния окружающей природной среды

Кадочников А.А.

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
E-mail: scorant@icm.krasn.ru

Актуальными направлением в области охраны природы являются мониторинг загрязнения окружающей среды, возникающего в результате воздействия человека на природу, а также в результате естественных природных процессов. Мониторинг состояния окружающей природной среды в зоне действия различных промышленных предприятий позволяет сократить расходы на ликвида-

цию последствий техногенных аварий, что в свою очередь снижает вероятность загрязнения почвы, поверхностных вод, гибели растительности и представителей животного мира.

В работе рассматривается задача создания информационно-аналитических систем для экологического мониторинга состояния природной среды и ресурсов, построенной на основе технологий ГИС, Интернет, обработки данных дистанционного зондирования и данных со станций наблюдения. Значительное внимание уделяется веб-сервисам и программным интерфейсам. Рассматривается задача формирования геоинформационной Интернет-системы мониторинга состояния окружающей природной среды для системы поддержки принятия решений на уровне Красноярского края. В работе востребованы методики и программные средства, которые позволят формировать оценки состояния территорий на базе основных показателей в наглядном виде. Важную роль играет использование современных средств визуализации данных с использованием ГИС-технологий. В таких задачах использование Интернет-технологий имеет ряд преимуществ по сравнению с настольными ГИС – доступность предлагаемых решений большому числу пользователей, упрощение процесса установки и распространения программного обеспечения, снижение его стоимости, возможность интеграции со сторонними приложениями и проч. Основное внимание уделяется описанию проблем и решений связанных с разработкой веб-сервисов и приложений для таких Интернет-систем.

В рамках исследования уделено внимание проблеме, возникающей при разработке совместных проектов различных научных институтов, университетов и подразделений органов власти, связанной с обменом данными и метаданными о пространственной информации, а также данными наблюдений за окружающей средой. Возникла задача разработки распределенного хранилища пространственной информации для более эффективного взаимодействия различных организаций. Разработаны программные средства для анализа пространственных данных в среде геопортала Института вычислительного моделирования СО РАН с использованием технологий, предлагаемых международным консорциумом Open Geospatial Consortium и программного обеспечения MapServer, MapGuide Open Source и GeoWebCache. Программные инструменты содержат средства для хранения цифровых картографических материалов, растровых снимков территории, сервисы для навигации по распределенному каталогу пространственных данных, сервисы для пространственного анализа и математического моделирования на унифицированных цифровых картах. Основным элементом геопортала является каталог метаданных о пространственных данных.

Каталог метаданных содержит информацию по доступным слоям и картам. Основной особенностью каталога пространственных данных является возможность использования различных форматов пространственных данных и организация доступа для пользователя к этим данным с помощью современных стандартов и технологий. Для оформления карт и картографических слоев применяется Styled Layer Descriptor – язык описания стилей, используемый для отображения объектов на карте в WMS, WFS и WCS серверах, а также собственный формат описания стилей, разработанный для геопортала ИВМ СО РАН [1].

В работе важную роль играет система сбора оперативных данных наблюдения от различных веб-сервисов, станций наблюдения и датчиков. В рамках геопортала ИВМ СО РАН был разработан блок для сбора, обработки и представления данных различных наблюдений. Организация доступа к данным наблюдений осуществляется стандартными средствами геопортала, включающего просмотр табличных данных, экспорт, просмотр данных на картах с возможностью выбора временных интервалов и доступ с помощью общепринятых стандартов.

Организован доступ к собранным данным оперативного мониторинга с помощью стандарта SOS (Sensor Observation Service), разрабатываемого консорциумом OGC. Этот стандарт определяет интерфейс веб-сервиса, который позволяет запрашивать информацию от датчиков, получать информацию о самих датчиках, а также описывает средства и механизмы для регистрации новых датчиков и возможности их удаления. В качестве базового программного обеспечения для организации SOS-сервисов выступает MapServer.

Пользовательский интерфейс для каталога метаданных, для систем мониторинга окружающей природной среды и для информационно-аналитических систем в региональном управлении решено выполнить в виде геоинформационного веб-приложения. Несмотря на некоторые недостатки, этот подход имеет существенные преимущества, как для пользователя, так и для разработчика, в том числе: независимость от платформы, отсутствие необходимости устанавливать дополнительное программное обеспечение, отсутствие проблем с поддержкой старых версий программ и обратной совместимостью, и др.

Для построения клиентской части веб-приложения подходят несколько технологий – Flash, DHTML (Dynamic HTML), SVG (Scalable Vector Graphics – масштабируемая векторная графика). Их возможностей достаточно для реализации клиентской логики картографического веб-интерфейса. Одним из интересных решений и популярных на сегодняшний день является применение технологии динамического HTML с методами асинхронного обмена данными без перезагрузки страницы (Remote Scripting, AJAX). Практически все современные веб-браузеры поддерживают эти технологии без использования дополнительных модулей.

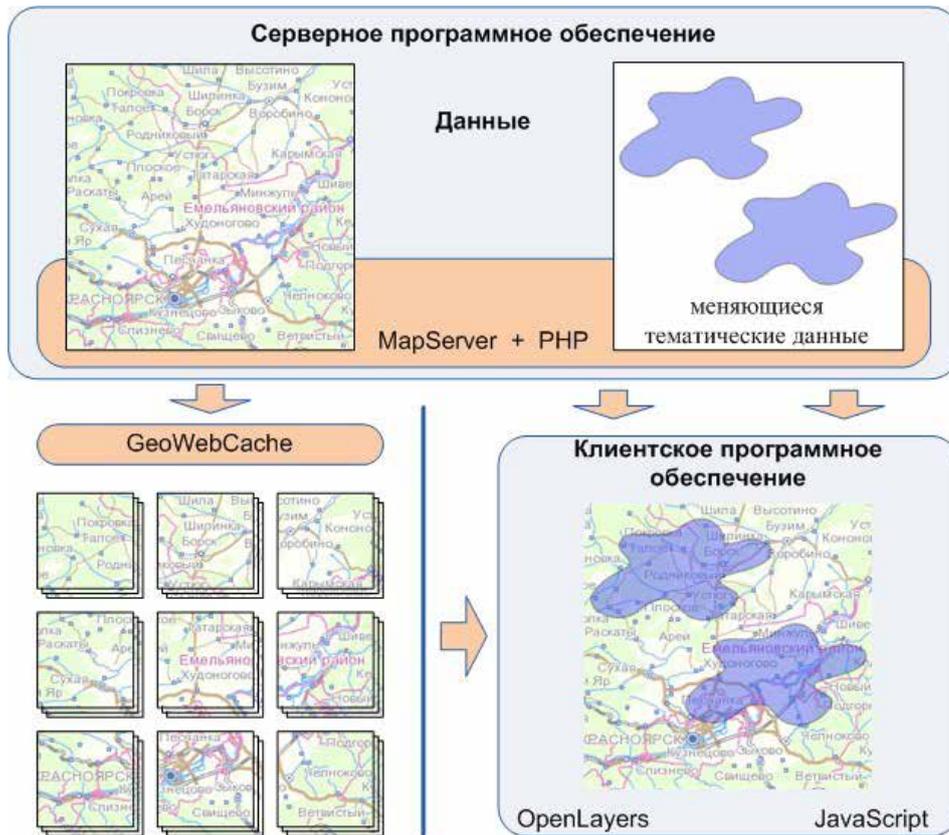


Рис. 1. Формирование карты для веб-приложения

При разработке картографического компонента веб-интерфейса были проанализированы два способа представления картографической информации для пользователя. Первый способ – карта отображается с использованием фрагментов (тайлы). Эту технологию используют такие ресурсы как Google Maps (<http://maps.google.com>), Яндекс Карты (<http://maps.yandex.ru>), Virtual Earth (<http://www.bing.com/maps/>) и др. Основным преимуществом такого способа является скорость получения визуальной информации пользователем и малая нагрузка на сервер при отображении статической информации. Процесс формирования карты на клиентском компьютере состоит из нескольких этапов, с использованием дополнительных программных потоков, механизма кэширования, очереди загрузки фрагментов и др. При таком способе отображения карты пользователю процесс построения композиции карты позволяет оптимизировать процесс загрузки, снизить нагрузку на веб-браузер и более равномерно ее распределить по времени. Однако при отображении меняющихся тематических данных такой способ снижает скорость доступа пользователя к пространственным данным и увеличивает нагрузку на сервер. Для решения этой проблемы используется второй способ отображения информации – по запросу пользователя генерируется одно растровое изображение [2]. В зависимости от типа представляемой информации пользователю в программном интерфейсе системы используется комбинация этих двух способов (рисунок 1).

Сегодня существует большое число библиотек с открытым исходным кодом для создания готового пользовательского интерфейса с картографическим интерфейсом, например OpenLayers (<http://www.openlayers.org>), GeoExt (<http://geoext.org>), MapFish (<http://www.mapfish.org>), Fusion (<http://trac.osgeo.org/fusion/>) и др. Однако функционала существующих библиотек было недостаточно для решения поставленной задачи и было разработано веб-приложение с использованием библиотеки OpenLayers. OpenLayers – это JavaScript библиотека с открытым исходным кодом, предназначенная для создания карт на основе программного интерфейса, подобного GoogleMap API (<http://code.google.com/>), Virtual Earth API (<http://www.microsoft.com/maps/>) или API Яндекс.Карт (<http://api.yandex.ru/maps/>) поддерживает технологию AJAX и анимацию.

При разработке серверной части веб-приложения для работы с картой Красноярского края используется программное обеспечение MapServer, предназначенное для обеспечения доступа через Интернет к интерактивным картам, различной пространственно увязанной информации. MapServer представляет собой открытую и свободно распространяемую среду разработки Интернет-приложений для работы с электронными картами широко распространенных среди множества геоинформационных систем векторных и растровых форматов, обладающую большим числом функциональных возможностей.

Для создания карты из фрагментов использовалось программное обеспечение GeoWebCache. GeoWebCache использует спецификацию WMS Tile Caching (WMS-C), которая явилась результатом конференции FOSS4G в 2006 г [3]. Сервисы WMS (Web Map Service) разрабатывались с учетом большой

гибкости и богатого функционала [4]. Но это оборачивается высокими требованиями к вычислительной мощности сервера. Серверы WMS-C по протоколам совместимы с OGC WMS, поэтому их можно встроить между клиентом и сервером WMS, что позволяет существенно увеличить скорость реакции и разгрузить сервер. Рассмотрены альтернативные решения для создания каталога фрагментов (тайлов), такие как ka-Map Cache (<http://ka-map.ominiverdi.org>), TileCache (<http://tilecache.org>) и др.

Источником пространственных данных для сервера с программным обеспечением GeoWebCache послужил WMS сервер с картой Красноярского края на основе программного обеспечения MapServer. Реализована система сервисов, которые поддерживают кэш растровых изображений на сервере с GeoWebCache в актуальном состоянии при обновлении исходных данных на WMS сервере.

В результате объединения различных технологий представления карты пользователю на стороне клиента реализован вариант, в котором карта состоит из двух слоев: подложка и тематический слой.

Вторая часть карты накладывается поверх слоя подложки в виде полупрозрачного растрового изображения. Эта часть карты отображает всю тематическую информацию, либо ее срез в зависимости от настроек пользователя. Пользователь также может определить типы объектов и тематические наборы данных наблюдения, которые будут отображаться на карте.

Предложенная технологическая основа и карта Красноярского края активно используется в следующих проектах:

«Карта здравоохранения Красноярского края», Красноярский краевой медицинский информационно-аналитический центр (ККМИАЦ), 2008-2013 гг. (<http://www.kmiac.ru/>).

«Сеть образовательных учреждений Красноярского края», Министерство образования и науки Красноярского края, 2009-2012 гг. (<http://issou.cross-edu.ru/>).

АИС ГТС (Единая база данных «Гидротехнические сооружения и опасные участки берегопереработки»), Министерство природных ресурсов и лесного комплекса Красноярского края 2010-2012 гг.

Сегодня в результате развития технологий и программного обеспечения получены новые результаты, которые позволили значительно усовершенствовать существующую программно-технологическую платформу геопортала ИВМ СО РАН для разработки систем мониторинга окружающей природной среды. Программно-технологическая платформа для организации распределенного доступа к электронной карте Красноярского края позволит усовершенствовать процессы разработки систем мониторинга для Красноярского края, повысит качество предоставляемых услуг для населения края и качество принимаемых управленческих решений. Рассмотренное решение может быть использовано не только для территории Красноярского края, а ресурсы и инструменты разработанной программно-технологической платформы могут быть использованы при разработке других систем.

Литература:

1. Пятаев А.С., Якубайлик О.Э. Средства автоматизации подготовки и веб-публикации данных в технологии MapServer / Проблемы информатизации региона. ПИР-2009: Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. / Красноярск, СФУ 2009. – С. 148-150.
2. Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Попов В.Г., Токарев А.В.. Модель геоинформационной аналитической Интернет-системы для анализа состояния и презентации региона // Вестник СибГАУ, 2009, Вып. 4 (25). – С. 61-66.
3. Tile Map Service Specification. / The Open Source Geospatial Foundation [Электронный ресурс] – <http://wiki.osgeo.org/wiki/Tile_Map_Service_Specification> (21.02.2013).
4. OpenGIS Web Map Service (WMS) Implementation Specification. / Open GIS consortium. [Электронный ресурс] – <<http://www.opengeospatial.org/standards/wms>> (21.02.2013).

Architecture of integrated system of geospatial data services for climate research

^{1,2}Titov A.G., ^{1,2}Gordov E.P., ^{1,2}Okladnikov I.G.

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

²Tomsk Branch of Institute of Computational Technologies SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: titov@scert.ru, gordov@scert.ru, oig@scert.ru

Geospatial datasets (meteorological databases, modeling and reanalysis results, etc.) are actively used in modeling, interpretation and forecast of climate change for various spatial and temporal scales. Due to inherent heterogeneity of environmental datasets as well as their size which might constitute up to tens terabytes for a single dataset studies in the area of climate and environmental change require an effective soft-

ware support based on SDI (Spatial Data Infrastructure) approach [1]. A dedicated architecture of the integrated system of geospatial data services providing over the web quantitative information for climate change monitoring applications is presented (Fig. 1).

It should be noted that a number of objective reasons such as complexity of data models used, syntactic and semantic differences of various datasets that complicate creation and use of common terminology, the development of environmental geodata access, processing and visualization services turns out to be quite a complex task, [2]. So that, the architecture presented includes the following components:

1. Effective in terms of search, access, retrieval and subsequent statistical processing model of storing big sets of regional geospatial data, allowing in particular to store frequently used values (like monthly and annual climate change indices, etc.), thus providing different temporal views of the datasets.
2. Modular computational core as a standalone software unit, providing basic dataset handling as well as statistical processing functionality required thus representing computational backend for geoprocessing services.
3. Metadata catalog describing in detail using ISO 19115 and CF-convention standards geoinformation resources (datasets and services) used in climate researches as well as providing its publication according to OGC CSW (Catalog Service Web) 2.0 specification.
4. Computational and mapping Web services to work with geospatial datasets based on OWS (OGC Web Services) standards: WMS, WFS, WCS and WPS.

To realize web mapping and processing services Geoserver software is used since it provides natural WPS implementation as a separate software module while standalone software such as PyWPS (<http://pywps.wald.intevation.org/>) or ZOO Project WPS (<http://zoo-project.org>) can also be used. To provide geospatial metadata services GeoNetwork Opensource (<http://geonetwork-opensource.org>) product is employed for it

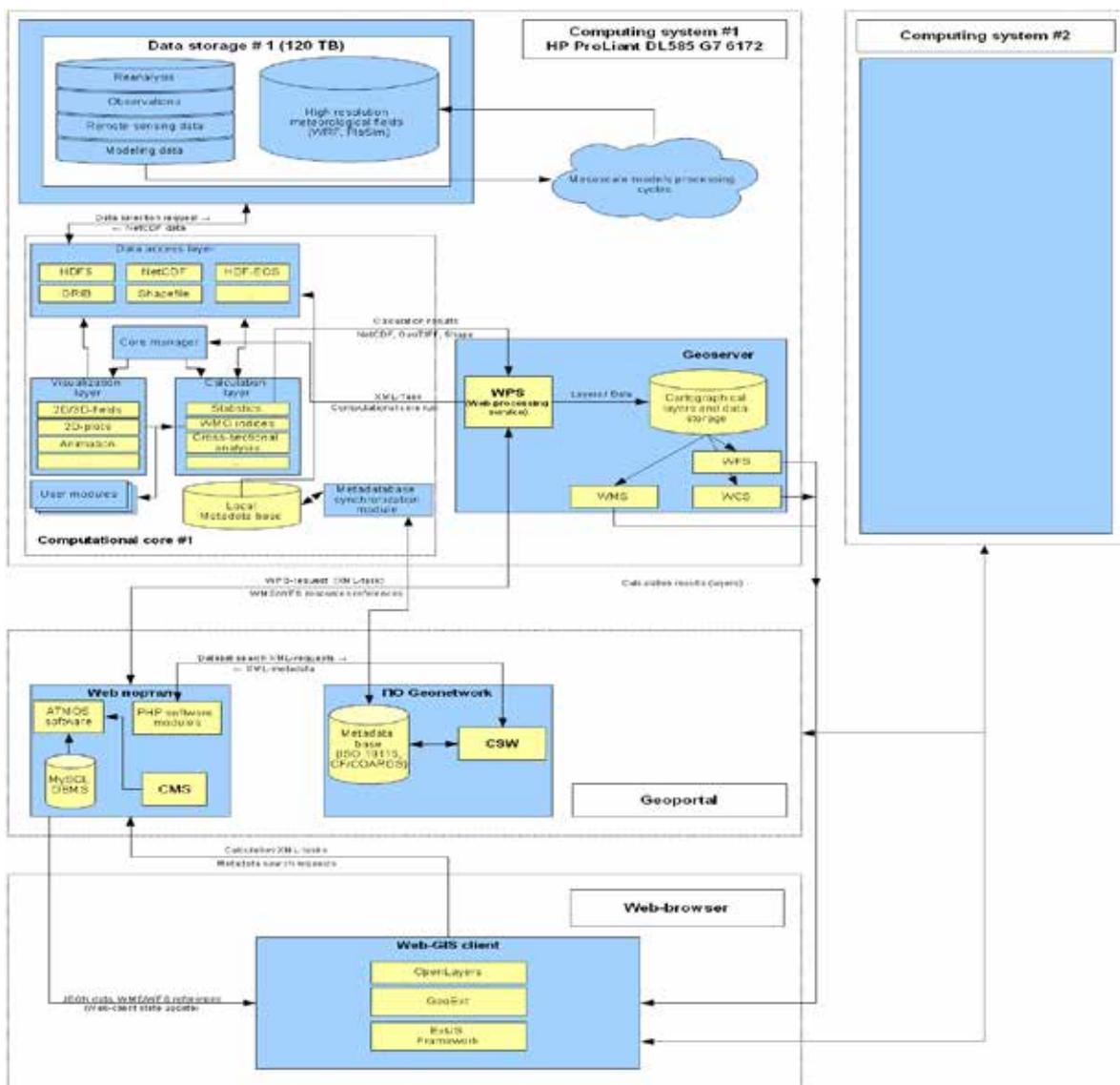


Figure 1. General architecture of the geospatial data services system

supports ISO 19115/ISO 19119/ISO 19139/ISO 19110 metadata standards as well as ISO CSW 2.0 profile for both client and server.

The system of geospatial data services created according to the architecture presented will serve as a basis for development of complex client-server applications aimed at climate change research.

The work is partially supported by RF Ministry of Education and Science grant 8345, SB RAS Program VIII.80.2.1 and IP 131, RFBR grant 13-05-12034.

References:

1. Steiniger S., Hunter A.J.S. *Free and open source GIS software for building a spatial data infrastructure.* / In: Bocher E., Neteler M., (eds.), *Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century*, LNCS, Heidelberg, Springer, 2012a, p. 247-261.
2. A.P. Kryukov, M.N. Zhizhin, A.A. Poyda, D.Yu. Mishin, D.P. Medvedev, A.P. Demichev, D.S. Kokovin. *Development of remote access RESTful web services to data resources for distributed Earth science systems* // Preprint SINP MSY # 2012-4/882, 2012. (in Russian)

Bioresource management problems with asymmetric players

Rettieva A.N.

Institute of Applied Mathematical Research KarSC RAS,
Petrozavodsk, Russia
E-mail: annaret@krc.karelia.ru

Discrete-time game-theoretic model of related to a bioresource management problem (fish catching) is investigated. The players (countries or fishing firms) which harvest the fish stock are the participants of the game. Players differ in their time preferences and use different discount factors. Power population's growth function and logarithmic players' profits are considered. Such models usually named as "fish wars" [1,3].

The main problem investigated here is how to construct the value function for the cooperative solution and to distribute the joint payoff among the players when players have different discount factors. Here we construct the schemes how to determine the joint discount factor in order to construct cooperative payoff and how to construct the cooperative strategies and payoffs without the joint discount factor. Also we consider the case when players have different exploitation times.

Let two players (countries or fishing firms) exploit the fish stock during infinite time horizon. The dynamics of the fishery is described by the equation [5]:

$$\mathbf{x}_{t+1} = (\varepsilon \mathbf{x}_t - \mathbf{u}_{1t} - \mathbf{u}_{2t})^\alpha, \quad \mathbf{x}_0 = \mathbf{x},$$

where $\mathbf{x}_t \geq 0$ - the size of population at a time t , $\varepsilon \in (0,1)$ - natural death rate, $\alpha \in (0,1)$ - natural birth rate, $\mathbf{u}_{it} \geq 0$ - the catch of player i , $i=1,2$.

Then the players' net revenues over infinite time horizon are

$$J_i = \sum_{t=0}^{\infty} \delta_i^t \ln(u_{it}),$$

where $\delta_i \in (0,1)$ - the discount factor for player i , $i=1,2$.

First, we show that the joint discount factor δ for the case when cooperative payoff is distributed proportionally among the players exists. Second, we suppose that the cooperative payoff is distributed in the portion $\gamma V(\mathbf{x}, \delta) : (1 - \gamma)V(\mathbf{x}, \delta)$, where γ is a parameter. We propose to use Nash bargaining solution in order to determine the unknown parameters [2].

Then we obtain the cooperative strategies without determining the joint discount factor using Nash bargaining solution. We present two different approaches of bargaining procedure. In the first one the cooperative strategies are determined as the Nash bargaining solution for the whole planning horizon. In the second approach, we construct the cooperative solution as a recursive bargaining procedure. On each time moment the cooperative strategies are determined as the Nash bargaining solution taking the non-cooperative profits as a status-quo point.

In the case of different players' time of exploitation we also consider two cases. In the first one participations' times are known $n_1 < n_2$. In the second, the times are random variables with known discrete distribution.

For all the models the results of numerical modelling and comparison of the schemas are presented.

References:

1. Mazalov V.V., Rettieva A.N. *The discrete-time bioresource sharing model // Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2011. V. 75. N 2. P. 180-188.
2. Rettieva A.N. *Discrete-time bioresource management problem with asymmetric players // Mathematical Game Theory and Applications*. 2012. V. 4. N 4. P. 63-72 (in Russian).
3. Levhari D., Mirman L.J. *The great fish war: an example using a dynamic Cournot-Nash solution // The Bell J. of Economics* 1980. V. 11(1). P. 322-334.
4. Mazalov V.V., Rettieva A.N. *Fish wars with many players // International Game Theory Review*. 2010. V. 12. N 4. P. 385-405.

Задачи управления биоресурсами с несимметричными игроками

Реттеева А.Н.

Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

E-mail: annaret@krc.karelia.ru

В работе исследована теоретико-игровая модель эксплуатации ресурсов в дискретном времени. В игре участвуют игроки (страны или рыболовецкие артели), производящие вылов биоресурсов на бесконечном промежутке времени. В предыдущих работах авторов [1,2,6,7] были исследованы модели с двумя или многими игроками, но при этом, при кооперативном поведении предполагалось задание одинакового коэффициента дисконтирования. В данной работе игроки используют различные коэффициенты дисконтирования, что можно интерпретировать как их различные предпочтения во времени.

Основной проблемой в данной ситуации является то, что нет возможности определить выигрыши игроков при кооперативном поведении стандартными способами. В работе [4] было предложено построение кооперативного выигрыша как суммы индивидуальных, но данный подход является нетрадиционным для кооперативной теории игр, где при кооперации определяется общий выигрыш всех участников, а потом используются схемы его распределения.

Поэтому в данной работе для построения кооперативного выигрыша и распределения его между игроками предложено использование арбитражной схемы Нэша. При этом исследованы два способа решения данной задачи: построение общего коэффициента дисконтирования и построение кооперативных выигрышей без его использования.

При использовании первого способа решения показано, что, если кооперативный выигрыш распределяется пропорционально между игроками, то существует общий коэффициент дисконтирования и определены условия его существования. Далее, предполагая, что кооперативный выигрыш распределяется в некоторой пропорции, необходимо определение двух параметров: доли выигрыша и общего коэффициента дисконтирования. Найдены условия существования таких параметров, а для выбора конкретных из них предложено использование арбитражной схемы Нэша.

При решении данной задачи без использования общего коэффициента дисконтирования предложено два варианта. В первом из них кооперативные стратегии и выигрыш определяются из решения арбитражной схемы для всего периода продолжения игры. Таким образом, максимизируется произведение разностей общего кооперативного и некооперативного выигрышей. Во втором же – арбитражная схема применяется на каждом шаге для определения кооперативного поведения. При этом точкой статус-кво является некооперативный выигрыш на каждом шаге. Показано, что обе эти схемы дают большие выигрыши и размер популяции, чем эгоистическое поведение.

Также рассмотрены ситуации, когда игроки различаются не только различными коэффициентами дисконтирования, но и различным временем участия в процессе эксплуатации ресурса. Исследован случай фиксированных времен участия и времен участия, выраженных дискретными случайными величинами с заданными распределениями.

Модель и общий коэффициент дисконтирования

Пусть два игрока (страны или рыболовецкие артели) эксплуатируют рыбный ресурс на протяжении бесконечного горизонта планирования. Динамика развития популяции имеет вид

$$x_{t+1} = (\varepsilon x_t - u_{1t} - u_{2t})^\alpha, \quad x_0 = x,$$

где $x_t \geq 0$ - размер популяции в момент t , $\varepsilon \in (0, 1)$ - коэффициент смертности, $\alpha \in (0, 1)$ - коэффициент рождаемости, $u_{it} \geq 0$ - вылов игрока i , $i=1, 2$.

Предполагаем логарифмический вид функции выигрышей игроков и наличие различных коэффициентов дисконтирования. Общий доход игроков на бесконечном промежутке имеет вид

$$J_i = \sum_{t=0}^{\infty} \delta_i^t \ln(u_{it}),$$

где $\delta_i \in (0, 1)$ - коэффициент дисконтирования игрока i , $i=1, 2$.

Такие модели в зарубежной литературе принято называть «fish wars» [5].

Равновесие по Нэшу и кооперативное равновесие определим, используя метод динамического программирования (см. [2, 6, 7]).

Обозначим $V_i(x, \delta_i)$ - выигрыш игрока i при некооперативном поведении

При кооперации целью игроков является максимизация суммы их выигрышей, и обозначим $V(x, \delta)$ - выигрыш игрока i при кооперативном поведении, где δ - общий неизвестный коэффициент дисконтирования.

Предположим, что кооперативный выигрыш распределяется между игроками пропорционально их коэффициентам дисконтирования, а именно

$$\frac{\delta_i}{\delta_1 + \delta_2} V(x, \delta)$$

Найдены условия, которым должен удовлетворять общий коэффициент дисконтирования δ , чтобы кооперативное поведение было рациональным, т.е.

$$\frac{\delta_i}{\delta_1 + \delta_2} V(x, \delta) \geq V_i(x, \delta_i), \quad i = 1, 2.$$

Далее предполагая, что кооперативный выигрыш распределяется в пропорции $\gamma V(x, \delta) : (1 - \gamma)V(x, \delta)$, где γ - неизвестный параметр, найдены условия для рациональности кооперации:

$$\gamma V(x, \delta) \geq V_1(x, \delta_1), \quad (1 - \gamma)V(x, \delta) \geq V_2(x, \delta_2).$$

Таким образом, получено множество допустимых параметров δ и γ . Для построения решения предложено использовать арбитражную схему Нэша

$$(\gamma V(x, \delta) - V_1(x, \delta_1))((1 - \gamma)V(x, \delta) - V_2(x, \delta_2)) \rightarrow \max_{\delta, \gamma}.$$

Итого, для определения кооперативного поведения предложено построение общего коэффициента дисконтирования. Рассмотрены два случая разделения кооперативного выигрыша: пропорционально коэффициентам дисконтирования и в некоторой неизвестной пропорции. В первом случае найдены условия существования общего коэффициента дисконтирования, а во втором - предложено использование арбитражного решения Нэша для определения неизвестных параметров [3].

Построение кооперативного поведения без общего коэффициента дисконтирования

Для построения данной схемы используется n -шаговая игра, т.е. выигрыши игроков принимают вид

$$J_i = \sum_{t=0}^n \delta_i^t \ln(u_{it}),$$

где $\delta_i \in (0, 1)$ - коэффициент дисконтирования игрока i , $i=1, 2$.

Рассмотрены два варианта построения кооперативного поведения при помощи арбитражной процедуры Нэша:

1. Кооперативные стратегии определяются из решения арбитражной схемы для всего периода продолжения игры.

2. Рекурсивная арбитражная схема Нэша применяется на каждом шаге игры. В первом случае решается следующая задача

$$\begin{aligned} & (V_1^{nc}(x, \delta_1) - V_1^N(x, \delta_1))(V_2^{nc}(x, \delta_2) - V_2^N(x, \delta_2)) = \\ & = \left(\sum_{t=0}^n \delta_1^t \ln(u_{1t}^c) - V_1^N(x, \delta_1) \right) \left(\sum_{t=0}^n \delta_2^t \ln(u_{2t}^c) - V_2^N(x, \delta_2) \right) \rightarrow \max_{u_{1t}^c, u_{2t}^c} \end{aligned}$$

где $V_i^N(x, \delta_i)$ - некооперативные выигрыши в n шаговой игре.

При этом удалось выразить кооперативные стратегии на каждом шаге через одну неизвестную переменную, которую можно определить из одного из уравнений условия максимума.

Во втором случае используется рекурсивная арбитражная процедура. Начиная с одношаговой игры определяем кооперативные стратегии из решения задачи

$$\begin{aligned} & (\ln(u_1) + \alpha \delta_1 \ln(\varepsilon x - u_1 - u_2) - \delta_1 \ln(2) - H_1^{1N})(\ln(u_2) + \alpha \delta_2 \ln(\varepsilon x - u_1 - u_2) - \delta_2 \ln(2) - H_1^{1N}) = \\ & = (H_1^{1c} - H_1^{1N})(H_2^{1c} - H_2^{1N}) \rightarrow \max_{u_1, u_2} \end{aligned}$$

где H_i^{1N} - некооперативные выигрыши в одношаговой игре.

Таким образом, получены кооперативные выигрыши и стратегии в одношаговой игре. Затем переходим двухшаговой игре, используя уже полученные выигрыши, где решаем следующую задачу

$$(\ln(u_1) + \delta_1 H_1^{1c} - H_1^{2N})(\ln(u_2) + \delta_2 H_2^{1c} - H_2^{2N}) \rightarrow \max_{u_1, u_2}$$

где H_i^{2N} - некооперативные выигрыши в двухшаговой игре.

Действуя далее таким же образом, получены рекурсивные уравнения, из которых определяются кооперативные стратегии и выигрыши на каждом шаге.

Таким образом, исследованы два варианта построения кооперативных стратегий и выигрышей без использования общего коэффициента дисконтирования. В первом -- арбитражная схема применяется для всего периода продолжения игры, а во втором -- используется рекурсивная арбитражная схема Нэша.

Арбитражная схема и различные времена участия

Рассмотрены два варианта построения кооперативного поведения при помощи арбитражной процедуры Нэша в случае, когда игроки участвуют в процессе эксплуатации ресурса различное время:

1. Время участия игроков задано.

2. Времена участия игроков являются дискретными случайными величинами с заданными распределениями.

В первом случае предположим, что первый игрок участвует в игре n_1 шагов, а второй игрок – n_2 шагов. Не умаляя общности, будем считать, что $n_1 < n_2$. Таким образом, оба игрока кооперируются на промежутке $[0, n_1]$, а затем второй игрок продолжает эксплуатацию индивидуально. Для определения стратегий игроков также используется арбитражная схема. Таким образом, решается следующая задача:

$$\left(\sum_{t=0}^{n_1} \delta_1^t \ln(u_{1t}^c) - V_1^{[0, n_1]}(x, \delta_1) \right) \left(\sum_{t=0}^{n_1} \delta_2^t \ln(u_{2t}^c) + \sum_{t=n_1}^{n_2} \delta_2^t \ln(u_{2t}^N) - V_2^{[0, n_1]}(x, \delta_2) - V_2^{[n_1, n_2]}(x, \delta_2) \right) \rightarrow \max,$$

где $V_i^{[0, n_i]}(x, \delta_i)$ - некооперативные выигрыши игроков на промежутке $[0, n_i]$.

Найдены кооперативные выигрыши и стратегии игроков на промежутке $[0, n_1]$, а также индивидуальный выигрыш второго игрока и его стратегии промежутке $[n_1, n_2]$.

Во втором случае, предположим, что первый игрок участвует случайное n_1 число шагов, принимающее значение $1, \dots, n$ с вероятностями $\theta_1, \dots, \theta_n$, а второй игрок – n_2 число шагов, принимающее значение $1, \dots, n$ с вероятностями $\omega_1, \dots, \omega_n$.

Тогда выигрыши игроков являются математическими ожиданиями и могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} J_1 & = E \left\{ \sum_{t=1}^{n_1} \delta^t \ln(u_1^c) I_{(n_1 \leq n_2)} + \left(\sum_{t=1}^{n_2} \delta^t \ln(u_1^c) + \sum_{t=n_2}^{n_1} \delta^t \ln(u_1^N) \right) I_{(n_1 > n_2)} \right\} = \\ & = \sum_{n_1=1}^n \theta_{n_1} \left[\sum_{n_2=n_1}^n \omega_{n_2} \sum_{t=1}^{n_1} \delta^t \ln(u_1^c) + \sum_{n_2=1}^{n_1-1} \omega_{n_2} \left(\sum_{t=1}^{n_2} \delta^t \ln(u_1^c) + \sum_{t=n_2}^{n_1} \delta^t \ln(u_1^N) \right) \right] \end{aligned}$$

$$J_2 = E \left\{ \sum_{t=1}^{n_2} \delta^t \ln(u_2^c) I_{(n_2 \leq n_1)} + \left(\sum_{t=1}^{n_1} \delta^t \ln(u_2^c) + \sum_{t=n_1}^{n_2} \delta^t \ln(u_2^N) \right) I_{(n_2 > n_1)} \right\} =$$

$$= \sum_{n_2=1}^n \omega_{n_2} \left[\sum_{n_1=n_2}^n \theta_{n_1} \sum_{t=1}^{n_2} \delta^t \ln(u_2^c) + \sum_{n_1=1}^{n_2-1} \theta_{n_1} \left(\sum_{t=1}^{n_1} \delta^t \ln(u_2^c) + \sum_{t=n_1}^{n_2} \delta^t \ln(u_2^N) \right) \right]$$

Найдены кооперативные и некооперативные стратегии игроков.

Таким образом, исследованы два варианта построения кооперативных стратегий и выигрышей в случае, когда игроки эксплуатируют ресурс различное время. В первом случае – времена участия заданы, а во втором – являются случайными величинами.

Литература:

1. Мазалов В.В., Реттиева А.Н. Условия, стимулирующие рациональное поведение, в дискретных задачах управления биоресурсами // Доклады АН. 2010. Т. 432. Вып. 3. С. 308-311.
2. Мазалов В.В., Реттиева А.Н. Дискретная задача разделения биоресурсов // Прикладная математика и механика. 2011. Т. 75. Вып. 2. С. 259-270
3. Реттиева А.Н. Дискретная задача управления популяцией с несимметричными игроками // Теория игр и ее приложения. 2012. Т. 4. Вып. 4. С. 63-72
4. Breton M., Keoula M.Y. A great fish war model with asymmetric players // Cahiers du GERAD G-2010-73, December 2010.
5. Levhari D., Mirman L.J. The great fish war: an example using a dynamic Cournot-Nash solution // The Bell J. of Economics 1980. V. 11(1). P. 322-334.
6. Mazalov V.V., Rettieva A.N. Fish wars and cooperation maintenance // Ecological Modelling. 2010. V. 221. P. 1545-1553.
7. Mazalov V.V., Rettieva A.N. Fish wars with many players // International Game Theory Review. 2010. V. 12. N 4. P. 385-405.

Mathematical modeling of nitrification and organic matter oxidation processes in the biological treatment system

Smirnov N.V., Kirillov A.N.

Institute of Applied Mathematical Research KarSC RAS, Petrozavodsk, Russia
E-mail: fresh.87@mail.ru

The goal of this report is the developing of biochemical processes' mathematical model in the flow biosystem. In particular, wastewater treatment aeration tank is the flow biosystem. We have considered the well-mixed continuous aeration tank, which is relatively divided by areas termed as compartments. The vectors of current and initial states correspond to their own compartments.

The nitrification and organic matter oxidation's mathematical model is proposed in the report. The two species of aggregated substrates and related species of microorganisms' dynamics is described by the nonlinear ordinary differential equations system.

The threshold functions are introduced in the right-hand-side of the equations. It allows us to consider nitrification or oxidation of organic matter in the aeration tank complying with the zones as almost self contained processes.

The industrial flow biosystem's parametrical identification is a complex problem due to lack amount of processes' data. The scanning method is used to obtain the numerical solution of this problem. The directions of the model developing and clarification of parameters' point are submitted in the report.

Математическое моделирование процессов нитрификации и окисления органического вещества в системе биологической очистки

Смирнов Н.В., Кириллов А.Н.

Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия
E-mail: fresh.87@mail.ru

Введение

Проточные биосистемы, к которым можно отнести и систему биологической очистки сточных вод активным илом, представляют значительный интерес, как для биологов, экологов, так и для специалистов в области математического моделирования. В данной работе предложены модель процесса биочистки и подход к решению задачи параметрической идентификации.

Описание процесса.

На большинстве очистных сооружений сточная вода, пройдя предварительные этапы обработки, попадает в специальные резервуары, аэротенки, где происходит биологическая очистка. В работе рассмотрен процесс, происходящий в аэротенке-смесителе, в который активный ил и сточная вода поступают непрерывно. Иловая смесь движется вдоль оси аэротенка. Сточная вода, содержащая разные виды субстрата, поступает с одинаковой объёмной скоростью равными порциями в нескольких точках аэротенка. На рис. 1 приведена схема аэротенка очистных сооружений г. Петрозаводска. Выделим два вида субстрата, которые окисляются на очистных сооружениях:

- легко биоразлагаемый органический субстрат, характеризуемый концентрацией S_S ;
- азот в аммонийной форме, характеризуемый концентрацией S_{NH} .

Очистные сооружения, как правило, успешно справляются с окислением легко биоразлагаемой органики, достаточная же степень окисления аммония может не достигаться. Возникает проблема математического моделирования процесса нитрификации с целью уменьшения величины S_{NH} в очищенной воде.

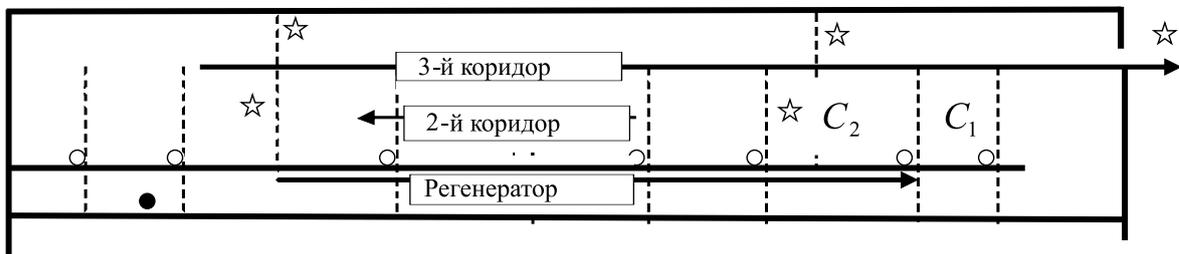


Рис. 1. Схема аэротенка.

- – место вхождения сточной воды в аэротенк;
- – место вхождения иловой смеси в аэротенк;
- ☆ – место сбора проб
- ▶ – направление движения иловой смеси.
- – граница компарментов

В аэротенке выделим участок длиной l_{el} (например, $l_{el} = 1$ м). Выделим объём $V_{el} = a \cdot b \cdot l_{el}$, где a – ширина коридора аэротенка, b – высоты иловой смеси в аэротенке. Пусть за время Δt в систему попадают объёмы ΔV_{cv} , ΔV_{il} сточной воды и активного ила соответственно. Тогда $v_1 = \frac{\Delta V_{cv}}{\Delta t}$ и $v_2 = \frac{\Delta V_{il}}{\Delta t}$ – объёмные скорости вхождения в аэротенк сточной воды и активного ила, соответственно. $t_{el} = \frac{V_{el}}{v_1 + v_2}$ – время продвижения иловой смеси на расстояние l_{el} . Учитывая, что сточная вода подаётся через n труб, рассчитаем объём, который входит через одну трубу за время t_{el} : $V_{cv} = \frac{v_1 \cdot t_{el}}{n}$.

Иловая смесь, двигаясь по коридору аэротенка, попадет к месту вхождения сточной воды (через очередную трубу), где происходит их перемешивание. Таким образом, места вхождения сточной воды естественным образом делят аэротенк на компарменты (C_i , $i = 1, 2, K$), объёмы которых равны $V_i = k_i \cdot V_{el}$, где k_i – это количество участков длиной l_{el} , входящих в C_i . Будем предполагать, что в каждом компарimente происходит идеальной перемешивание иловой смеси, которой на прохождение каждого из них требуется время $t_i = k_i \cdot t_{el}$. За время t_i в C_i вливается сточная вода объёмом V_{cv} , $i = k_i \cdot V_{cv}$.

Пусть S_S^* , S_{NH}^* и S_S , S_{NH} – концентрации субстратов в сточной воде и иловой смеси соответственно, X_H , X_A – концентрации гетеротрофных и автотрофных микроорганизмов иловой смеси, соответственно.

При попадании иловой смеси в i -ый компартмент, где она перемешивается со сточной водой, концентрации субстратов и микроорганизмов активного ила рассчитываются по формулам:

$$S_S = \frac{S_S^* \cdot V_{v,i} + S_S \cdot V_i}{V_{v,i} + V_i}, \quad S_{NH} = \frac{S_{NH}^* \cdot V_{v,i} + S_{NH} \cdot V_i}{V_{v,i} + V_i},$$

$$X_H = \frac{X_H \cdot V_i}{V_{v,i} + V_i}, \quad X_A = \frac{X_A \cdot V_i}{V_{v,i} + V_i}.$$

Математическая модель

Группой исследователей, возглавляемой М. Henze, был предложен ряд моделей для описания процесса биоочистки [6]. На основании подхода, предложенного этой группой, предлагается модель, учитывающая динамику концентраций легко биоразложимого органического субстрата, азота в аммонийной форме и микроорганизмов, окисляющих эти субстраты.

В активном иле выделим 2 группы микроорганизмов: гетеротрофные и автотрофные. Заметим, что в общей биомассе гетеротрофных бактерий значительно больше, чем автотрофных [7]. Гетеротрофные организмы преимущественно окисляют органический субстрат, обеспечивая за счёт этого рост своей биомассы. Концентрацию органического субстрата будем характеризовать показателем БПК_{полн} (биологическое потребление кислорода на окисление субстрата). Однако последний показатель включает в себя расход кислорода и на процессы окисления других веществ, в том числе тех, которые не будут окислены в аэротенке. Поэтому введём пороговую функцию f_1 , позволяющую описать переключение процесса окисления с органики на аммоний при достижении концентрацией S_S некоторого значения c_1 . В качестве значения c можно взять БПК_{полн} надильной жидкости на выходе из аэротенка.

$$\text{Пусть } f_1 = \frac{1}{1 + e^{10^6 \left(\frac{c}{S_S} - 1\right)}}.$$

Поведение функции f_1 имеет ступенчатый характер. При этом $f_1 \approx 0$ при $S_S \in (0, c - \varepsilon)$, $f_1 \approx 1$ при $S_S \in (c + \varepsilon, \infty)$, где $\varepsilon > 0$ – достаточно малая величина. Константа 10^6 обеспечивает близость функции f_1 к разрывной ступенчатой функции.

Наличие органических веществ активизирует развитие гетеротрофных микроорганизмов, которые выигрывают у нитрифицирующих микроорганизмов в борьбе за кислород [2]. В результате, процесс нитрификации сначала в значительной мере затормаживается и начинает активизироваться, по мере удаления органического субстрата. Тогда введём функцию, отражающую этот факт:

$$f_2 = \frac{S_{NH} / (S_S - c_1)}{K_a + S_{NH} / (S_S - c_1)},$$

где K_a – это некоторая постоянная. Заметим, что $f_2 \in (0, 1)$, f_2 возрастает при увеличении отношения концентраций $S_{NH} / (S_S - c_1)$.

Используя зависимость Моно $f(S, K) = \frac{S}{S + K}$ и введённые выше функции f_1, f_2 получаем динамическую систему, описывающую процесс биоочистки:

$$\begin{aligned} S_S^{\&} &= Q(S_S^{in} - S_S) - \frac{\mu_H}{Y_H} f(S_S, K_S) f(S_O, K_{O,H}) \frac{1}{1 + e^{10^6 \left(\frac{c}{S_S} - 1\right)}} X_H, \\ S_{NH}^{\&} &= Q(S_{NH}^{in} - S_{NH}) - \frac{\mu_A}{Y_A} f(S_{NH}, K_N) f(S_O, K_{O,A}) \frac{S_{NH} / S_C}{K_a + S_{NH} / S_C} X_A, \\ X_H^{\&} &= Q(X_H^{in} - X_H) + \left(\mu_H f(S_S, K_S) f(S_O, K_{O,H}) \frac{1}{1 + e^{10^6 \left(\frac{c}{S_S} - 1\right)}} - b_H \right) X_H, \\ X_A^{\&} &= Q(X_A^{in} - X_A) + \left(\mu_A f(S_{NH}, K_N) f(S_O, K_{O,A}) \frac{S_{NH} / S_C}{K_a + S_{NH} / S_C} - b_A \right) X_A, \end{aligned} \quad (2)$$

где $Q = \frac{1}{T}$ [1] – расход смеси ила и сточной воды, T – время прохождения аэротенка иловой смесью.

Концентрации на входе и выходе участка аэротенка соответственно:

S_0^n, S_0 – растворённого кислорода;

S_S^n, S_S – растворённых легко биоразложимых органических веществ;

S_{NH}^n, S_{NH} – растворённого азота в аммонийной форме;

X_H^n, X_H – гетеротрофных микроорганизмов;

X_A^n, X_A – автотрофных микроорганизмов.

Параметры:

K_S – полунасыщения гетеротрофов легко биоразложимыми органическими веществами;

K_{NH} – полунасыщения автотрофов аммонием азота;

$K_{O,H}$ – полунасыщения гетеротрофов кислородом;

$K_{O,A}$ – полунасыщения автотрофов кислородом;

Y_H – перехода массы органического субстрата в биомассу гетеротрофов;

Y_A – перехода массы аммония азота, в биомассу автотрофов;

b_H – скорость распада гетеротрофов;

b_A – скорость распада автотрофов;

μ_H – максимальная скорость роста гетеротрофов;

μ_A – максимальная скорость роста автотрофов.

Данная модель является усовершенствованием модели, предложенной в [5]. Концентрации на входе в каждый компартмент вычисляются по формулам (1). Для расчета выходных концентраций из каждого компартмента производится численное интегрирование системы (2).

Имитационное моделирование

Для решения задачи параметрической идентификации использован метод сканирования [3] в области допустимых значений параметров [7]. Решением является набор параметров $P = (Y_H, Y_A, \mu_H, \mu_A, b_H, b_A, K_S, K_{NH}, K_{O,H}, K_{O,A}, K_a)^T$ который минимизирует целевой функционал

$$J = \sum_{i=1}^{n_y \cdot N} w_i (y_i - y_i^m)^T (y_i - y_i^m),$$

где w_i – весовой коэффициент, n_y – количество наблюдаемых переменных, N – количество точек сбора экспериментальных данных, y_i, y_i^m – экспериментальные и модельные данные соответственно. Численное моделирование проводилось с помощью кластера «Центр высокопроизводительной обработки данных» [ЦКП КарНЦ РАН, 2012-2013]. Получение модельных данных проводилось путём решения системы (2) методом прогноза-коррекции Адамса.

Проведены компьютерные эксперименты, в которых экспериментальными данными были: БПК_{полн} на выходе из аэротенка; концентрации: аммония азота $y_1 = (y_{11}^{in}, y_{11}^1, y_{11}^2, y_{11}^3, y_{11}^4, y_{11}^{out})$, концентрации общей биомассы микроорганизмов $y_2 = (y_{21}^{in}, y_{21}^1, y_{21}^2, y_{21}^3, y_{21}^4, y_{21}^{out})$ на входе, в четырех точках аэротенка и на выходе из него. Эти данные были получены на очистных сооружениях г. Петрозаводска. С помощью метода сканирования был получен набор параметров, минимизирующий целевой функционал J .

Табл. 1. Значения параметров.

Параметр	Значение	Единицы измерения
Y_H	0,59	г биомассы (г БПК _{полн}) ⁻¹
Y_A	0,24	г биомассы (г аммония азота) ⁻¹
μ_H	3,5	сут ⁻¹
μ_A	0,315	сут ⁻¹
b_H	0,05	сут ⁻¹
b_A	0,05	сут ⁻¹
K_S	25	г БПК _{полн} м ⁻³
K_{NH}	1	г аммония азота м ⁻³
$K_{O,H}$	0,1	г O ₂ м ⁻³
$K_{O,A}$	0,67	г O ₂ м ⁻³
K_a	5	безразмерная величина

Выводы

Предложены математическая модель процесса биоочистки и подход к её параметрической идентификации. С помощью метода сканирования найден набор параметров, наиболее удовлетворяющий экспериментальным данным.

Возможно дальнейшее уточнение значений параметров с использованием теории чувствительности [4].

Возможно дальнейшее развитие модели путём введения уравнения динамики концентрации кислорода, что позволит решить задачу управления процессом биоочистки.

Литература:

1. Вавилин В. А. *Время оборота биомассы и деструкция органического вещества в системах биологической очистки*. М.: Наука, 1986. 143 с.
2. Жмур Н. С. *Управление процессом и контроль результата очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками*. М.: Лuch, 1997. 172 с.
3. *Метод сканирования [Электронный ресурс]*. Адрес: http://flowmetrika.narod.ru/_algorithms/algoritm_metod_skanirovania.htm
4. Розенвассер Е. Н., Юсупов Р. М. *Чувствительность систем автоматического управления*. Л.: Энергия, 1969. 208 с.
5. Смирнов Н. В. *Математическое моделирование процесса биологической очистки сточных вод*. // Ярославский педагогический вестник. Серия «Естественные науки»: науч. журн. 2012. Т. 3, № 3. С. 44–49.
6. Henze M., Gujer W., Mino Takashi, Mark van Loosdrecht. *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. // London, UK, IWA Publishing. Scientific and Technical Report series, 2000. 130 p.
7. Boukroune B., Darouach M., Zasadzinski M., Gille S. *A nonlinear observer for an activated sludge wastewater treatment process*. // USA, American Control Conference, 2009. P. 1027–1033.

Spatial demo-genetic model for studying phenomena observed during introduction of the ragweed leaf beetle *zygogramma suturalis* f. in the South of Russia

^{1,3}Tyutyunov Yu., ²Kovalev O., ³Titova L., ⁴Berdnikov S.

¹Institute of Arid Zones, Southern Scientific Center of RAS, Rostov-on-Don, Russia

²Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, Russia

³Research Institute of Mechanics and Applied Mathematics, SFedU, Rostov-on-Don, Russia

⁴Southern Scientific Center of RAS, Rostov-on-Don, Russia

E-mail: tyutyunov@sfedu.ru, kovalev@OK11495.spb.edu, ltitova@sfedu.ru, berdnikov@ssc-ras.ru

Being stimulated by disturbance of the natural habitats, explosive spread of common ragweed in the postwar years has created an ideal vacant niche for acclimatization of the ragweed leaf beetle (*Zygramma suturalis* F.), the North American phytophagous insect species introduced in the South of Russia in 1978. The propagation of this species resulted in restoration of natural periodicity of succession process, and significantly depleted the soil seed bank of the weed. Besides an applied economic effect, the studies on introduction had important theoretical significance, allowing revealing the phenomenon of solitary population wave (SPW) of the ragweed leaf beetle (Kovalev, Vechernin 1996). Theoretical study of SPW as the key factor determining the efficacy of weed biocontrol application underlie the method of biological suppression of common ragweed, based on SPW formation by means of arranging local refuges for initial increase of the beetle population abundance.

We propose a novel approach for modeling the spatiotemporal dynamics of the “ragweed – phytophage” system, accounting for both spatial activity and genetic structure of the ragweed leaf beetle population. The model is based on a taxis-diffusion-reaction system of partial differential equations (PDEs) and demo-genetic Kostitzin (1937) model, which describes the local kinetics of three competing genotypes of a diploid population. Common ragweed is supposed to compete with native plant species. Spatial heterogeneity is taken into account by possibility of selecting pattern of plots not suitable for both plants. Besides, we take into account the mate-finding Allee effect of the ragweed leaf beetle, caused by demographic stochasticity at low population density.

In particular, the model simulations easily reproduce the observed fieldwork phenomena: effective elimination of common ragweed by the advancing wave of *Zygogramma suturalis* population, and rapid (within 5-6 generations) development of flight in the ragweed leaf beetle, which in its home country, lost the ability to fly. Thus we confirm the earlier suggestion by Kovalev (2004) that formation of 'flyers' completely replacing 'pedestrians', was caused due to overcrowding in the wave front of expanding population of the ragweed leaf beetles.

The study was partially supported by the ministry of education and science of Russian Federation (grant FTFC 2012-1.1-12-000-1001-033, agr. 8044).

Пространственная демогенетическая модель в изучении феноменов, наблюдаемых при интродукции амброзиевого *zygogramma suturalis* f. листоеда на юге России

^{1,3}Тютюнов Ю.В., ²Ковалев О.В., ³Титова Л.И., ⁴Бердников С.В.

¹Институт аридных зон ЮНЦ РАН, Ростов-на-Дону, Россия

²Зоологический институт РАН, Санкт-Петербург, Россия

³НИИМ и ПМ ЮФУ им. И.И. Воровича, Ростов-на-Дону, Россия

⁴Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

E-mail: tyutyunov@sfedu.ru, kovalev@OK11495.spb.edu, ltitova@sfedu.ru, berdnikov@ssc-ras.ru

Амброзия полыннолистная занесена на Юг России в начале XX века, однако лишь с конца 1940-х годов её распространение приняло характер экологического взрыва: нарушение в результате военных действий почвенного покрова стимулировало экспансию этого сорняка, который вытеснял местные виды растений, формируя плотные гомогенные фитоценозы и на годы блокируя процесс сукцессии. Растительный покров нередко был образован только этим видом, плотность проростков которого при благоприятных условиях достигала 7 тыс. растений на 1 кв.м при фитомассе 10 т/га (Ковалев 1989а). Протяженные очаги амброзии представляли собой идеальную свободную нишу для акклиматизации завезенного в 1978 г. на Юг России полезного североамериканского насекомого – амброзиевого полосатого листоеда *Zygogramma suturalis* F. Расселение листоеда на залежах в очагах амброзии значительно снизило количество семян сорняка в почве и привело к восстановлению естественной периодичности сукцессионного процесса, характерной для этих территорий до нашествия амброзии (Ковалев, Вечернин 1989). Помимо прикладного экономического эффекта, работы по интродукции имели важное теоретическое значение, позволив открыть и изучить феномен уединённых популяционных волн (УПВ) амброзиевого листоеда – перемещающихся по засоренному амброзией полю полос высокой концентрации насекомых (до 5000 экз/кв.м), в тылу которых практически не остается сорняка (Ковалев, Вечернин 1986; Ковалев 1989а). Пролонгированный эффект прохождения волны обеспечивается последующим конкурентным вытеснением амброзии полыннолистной растительными культурами, рекомендуемыми фитоценологическими методами (Марьюшкина 1986; Дзыбов 2010).

Для описания УПВ листоеда Ковалевым и Вечерниным (1986; 1989) была предложена математическая модель, согласующаяся с результатами крупномасштабных полевых работ постоянной экспедиции ЗИН АН СССР в Ставропольском крае.

Дальнейший анализ мирового опыта биоконтроля (Kovalev 2004; Ковалев и др. 2013) показал, что эффективность наиболее успешных кампаний по биологическому подавлению сорных растений связана с волновым характером распространения фитофага (Huffaker 1967; Julien, Griffiths 1998; Room, Thomas 1985; Room 1990; Moran et al. 2009). Теоретические исследования УПВ как ключевого фактора эффективности агента-фитофага легли в основу разработанной в ЗИН РАН методики биологического подавления амброзии, предусматривающей формирование УПВ путём организации локальных участков-резерватов для начального наращивания численности популяции листоеда (Ковалев, Вечернин 1989).

Интродукция листоеда сопровождалась и другими интересными явлениями. Так, высокая плотность популяционной волны жуков способствовала быстрому (в течение шести поколений) закреплению фенотипического признака способности к полёту в популяции нелетающего в условиях родины вида насекомого (Ковалев 1989б). Бродским (1989) выявлены морфологические отличия жуков Ставропольской популяции от жуков из Канады и США, в аксиллярном аппарате которых отсутствуют склеротизованные структуры, обеспечивающие полет.

Для изучения факторов эффективности биометода и наблюдаемых при интродукции листоеда феноменов нами разработана модель системы «растительный ресурс – потребитель», учитывающая пространственную активность и генетическую структуру популяции биологического агента – фитофага. Предусмотрена возможность включения в модель культуры – конкурента сорняка, а также выделения участков, на которых вообще нет растительности. При построении модели объединены апробированные ранее методики описания активных направленных перемещений потребителей (Тютюнов и др. 2002; 2009; 2010; Tyutyunov et al. 2007) и эволюции генетической структуры пространственно-распределённой популяции (Тютюнов и др. 2008). Динамика генотипов листоеда, образованных аллелями способности и неспособности жуков к полёту задается демогенетическими уравнениями Костицина (Kostitzin, 1937). Учтено влияние на воспроизводство листоеда эффекта Олли, который может быть обусловлен сложностью выбора полового партнёра (Gascoigne 2009) вследствие демографической стохастичности, размерного полового диморфизма жуков и выявленной положительной ассортативностью скрещивания по признаку размера (Сергиевский 1989). Для двумерного прямоугольного местообитания модель представляет собой систему восьми дифференциальных уравнений с частными производными типа таксис-диффузия-реакция, численно интегрируемую методом прямых.

Модельные эксперименты, в частности, подтверждают критическое значение высокой плотности амброзии для формирования эффективной популяционной волны фитофага, которая, в свою очередь, создает условия для быстрого распространения в популяции аллеля способности к полёту.

Работа частично поддержана грантом ФЦП «Кадры» «Новый подход к согласованному биологическому контролю амброзии полыннолистной и колорадского жука» (шифр 2012-1.1-12-000-1001-033, согл. 8044).

Литература:

1. Бродский А.К. *Строение, функционирование и эволюция крыловых сочленений насекомых / Чтения памяти Н.А. Холодковского. Л.: Наука. 1989. С. 3-47.*
2. Дзыбов Д.С. *Агростепи. Ставрополь: АГРУС, 2010. 256 с.*
3. Ковалев О.В. *Микроэволюционные процессы в популяции амброзиевого листоеда *Zygogramma suturalis* F. (Coleoptera, Chrysomelidae), интродуцированного из Северной Америки в СССР // Теоретические основы биологической борьбы с амброзией / Ред. О.В. Ковалев, С.А. Белокобыльский. Л.: Наука. 1989б. Тр. ЗИН АН СССР; Т. 189. С. 139-165.*
4. Ковалев О.В. *Расселение адвентивных растений трибы амброзиевых в Евразии и разработка биологической борьбы с сорняками рода *Ambrosia* L. (Ambrosieae, Asteraceae) // Теоретические основы биологической борьбы с амброзией / Ред. О.В. Ковалев, С.А. Белокобыльский. Л.: Наука, 1989а. Тр. ЗИН АН СССР; Т. 189. С. 7-23.*
5. Ковалев О.В., Вечернин В.В. *Обнаружение и описание явления образования уединенной популяционной волны интродуцированных насекомых // Теоретические основы биологической борьбы с амброзией / Ред. О.В. Ковалев, С.А. Белокобыльский. Л.: Наука. 1989. Тр. ЗИН АН СССР. Т. 189. С. 105-120.*
6. Ковалев О.В., Вечернин В.В. *Описание нового волнового процесса в популяциях на примере интродукции и расселения амброзиевого листоеда *Zygogramma suturalis* F. (Coleoptera, Chrysomelidae) // Энтомол. обозр. 1986. Т. 65. Вып. 1. С. 21-38.*
7. Ковалев О.В., Тютюнов Ю.В., Ильина Л.П., Бердников С.В. *Об эффективности интродукции американских насекомых – фитофагов амброзии (*Ambrosia artemisiifolia* L.) на Юге России // Энтомол. Обзор. 2013. Т. 92. Вып. 2. (в печати)*
8. Марьюшкина В.Я. *Амброзия полыннолистная и основы биологической борьбы с ней. Киев: Наукова думка. 1986. 120 с.*
9. Сергиевский С.О. *Выбор партнера для спаривания в популяциях амброзиевого листоеда *Zygogramma suturalis* F. // Теоретические основы биологической борьбы с амброзией / Ред. О.В. Ковалев, С.А. Белокобыльский. Л.: Наука. 1989. Тр. ЗИН АН СССР. Т. 189. С. 173-176.*
10. Тютюнов Ю.В., Жадановская Е.А., Ардити Р., Медвинский А.Б. *Пространственная модель развития устойчивости насекомых-вредителей к трансгенной инсектицидной сельскохозяйственной культуре на примере кукурузного стеблевого мотылька // Биофизика. 2007. Т. 52. Вып. 1. С. 95-113.*
11. Тютюнов Ю.В., Загребнева А.Д., Сурков Ф.А., Азовский А.И. *Микромасштабная пятнистость распределения веслоногих рачков как результат трофически-обусловленных миграций // Биофизика. 2009. Т. 54. Вып. 3. С. 508-514.*
12. Тютюнов Ю.В., Загребнева А.Д., Сурков Ф.А., Азовский А.И. *Моделирование потока популяционной плотности организмов с периодическими миграциями // Океанология. 2010. Т. 50. № 1. С. 72-81.*
13. Тютюнов Ю.В., Сапухина Н.Ю., Сенина И.Н., Ардити Р. *Явная модель поискового поведения хищника // Журн. общ. биологии. 2002. Т. 63. №2. С. 137-148.*

14. Gascoigne J., Berec L., Gregory S, Courchamp F. *Dangerously few liaisons: a review of mate-finding Allee effects* // *Popul. Ecol.* 2009. Vol. 51. N 3. P. 355-372.
15. Huffaker C.B. *A comparison of the status of biological control of St. John's wort in California and Australia* // *Mushi.* 1967. Vol. 39. (Suppl.). P. 51-73.
16. Julien M.N., Griffiths M.W. *Biological Control of Weeds: A World Catalogue of Agents and Their Target Weeds*, 4th edn. Wallingford, UK: CABI Publishing, 1998. 223 p.
17. Kostitzin V.A. *Biologie mathématique.* Paris: Librairie Armand Colin, 1937. 223 p.
18. Kovalev O.V. *The solitary population wave, a physical phenomenon accompanying the introduction of a chrysomelid* / Jolivet P., Santiago-Blay J.A., Schmitt M. (eds). *New Developments in the Biology of Chrysomelidae. The Hague, the Netherlands: SPB Academic Publishing bv*, 2004. P. 591-601.
19. Moran P.J., DeLoach C.J., Dudley T.L., Sanabria J. *Open field host selection and behavior by tamarisk beetles (Diorhabda spp.) (Coleoptera: Chrysomelidae) in biological control of exotic saltcedars (Tamarix spp.) and risks to non-target athel (T. aphylla) and native Frankenia spp.* // *Biol. Control.* 2009. Vol. 50. P. 243-261.
20. Room P.M. *Ecology of a simple plant-herbivore system. Biological control of Salvinia* // *Trends in ecology and evolution.* 1990. Vol. 5, N 3. P. 74-79.
21. Room P.M., Thomas P.A. *Nitrogen and establishment of a beetle for biological control of the floating weed Salvinia in Papua New Guinea* // *J. Appl. Ecol.* 1985. Vol. 22. P. 139-156.
22. Tyutyunov Yu., Titova L., Arditi R. *A minimal model of pursuit-evasion in a predator-prey system* // *Mathematical Modelling of Natural Phenomena.* 2007. Vol. 2. N 4. P. 122-134.

Problem of intensity identification of atmospheric pollution source

¹Chubatov A.A., ²Karmazin V.N.

¹Armavir State Pedagogical Academy, Russia

²Kuban State University, Russia

E-mail: chaa@inbox.ru, karmazin@kubsu.ru

The special case of source intensity estimation problem is investigated in present study with application to atmospheric pollution transport modeling [1]. The considered approach uses as input parameters the set of known sensitivity coefficients and results of corresponding pollution measurements. The observation in the area is defined as a vector field $c_{ji} = q(x_j, y_j, z_j, t_j)$ $j = 1, K, J, i = 1, K, N, , J$ is a number of sensors, N is a number of time steps). In finite vector space of unknown the source estimation problem can be presented as a matrix equation

$$A_h \cdot g = f_\delta, \quad A_h \in \mathbb{R}^{N \cdot J \times N}, \quad g \in \mathbb{R}^N, \quad f_\delta \in \mathbb{R}^{N \cdot J}, \quad \|A_h - A\| \leq h, \quad \|f_\delta - f\| \leq \delta, \quad (1)$$

where A_h is a matrix of sensitivity, f_δ is a observation data rewritten in terms of sensitivity.

The residual of the problem $\mu = \inf \|f - A \cdot g\| = \|f - A \cdot g^*\|$ called misfit data in geophysics defines the corresponding optimization problem. Errors h and δ of this ill-posed problem overdetermine ($\mu > 0$) matrix equation (1). Solving (1) we are looking for so called general solution or pseudo-solution determined as $g = g^* = \arg \min \|f - A \cdot g\|$, where $r = f_\delta - A_h \cdot g$ called residual. We can transform the equation (1) into $A_h \cdot g + r = f_\delta$. In this case both g and r are unknown. Normalizing with least squares method we get a augmented normal system of the following form

$$R_\omega \cdot x = b, \quad R_\omega = \begin{pmatrix} \omega \cdot E & A_h \\ A_h^T & O \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} \omega^{-1} \cdot \hat{r} \\ \hat{g} \end{pmatrix}, \quad d = \begin{pmatrix} f_\delta \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

where \hat{r} is an approximation of residual, \hat{g} approximate the solution, ω is a scaling parameter.

The last matrix equation (3) is solved with standard Tikhonov regularization and imaginary spectrum shift approach proposed by Fadeeva taking advantage of the matrix symmetry ($R_\omega^T = R_\omega$). Two approaches of regularization parameter α choice were used here: apriority and aposteriori. We use the fact proved by Morozov V.A. and Gilyazov S.F. [2] that $\|g(\alpha) - g^*\| = O(h + \delta)$ for $\mu = 0$ and $\alpha = h$. The aprioristic choice of α for which $\alpha_{apriority} = h$ guarantees asymptotic convergence to the exact solution $g(\alpha) \rightarrow g^* = \hat{g}$. In the case of big fixed h and δ , parameter α is defined with aposteriori approach using generalized residual method. For an estimation of quality of the choice The parameter $\eta_{eff}(\alpha_{meth}) = \|g(\alpha_{meth}) - \hat{g}\| / \|g(\alpha_{best}) - \hat{g}\|$ controls the efficiency of choicing α , where α_{best} is the α best guess satisfying $\min_\alpha \|g(\alpha) - \bar{g}\| = \|g(\alpha_{best}) - \bar{g}\|$.

The algorithm designed and used in presented study provide a stable numerical solution of the considered source estimation problem. This result was numerically approved by author with numerical experiments. The solution obtained with regularizing approach with SVD decomposition was studied and analyzed making corresponding conclusions about its efficiency. Two considered approaches choicing α were compared with the corresponding efficiency control parameters: $\eta_{eff}(\alpha_{apriory}) \leq 2$ for the aprioristic choice of α , $\eta_{eff}(\alpha_{apost}) < 1,3$ for the aposteriori choice of α .

References:

1. Chubatov A.A., Karmazin V.N. The operative control for atmospheric pollution source on the base of function specification method // Vestn. Sam. state. tech. univ-ty. 2008, № 2, p. 210–214.
2. Morozov V.A. Algorithmic bases of methods of the solution of ill-posed problems // Vychisl. methods and programming. 2003, Vol. 45, p. 130-141.

Задача идентификации интенсивности источника загрязнения атмосферы

¹Чубатов А.А., ²Кармазин В.Н.

¹ Армавирская государственная педагогическая академия, Армавир, Россия

² Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

E-mail: chaa@inbox.ru, karmazin@kubsu.ru

В работе предлагается подход, позволяющий оценить интенсивность действия источника загрязнения атмосферы на основе данных о замерах концентрации примеси в стационарных пунктах контроля. Обратная задача решалась методом регуляризации. Получены устойчивые оценки интенсивности при наличии погрешностей в операторе (матрице системы) и отсутствии информации о совместности точной системы. Произведено сравнение априорного и апостериорного способов выбора параметра регуляризации. Работа продолжает исследования, представленные в [2,3].

1. Математическая модель и методы

1.1. Постановка задачи. Обзор моделей идентификации интенсивностей источников загрязнения атмосферы дан в работе [1]. В работах [2,3] рассматривалась задача идентификации интенсивности $g(t)$ источника загрязнения атмосферы при известных замерах концентрации $c_{ji} = q(x_j, y_j, z_j, t_i)$, $j = 1, \dots, J$, $i = 1, \dots, N$ и ступенчатых коэффициентах чувствительности. Коэффициенты чувствительности характеризуют причинно-следственные связи и параметры модели: коэффициенты диффузии, скорость ветра, геометрию области, расположение источника и датчиков, за исключением интенсивности источника. Задача идентификации интенсивности источника с помощью принципа суперпозиции сводилась к приближенной системе линейных уравнений

$$A_h \cdot g = f_\delta, \quad A_h \in \mathbb{R}^{N \times J \times N}, \quad g \in \mathbb{R}^N, \quad f_\delta \in \mathbb{R}^{N \times J}, \quad \|A_h - A\| \leq h, \quad \|f_\delta - f\| \leq \delta, \quad (1)$$

где A_h — матрица коэффициентов чувствительности, f_δ — вектор, зависящий от замеров c_{ji} , — число датчиков, N — число шагов по времени.

Погрешности исходных данных h , δ и неучтенные факторы модели приводят к практической несовместности системы (1). В этом случае решение системы будем находить в обобщенном смысле (псевдорешение)

$$g := g^* = \arg \min \|f - A \cdot g\| = A^+ \cdot f, \quad A^+ = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T.$$

Величина $\mu = \inf \|f - A \cdot g\| = \|f - A \cdot g^*\|$ называется мерой несовместности (точной) системы. Задача идентификации интенсивности источника является некорректно поставленной (решение неустойчиво по отношению к погрешностям исходных данных) и требует специальных методов решения [4].

1.2. Сингулярное разложение матрицы. В численных методах решения некорректных задач линейной алгебры особое место занимает сингулярное разложение (singular value decomposition, SVD) [5]

$$A = U \cdot S \cdot V^T, \quad A, S \in \mathbb{R}^{(N-J) \times N}, U \in \mathbb{R}^{(N-J) \times (N-J)}, V \in \mathbb{R}^{N \times N}, \quad (2)$$

где U, V — унитарные матрицы, $S = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N)$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_N \geq 0$ — диагональная матрица сингулярных чисел.

Хотя, процедура сингулярного разложения является трудоемкой задачей, оно дает почти исчерпывающую информацию о степени некорректности задачи. Будем использовать евклидовы векторную и матричную нормы $\|x\| = x^T \cdot x$, $\|A\| = \max \|A \cdot x\|$, тогда $\text{cond}(A) = \sigma_1 / \sigma_N$. Степень некорректности задачи можно определять по скорости убывания сингулярных чисел. Данная обратная задача относится к сильно некорректным задачам [6], т.к. при малом шаге по времени $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ существует число $\nu > 0$, такое что $\lim_{n \rightarrow \infty} e^{\nu n} \sigma_n = 0$.

1.3. Регуляризирующий алгоритм. Академик А.Н. Тихонов предложил свести задачу отыскания нормальных псевдорешений к задаче условной минимизации методом множителей Лагранжа параметрического функционала невязки

$$S_\alpha(g) = \|A_h \cdot g - f_\delta\|^2 + \alpha \cdot \|g\|^2 \rightarrow \min,$$

решение которой определяется как единственное решение уравнения Эйлера (регуляризованной нормальной системы, РЕНС)

$$(A_h^T \cdot A_h + \alpha \cdot E) \cdot g(\alpha) = A_h^T \cdot f_\delta,$$

где символом E обозначается единичная матрица, соответствующего порядка.

Вычислительный эффект регуляризации заключается в малом сдвиге (от нуля) спектра неотрицательно определенной матрицы $A_h^T \cdot A_h$, что улучшает (при соответствующем выборе α) число обусловленности задачи.

1.4. Выбор параметра регуляризации. В [7] доказано, что если $\alpha = \alpha(h, \delta) > 0$ выбран, так что $\lim_{h, \delta \rightarrow 0} (h + \delta) / \alpha = 0$, то $g(\alpha) \xrightarrow{h, \delta \rightarrow 0} g^*$. Также В.А. Морозовым и С.Ф. Гилязовым было доказано, что если $\mu = 0$ и $\alpha = h$, то $\|g(\alpha) - g^*\| = O(h + \delta)$. Такой априорный выбор $\alpha_{\text{apriory}} = h$ гарантирует асимптотическую сходимость $g(\alpha) \xrightarrow{h, \delta \rightarrow 0} g^* = \bar{g}$. В случае, когда погрешности h и δ фиксированы, параметр выбирается апостериорно по принципу обобщенной невязки

$$\varphi(\alpha) - \psi(\alpha) = 0, \quad \varphi(\alpha) = \|f_\delta - A_h \cdot g(\alpha)\|, \quad \psi(\alpha) = \mu + h \cdot \|g(\alpha)\| + \delta.$$

2. Регуляризирующий алгоритм решения задачи идентификации интенсивности

2.1. Несовместность системы. Еще раз отметим, сложности решения данной обратной задачи:

система является несовместной (это преодолевается с помощью псевдорешения);

матрица системы A_h является плохообусловленной (это преодолевается регуляризирующим алгоритмом);

нет информации о мере несовместности точной системы μ .

Третья из сложностей вынуждает решателя вычислять меру несовместности точной системы (точнее ее оценку). Учитывая это, запишем систему (1) в виде

$$A_h \cdot g + r = f_\delta, \quad (3)$$

где $r = f_\delta - A_h \cdot g$ — вектор невязки ($\mu = \|r\|$). Отметим, что вектор невязки r (либо его норма μ) описывает меру адекватности модели реальной ситуации, поэтому его значение так же интересно исследователю, т.к. позволяет идентифицировать скрытые (неучтенные) факторы модели.

Существует три подхода к поиску приближенных решений системы (3):

на основе априорной информации ищется r и затем решается система $A_h \cdot g = f_\delta - r$;

ищется регуляризованное псевдорешение g и вычисляется вектор $r = f_\delta - A_h \cdot g$;

решение g и невязка r ищутся одновременно.

В последнем случае система будет недоопределенной и будет иметь бесконечное число решений.

Для единственности решения система (3) дополняется нормальной системой

$$A_h^T \cdot A_h \cdot g = A_h^T \cdot f_\delta. \quad (4)$$

2.2. Расширенная нормальная система (РНС) [8,9]. Перепишем систему (4) в виде

$$A_h^T \cdot r = 0, \quad (4')$$

где 0 — нулевой вектор-столбец.

Учитывая это, составим из (3) и (4') совместную расширенную систему (РНС)

$$R_{\omega} \cdot x = b, \quad R_{\omega} = \begin{pmatrix} \omega \cdot E & A_h \\ A_h^T & O \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} \omega^{-1} \cdot \hat{r} \\ \hat{g} \end{pmatrix}, \quad d = \begin{pmatrix} f_{\delta} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$: N \cdot J, \quad R_{\omega} \in \mathbb{R}^{(m+N) \times (m+N)}, \quad x, d \in \mathbb{R}^{m+N}, \quad E \in \mathbb{R}^{m \times m}, \quad O \in \mathbb{R}$$

где \hat{r} — оценка вектора невязки, \hat{g} — оценка решения g системы (1), ω — скалярный параметр, служащий для масштабирования расширенного вектора решения x и уменьшения числа обусловленности матрицы R_{ω} расширенной системы, O — нулевая матрица.

2.3. Использование SVD в решении РНС. Подставим формулу (2) сингулярного разложения матрицы A_h в систему (3)

$$U \cdot S \cdot V^T \cdot g + r = f_{\delta},$$

и модифицируем систему, домножив обе части на U^T

$$S \cdot w + \rho = b, \quad w = V^T \cdot g, \quad \rho = U^T \cdot r, \quad b = U^T \cdot f_{\delta}, \quad (3')$$

тогда РНС (5) примет вид

$$R_{\omega} \cdot x = d, \quad R_{\omega} = \begin{pmatrix} \omega \cdot E & S_h \\ S_h^T & O \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} \omega^{-1} \cdot \hat{\rho} \\ \hat{w} \end{pmatrix}, \quad d = \begin{pmatrix} b \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (5')$$

В этом случае матрица R_{ω} будет разреженной (иметь три ненулевые диагонали).

2.4. Регуляризация РНС. Теперь необходимо выполнить регуляризацию расширенной нормальной системы (5'). Для нахождения регуляризованного решения можно применить метод регуляризации А. Н. Тихонова

$$T_{\omega, \alpha} \cdot x(\alpha) = R_{\omega} \cdot d, \quad T_{\omega, \alpha} = (R_{\omega}^2 + \alpha \cdot E), \quad E \in \mathbb{R}^{(m+N) \times (m+N)}, \quad (6)$$

где $x(\alpha)$ — регуляризованные невязка и решение. Как отмечалось выше, из-за использования гауссовой симметризации число обусловленности системы увеличится (возведется в квадрат).

Учитывая симметричность матрицы R_{ω} , что гарантирует вещественность ее спектра (т.к. матрица квадратная, то сингулярные числа являются спектральными (собственными) числами), применим к (5') метод мнимого сдвига спектра Фадеевой

$$(R_{\omega} + i \cdot \alpha \cdot E) \cdot (x(\alpha) + i \cdot y) = d, \quad i = \sqrt{-1}, \quad E \in \mathbb{R}^{(m+N) \times (m+N)},$$

или в расширенном виде

$$F_{\omega, \alpha} \cdot z(\alpha) = d_F, \quad F_{\omega, \alpha} = \begin{pmatrix} R_{\omega} & -\sqrt{\alpha} \cdot E \\ \sqrt{\alpha} \cdot E & R_{\omega} \end{pmatrix}, \quad z_{\alpha} = \begin{pmatrix} x(\alpha) \\ y \end{pmatrix}, \quad d_F = \begin{pmatrix} d \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Системы (6),(7) называются регуляризованными расширенными нормальными системами (РегРНС). Мы будем называть их ТРегРНС и ФРегРНС, соответственно.

2.5. Выбор α . При поиске регуляризованного решения РНС использовались два принципа выбора регуляризирующего параметра α :

априорный $\alpha_{apriory} = h$,

апостериорный α_{apost} — корень обобщенной невязки $\varphi_{\omega}(\alpha) - \psi_{\omega}(\alpha) = 0$ для РегРНС, где

$$\varphi_{\omega}(\alpha) = \sqrt{\|b - S \cdot w(\alpha) - \rho\|^2 + \|\omega^{-1} \cdot S^T \cdot \rho\|^2}, \quad \psi_{\omega}(\alpha) = \delta + \sqrt{2} \cdot h \cdot \sqrt{\|w(\alpha)\|^2 + \|\omega^{-1} \cdot \rho\|^2}.$$

Для поиска корня α_{apost} использовался метод касательных с начальным значением $\alpha = 10$.

Для оценки качества выбора α использовался коэффициент эффективности

$$\eta_{eff}(\alpha_{meth}) = \|g(\alpha_{meth}) - \bar{g}\| / \|g(\alpha_{best}) - \bar{g}\|,$$

где α_{best} — лучшее α , выбранное по условию $\min_{\alpha} \|g(\alpha) - \bar{g}\| = \|g(\alpha_{best}) - \bar{g}\|$. Для поиска α_{best} функция $g(\alpha)$ вычислялись на геометрической сетке $\alpha_k = \alpha_0 \cdot q^k$, $0 < q < 1$.

3. Выводы

В проведенных вычислительных экспериментах построены устойчивые численные приближения искомой интенсивности. Произведен анализ решений (оценок интенсивности), полученных методом регуляризации на основе РегРНС с использованием SVD-разложения. Сравниваются априорный и апостериорный (принцип обобщенной невязки) подходы к выбору регуляризирующего параметра. Для априорного выбора α коэффициент $\eta_{eff}(\alpha_{apriory}) \leq 2$, для апостериорного — $\eta_{eff}(\alpha_{apost}) < 1,3$.

Литература:

1. Кожневникова М.Ф., Левенец В.В., Ролик И.Л. Идентификация источников загрязнения: вычислительные методы // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники* (19). 2011, № 6, с. 149–156.
2. Чубатов А.А., Кармазин В.Н. Экспресс-контроль за источником загрязнения атмосферы на основе метода последовательной функциональной аппроксимации // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*. 2008, № 2, с. 210–214.
3. Чубатов А.А., Кармазин В.Н. Устойчивая оценка интенсивности источника загрязнения атмосферы на основе метода последовательной функциональной аппроксимации // *Компьютерные исследования и моделирование. Модели в физике и технологии*. 2009, Т. 1, № 4, с. 391–403.
4. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. *Методы решения некорректных задач*. — М: Наука, 1986.
5. Голуб Дж., Ван Лоун Ч. *Матричные вычисления: Пер. с англ.* — Москва: Мир, 1999.
6. Engl H. W., Hanke M., Neubauer A. *Regularization of Inverse Problems*. — Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1996.
7. Морозов В.А. *Алгоритмические основы методов решения некорректных задач // Вычисл. методы и программирование*. 2003, Т. 45, с. 130–141.
8. Vjoork A. *Numerical stability of methods for solving augmented systems // Contemporary Math*. 1997. Vol. 204. Pp. 51–60.
9. Жданов А.И. Регуляризация неустойчивых конечномерных линейных задач на основе расширенных систем // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.*, 2005, Т. 45, № 11, с. 1918–1926.

Effects of environmental conditions on CO₂ / H₂O exchange of Betula species in the taiga zone of North-West Russia

¹Pridacha V.B., ¹Sazonova T.A., ²Olchev A.V.

¹Forest Research Institute KarSC RAS, Petrozavodsk, Russia

²A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of RAS, Moscow, Russia

E-mail: pridacha@krc.karelia.ru, aoltche@gmail.com

Measurements of leaf photosynthesis, respiration and stomatal conductance of *Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh. were provided using the portable photosynthesis system LI-6400 (Li-Cor, USA) on the experimental plots of the Forest research Institute of KarRC RAS (Petrozavodsk, Russia). During the field campaigns in 2011 the CO₂ and light response curves of photosynthesis of leaves under different air temperatures as well as the temperature response functions of dark respiration (Rd) of the leaves of different species were estimated.

The method suggested by Sharkey et al (2007) was used to estimate the maximal velocity of Rubisco for carboxylation ($V_{c_{max}}$), the rate of electron transport at light saturation (J_{max}), photorespiratory compensation point as well as the rate of use of triose phosphates (TPU) that characterizes the availability of internal inorganic phosphates (Ci) in leaves for Calvin's cycle. It was assumed that the initial slope of the relationship between leaf photosynthesis rate and CO₂ concentration in sub-stomatal air space ($C_i < 200$ ppm) can be considered as an area of Rubisco limitation of photosynthesis. The upper part of CO₂ response curve from approximately 300 ppm and higher is influenced by, first of all, the rate of regeneration of RuBP, and after that by availability of inorganic phosphate in leaves. The temperature dependences of $V_{c_{max}}$, J_{max} and TPU were estimated using the statistical analysis of $V_{c_{max}}$ and J_{max} data set using equations suggested by Medlin et al (2002). Temperature dependence function of TPU was derived using algorithm proposed by Sharkey et al (2007). The results of field measurements show a relatively weak differences among $V_{c_{max}}$, J_{max} , TPU and Rd for *B. pendula* and *B. pubescens* trees (for leaf temperature $T=25^{\circ}C$).

The analysis of nitrogen influence on H₂O and CO₂ exchange in the leaf of *B. pendula* and *B. pubescens* also identified interspecific distinctions under experimental treatment. When treated with nitrogen (NH₄NO₃) both species demonstrated an increase in stomatal conductance (g_s), rates of photosynthesis (A) and transpiration (E) in the leaf. In *B. pubescens* the increase in the leaf E rate came along with an increase in the water potential (Ψ) of the foliated shoot and a decrease in the available water content (WC_f) and saturating water content (WC_s) in the leaf. The changes accompanying the increase in leaf E rate in *B. pendula* were a decrease in Ψ of the foliated shoot and stabilization of WC_f and WC_s of the leaf. In both the control and the treatments the values

of the leaf A rate, WC_f and WC_s were higher in *B. pubescens*. The conclusion is that the two species differ in their functional plasticity with respect to the mineral nutrition conditions.

The results of provided leaf photosynthesis, respiration, stomatal conductance and transpiration measurements were used in the process-based Mixfor-SVAT model (Olchev et al 2002, 2008) to derive the possible response of CO_2/H_2O budgets of Karelian forest ecosystems to future climatic changes.

The study was supported by grants (13-04-00827-a and 11-04-01622-a) of the Russian Foundation of Basic Research (RFBR).

Влияние условий внешней среды на показатели CO_2 и H_2O обмена растений рода *Betula* таежной зоны Северо-Запада России

¹Придача В.Б., ¹Сазонова Т.А., ²Ольчев А.В.

¹Институт леса Карельского НЦ РАН, Петрозаводск, Россия

²Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

E-mail: pridacha@krc.karelia.ru, aoltche@gmail.com

Происходящие изменения климата и антропогенная деятельность оказывают заметное влияние на развитие и динамику наземных экосистем. Отклик растений на изменения условий внешней среды проявляется в первую очередь в изменении интенсивности их биофизических и биохимических реакций, важным индикатором которых является скорость газообмена CO_2 (фотосинтез и дыхание) и обмена H_2O (транспирация) между растениями и окружающим воздухом. Для прогноза возможной реакции различных растительных сообществ необходимо оценить масштабы природной изменчивости и чувствительность показателей CO_2 и H_2O обмена к изменению параметров внешней среды. Полученные показатели могут быть использованы как в качестве индикаторов при оценке чувствительности растений к внешним воздействиям, так и в качестве параметров в математических моделях продукционного процесса и водного цикла наземных экосистем. В рамках данного исследования на примере видов *Betula L.*, в частности березы повислой (*Betula pendula* Roth) и березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), являющихся основными лесообразующими породами на Северо-Западе России наряду с видами родов *Pinus* и *Picea*, была проведена оценка влияния факторов внешней среды на показатели CO_2 и H_2O обмена листа берез в условиях европейской части среднетаежной зоны России.

Измерения параметров фотосинтеза, дыхания и устьичной проводимости листа березы повислой и березы пушистой проводили на неотделенных сформировавшихся листьях в средней части кроны берез с помощью портативной фотосинтетической системы LI-COR 6400XT (LI-COR Inc., США) на экспериментальных площадях Института леса КарНЦ РАН (южная Карелия, N 61°45', E 34°20'). В работе использовали стандартную листовую камеру с источником света LI-COR 6400-02B LED (LI-COR Inc., США). Прибор LI-6400XT позволяет в автоматическом режиме проводить измерения фотосинтеза и дыхания отдельного листа при различных значениях ФАР, температуры, влажности и концентрации CO_2 в измерительной камере. Программа измерений в полевых условиях включала получение углекислотных и световых кривых фотосинтеза листьев при разных температурах воздуха и температурных зависимостей темного дыхания.

Для моделирования нетто фотосинтеза листьев деревьев и напочвенной растительности широко используется подход Фаркхара (Farquhar et al., 1980, 2001), который предполагает, что нетто фотосинтез листа определяется скоростью карбоксилирования (РБФК/О), скоростью переноса электронов для регенерации акцептора РБФ и темного дыхания. В качестве дополнительного лимитирующего фактора фотосинтеза рассматривается также доступность внутренних неорганических фосфатов (Pi) для цикла Кальвина (Sharkey 1985).

На основе полученных данных по методике (Sharkey et al., 2007) рассчитывали значения максимальной скорости карбоксилирования РБФК/О ($V_{c_{max}}$), скорость переноса электронов для регенерации акцептора РБФ при световом насыщении (J_{max}), а также скорость утилизации триозофосфатов (TPU), что характеризует доступность внутренних неорганических фосфатов (Pi) для цикла Кальвина. Температурные зависимости $V_{c_{max}}$, J_{max} и TPU были получены путем статистического анализа множества значений $V_{c_{max}}$ и J_{max} при разных температурах листа с использованием уравнений, предложенных группой исследователей (Medlin et al., 2002). Температурную зависимость TPU рассчитывали с использованием алгоритма (Sharkey et al., 2007). На основании температурных зависимостей были получены предварительные оценки $V_{c_{max}}$, J_{max} и TPU для выбранной референтной температуры 25°C. Анализ полученных

данных выявил, в частности, некоторую тенденцию более высоких значений показателей $V_{c_{max}}$, J_{max} и TPU_{max} листа березы пушистой по сравнению с березой повислой. Так, например, максимальные значения $V_{c_{max}}$ листа березы пушистой были выше на 14 % по сравнению с березой повислой и составили, соответственно, 111 и 97 $\mu\text{моль м}^{-2} \text{с}^{-1}$. Максимальные значения J_{max} также были получены для березы пушистой ($J_{max}(25) = 164 \mu\text{моль м}^{-2} \text{с}^{-1}$), минимальные - для березы повислой ($J_{max}(25) = 157 \mu\text{моль м}^{-2} \text{с}^{-1}$). Значения TPU_{max} листа березы пушистой и березы повислой составили, соответственно, 11.7 и 11.0 $\mu\text{моль м}^{-2} \text{с}^{-1}$. Значения $R_d(25)$ листа исследуемых берез не различались и составили 2.0 $\mu\text{моль м}^{-2} \text{с}^{-1}$.

Особый интерес представляют результаты полевого опыта с внесением азотного удобрения NH_4NO_3 в условиях достаточной влагообеспеченности. Известно, что биологическим круговоротом углерода в большей степени управляет круговорот азота, который является самым дефицитным элементом минерального питания для растений бореальной зоны вследствие особенностей гидротермического режима лесных почв (Larcher, 1995, и др.). В этой связи было проведено исследование показателей H_2O и CO_2 обмена листа березы повислой и березы пушистой при разной обеспеченности среды азотом. Измерения проводили в дневной динамике с 9.00 до 15.00 в июне-июле в дни с разными погодными условиями. В опытный период дневные значения интенсивности ФАР, температуры и дефицита водяного пара в воздухе варьировали в диапазоне 170-1800 $\mu\text{моль м}^{-2} \text{с}^{-1}$, 20-28°C и 0.6-1.6 кПа, соответственно. Концентрация CO_2 в воздухе в среднем за период наблюдения составила $370.0 \pm 0.4 \mu\text{моль CO}_2 \text{ моль}^{-1}$. Наблюдения проводили на сформировавшихся листьях при одинаковых условиях в листовой камере, в частности, освещенность, концентрация CO_2 и интенсивность потока воздуха составили, соответственно, 1600 $\mu\text{моль м}^{-2} \text{с}^{-1}$, 400 $\mu\text{моль CO}_2 \text{ моль}^{-1}$ и 500 $\mu\text{моль с}^{-1}$. Температура воздуха и листа в измерительной камере составили за весь период измерения в среднем 23.56 ± 0.10 и 24.84 ± 0.12 °C, соответственно. Водный потенциал (Ψ) в облиственных побегах определяли с помощью камеры давления Plant Moisture Vessel SKPM 1400 (Skye Instruments Ltd., Великобритания). Содержание воды в свежей навеске (WC_f) в листьях, дефицит водного насыщения (WSD) и насыщающее содержание воды (WC_s) определяли весовым методом. Определение содержания азота (N) в листьях выполняли с помощью элементного анализатора PE-2410 (Perkin Elmer, США) в аналитической лаборатории ИЛ КарНЦ РАН.

Проведенное исследование показало, что показатели H_2O и CO_2 обмена листа березы повислой и березы пушистой в разной степени чувствительны к внесению азотного удобрения NH_4NO_3 . Следует отметить межвидовые различия исследуемых показателей при экспериментальном воздействии. При внесении азота (NH_4NO_3) для обоих видов установлено увеличение устьичной проводимости (g_s), интенсивности фотосинтеза (A) и транспирации (E) листа. Диапазоны варьирования g_s , интенсивности A и E листа двух видов берез за период исследования были близкие и составили для березы повислой 0.15 – 0.46 $\text{моль H}_2\text{O м}^{-2} \text{с}^{-1}$, 12.66 – 24.25 $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$ и 1.58 – 4.86 $\text{млмоль H}_2\text{O м}^{-2} \text{с}^{-1}$ соответственно, березы пушистой – соответственно 0.13 – 0.48 $\text{моль H}_2\text{O м}^{-2} \text{с}^{-1}$, 14.42 – 25.76 $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$ и 1.50 – 5.15 $\text{млмоль H}_2\text{O м}^{-2} \text{с}^{-1}$. Однако у березы пушистой рост интенсивности E листа сопровождался увеличением водного потенциала (Ψ) облиственного побега и снижением оводненности (WC_f) и насыщающего содержания воды (WC_s) листа. В тоже время у березы повислой при увеличении интенсивности E листа отмечены снижение Ψ облиственного побега и стабилизация WC_f и WC_s листа. При этом как в контроле, так и в опыте более высокие значения интенсивности A, WC_f и WC_s листа отмечены для березы пушистой. Наиболее информативными показателями для выявления межвидовых особенностей H_2O и CO_2 обмена листа при внесении азотного удобрения в условиях достаточной влагообеспеченности оказались интенсивность A, WC_f и WC_s листа и Ψ облиственного побега.

Анализ взаимосвязи показателей H_2O и CO_2 обмена листа березы повислой и березы пушистой от содержания N в листе двух экспериментальных групп также выявил межвидовые различия силы влияния исследуемых параметров. Так, более сильные зависимости интенсивности A листа и Ψ облиственного побега от содержания азота в листе были отмечены для березы повислой по сравнению с березой пушистой, о чем свидетельствуют более высокие значения коэффициента детерминации (R^2), соответственно, 0.67 ($r = 0.82$, $p < 0.05$), 0.44 ($r = -0.66$, $p < 0.05$) и 0.60 ($r = 0.77$, $p < 0.05$), 0.28 ($r = 0.53$, $p < 0.05$). Напротив, более сильные зависимости WC_f и WC_s от содержания азота в листе получены для березы пушистой, соответственно, 0.68 ($r = -0.83$, $p < 0.05$) и 0.70 ($r = -0.84$, $p < 0.05$), по сравнению с березой повислой, для которой данные зависимости установлены не были ($p > 0.05$). Следует отметить, что зависимости g_s и интенсивности E листа от содержания N в листе для исследуемых берез были однонаправленные и близкие по силе влияния действующего фактора, о чем свидетельствуют значения R^2 для березы повислой, соответственно, 0.59 ($r = 0.77$, $p < 0.05$) и 0.79 ($r = 0.89$, $p < 0.05$), для березы пушистой – 0.56 ($r = 0.75$, $p < 0.05$) и 0.77 ($r = 0.88$, $p < 0.05$) соответственно.

Выявленные различия адаптивных механизмов регуляции H_2O и CO_2 обмена на экспериментальное воздействие, в частности, внесение NH_4NO_3 , свидетельствуют о разной функциональной пластичности березы повислой и березы пушистой по отношению к условиям минерального питания. Полученные результаты использованы в процесс-ориентированной модели MixFor-SVAT (Olchev et al., 2002, 2008) для определения возможного отклика $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ бюджета лесных экосистем Карелии на будущие климатические изменения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 13-04-00827-а и 11-04-01622-а).

Forecast of the emerge period of hadrobregmus pertinax (L.) – the pest of the historic timber structures

¹Kisternaya M.V., ²Kozlov V.A., ³Leri M.M., ³Pavlov Y.L.

¹The KIZHI state open-air museum of history, architecture and ethnography, Petrozavodsk, Russia

²Forest Research Institute KarSC RAS, Petrozavodsk, Russia

³Institute of Applied Mathematical Research KarSC RAS, Petrozavodsk, Russia

E-mail kisternaya@kizhi.karelia.ru, vkozlov@krc.karelia.ru, leri@krc.karelia.ru, pavlov@krc.karelia.ru

House borer *Hadrobregmus pertinax* (L.) is one of the main destroyers of timber structures without heating in Russian North and Siberia [1-4]. It mainly damages the pine wood which is the basic building material in the North [5]. In the recent years *Hadrobregmus pertinax* (L.) is noticed to be the most typical pests of historic buildings in the museums of wooden architecture – Kizhi, Marcial Waters (Karelia), Vitoslavitsi (V. Novgorod), Malye Korely (Arkhangelsk).

The difficulty in the struggle with borers is that the main damage to structures is caused by larva growing deep in the timber for 2,5-3 years (under unfavorable conditions up to 6-7 years).

The paper presents the model which describes the relationship between the beginning of the borers emerge period and climatic factors (cumulative temperature and air humidity). The model is based on data obtained during 12-year-long monitoring of borers in the Kizhi open-air museum (Karelia). The monitored structures were built of pine (*Pinus sylvestris* L.) timber in XVIIIth-XIXth cc. Temperature and air humidity was measured simultaneously by loggers.

Regression relationships were used to model the dependence of the borers emerge percent (y) on cumulative daily average temperature (t) and air humidity (h) for the different time periods. The series of the obtained equations gives a substantially good description of the phenomenon being studied with a high confidence probability and shows that cumulative temperature and air humidity for the previous 3-8 weeks influence the beginning of emerge period. For the goals of forecast was taken a model for the 2 month prior time period (with the multiple correlation coefficient equals to 0,84):

$$y = \begin{cases} 0, & \ln t \leq 6.95 - 0.0003h; \\ -741.2 + 106.6 \ln t + 0.026h, & 6.95 - 0.0003h < \ln t < 7.89 - 0.0003h; \\ 100, & \ln t \geq 7.89 - 0.0003h. \end{cases}$$

The obtained model enables prediction of both the beginning and duration of the borers emerge period. It also confirms the hypothesis that these dangerous pests hibernate in both larva and pupa forms.

In addition, this research allows for more effective measures to eliminate this pest. It is known that the local heat treatment being the most environmentally friendly and efficient way for pest control is conducted only after the preliminary determination of the areas of this pest, for example by using acoustic detectors, which may be carried out in two weeks before the emerge period and during it [14]. The obtained model will enable to plan inspections of monuments to reveal pest activity, and their disinsection particularly in buildings where trap installation is impossible.

The research is supported with Russian Foundation for Basic Research, grant # 11-06-00165.

Прогнозирование периода лёта жука-ксилотрофа – вредителя памятников деревянного зодчества

¹Кистерная М.В., ²Козлов В.А., ³Лери М.М., ⁴Павлов Ю.Л.

¹Государственный историко-архитектурный и этнографический музей-заповедник «Кижы», Петрозаводск, Россия

²Институт леса КНЦ РАН Петрозаводск, Россия

³Институт прикладных математических исследований КНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

E-mail kisternaya@kizhi.karelia.ru, vkozlov@krc.karelia.ru, leri@krc.karelia.ru, pavlov@krc.karelia.ru

Домовый точильщик *Hadrobregmus pertinax* (L.) является одним из основных разрушителей неотапливаемых деревянных построек на Европейском Севере и в Сибири [1-4]. В основном он поражает древесину хвойных пород – сосны, ели, которые являются основным конструктивным

материалом на севере [5]. В основном жуки заселяют нижние венцы построек до высоты 1,5 – 2 м, обычно с северной стороны, предпочитая влажную древесину, особенно поврежденную грибами бурой гнили [6].

В последние годы точильщики отмечаются в качестве основных вредителей памятников в музеях деревянного зодчества – Кижы, Марциальные Воды (Карелия), Витославицы (В.Новгород), Малые Корелы (Архангельск). Объясняется это, по всей видимости особенностями эксплуатации зданий. В большинстве своем памятники не отапливаются, многие из них в 1980-1990-е гг. XX в. подверглись глубокой химической пропитке различными химическими препаратами, что вызвало разрушение структуры древесины и создало благоприятные условия для жизнедеятельности этого вредителя.

Сложность борьбы с точильщиками заключается в том, что основной вред конструкциям наносит личинка, скрытно развивающаяся в толще древесины в течение 2,5 – 3 лет (а при неблагоприятных условиях и до 6-7 лет). После окончания развития, обычно весной или осенью личинка формирует колыбельку-кокон из которой через 2-3 недели отрождается жук, который прогрызает округлое летное отверстие и выходит наружу, выталкивая буровую муку. Вылет жуков из древесины происходит в весенне-летний сезон, при положительных температурах [2, 7]. Ранее выдвигалась гипотеза, что лет жуков начинается при достижении среднесуточной температуры воздуха 10°C [7]. Существуют методы, учитывающие кумулятивную (накопленную) температуру для оценки стадии развития насекомых-вредителей (<http://www.ca.uky.edu/entomology/entfacts/ef123.asp>).

Целью данной работы было разработать на основе данных многолетних наблюдений математические модели зависимости времени лета жуков от показателей температуры и относительной влажности воздуха.

Исследования проводились в музее-заповеднике «Кижы» (www.kizhi.karelia.ru) с 1998 по 2012 гг. Отлов насекомых проводился в следующих памятниках: в Преображенской (1714 г.) и Покровской (1764 г.) церквях, домах Ошевнева (1876 г.), Елизарова (1880 г.), Сергина (1884 г.). Основным строительным материалом для них послужила древесина сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), однако в кровельных конструкциях домов есть элементы, изготовленные из ели (*Picea abies* Kt.), а главки церквей покрыты осиновым (*Populus tremula* L.) лемехом.

Все дома-комплексы были привезены на остров Кижы в процессе формирования экспозиции музея в 1960-1980 гг. [8]. Все они, за исключением Преображенской церкви, были обработаны в 1980-х гг. препаратом ПББ-211 (пентахлорфенолят натрия, бура, борная кислота) [9].

Для отлова дереворазрушающих насекомых в исследуемых помещениях исключали все источники света за исключением окон, на которые устанавливали ловушки, состоявшие из оргстекла и приемника, заполненного водой с СМС. Подсчет жуков проводили один раз в неделю с середины мая до конца июля. Для идентификации жуков использовали монографию В.Д.Логвиновского [10]. Одновременно фиксировали параметры микроклимата с помощью логгеров ACR loggers (Canada). Температура и относительная влажность воздуха регистрировались с интервалом 1 час с точностью 1°C и 3%.

Многолетние исследования показали, что в условиях музея-заповедника «Кижы» лёт жуков-точильщиков длится с середины мая до конца июля в зависимости от климатических условий. Время начала лёта (Рис. 1) варьируется в достаточно широком промежутке с 15 мая (2010 г.) до 14 июня (2008 г.), его продолжительность в зависимости от метеорологических условий составляет от 34 до 70 дней (2002 и 2010 гг. соответственно).



Рис.1. Длительность времени лета жуков-точильщиков по данным многолетних наблюдений.

При построении математических моделей в качестве зависимой переменной рассматривалась величина y , равная кумулятивному проценту вылетевших жуков (т.е. y изменялась нарастающим итогом от 0 до 100%). Независимыми переменными являются величины t и h , равные накопленным за заданный период среднесуточным значениям температуры и влажности, соответственно. Задача состояла в выборе метода построения, подборе формы зависимости, определении периода времени, за который климатические показатели оказывают максимальное влияние на время лета жуков, оценке адекватности этих моделей и выборе среди них наилучшей как с точки зрения содержательной цели исследования, так и с точки зрения формальных математических показателей качества. В качестве предшествующих периодов времени были взяты: 1 день, 1 неделя, 2 недели, 3 недели, 1 месяц и 2 месяца. Основным методом построения моделей был выбран регрессионный анализ. Для нахождения наиболее адекватных моделей была использована методика поиска наиболее информативного множества признаков. С этой целью осуществлялись функциональные преобразования участвующих переменных, а число просматриваемых уравнений было ограничено требованием учета возможного эффекта вздувания коэффициента детерминации (эффект А. Н. Колмогорова) [11-12]. Проверка всех статистических гипотез осуществлялась с уровнем значимости 5%. Расчеты проводились с помощью статистического пакета Statistica 6.0.

Анализ построенных моделей позволяет сделать следующие выводы. Время вылета жуков в большей степени зависит от накопленных за предыдущий период значений температуры и в меньшей степени от накопленной за этот период влажности, при этом период влияния климатических факторов должен быть не менее трех недель. По всей видимости, это определяется тем, что это время необходимо для того, чтобы из перезимовавшей куколки появился жук. Именно этот период – 2-3 недели упоминается в книгах по энтомологии [2, 13]. В то же время оптимальной для развития насекомых является температура 25°C [14], поэтому наиболее высокие коэффициенты детерминации дают регрессионные модели, полученные для более длинных предшествующих периодов – 4-8 недель. Отчасти это объясняется и тем, что у домового точильщика зимуют как куколки, так и личинки. Когда температура воздуха становится положительной, прогревается субстрат, в котором зимуют личинки и куколки, и начинается их развитие.

В качестве прогнозной модели была выбрана следующая зависимость (с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,7$) с 8-недельным периодом влияния климатических факторов:

$$y = \begin{cases} 0, & \ln t \leq 6.95 - 0.00024h; \\ -741.2 + 106.6 \ln t + 0.026h, & 6.95 - 0.0003h < \ln t < 7.89 - 0.00024h; \\ 100, & \ln t \geq 7.89 - 0.00024h. \end{cases} \quad (1)$$

Разработанная модель (1) позволяет прогнозировать как время начала лета жуков-точильщиков, так и его продолжительность (Рис. 2). Так, при среднесуточной относительной влажности воздуха 75% (кумулятивная относительная влажность 4500), лет начинается при достижении суммарной температуры 350°C. Чем выше относительная влажность воздуха, тем более низких температур достаточно для начала лета жуков.

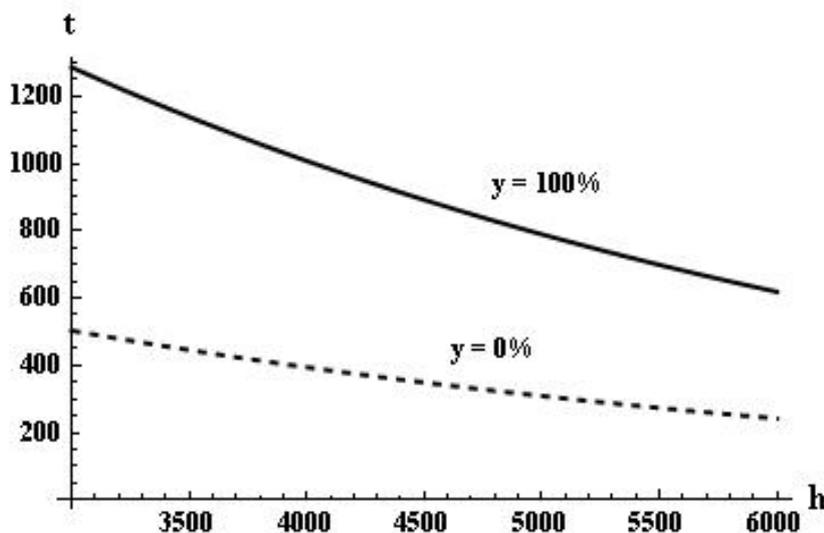


Рис.2. Графики зависимости накопленных значений температуры от влажности в точках $y = 0\%$ (начало лета жуков) и $y = 100\%$ (конец лета жуков).

Продолжительность лета жуков также определяется климатическими параметрами. Так при влажном и холодном лете (при средней относительной влажности воздуха 85%) лет жуков начнется при

накоплении температуры воздуха чуть более 300°C и при дальнейшей среднесуточной температуре 15°C, лет может продолжаться до 17-18 дней, если же при той же влажности температура воздуха поднимется до 20°C, то лет может закончиться за 15 дней. В случае более сухого и жаркого лета (средняя ОВР 70%) для начала лета жуков необходимы более высокие температуры. Так накопленная среднесуточная t должна превзойти 375°C. Если далее средняя t будет держаться на уровне 20°C, лет может продолжаться 18-19 дней, а при $t = 25^\circ\text{C}$ – 15-16 дней.

Полученная модель вносит новый вклад в развитие знаний о биологии этого опасного вредителя и подтверждает гипотезу, что у домового точильщика зимуют куколки и личинки.

Кроме того, она позволяет более эффективно проводить мероприятия по уничтожению этого вредителя. Известно, что локальная тепловая обработка как наиболее экологически безопасный и действенный способ дезинсекции проводится только после предварительного выявления зон развития этого вредителя, например, с помощью акустических детекторов, которое возможно за две недели до и в период лёта жуков [15]. Разработанная модель позволит планировать инспекционные и дезинсекционные мероприятия в частности в тех зданиях, где установка ловушек невозможна.

Роль математического моделирования процессов жизнедеятельности жуков-ксилотрофов приобретает особое значение в условиях меняющегося климата.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований, грант 11-06-00165.

Литература:

1. Воронцов А. И. *Насекомые – разрушители древесины*. М., 1981, 176 с.
2. *Насекомые в музеях. (Биология. Профилактика заражения. Меры борьбы)*, М. Т-во научных изданий КМК. 2007. 220 с.
3. Noldt U., Noldt G. *Insects damaging wooden cultural heritage in Central and North-Eastern Europe – recent studies and assessment cases / Fungi and beetles in historic timber structures in Northern Europe. Proceedings of the workshop. 2012, Petrozavodsk. 2012. P. 38-44.*
4. Polevoj A., Kozlov V. *Insects damaging wooden constructions in Karelia / Fungi and beetles in historic timber structures in Northern Europe. Proceedings of the workshop. 2012, Petrozavodsk. 2012. P. 45-49.*
5. Ванин С. И. *Об изучении физических и механических свойств древесины с различными пороками* // Труды Института леса АН СССР. 1949. Т.4. М.-Л. С. 46-51.
6. Тоскина И. Н. *О некоторых вредителях дерева в холодных помещениях и постройках северной и средней России* // Консервация и реставрация памятников истории и культуры. Экспресс-информация. Вып. 2. О защите музеев. М.: изд. РГБ. 1996. С. 20-35.
7. Полевой А. В., Козлов В. А., Кистерная М. В. *Насекомые, вредящие деревянным постройкам на территории музея-заповедника «Кижы»* // Труды Карельского научного центра Российской Академии Наук. Серия: Биогеография. Вып. 12. Петрозаводск. 2008. С.127-133.
8. *Кижы: альбом-путеводитель по музею-заповеднику* // Сост. И. В.Мельников; фотографии О. А. Семенов. Музей-заповедник «Кижы». Петрозаводск. 2012. 176 с.
9. Горшин, С. Н. *Защита памятников деревянного зодчества [Текст] / С. Н. Горшин, Н. А. Максименко, Е. С. Горшина. – М., 1992. 297 с.*
10. Логвиновский В. Д.: «Насекомые жесткокрылые» в серии «Фауна СССР». Л.: Наука, 1985. Т. XIV, вып.2.
11. Колмогоров А. Н. *К вопросу о пригодности найденных статистическим путем формул прогноза* // Геофизический журнал, Т. 3, № 1, 1933. С. 78-82.
12. Leri M. M. *On one problem of A. N. Kolmogorov* // Proceedings of the Fifth International Petrozavodsk conference “Probabilistic methods in discrete mathematics”. VSP, Utrecht, 2001. P. 219-225.
13. Тоскина И. Н. *Насекомые* // Технология, исследование и хранение произведений станковой и настенной живописи. Учеб. пособие / под ред. Ю. И. Гринберга. М., 1987. С.308-322.
14. Осмоловский Г. Е. *Применение токов высокой частоты для борьбы с насекомыми-разрушителями древесины* // Труды Института леса АН СССР. 1950. Т.6. М.-Л. С. 162-181.
15. Kisternaya M., Kozlov V. *Preservation of historic monuments in the “Kizhi” Open-Air Museum (Russian Federation)* // Journal of Cultural Heritage. Vol. 13. N 3S. 2012. P. S74–S78.

Probabilistic model of host-parasite system

Pavlov Yu., Khvorostyanskaya E.

Institute of Applied Mathematical Research KarSC RAS, Petrozavodsk, Russia
E-mail: pavlov@krc.karelia.ru, cher@krc.karelia.ru

The negative binomial distribution has a special role in parasitology. According to the results of numerous observations in almost any parasitic system the number of parasites ξ on the host statistically significantly has the negative binomial distribution

$$p_k = \mathbf{P}\{\xi = k\} = \binom{\alpha + k - 1}{k} p^\alpha (1 - p)^k, \quad k = 0, 1, 2, \dots; \alpha > 0, 0 < p < 1.$$

We consider the mathematical model of a parasitic system based on the famous representation of this law as a mixed Poisson distribution with a random parameter having the gamma distribution. To forecast the development of parasitological situation it is important to know the structure of parasitic infection, i.e. portions of hosts with given numbers of parasites. Furthermore to estimate the number of hosts killed by excessive parasitic infection we have to know the distribution of the maximum number of parasites on the host. The model assumes that the number of hosts N is known and the total number of parasites does not exceed n . Let μ_r denote the number of hosts with exactly r parasites and $\eta_{(N)}$ be the maximum number of parasites on the host. Limit distributions of random variables μ_r and $\eta_{(N)}$ were obtained as $n, N \rightarrow \infty$.

Theorem 1. Let $n, N \rightarrow \infty$ in such a way that $(n - N\alpha(1-p)/p)/\sqrt{N} \rightarrow +\infty$, $0 < p_0 \leq p \leq p_1 < 1$, $0 < \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_1 < \infty$, $r \geq 2$ is fixed. Then

$$\mathbf{P}\{\mu_r = k\} = \frac{1 + o(1)}{\sqrt{2\pi N p_r (1 - p_r)}} e^{-z^2/2}$$

uniformly in integers k such that $z = (k - Np_r)/\sqrt{Np_r(1-p_r)}$ lying in any fixed finite interval.

Theorem 2. Let $n, N \rightarrow \infty$ in such a way that $(n - N\alpha(1-p)/p)/\sqrt{N} \rightarrow +\infty$, $0 < p_0 \leq p \leq p_1 < 1$, $0 < \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_1 < \infty$,

$$r = \left\lceil \left[(\ln N + (\alpha - 1) \ln \ln N + (\alpha - 1) \ln(p/q) - \ln \Gamma(\alpha) + z - q)/q \right] \right\rceil$$

where $q = \lfloor h(1-p) \rfloor$, $\Gamma(\alpha)$ is the value of the gamma function at α , z is a constant, $[x]$ denote the integer part of a number x . Then

$$\mathbf{P}\{\eta_{(N)} \leq r\} \rightarrow e^{-e^{-z}}.$$

To prove these limit theorems we used the modification of the generalized allocation scheme.

Вероятностная модель системы «паразит-хозяин»

Павлов Ю.Л., Хворостянская Е.В.

Институт прикладных математических исследований КНЦ РАН, Петрозаводск, Россия
E-mail: pavlov@krc.karelia.ru, cher@krc.karelia.ru

Известно (см., например, [1]), что отрицательное биномиальное распределение вероятностей играет особую роль в паразитологии. Согласно результатам многочисленных наблюдений, практически в любых паразитарных системах число паразитов на хозяине статистически значимо подчиняется отрицательному биномиальному распределению. Это свойство можно считать основным законом количественной паразитологии. В [2] впервые предложена модель, объясняющая природу этого явления и основанная на известном представлении отрицательного биномиального распределения как смешанного распределения Пуассона со случайным параметром, имеющим гамма-распределение, а в [3] эта модель была уточнена и проверена экспериментально. Использование такого подхода полезно для оценки степени равновесия системы «паразит-хозяин» и для прогнозирования развития паразитологической ситуации. Обычно в такой системе паразиты и хозяева не «стремятся» уничтожить друг

друга, наоборот, здесь равновесие обуславливает стабильное сосуществование обеих популяций. Зная закон распределения численности паразитов и его параметры, можно оценить устойчивость паразитарной системы в целом. Поэтому важно знать структуру зараженности, т.е. доли особей, имеющих определенное число паразитов. Кроме того, для прогнозирования количества погибающих от чрезмерного заражения хозяев, необходимо знать распределение максимального значения числа паразитов на особи. Задача оценки численности хозяев в популяции является типичной для экспериментальной биологии, гораздо труднее достаточно точно определить число паразитов в системе. Если известны и число хозяев, и число паразитов, то для изучения структуры паразитарной системы естественно использовать обобщенную схему размещения частиц по ячейкам [4]. Однако, если мы можем только оценить сверху возможное число паразитов в системе, то следует применить модификацию этого метода вероятностной комбинаторики, предложенную в [5].

В рассматриваемой модели будем считать, что число хозяев в системе равно N , а число паразитов не превосходит n . Обозначим через η_1, \dots, η_N случайные величины, соответствующие числу паразитов на хозяевах $1, \dots, N$. Очевидно, что в силу условия $\eta_1 + \dots + \eta_N \leq n$, случайные величины η_1, \dots, η_N являются зависимыми. Введем далее независимые случайные величины ξ_1, \dots, ξ_N , общее распределение которых является отрицательным биномиальным и имеет вид

$$p_k = \mathbf{P}\{\xi_i = k\} = \binom{\alpha + k - 1}{k} p^\alpha (1-p)^k,$$

где $i=1, \dots, N, k=0, 1, 2, \dots; \alpha > 0, 0 < p < 1$. Учитывая упомянутый выше основной закон количественной паразитологии, нетрудно видеть, что случайные величины ξ_1, \dots, ξ_N на подмножестве реализаций, удовлетворяющих условию $\xi_1 + \dots + \xi_N \leq n$, индуцируют вероятностную меру, описывающую совместное распределение η_1, \dots, η_N . Таким образом,

$$\mathbf{P}\{\eta_1 = k_1, \dots, \eta_N = k_N\} = \mathbf{P}\{\xi_1 = k_1, \dots, \xi_N = k_N \mid \xi_1 + \dots + \xi_N \leq n\} \quad (1)$$

Обозначим через μ_r число хозяев, имеющих ровно r паразитов. Согласно теореме 3 [5], справедливо равенство

$$\mathbf{P}\{\mu_r = k\} = \binom{N}{k} p_r^k (1-p_r)^{N-k} \frac{\mathbf{P}\{\zeta_{N-k}^{(r)} \leq n - kr\}}{\mathbf{P}\{\zeta_N \leq n\}}, \quad (2)$$

где $\zeta_N = \xi_1 + \dots + \xi_N$, $\zeta_{N-k}^{(r)} = \xi_1^{(r)} + \dots + \xi_{N-k}^{(r)}$, а случайные величины $\xi_1^{(r)}, \dots, \xi_{N-k}^{(r)}$ независимы и

$$\mathbf{P}\{\xi_i^{(r)} = k\} = \mathbf{P}\{\xi_1 = k \mid \xi_1 \neq r\}, \quad i = 1, \dots, N.$$

Пусть $\eta_{(N)}$ – максимальное число паразитов на одной особи популяции хозяев. Введем независимые одинаково распределенные случайные величины $\tilde{\xi}_1^{(r)}, \dots, \tilde{\xi}_{N-k}^{(r)}$ такие, что

$$\mathbf{P}\{\tilde{\xi}_i^{(r)} = k\} = \mathbf{P}\{\xi_1 = k \mid \xi_1 \leq r\}, \quad i = 1, \dots, N.$$

Обозначим

$$\tilde{\zeta}_N^{(r)} = \tilde{\xi}_1^{(r)} + \dots + \tilde{\xi}_N^{(r)}, \quad P_r = \mathbf{P}\{\xi_1 > r\}.$$

Из (1) и теоремы 1 [6] следует, что

$$\mathbf{P}\{\eta_{(N)} \leq r\} = (1 - P_r)^N \frac{\mathbf{P}\{\tilde{\zeta}_N^{(r)} \leq n\}}{\mathbf{P}\{\zeta_N \leq n\}}. \quad (3)$$

Поскольку величины N и n обычно принимают большие значения, непосредственное использование формул (2) и (3) для вычисления интересующих нас вероятностей практически невозможно. Поэтому естественно использовать асимптотическое представление этих вероятностей при $n, N \rightarrow \infty$. Из (2) и (3) ясно, что для исследования предельного поведения μ_r и $\eta_{(N)}$ достаточно рассмотреть слабую сходимость сумм независимых случайных величин к предельным законам, а также использовать асимптотику биномиальных вероятностей.

Нетрудно видеть, что

$$m = \mathbf{E}\xi_1 = \frac{\alpha(1-p)}{p}, \quad \sigma^2 = \mathbf{D}\xi_1 = \frac{\alpha(1-p)}{p^2},$$

$$m_r = \mathbf{E}\xi_1^{(r)} = \frac{m - rp_r}{1 - p_r}, \quad \sigma_r^2 = \mathbf{D}\xi_1^{(r)} = \frac{\sigma^2}{(1 - p_r)^2} \left(1 - p_r - \frac{p_r(m-r)^2}{\sigma^2} \right). \quad (4)$$

Справедливы следующие результаты.

Теорема 1. Пусть $n, N \rightarrow \infty$ так, что $(n - mN)/\sqrt{N} \rightarrow +\infty$, и $0 < p_0 \leq p \leq p_1 < 1$, $0 < \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_1 < \infty$, $r \geq 2$ фиксировано. Тогда

$$\mathbf{P} \{ \mu_r = k \} = \frac{1 + o(1)}{\sqrt{2\pi N p_r (1 - p_r)}} e^{-z^2/2}$$

равномерно относительно целых k , для которых $z = (k - Np_r)/\sqrt{Np_r(1 - p_r)}$ лежит в любом конечном фиксированном интервале.

Теорема 2. Пусть $n, N \rightarrow \infty$ так, что $(n - mN)/\sqrt{N} \rightarrow +\infty$, и $0 < p_0 \leq p \leq p_1 < 1$, $0 < \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_1 < \infty$,

$$r = [(\ln N + (\alpha - 1)\ln \ln N + (\alpha - 1)\ln(p/q) - \ln \Gamma(\alpha) + z - q)/q] \quad (5)$$

где $q = \lfloor \ln(1 - p) \rfloor$, $\Gamma(\alpha)$ - значение гамма-функции в точке α , z - произвольная постоянная, а $[x]$ означает целую часть числа x . Тогда

$$\mathbf{P} \{ \eta_{(N)} \leq r \} \rightarrow e^{-e^{-z}}.$$

Для доказательства теоремы 1 заметим, что в силу центральной предельной теоремы распределения сумм ζ_N , $\zeta_N^{(r)}$ в (2) сходятся к нормальному закону. Используя нормальное приближение биномиальных вероятностей, отсюда и из (2) находим, что

$$\mathbf{P} \{ \mu_r = k \} = \frac{1 + o(1)}{\sqrt{2\pi N p_r (1 - p_r)}} e^{-z^2/2} \frac{\int_{-\infty}^{x_r} e^{-u^2/2} du}{\int_{-\infty}^y e^{-u^2/2} du}, \quad (6)$$

где

$$x_r = \frac{n - kr - m_r(N - k)}{\sigma_r \sqrt{N - k}}, \quad y = \frac{n - mN}{\sigma \sqrt{N}}.$$

С помощью (4) при $k = Np_r + z\sqrt{Np_r(1 - p_r)}$ несложно показать, что $x_r \rightarrow +\infty$ при $y \rightarrow +\infty$. Отсюда и из (6) следует утверждение теоремы 1.

При выполнении условий теоремы 2 распределение суммы ζ_N сходится к нормальному закону по центральной предельной теореме. Поскольку $r \rightarrow \infty$, сумма $\zeta_N^{(r)}$ образует схему серий, и в этом случае слабая сходимость распределения $\zeta_N^{(r)}$ к нормальному закону следует из результатов работы [7]. Используя (5), находим, что справедливо соотношение

$$Np_r \rightarrow e^{-z}. \quad (7)$$

Учитывая слабую сходимость распределений ζ_N , $\zeta_N^{(r)}$ к нормальному закону, можно показать, что

$$\frac{\mathbf{P} \{ \zeta_N^{(r)} \leq n \}}{\mathbf{P} \{ \zeta_N \leq n \}} \rightarrow 1.$$

Отсюда и из (3), (7) получаем утверждение теоремы 2.

Литература:

1. А.К. Бреев. Применение негативного биномиального распределения для изучения популяционной экологии паразитов. Ленинград, Наука, 1972.
2. R.H. Anderson. Population dynamics of the cestode *Caryophyllaens latisceps* (Pallas, 1781) in the bream (*Abramis brama* L.) *Journal of Animal Ecology*, v.43, №2, 1974, 305-321.
3. Ю.Л. Павлов, Е.П. Иешко. Модель распределения численности паразитов. Доклады АН СССР, т. 289, №3, 1986, 746-748.
4. В.Ф. Колчин. Случайные графы. Москва, Физматлит, 2000.
5. А.Н. Чупрунов, И. Фазекаш. Аналог обобщенной схемы размещения. Предельные теоремы для числа ячеек заданного объема. *Дискретная математика*, т. 24, вып. 1, 2012, 140-158.
6. А.Н. Чупрунов, И. Фазекаш. Аналог обобщенной схемы размещения. Предельные теоремы для максимального объема ячейки. *Дискретная математика*, т. 24, вып. 3, 2012, 122-129.
7. А.В. Колчин. Предельные теоремы для обобщенной схемы размещения. *Дискретная математика*, т. 15, вып. 4, 2003, 148-157.

Multistage Mate Choice Game with Age Preferences

Ivashko A.A.

Institute of Applied Mathematical Research KarSC RAS, Petrozavodsk, Russia
E-mail: aivashko@krc.karelia.ru
Web: <http://mathem.krc.karelia.ru>

The mutual mate choice model of Alpern, Katrantzi and Ramsey [3] is considered. In the problem individuals from two distinct groups (for example, males and females) want to form a long-term relationship with a member of the other group, i.e. to form a couple. Each group is large and there is steady state distribution for the age of individuals. In the model males and females have lifetime m and n respectively. It is assumed that the total number of unmated males is greater than the total number of unmated females and $m > n$. The multistage game is considered. In the game unmated individuals from different groups randomly meet each other at each stage. If they accept each other, they form a couple and leave the game, otherwise they go to the next stage unmated and one year older. It is assumed that individuals of both sexes enter the game at age 1 and stay until they are mated or males (females) pass the age m (n). The initial ratio of age 1 males to age 1 females is given. The payoff of mated player is the number of future joint stages with selected partner. The aim of each player is to maximize his/her expected payoff. At each stage players use threshold strategies: to accept exactly those partners who give them at least the same payoff as the expected payoff of the next stage.

In the literature such problems are called also marriage problems or job search problems. In papers [1, 2, 7] investigate the mutual mate choice problems with homotypic and common preferences. Alpern, Katrantzi and Ramsey [3] derive properties of equilibrium threshold strategies and analyse the model for small m and n . In this paper we derive analytically the equilibrium threshold strategies and investigate players' payoffs for the cases $n = 3$ and large m .

This research is supported by Russian Fund for Basic Research (project 13-01-91158-ГФЕН_a, project 13-01-00033-a) and the Division of Mathematical Sciences of RAS (the program "Algebraic and combinatorial methods of mathematical cybernetics and new information system").

References:

1. Alpern S., Reyniers D.J. *Strategic mating with homotypic preferences // Journal of Theoretical Biology.* 1999. № 198, P. 71-88.
2. Alpern S., Reyniers D. *Strategic mating with common preferences // Journal of Theoretical Biology.* 2005. 237. P. 337-354.
3. Alpern S., Katrantzi I., Ramsey D. *Strategic mating with age dependent preferences. The London School of Economics and Political Science.* 2010.
4. Mazalov V., Falko A. *Nash equilibrium in two-sided mate choice problem // International Game Theory Review.* Vol. 10, № 4. 2008. P. 421-435.

Многошаговая игра наилучшего взаимного выбора с возрастными предпочтениями

Ивашко А.А.

Институт прикладных математических исследований КНЦ РАН, Петрозаводск, Россия
E-mail: aivashko@krc.karelia.ru Web: <http://mathem.krc.karelia.ru>

Задачи наилучшего выбора составляют важный класс задач, изучаемых теорией игр и теорией оптимальной остановки. Они отражают существенные особенности реальных процессов выбора, имеют простую постановку и легко интерпретируемые решения, что делает их применимыми для моделирования биологических, социально-экономических и политических процессов. В задаче наилучшего выбора перед лицом, принимающим решение, стоит вопрос о выборе удовлетворяющего определенным условиям объекта из общего множества объектов. Как правило, в классических постановках принимает решение только одна сторона, а вторая всегда согласна с выбором. В последнее время стали рассматриваться задачи так называемого взаимного выбора. В таких задачах отражены особенности двустороннего выбора. Задачи взаимного выбора моделируют такие ситуации, как выбор брачного партнера, поиск работы (работодатель-работник), рыночные отношения (продавец-покупатель).

В данной работе рассмотрена модель наилучшего взаимного выбора, предложенная в работе [3], в которой большая популяция разделена на две группы (мужчины и женщины). Индивидуумы из двух

различных групп хотят выбрать партнера из противоположной группы для создания пары. В качестве характеристики каждого индивидуума, по которой осуществляется выбор партнера, выступает его возраст. При взаимном принятии партнеров создается пара, при этом каждый индивидуум получает одинаковую полезность, равную общему количеству прожитых вместе с выбранным партнером лет. Предполагается, что общее число мужчин больше числа женщин, а также мужчины живут дольше женщин. Каждый индивидуум заинтересован выбрать партнера с наименьшим возрастом.

Данная модель описывается многошаговой игрой наилучшего выбора, в которой имеются игроки двух типов, назовем их мужчины и женщины. Возраст каждого игрока принимает целые значения $1, 2, \dots$. Предполагается, что игроки приходят в игру в возрасте 1 и остаются в игре до своего максимального возраста. Максимальный возраст мужчин равен m , а женщин — n . Предполагается, что общее число мужчин больше числа женщин, и что мужчины живут дольше женщин, т. е. $m > n$. На каждом шаге моделируются случайные встречи игроков из разных групп. Предпочтения игроков зависят от возраста встреченного партнера. Если игроки принимают друг друга, то они создают пару и покидают популяцию. При этом выигрышем каждого игрока является общее число лет, прожитых с выбранным партнером. Так выигрыши мужчины возраста i и женщины возраста j при создании пары одинаковы и равны $\min\{m-i+1, n-j+1\}$. Если же хотя бы один из игроков отказывает, то игроки переходят на следующий шаг, остаются без пары и становятся на год старше. На последнем шаге при достижении своего максимального возраста, если игрок остался без пары, то его выигрыш равен нулю. Каждый игрок стремится максимизировать свой ожидаемый выигрыш в данной игре.

Возрастное распределение мужчин и женщин определяется векторами $a = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ и $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ соответственно, где a_i и b_j — отношения числа мужчин возраста i и женщин j к числу женщин возраста 1 . Следовательно, получим $b_1 = 1$. Так как рассматривается популяция, содержащая большее количество игроков, то векторы a и b постоянны во времени. Обозначим общее число мужчин $A = a_1 + a_2 + \dots + a_m$, а женщин — $B = b_1 + b_2 + \dots + b_n$, $r = A/B$ — величина, характеризующая соотношение полов в популяции, $R = a_1/b_1 = a_1$ — соотношение полов первого возраста. R является внешне заданным и определяется в начале игры.

Оптимальными стратегиями игроков являются пороговые стратегии $F = [f_1, f_2, \dots, f_m]$ и $G = [g_1, g_2, \dots, g_n]$ для мужчин и женщин соответственно. Мужчина возраста i принимает женщину, только если ее возраст не превышает порогового значения f_i , равного среднему ожидаемому выигрышу мужчины на следующем шаге игры. Для женщин пороговые стратегии g_j определяются аналогично.

В литературе представлены различные постановки задач взаимного выбора. В работах [2, 7] рассмотрены задачи с общими предпочтениями (игроки выбирают партнера с наилучшими характеристиками) и гомотипными предпочтениями (игроки выбирают партнера с характеристиками близкими к собственным). В работе [4] исследована симметричная непрерывная модель с возрастными предпочтениями. Другие задачи взаимного выбора были рассмотрены в работах [5, 6, 8]. В статье [3] была разработана приведенная выше модель взаимного выбора, были исследованы свойства оптимальных стратегий игроков и проанализирована задача для малых значений m и n . В настоящей работе получены аналитически равновесные стратегии игроков и исследованы функции выигрышей для случая $n = 3$ и больших значений m .

Работа поддержана грантами РФФИ, проект 13-01-91158-ГФЕН_а и проект 13-01-00033-а, а также Отделением математических наук РАН, программа «Алгебраические и комбинаторные методы математической кибернетики и информационные системы нового поколения»

Литература:

1. Alpern S., Reyniers D.J. Strategic mating with homotypic preferences // *Journal of Theoretical Biology*. 1999. № 198, P. 71-88.
2. Alpern S., Reyniers D. Strategic mating with common preferences // *Journal of Theoretical Biology*, 2005. 237. P. 337-354.
3. Alpern S., Katrantzi I., Ramsey D. Strategic mating with age dependent preferences. *The London School of Economics and Political Science*. 2010.
4. Alpern S., Katrantzi I., Ramsey D.M. Partnership formation with age-dependent preferences // *European Journal of Operational Research* 225. 2013. P. 91-99.
5. Gale D., Shapley L.S. College Admissions and the Stability of Marriage // *The American Mathematical Monthly*. 1962. Vol. 69, № 1, P. 9-15.
6. Kalick S.M., Hamilton T.E. The mating hypothesis reexamined // *J. Personality Soc. Psychol.* 1986 № 51. P. 673-682.
7. Mazalov V., Falko A. Nash equilibrium in two-sided mate choice problem // *International Game Theory Review*. Vol. 10, № 4. 2008. P. 421-435.
8. Roth A. Sotomayor M. Two-sided matching: A study in game-theoretic modeling and analysis. Cambridge University Press, 1992.

Секция 6

Выполняемые в Северной Евразии Программы

Session 6

Core environmental activities in Northern Eurasia

The NASA LCLUC Program in Northern Eurasia: An Update

¹Gutman G., ²Groisman P.

¹ NASA Land-Cover/Land-Use Change Program, Washington, DC USA

² UCAR Project Scientist at NOAA National Climatic Data Center, Asheville, USA

E-mail: ggutman@nasa.gov, Pasha.Groisman@noaa.gov

Web: <http://lcluc.hq.nasa.gov>, <http://neespi.org>

The NASA Land-Cover/Land-Use is an interdisciplinary scientific theme within NASA's Earth Science program. The ultimate vision of this program is to develop the capability for periodic global inventories of land use and land cover from space, to develop the scientific understanding and models necessary to simulate the processes taking place, and to evaluate the consequences of observed and predicted changes (<http://lcluc.hq.nasa.gov/>).

During the past 17 years the NASA LCLUC program has conducted around 250 projects, which included substantial international involvement. Each year the program consists of about 40 projects with over 200 researchers involved, including U.S. and international senior and junior scientists and students. The program components include: 1) LCLUC impacts on carbon and water cycles, and on ecosystems, climate and biodiversity (about 30%); 2) LCLUC monitoring and modeling (about 40%), 3) LCLUC drivers, vulnerability and adaptation (around 15%), and 4) LCLUC synthesis (5%). The Synthesis component is gradually increasing in proportion on the account of reducing the proportion of case studies analysis.

Since the NASA LCLUC program is global it has always been supporting regional initiatives, which help building international cooperation in scientific research, validation of satellite-derived products and modeling LCLUC processes as a combination of physical and societal changes. The regional programmatic support include the Regional Field Campaign in Amazon (LBA), the Central African Regional Project (CARPE), the Monsoon Area Integrated Study (MAIRS), and the Northern Eurasia initiative (NEESPI), the latter being the focus of the LCLUC program during the last 8-9 years.

It is well known that Northern Eurasia is a sensitive and rapidly changing area with the signal of climate change effects already observed in many components of the Earth's system. Space-based remote sensing provides unique information over this vast region. Additionally, this region of the globe experienced a shock impact of the abrupt institutional and economic changes due to the breakup of the Soviet Union.

The goal of the NEESPI program has been to study climate-ecosystem interactions and societal impacts in boreal and non-boreal zones of Northern Eurasia. The program has involved 30 countries and more than 200 institutions, with over 700 scientists working in over 150 individual NEESPI projects. Among them the NASA-funded projects' proportion has been one third to one half. The four most recent NEESPI projects are on synthesis of the previous LCLUC and carbon cycle studies in Eastern Europe and Siberia/Far East regions. Fig. 1 shows the NEESPI sub-regions. Some of these sub-regions have been studied more intensively, some – less. Caucasus and Central Russia areas are probably the regions with the least NASA-supported investigations, while Siberia is probably the best explored part of NEESPI, which is the indicator which areas are and which are not yet mature for synthesis.

The NEESPI has been implemented by developing international teams, reaching out to regional scientists to build partnerships and combining local data/knowledge with US science. At NASA, the implementation was done by soliciting research in US, expanding international support by obtaining recognition/sponsorship from large international programs, such as IGBP and WCRP. During the past three years, at each AGU, EGU and JpGU Annual Meeting/Assembly (during the past seven years for AGU and EGU), NEESPI sessions were organized by the NASA Project Scientist and they always include NASA-affiliated investigators.

The NEESPI is in its concluding stage as a focused activity. The legacy of the program is in its established connections, ongoing synthesis of the previous studies and a new generation of scientists that came out from the NEESPI projects, with about 80 Ph.D. students defending their theses in the NEESPI framework, and over a thousand peer-review articles published. It took more than a year to prepare the NEESPI Science Plan (released in 2004), to conduct its international peer-review process, and to launch the first generation of NEESPI projects. At present, some science questions/ideas and major research pathways that were put forward ten years ago have been already resolved or, at least, addressed and should be re-focused in response to new environmental change challenges and new technologies of the Earth monitoring. Therefore, further post-NEESPI research planning and formulation of the new key NEESPI science questions are currently underway.



Figure 1. Sub-regions of Northern Eurasia considered in the LCLUC program, overlaid on the MODIS 1-km true color composite of August, 2004 (courtesy by Dr. Ozdogan, U. Wisconsin)

Siberia Integrated Regional Study: the state of the art and projections

Gordov E.P.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS/Siberian Center for Environmental Research and Training, Tomsk, Russia
E-mail: gordov@scert.ru

Siberia Integrated Regional Study (SIRS, <http://sirs.scert.ru/en/>) is a NEESPI megaproject coordinating national and international activity in the region in line with Future Earth Initiative (<http://www.icsu.org/future-earth>) approach whose overall objectives are to understand impact of Global change on on-going regional climate and ecosystems dynamics; to study future potential changes in both, and to estimate possible influence of those processes on the whole Earth System dynamics as well as on social and economic situation in the region. Reported are several dimensions characterizing SIRS state of the art and projections. Among those are SB RAS and other funding bodies support, information-computational and instrumental infrastructure development, organizational and capacity building development.

The state of the art

In spite of the fact that promised SB RAS few years ago direct SIRS funding yet not given, overall support to SIRS domain projects looks not so bad. SIRS oriented activity is supported by two SB RAS basic research multiyear Programs initiated and carried out by IMCES. Those are Program VIII.77.1. "Environmental and climatic changes in Siberia and Arctic under impact of global and regional factors", and VIII.80.2. "Scientific and methodical basis for information-computational technologies and measuring complexes for climatic and ecosystem monitoring". Also SB RAS funded several thematic integrated projects in which researchers from different Institutes work jointly on one of SIRS specific problems. Similar projects are currently funded by the RF Ministry of Education and Science as well as RFBR. Overall funding coming from international foundations is not very impressive; however such cooperative projects provide Siberian researchers with access to modern data and instruments and simplify publication of results obtained in leading journals.

2 reference monitoring stations equipped with modern instrumentation for monitoring from the planned reference network for monitoring of climatic changes in Siberia is planned for 2012-2017 are operating now in Tomsk (Vasyuganie and Akademgorodok) and Buryatiya. Recently reconstructed station on Samoylovskii Island is under SB RAS supervision now, which is unforeseen important supplement to the network.

New level in development of SIRS information-computational infrastructure was achieved with launching into test operation the web-GIS based distributed information-computational platform for collaborative multidisciplinary investigations of regional climatic changes and their impacts CLIMATE (<http://climate.scert.ru/>, Gordov et al., 2012, Gordov et al., 2013). It provides users with capabilities of heterogeneous geophysical data analysis, including high resolution data, and discovering of tendencies in climatic and ecosystem changes in the framework of different multidisciplinary investigations. Using it even unskilled user without specific knowledge can perform reliable computational processing and visualization of large meteorological, climatic and satellite monitoring datasets through unified graphical web-interface. Platform combines modern web 2.0 approach, GIS-functionality and capabilities to run climate and meteorological models, process large geophysical geo-referenced datasets and support relevant analysis. It also supports joint software development by distributed research groups, and organization of thematic education for graduate and post-graduate students.

Additionally to traditional SIRS education and training program which is run via annual organization in the region either international multidisciplinary conference with elements of young scientists school ENVIROMIS or young scientists school and collocated international conference CITES (<http://www.scert.ru/en/conferences/>) online courses on climate change topics to students were developed and supported in operation now by the CLIMATE platform (<http://climate.scert.ru/resources/courses/>, Gordova et al., 2013).

Projections

Possible SB RAS climate megascience facility aimed at detailed monitoring of on-going natural and climatic processes on this territory and prognoses of their dynamics in future, which will include three major components. Those are the network of monitoring stations equipped with modern instrumentation for monitoring spread across Siberia, the dedicated computing and data center providing an access to instrumental and modeling data including those from runs of a suite of global and regional climatic and meteorological models, and information-computational infrastructure supporting knowledge generation on the basis of data available.

Crucial scientific questions for future SIRS projects:

Role of regional geosphere-biosphere interactions (including the surface air layer, the vegetation layer, soil, and inland water bodies) in regional and global climate formation with special emphasis upon feedbacks generated by variations of some parameters of regional atmosphere and surface hydrology;

Possible influence of future potential changes in the region on the whole Earth System dynamics;

Adaptation and mitigation strategy meeting challenges from on-going and projected processes leading to major regional and global risks rising with regional environment changes including permafrost border shift, desert - steppe- forest-tundra ecosystems borders shifts, and temperature/precipitation/hydrology extreme changes;

Weather and climate extremes with special emphasis on atmospheric blockings: from statistics to understanding mechanisms.

Acknowledgements

Partial support of RF Ministry of Education and Science grant 8345, SB RAS Program VIII.80.2 and Projects 69, 131, 140 and APN CBA2012-16NSY project and numerous RFBR grants into SIRS development is acknowledged.

References:

1. Gordov E.P., Okladnikov I.G., Titov A.G., Bogomolov V.Yu., Shulgina T.M., Genina E.Yu. *Geo-information system for investigation of regional climatic changes and first results obtained / Atmospheric and Ocean Optics, vol. 25, 2012, No.02, pp.137-143.*
2. Gordov E.P., Lykosov V.N., Krupchatnikov V.N., Okladnikov I.G., Titov A.G., Shulgina T.M. *Computing and information technologies for monitoring and modeling of climate change and its impacts. 2013, Novosibirsk, Nauka, 175 pp. (In Russian)*
3. Gordova Yu.E.; Genina E.Yu.; Gorbatenko V.P.; Gordov E.P.; Kuzhevskaya I.V.; Martynova Yu.V.; Okladnikov I.G., Titov A.G., Shulgina T.M.; Barashkova N.K. *Support of the educational process in modern climatology within the web-GIS platform "Climate" / Open and distant learning - 2013. - № 1. - P. 14-19 (In Russian)*

NEESPI/SIRS capacity building program: from CITES/ENVIROMIS YS conferences to continuous learning on the base of web-GIS platform «Climate»

¹Gordova Yu., ¹Martynova Yu., ¹Shulgina T., ¹Titov A., ¹Genina E., ²Gorbatenko V., ¹Gordov E., ³Groisman P.Ya., ⁴Lykosov V.N.

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

²Tomsk State University, Russia

³NEESPI Project Scientist UCAR Project Scientist at NOAA National Climatic Data Center, Asheville, USA

⁴Institute for Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: office@scert.ru, Pasha.Groisman@noaa.gov

Nowadays there is a great need in young scientists which are familiar with modern research and scientific tools to meet the challenges of their domains and fast developing technologies. Such necessity is especially strong in the Earth system sciences where modern research tools such as sophisticated computational models are used and huge archives of geo-referenced observational and modeling data should be analyzed. The specialists in this area should be qualified not only in their disciplines but also use modern information computational technologies and be able to communicate and work jointly with colleagues from other fields of science. The environmental data bases and the climate models become more complicated so future specialists should be prepared to face it. We consider that traditional courses should be combined with trainings within thematic informational computational systems.

That is why a capacity building program was elaborated with special emphasis to young scientist involvement into this area. First, the program is based on a "two-component" approach: annual organization of thematic schools CITES (Computational and Information Technologies for Environmental Sciences) for scientists and interdisciplinary conferences ENVIROMIS (Environmental Observations, Modeling and Information Systems) comprising elements of scientists' schools [1, 2]. An additional educational moment in the both cases is in training young scientists in presenting their results during poster presentations. Later targeted workshops were embedded into the conferences as well as open meetings of partners of large environmental projects belonging to NEESPI/SIRS area of interest. Nowadays the CITES and ENVIROMIS events became leading reg-

ular environmental forums taking place in Russia (<http://scert.ru/en/conferences/>) gathering researchers and environmental decisions makers, one half of those are young scientists.

Besides, to make training process continuous and improve skill in working with modern on-line data processing systems, a web-GIS based platform named “Climate” has been developed at our institute (<http://climate.scert.ru/>). This system has a set of tools and data bases to perform climate changes analysis on the selected territory. The platform is functioning now, it is open for registration and all these tools are available. But besides that the platform has a potential to be used in education. Educational tools are part of the system and represented as dedicated software modules in the platform. (Fig. 1).

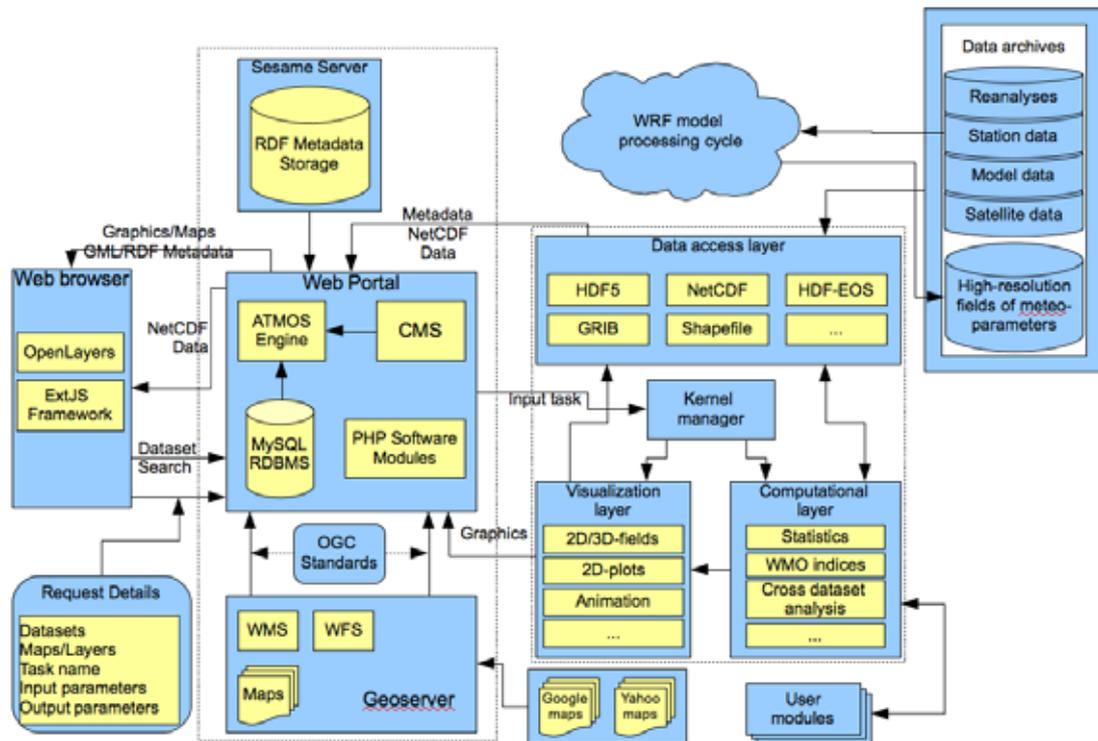


Figure 1. System structure.

To organize the educational process, we use freeware Moodle. It is an open-source course management system, so-called virtual learning environment which is used to create effective online learning sites. Using this course management system gave us an opportunity to combine text and multimedia in our educational courses. They form a theoretical part of the course that should be studied through before taking test and trainings which are performed within the platform “Climate” using web-GIS tools.

Now the educational block of the platform “Climate” (<http://climate.scert.ru/resources/courses/>) [3] consists of two educational courses (Fig. 2). One of them is “Analysis of regional climate changes”. It contains description of main statistical methods of processing and analysis of meteorological data which are used to characterize the ongoing changes of regional climate. Theoretical part of this course is followed by a set of trainings to study a long-term behavior of climatic variables in the selected regions. The second course is called “Analysis of future climate”. This course is supported by the set of tasks based on results of the model “Planet simulator” calculations. “Planet Simulator” is a climate model of intermediate complexity and it doesn’t require large computing resources. This model allows studying interactions of climate system components and making computations for different future development scenarios.

Within the framework of first course trainings the students receive the opportunity to use the large set of modern world-known data archives, which are not presented on their university basic courses. This data can be compared with the data of station observations. Students can calculate a basic set of climate characteristics for a chosen region and time period, receive graphically presented results and analyze the dynamics of chosen climatic characteristics.

The second set of trainings involves analysis of the different climatic characteristics changes and their correlations. The system contains several predefined IPCC scenarios (SRES and RCP). Students are supposed to compare two climate scenarios and estimate the influence of global change on different climatic characteristics.

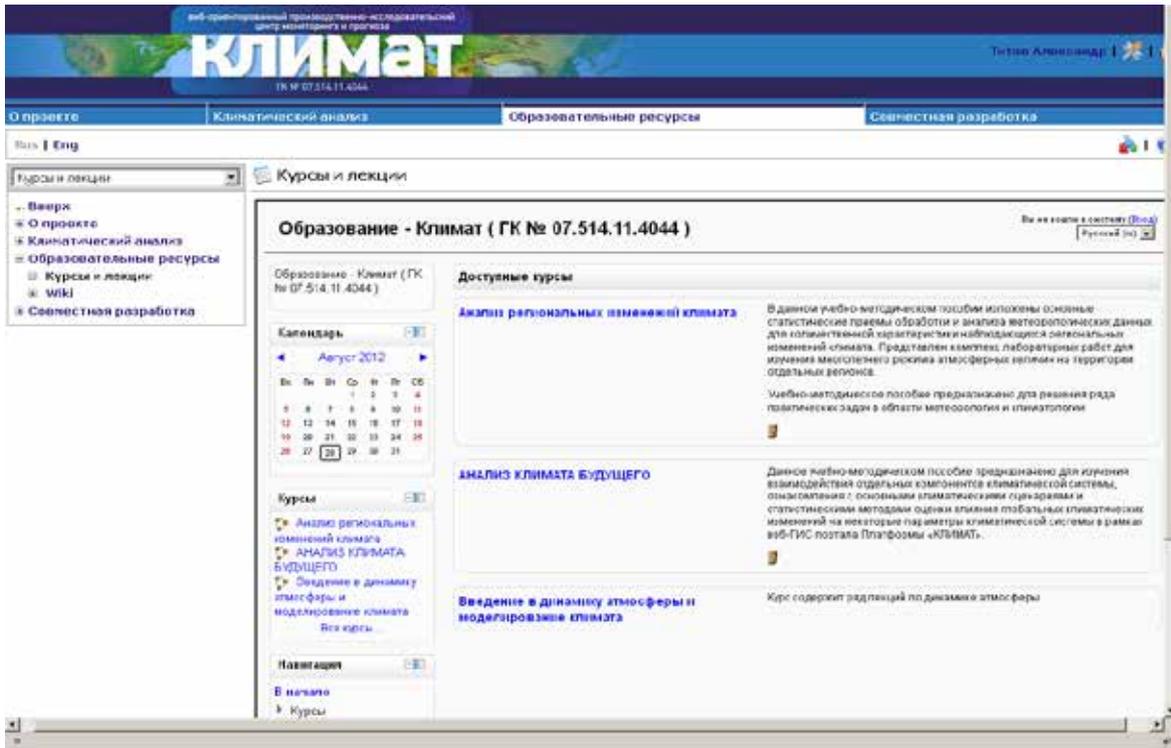


Figure 2. “Educational courses” window.

Work with the courses has the following steps:

1. Register in the system “Climate”.
2. Enter the section “Lectures and courses”
3. Choose the course and enter the educational part of the platform using the same login data.

The following steps depend on the chosen course. For example for the course on future climate analysis one should go through the theoretical part and then go to the tab “Practical tasks”. After reading the task one should go to “Climate software” section and to the tab “Web-GIS system”. Here new layers for calculated characteristics could be added to preinstalled ones, and scenario, time period and the area of research could be chosen. The results of calculations are presented as color surface map, where every color means fixed quantitative value of calculated climatic characteristics. It is also possible to get quantitative value of a single point by choosing it on the map (Fig. 3).



Figure 3. Report on a practical task.

Both courses are used to prepare bachelors of meteorology, hydrology and ecology in Tomsk State University. It is a test use and these students were pioneers so they helped us to find and fix some minor bugs in the system and try our tasks and trainings on them. A group of 30 students received their personal accounts in the

system “Climate” and were subscribed for both educational courses. After reading the theoretical part they passed through trainings within the systems. Their results were sent to teachers to check their progress and to the authors of the courses to find out weak points. By now this group has passed both course and practices working with different data archives, using modern methods of analysis of time series data.

Although the system was only tested we can already speak about some results. We gave students a fresh point of view on their familiar disciplines and make them acquainted with modern research and modeling tools and approaches. They are able now to acquire new information and results by themselves and this information is usually remembered. We hope that the students could try to conduct their own scientific research on the basis of the available information and theoretical material. Now we plan to work through the courses and add them to a basic climate change course at Tomsk State University.

Acknowledgements

Partial support of RF Ministry of Education and Science grant 8345, RFBR grant 13-05-12034.

References:

1. Gordov E.P., Kabanov M.V., Lykosov V.N. *Information-computational technologies for environmental science: young scientists training // Computational Technologies.– V. 11.– Part 1.– Special Issue.– pp. 3-15.*
2. Gordov E.P., Gordova Yu.E. *EU framework program and creation of scientific basis for contemporary environmental studies: results and problems /Proc. of the International Scientific Conference “Russia and EU: Prospects of creating common space of research and education”.– Voronezh, 13-14 December, 2006.– pp.163-174 (in Russian).*
3. Gordova Yu.E.; Genina E.Yu.; Gorbatenko V.P.; Gordov E.P.; Kuzhevskaya I.V.; Martynova Yu.V.; Okladnikov I.G., Titov A.G., Shulgina T.M.; Barashkova N.K. *Support of the educational process in modern climatology within the web-GIS platform “Climate” / Open and distant learning - 2013. - № 1. - P. 14-19 (In Russian)*