

International Young Scientists School and Conference  
on Computational Information Technologies  
for Environmental Sciences  
and Information Systems

**CITES-2015**

26 June – 30 June 2015, Tomsk, Russia



Международная молодежная школа и конференция  
по вычислительно-информационным технологиям  
для наук об окружающей среде

**CITES-2015**

26 июня – 30 июня 2015, Томск, Россия



## Организаторы CITES 2015

Институт мониторинга климатических  
и экологических систем СО РАН

Институт вычислительной математики РАН

Институт вычислительной математики  
и математической геофизики СО РАН

Научно-исследовательский  
вычислительный центр МГУ

Томский государственный университет

## CITES 2015 organizers

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological  
Systems SB RAS

Institute for Numerical Mathematics RAS

Institute of Computational Mathematics  
and Mathematical Geophysics SB RAS

Research Computing Center  
of Moscow State University

Tomsk State University

## Благодарим за финансовую поддержку:

Проект РФФИ 15-35-10151 мол\_г  
Мегагрант Минобрнауки РФ №14.В25.31.0026  
«Внетропический гидрологический цикл в современном и будущем климате: неопределенности и предсказуемость»  
(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН)

## Aknowledgements:

RFBR project 15-35-10151 mol\_g  
Mega-grant of Ministry of Education and Science  
of Russian Federation №14.V25.31.0026  
“Extra-tropical hydrological cycle in the current  
and future climate: uncertainties and predictability”  
(P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS)

**SESSION MODELING AND ANALYSIS OF REGIONAL ATMOSPHERIC PROCESSES**  
**СЕКЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕГИОНАЛЬНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ**

<b>Development of the concept of environmental forecasting to assess the consequences of natural and anthropogenic impacts</b> <i>Penenko V.V.</i> .....	8
<b>Развитие концепции природоохранного прогнозирования для оценки последствий природных и антропогенных воздействий</b> <i>Пененко В.В.</i> .....	8
<b>Averaging of stochastic radiation models based on probabilistic and computational-statistical analysis</b> <i>Mikhailov G.A., Ambos A.Yu.</i> .....	12
<b>Осреднение стохастических радиационных моделей на основе вероятностного и численно-статистического анализа</b> <i>Михайлов Г.А., Амбос А.Ю.</i> .....	12
<b>Real-time data assimilation algorithm for atmospheric transport and transformation models</b> <i>Penenko A.V., Penenko V.V.</i> .....	15
<b>Алгоритмы реального времени для усвоения данных в моделях транспорта и трансформации атмосферных примесей</b> <i>Пененко А.В., Пененко В.В.</i> .....	15
<b>The study of ground gas atmospheric composition by differential optical absorption in the UV region of spectrum</b> <i>Smirnov S.S., Geiko P.P.</i> .....	18
<b>Restoration of the atmospheric instability parameters using MODIS and radiosonde data</b> <i>Gorbatenko V.P., Nechepurenko O.E., Belikova M.Yu., Krechetova S.Yu.</i> .....	19
<b>Восстановление параметров неустойчивости атмосферы по данным MODIS и радиозондирования</b> <i>Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Нечепуренко О.Е.</i> .....	19
<b>Estimate of the ratio of the ozone formation rate in the atmospheric boundary layer</b> <i>Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Belan B.D.</i> .....	21
<b>Оценка скорости образования озона в пограничном слое атмосферы</b> <i>Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Белан Б.Д.</i> .....	21
<b>Effects of short-time variations of cosmic rays in pressure field of lower atmosphere using Multifield Comparison Measure Method</b> <i>Artamonova I.V., Volobuev D.M., Makarenko N.G.</i> .....	24
<b>Исследование эффектов короткопериодных вариаций космических лучей в поле давления нижней атмосферы методом мультиградиентной меры</b> <i>Артамонова И.В., Волобуев Д.М., Макаренко Н.Г.</i> .....	24
<b>Discrete analytical schemes for modeling of aerosols binary coagulation with integro-differential Smolukhovsky equation</b> <i>Sorokovoy A.A., Penenko A.V.</i> .....	28
<b>Structure and evolution of polar low in Kara sea by WRF numerical simulation</b> <i>Verezemskaya P.S., Stepanenko V.M.</i> .....	28
<b>Структура и эволюция полярного мезоциклона в Карском море по данным численного моделирования WRF</b> <i>Веземская П.С., Степаненко В.М.</i> .....	29
<b>Thermodynamic characteristics of the atmosphere in days with thunderstorm on the cosmodrome «Vostochny»</b> <i>Gromniitskaya A.A., Gorbatenko V.P.</i> .....	33
<b>Термодинамические характеристики атмосферы в дни с грозой на космодроме «Восточный»</b> <i>Громницкая А.А., Горбатенко В.П.</i> .....	33
<b>Turbulence parametrization of heat plume over an urban heat island in stably stratified atmosphere</b> <i>Kurbatskiy A.F., Kurbatskaya L.I.</i> .....	36
<b>Параметризация турбулентности теплового факела над городским островом тепла в устойчиво стратифицированной атмосфере</b> <i>Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И.</i> .....	36

**SESSION MODELING AND ANALYSIS OF STATE OF THE REGIONAL UNDERLYING SURFACE AND ITS HYDROLOGICAL REGIME**  
**СЕКЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕГИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ЕЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА**

<b>Turbulence and greenhouse gas dynamics in lake ecosystems</b> <i>Stepanenko V.M., Mammarella I.</i> .....	40
<b>Турбулентность и перенос парниковых газов в озерных экосистемах</b> <i>Степаненко В.М., Маммарелла И.</i> .....	41
<b>Моделирование мезомасштабных стратифицированных течений над крутыми препятствиями различной формы</b> <i>Юдин М.С.</i> .....	43
<b>Simulation of mesoscale stratified flows over steep obstacles of various shapes</b> <i>Yudin M.S.</i> .....	44
<b>Features of NDVI variations of permafrost regions in the post-fire period</b> <i>Varlamova E.V., Solovyev V.S.</i> .....	46
<b>Особенности вариаций NDVI мерзлотных ландшафтов после лесных пожаров</b> <i>Варламова Е.В., Соловьев В.С.</i> .....	47
<b>The study of the spatial distribution of small thermokarst lakes in Western Siberia based on ultrahigh resolution satellite images</b> <i>Polishchuk V.Yu., Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M.</i> .....	50
<b>Изучение пространственного распределения малых термокарстовых озер Западной Сибири на основе спутниковых снимков сверхвысокого разрешения</b> <i>Полищук В.Ю., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М.</i> .....	51
<b>Mathematical model and computational method for investigation of a river stream</b> <i>Churuksaeva V.V., Starchenko A.V.</i> .....	54
<b>Математическая модель и численный метод для расчета течения в русле реки</b> <i>Чуруксаева В.В., Старченко А.В.</i> .....	54
<b>Numerical study of water-atmosphere gas exchange for a boreal lake</b> <i>Guseva S.P., Stepanenko V.M.</i> .....	57
<b>Моделирование потока метана в атмосферу на примере пресноводного водоема (республика Коми)</b> <i>Гусева С.П., Степаненко В.М.</i> .....	58

**SESSION MODELING AND ANALYSIS OF REGIONAL CLIMATE**  
**СЕКЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА**

<b>Multiscale version of the global atmospheric model SL-AV model</b> <i>Tolstykh M.A., Volodin E.M., Fadeev R.Yu., Shashkin V.V.</i> .....	59
<b>Многомасштабная версия глобальной модели атмосферы ПЛАВ</b> <i>Толстых М.А., Володин Е.М., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В.</i> .....	59
<b>Influence of Siberian rivers runoff on the balance of fresh water in Arctic Ocean</b> <i>Kuzin V.I., Platov G.A., Lapteva N.A.</i> .....	62
<b>Влияние стока Сибирских рек в XXI веке на баланс пресной воды в Северном Ледовитом океане</b> <i>Кузин В.И., Платов Г.А., Лантева Н.А.</i> .....	63
<b>The new in the analysis of geophysical data with complicated structure</b> <i>Cheredko N.N., Krutikov V.A., Tartakovskiy V.A., Markelova A.N., Volkov V.Yu., Polishchuk V.Yu., Ivanova E.V.</i> .....	65
<b>Новое в анализе геофизических данных сложной структуры</b> <i>Чередыко Н.Н., Крутиков В.А., Тартаковский В.А., Маркелова А.Н., Волков В.Ю., Полищук В.Ю., Иванова Э.В.</i> .....	66
<b>The structures extraction method as a way of the research of the pressure field dynamics of the atmospheric boundary layer on the territory of Northern hemisphere</b> <i>Ivanova E.V., Kataev S.G., Tartakovskiy V.A., Krutikov V.A.</i> .....	68
<b>Метод выделения структур как способ исследования динамики поля давления приземного слоя атмосферы на территории северного полушария</b> <i>Иванова Э.В., Катаев С.Г., Тартаковский В.А., Крутиков В.А.</i> .....	69
<b>Experimental study of urban heat island of biggest Arctic cities: methods and first results</b> <i>Konstantinov P.I., Baklanov A.A., Varentsov M.I., Repina I.A., Samsonov T.E., Shuvalov S.E., Grishenko M.Yu.</i> .....	72
<b>Экспериментальное исследование островов тепла крупнейших арктических городов: методика и первые результаты</b> <i>Константинов П.И., Бакланов А.А., Варенцов М.И., Репина И.А., Самсонов Т.Е., Шувалов С.В., Грищенко М.Ю.</i> .....	72
<b>The influence of heat fluxes over the Arctic Ocean on the temperature conditions over the North Eurasia</b> <i>Moraru E.I., Loginov S.V.</i> .....	74

<b>Анализ влияния тепловых потоков в Арктическом секторе на температурные условия в Северной Евразии</b> <i>Морару Е.И., Логинов С.В.</i> .....	75
<b>Modeling of atmospheric transport pollutant from a point source in the Southern Baikal region</b> <i>Рянова Е.А., Фалейчик Л.М.</i> .....	77
<b>Моделирование атмосферного переноса примеси от точечного источника в Южном Прибайкалье</b> <i>Пьянова Э.А., Фалейчик Л.М.</i> .....	77
<b>Simulation of heat and mass transfer in Lake Baikal in winter taking into account the phase transitions in water-methane system</b> <i>Tsvetova E.A.</i> .....	81
<b>Моделирование тепло-массообмена в Байкале в зимний период с учетом фазовых переходов в системе вода-метан</b> <i>Цветова Е.А.</i> .....	81
<b>Evaluation of Coincidence in Environmental Processes</b> <i>Markelova A.N., Cheredko N.N., Volkov J.V., Tartakovskiy V.A.</i> .....	85
<b>Оценка согласованности природно-климатических процессов</b> <i>Маркелова А.Н., Чередыко Н.Н., Волков Ю.В., Тартаковский В.А.</i> .....	85
<b>Monitoring of wildfires in boreal forests of Eastern Siberia on remote sensing data</b> <i>Tomshin O.A., Solovyev V.S.</i> .....	88
<b>Мониторинг лесопожарной активности в бореальных лесах Восточной Сибири по данным дистанционного зондирования</b> <i>Томишин О.А., Соловьев В.С.</i> .....	88
<b>Integration of the lake model to the general circulation model INMCM4</b> <i>Bogomolov V., Stepanenko V., Volodin E.</i> .....	90
<b>Интеграция модели озера в совместную модель общей циркуляции атмосферы и океана</b> <i>Богомолов В.Ю., Степаненко В.М., Володин Е.М.</i> .....	91
<b>Variability of atmospheric circulation in response to climate change in West Siberia at the end of XX and at the beginning of XXI centuries</b> <i>Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Martynova Yu.V.</i> .....	93
<b>Изменчивость атмосферной циркуляции в условиях происходящих климатических изменений в Западной Сибири в конце XX и начале XXI веков</b> <i>Харюткина Е.В., Логинов С.В., Мартынова Ю.В.</i> .....	93
<b>Influence of a city on the variability of climatic characteristics</b> <i>Voropay N.N.</i> .....	96
<b>Влияние города на изменчивость климатических характеристик</b> <i>Воропай Н.Н.</i> .....	96
<b>Current changes of resources moistening during vegetation season in the South of Western Siberia</b> <i>Polyakov D.V., Kuzhevskaya I.V.</i> .....	99
<b>Тенденции современных изменений ресурсов увлажнения за период вегетации на территории юга Западной Сибири</b> <i>Поляков Д.В., Кузевская И.В.</i> .....	99
<b>SESSION DATA AND INFORMATION-COMPUTATIONAL SYSTEMS FOR EARTH SCIENCES</b>	
<b>СЕКЦИЯ ДАННЫЕ И ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ НАУК О ЗЕМЛЕ</b>	
<b>Complex approach for studying wildfires in Central Siberia</b> <i>Panov A.V., Chi X., Prokushkin A.S., Bryukhanov A.V., Korets M., Ponomarev E.I., Krivobokov L.V., Sidenko N.V., Timokhina A.V., Andreae M.O.</i> .....	102
<b>Комплексный подход в исследовании лесных пожаров в Средней Сибири</b> <i>Панов А.В., Чи Сяйгуань, Прокушкин А.С., Брюханов А.В., Корец М.А., Пономарев Е.И., Кривобоков Л.В., Сиденко Н.В., Тимохина А.В., Майнрат Андреа</i> .....	103
<b>Fire emissions estimates in Siberia: Impact of vegetation types, meteorological conditions, forestry practices and fire regimes</b> <i>Kukavskaya E.A., Conard S.G., Ivanova G.A., Buryak L.V., Zhila S.V., Kalenskaya O.P., Zarubin D.S.</i> .....	108
<b>Оценка пирогенной эмиссии углерода в лесах Сибири: Влияние лесорастительных и метеорологических условий, лесохозяйственной деятельности и пожарных режимов</b> <i>Кукавская Е.А., Конард С.Г., Иванова Г.А., Буряк Л.В., Жила С.В., Каленская О.П., Зарубин Д.С.</i> .....	108
<b>Evaluation of the vegetation structure and productivity of wetland ecosystems using satellite data</b> <i>Alekseeva M.N., Dyukarev E.A., Golovatskaya E.A.</i> .....	112
<b>Оценка структуры и продуктивности растительного покрова болотных экосистем по спутниковым данным</b> <i>Алексеева М.Н., Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А.</i> .....	112
<b>High-precision laser-based instrumentation system as a tool for assessing impact of various factors on Scots pine fire-resistance in Central Siberia</b> <i>Bryukhanov A.V., Panov A.V., Sidenko N.V.</i> .....	115

<b>Использование наземной лазерной съемки для оценки влияния различных факторов на огнестойкость сосны обыкновенной в Центральной Сибири</b> <i>Брюханов А.В., Панов А.В., Сиденко Н.В.</i> .....	116
<b>Monitoring of climatic conditions in forest and swamp ecosystems of the middle taiga in Central Siberia</b> <i>Sidenko N.V., Kollе O., Panov A.V., Heimann M.</i> .....	119
<b>Мониторинг климатических условий в лесо-болотных комплексах подзоны средней тайги Приенисейской Сибири</b> <i>Сиденко Н.В., Олаф Колле, Панов А.В., Мартин Хайманн</i> .....	120
<b>Architecture of the Web mapping application for working with NetCDF datasets</b> <i>Titov A.G., Gordov E.P., Okladnikov I.G.</i> .....	123
<b>Using of actinometric data to parameterize cloud forms and types</b> <i>Zuev S.V., Krasnenko N.P., Kartashova E.S.</i> .....	123
<b>Использование актинометрической информации для параметризации форм и видов облачности</b> <i>Зуев С.В., Красненко Н.П., Карташова Е.С.</i> .....	124
<b>Factor analysis of data from meso-oligotrophic peatland</b> <i>Lapina L.E., Mychaylov O.A., Uspensky I.M.</i> .....	126
<b>Факторный анализ данных с мезоолиготрофного болота Мэдла-Пэв-Нюр</b> <i>Латина Л.Э., Михайлов О.А., Успенский И.М.</i> .....	127
<b>Assessment of streams of greenhouse gases on a mesooligotrophic peatland in August, 2012</b> <i>Lapina L.E., Uspensky I.M.</i> .....	129
<b>Оценки потоков парниковых газов на мезоолиготрофном болоте Мэдла-Пэв-Нюр в августе 2012 года</b> <i>Латина Л.Э., Успенский И.М.</i> .....	130
<b>Three-layer informational-computational system for presentation of predicted values of urban air pollution by sources of anthropogenic and biogenic emission</b> <i>Bart A.A., Starchenko A.V., Fazliev A.Z., Tsar'kov D.V.</i> .....	133
<b>Информационно-вычислительная система трехслойной архитектуры для представления прогнозируемых значений загрязнения городского воздуха источниками антропогенной и биогенной эмиссии</b> <i>Барт А.А., Старченко А.В., Фазлиев А.З., Царьков Д.В.</i> .....	134
<b>Using satellite-derived atmospheric motion vectors (AMV) observations in the data assimilation system based on LETKF algorithm</b> <i>Mizyak V.G., Shlyayeva A.V., Tolstykh M.A.</i> .....	137
<b>Использование данных спутниковых наблюдений AMV в системе усвоения на основе LETKF</b> <i>Мизяк В.Г., Шляева А.В., Толстых М.А.</i> .....	137
<b>The use of ASCAT ocean surface wind satellite observations in the data assimilation system based on the Local Ensemble Kalman Filter</b> <i>Rogutov V.S., Tolstykh M.A., Shlyayeva A.V.</i> .....	141
<b>Использование спутниковых данных наблюдений ветра на уровне моря ASCAT в системе усвоения на основе локального ансамблевого фильтра Калмана</b> <i>Рогутов В.С., Толстых М.А., Шляева А.В.</i> .....	142
<b>Influence of climatic changes on a prevalence of cardio-vascular diseases in Tomsk: first results</b> <i>Gordov E.P., Genina E.Yu., Garganeeva A.A., Okrugin S.A., Borel K.N., Chudinov I.L.</i> .....	145
<b>Влияние климатических изменений на частоту возникновения сердечно-сосудистых заболеваний в г. Томске: первые результаты</b> <i>Гордов Е.П., Генина Е.Ю., Гарганеева А.А., Округин С.А., Борель К.Н., Чудинов И.Л.</i> .....	145
 <b>SESSION COMPLEX STUDY OF THE STATE AND CLIMATE VARIABILITY OF THE EAST SIBERIAN SECTOR OF ARCTIC</b>	
<b>СЕКЦИЯ КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ И КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО СЕКТОРА АРКТИКИ</b>	
<b>Совместная гидродинамическая система дельты реки Лена и шельфовой зоны моря Лаптевых: численные эксперименты и предварительные результаты</b> <i>Платов Г.А., Шлычков В.А., Климова Е.Г., Крылова А.И.</i> .....	147
<b>The coupled hydrodynamic system of Lena River delta and the Laptev Sea shelf zone: numerical tests and preliminary results</b> <i>Platov G., V. Shlychkov, E. Klimova, and A. Krylova</i> .....	148
<b>Sediment delivery towards the Lena River delta: quantification and environmental implications</b> <i>Tananaev N.I.</i> .....	151
<b>Modeling recent climate variability of the sea water over the East Siberian Arctic Shelf</b> <i>Golubeva E.N., Malakhova V.V., Krayneva M.B.</i> .....	152
<b>Исследование изменчивости состояния вод Восточно-Сибирского сектора Арктического шельфа на основе численного моделирования</b> <i>Голубева Е.Н., Малахова В.В., Крайнева М.В.</i> .....	152
<b>Development of a high-resolution coupled ocean – sea ice model of the Arctic region</b> <i>Ushakov K.V., Kalmykov V.V., Ibraev R.A.</i> .....	155

<b>Разработка высокоразрешающей совместной модели океана и морского льда Арктического региона</b> <i>Ушаков К.В., Калмыков В.В., Ибраев Р.А.</i> .....	155
<b>Mobilization, mineralization and turnover of dissolved organic matter in the Lena Delta and coastal Laptev Sea</b> <i>Ivan V. Dubinenkov, Anne Morgenstern, Ruth Flerus, Philippe Schmitt-Kopplin, Gerhard Kattner, Boris P. Koch</i> .....	158
<b>From fresh – to marine waters: the fate of dissolved organic matter in the Lena delta region, Siberia</b> <i>Rafael Gonçalves-Araujo, Colin Stedmon, Birgit Heim, Ivan Dubinenkov, Alexandra Kraberg, Denis Moiseev, Astrid Bracher</i> .....	159
<b>Mathematical modeling of the submarine permafrost dynamics and gas hydrate stability zone in the East Siberian Arctic Shelf</b> <i>Malakhova V.V.</i> .....	159
<b>Математическое моделирование динамики подводной мерзлоты и зоны стабильности газовых гидратов на Восточно-Сибирском шельфе</b> <i>Малахова В.В.</i> .....	160
<b>Numerical simulation of the Lena River estuary dynamics using SELFE</b> <i>Fofonova Vera, Kraineva Marina, Tomety Serge, Golubeva Elena, Wiltshire Karen Helen</i> .....	162
<b>Hydrodynamic modeling of hydrophysical processes in the Lena River delta</b> <i>Krylova A.I., Shlychkov V.A.</i> .....	163
<b>Гидродинамическое моделирование гидрофизических полей в дельте р. Лена</b> <i>Шлычков В.А., Крылова А.И.</i> .....	163

## SESSION

IN COMMEMORATION OF AC. V.E. ZUEV

# Modeling and analysis of regional atmospheric processes

## СЕКЦИЯ

ПАМЯТИ АКАДЕМИКА В.Е. ЗУЕВА

# Моделирование и анализ региональных атмосферных процессов

## Development of the concept of environmental forecasting to assess the consequences of natural and anthropogenic impacts

**Penenko V.V.**

Institute of Computational Mathematic and Mathematical  
Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia  
E-mail: [penenko@sscc.ru](mailto:penenko@sscc.ru)

**P**roblems of forecasting changes in the environment quality and ecological perspectives assessments for industrial regions exposed to natural and anthropogenic factors are important class of interrelated problems of ecology and climate.

They require methods for identifying centers of action of the climate system and methods of risk assessment and vulnerability of territories, which are subjected to severe exposure of emissions of contaminants, heat and moisture. Interest in these objectives actively stimulated by the fact that the results of their solutions have direct hands-on access to the sphere of public health, social and economic relations in modern society.

In fact, the goal of our research is to develop a technique with which we can get, in the forecasting mode, quantitative information on environmental changes and evaluate their impact using all available factual information.

To meet the challenges, we are developing new and effective methods of investigation. They are based on variational principles with the joint use of mathematical models of hydrodynamic and chemical processes in the atmosphere and evidence of their observable manifestations. Methods of mathematical modeling provides quantitative estimates of the environment evolution and degree of risks from various influences.

Many problems require the use of combined methods of direct and inverse modeling. This primarily applies to the problems of long-term forecasting and related risk assessments in the changing climate. Direct modeling gives the results of calculations on models of processes of varying complexity, which differ in the functional content and detail, the degree of accounting for various factors and spatio-temporal resolution of discrete approximations.

A higher system level of the problem as a whole is effectively implemented by the methods of inverse modeling. They are applied for the assessments of generalized goal characteristics of the studied phenomena. Here, the process models act as links between the state functions, the input parameters and sources of external influences.

Developing the methodology of G.I. Marchuk on the theory of adjoint equations and their applications, we have been constructing the variational



methods of the sensitivity theory of the models and functionals to the variations of model parameters, input data and source influences. On the basis of these methods, the algorithms are generated to implement forward links and feedbacks between the parameters and goal functionals.

The main question to be answered in the environmental forecasting and design is to assess possible changes in the environment quality for long periods. Variational methods of the sensitivity theory and risk assessments based on them provide such opportunities. In particular, for linearized models of transport and transformation of gas-aerosol substances, these methods allow us to obtain the required risk assessments without specifying information about the sources of these impacts.

*The work is carried out with the partial support under the Programs 43 and 18 of the Presidium of Russian Academy of Sciences, as well as the RFBR project №14-01-00125-a.*

## Развитие концепции природоохранного прогнозирования для оценки последствий природных и антропогенных воздействий

Пененко В.В.

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

**Введение.** Проблемы прогнозирования изменений качества природной среды и оценок экологической перспективы индустриальных регионов, подвергающихся воздействию естественных и антропогенных факторов, относятся к важному классу взаимосвязанных задач экологии и климата. Для их решения требуются методы выявления центров действия климатической системы и методы оценок рисков и уязвимости территорий, которые подвергаются интенсивным воздействиям выбросов загрязняющих примесей, тепла и влаги. Интерес к этим задачам активно стимулируется теми обстоятельствами, что результаты их решения имеют непосредственный практический выход в сферу охраны здоровья населения, социальных и экономических отношений современного общества.

По сути дела, цель наших исследований состоит в разработке методики, с помощью которой можно получать в режиме прогноза количественную информацию об изменениях природной среды и оценивать их последствия с использованием всей доступной фактической информации.

Как показывает практика, катастрофические экологические ситуации зачастую не имеют четкого проявления. Это обусловлено тем, что в каждый момент времени вклад эмиссии примесей, влияющих на качество атмосферы незначителен. Но в совокупности их влияние имеет накопительный и синергетический эффект, что может «неожиданно» привести к катастрофическим последствиям. Примерами тому могут быть эмиссия метана с болотных и переувлажненных территорий в Северном полушарии и, в частности, в Сибири, процессы переноса и трансформации в атмосфере радионуклидов и биологически активных аэрозолей, а также углеродсодержащих субстанций растительного происхождения. Установлено, что, кроме свойств метана как парникового газа, в результате его трансформации в атмосфере в реальном времени образуются формальдегид, оксид углерода и множество других высокотоксичных продуктов вторичного загрязнения окружающей среды, концентрации которых могут превышать предельно допустимые уровни. Вероятность появления таких событий увеличивается в случае изменения климатических условий. Поэтому необходимо иметь методику, позволяющую оперативно оценивать тенденции в развитии химической, радиационной и аэрозольной обстановки при различных условиях и выявлять предпосылки образования экологически опасных ситуаций.

**Основы вариационной технологии моделирования.** Для решения задач мы разрабатываем новые эффективные методы исследования. Они основаны на вариационных принципах с совместным использованием математических моделей процессов и фактических данных об их наблюдаемых проявлениях. Методы математического моделирования позволяют получать количественные оценки эволюции окружающей среды и оценивать степень экологических рисков.

Традиционный подход к решению таких задач обычно базируется на методах прямого моделирования. Суть их состоит в создании математических моделей изучаемых процессов и в проведении сценарных расчетов при различных способах задания входных данных и внешних воздействий. При этом необходимо знать всю информацию об источниках воздействий, что практически невозможно. Поэтому, несмотря на широкое распространение этого подхода, становится понятным, что он не может решить всего комплекса вопросов на современном уровне.

Многие задачи требуют использования комбинированных методов прямого и обратного моделирования. В первую очередь это относится к проблемам долгосрочного прогнозирования и связанных с

ними оценок рисков в условиях изменяющегося климата. В таком варианте прямое моделирование предоставляет результаты расчетов по моделям процессов различной степени сложности, которые различаются по функциональному содержанию и детализации, по степени учета различных факторов и пространственно-временному разрешению дискретных аппроксимаций. Методы обратного моделирования эффективно реализуют более высокий системный уровень проблемы в целом для оценок обобщенных характеристик исследуемых систем, в которых модели процессов выступают в качестве связей между функциями состояния, входными параметрами и источниками внешних воздействий.

В развитие методологии Г.И. Марчука по теории сопряженных уравнений и их приложениям [1,2], мы разрабатываем для этих целей методы теории чувствительности моделей и функционалов к вариациям параметров моделей, входных данных и источников воздействий [3,4,6]. На основе этих методов формируются алгоритмы реализации прямых и обратных связей между параметрами и целевыми функционалами.

Организация такой технологии моделирования строится на базе вариационных принципов в сочетании с методами декомпозиции и расщепления. Так как в моделях процессов и во входных данных имеются различного рода неопределенности, в таких случаях мы формулируем вариационные принципы со слабыми ограничениями для их нахождения.

Основной вопрос, на который требуется ответить при природоохранном прогнозировании и проектировании, состоит в оценке возможных изменений качества природной среды на длительные сроки.

**Модели химии атмосферы и динамики аэрозолей.** Основные задачи природоохранного прогнозирования состоят в оценке «качества» атмосферы, которое определяется составом химических веществ и аэрозолей, содержащихся в воздухе. В математическом моделировании качества атмосферы и его изменчивости участвуют совместные модели гидротермодинамики и химии в режиме двухсторонних взаимодействий. При реализации этих моделей 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 и характерных масштабов в механизмах трансформации аэрозолей, участвующих в реакциях.

Задачи атмосферной динамики и химии чрезвычайно сложны: в современных моделях учитывается порядка сотни различных субстанций, механизмы трансформации которых включают несколько сотен химических реакций. Эти параметры определяют структуру и размерность задач атмосферной химии. Для их численного решения часто используются методы расщепления по физическим процессам, по механизмам трансформации субстанций и декомпозиции по пространству. Они позволяют свести многомерные задачи к менее сложным и меньшей размерности.

Системы уравнений динамики аэрозольных популяций в атмосфере включают совокупность интегро-дифференциальных операторов. Последние описывают механизмы трансформации различных субстанций, имеющих широкий спектр пространственно-временных масштабов и масштабов механизмов трансформации в пространстве размеров частиц. Это механизмы коагуляции, конденсации/испарения, конверсии газ-частица, нуклеации и др.

Реализация блоков химической трансформации на отдельных этапах в методе расщепления позволяет выполнять интегрирование уравнений химии атмосферы и динамики аэрозолей формально независимо для каждого конечного объема трехмерной сеточной пространственной области в пределах каждого шага по времени.

Для наших целей требуются алгоритмы моделирования химической трансформации газовых примесей и динамики аэрозолей, согласованные в численных схемах для прямых, сопряженных и обратных задач. Для построения таких схем мы разрабатываем вариационные методы с использованием концепции и техники сопряженных интегрирующих множителей [7,8]. В результате получаем высокоточные дискретно-аналитические численные схемы, обладающие свойствами устойчивости и абсолютной монотонности. Алгоритмы их реализации прямые, то есть не использующие итерации. Такие схемы удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к методам решения прямых и обратных задач.

Организация такой технологии моделирования строится на базе вариационных принципов в сочетании с методами декомпозиции и расщепления. При необходимости включаются методы усвоения данных наблюдений с оценкой неопределенностей [6,9].

**Сценарный подход для оценок экологических перспектив.** Принципиальный вопрос, на который требуется ответить при природоохранном прогнозировании и проектировании, состоит в оценке возможных изменений качества природной среды на длительные сроки. Естественно, речь идет не только об учете непосредственных воздействий и выбросов примесей от действующих и потенциально возможных предприятий, но и об оценке эволюции гидротермодинамики атмосферы в условиях изменяющегося климата на показатели качества природной среды.

Один из путей учета климатического фона для целей природоохранного прогнозирования состоит в использовании фазовых пространств, описывающих изменчивость атмосферных процессов, которые

генерируются математическими моделями климатической системы. Однако, для существующих в настоящее время моделей, вопрос о предсказуемости моделируемых на их основе сценариев остается открытым. Поэтому для отработки методики прогнозирования и анализа многомерных фазовых пространств, порождаемых нелинейными динамическими системами, необходимо использовать количественную информацию об атмосферной и океанической циркуляциях за длительные периоды времени. Она имеется в базах данных, таких, например, как реанализ. Так, в базе данных реанализа NCEP/NCAR содержится информация об основных переменных состоянии климатической системы и других, связанных с ними характеристик, с 1948 года по настоящее время. Эти данные являются результатом реконструкции полей метеозлементов на базе совместного использования моделей и результатов наблюдений. Поэтому при их учете повышается степень адекватности прогнозов для оценок экологических перспектив. Естественно, возникает вопрос, как из этих огромных массивов разнородных данных извлекать главные элементы долговременной памяти климатической системы, необходимые для долгосрочного прогнозирования. Для решения этой проблемы мы предлагаем метод ортогональной декомпозиции функциональных пространств для формирования информативных базисов и на их основе осуществлять разделение масштабов исследуемых процессов. Он дает возможность проверять гипотезы существования квазистационарных центров активности атмосферы и изучать их пространственно-временную изменчивость во взаимосвязи с изменениями характеристик качества природной среды.

В мире активно ведутся работы по выявлению и изучению климатологических центров действия атмосферы с целью установления закономерностей, имеющих прогностический характер. К таким центрам обычно относят регионы земного шара, где формируются относительно устойчивые характеристики общей циркуляции атмосферы, например, квазистационарные зоны повышенного и пониженного давления. Начало этих исследований восходит к периоду, когда Тейсеран-де-Бор в 1884 году определил понятие центров действия атмосферы. В синоптической метеорологии описываются более двадцати центров с достаточно устойчивой локализацией по географическому положению. Типичным примером в Сибири является область интенсивного Алтае-Саянского циклогенеза. В 80-тых годах прошлого века Г.И.Марчуком была предложена концепция энергоактивных зон Мирового океана. В рамках этой концепции предлагались подходы к выявлению и изучению центров действия для целей долгосрочного прогнозирования погоды с использованием методов теории сопряженных уравнений [1,2].

Методы теории чувствительности и оценок рисков. Для этих целей мы разрабатываем вариационные методы теории чувствительности моделей. Они представляют универсальный математический аппарат для количественных оценок влияния возмущений всех факторов, учитываемых в моделях процессов, на поведение целевых функционалов, определенных в заданных областях-рецепторах. Рассчитываемые при этом функции чувствительности (ФЧ) выделяют величину относительного вклада в суммарный эффект каждого из факторов отдельно. Их пространственно-временная структура определяет области влияния различных факторов и, с позиций мониторинга, области наблюдаемости территорий, если системы мониторинга расположены в рецепторах.

Эти конструктивные возможности методов теории чувствительности удобно непосредственно использовать для оценок экологических рисков и уязвимости территорий по отношению к воздействиям антропогенных факторов. Они также составляют основу для формирования обратных связей при идентификации параметров и источников по данным мониторинга.

Вариационные методы теории чувствительности и оценок риска на их основе реализуются в режиме прямого/обратного моделирования. Для линеаризованных моделей переноса и трансформации примесей эти методы позволяют получать требуемые оценки рисков без задания информации об источниках этих воздействий. Это очень важно при подготовке управленческих решений при проектировании новых предприятий и организации оперативных природоохранных мероприятий при чрезвычайных ситуациях.

*Работа выполняется при частичной поддержке Программ 43 и 18 Президиума РАН, а также проекта РФФИ №14-01-00125-а.*

#### **Литература:**

1. Марчук Г.И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана. Л.: Гидрометеиздат, 1974, 303 с.
2. Марчук Г.И. Сопряженные уравнения и анализ сложных систем. М.: Наука, 1992.
3. Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. – Л., Гидрометеиздат, 1981, 352 с.
4. Пененко В.В. О концепции природоохранного прогнозирования// Оптика атмосферы и океана, 2010, т.23, №6, 432-438.
5. Penenko V., Tsvetova E. Orthogonal decomposition methods for inclusion of climatic data into environmental studies // Ecol. Model. 2008. V.217. P. 279–291.
6. Penenko V., Baklanov A., Tsvetova E., and Mahura A. Direct and Inverse Problems in a Variational Concept of Environmental Modeling. – Pure Appl. Geophys., 2012, 169, 447-465.

7. Penenko, V.V., Tsvetova E.A. Variational methods of constructing monotone approximations for atmospheric chemistry models. – *Numerical analysis and applications*, 2013, vol. 6, p. 210-220.
8. Penenko V.V., Tsvetova E.A., Penenko A.V. Variational approach and Euler's integrating factors for environmental studies. – *Computers and Mathematics with Applications*, 2014, vol. 67, p. 2240–2256.
9. А.В.Пененко, В.В.Пененко. Прямой метод вариационного усвоения данных для моделей конвекции-диффузии на основе метода расщепления. *Вычислительные технологии*. 2014, Т.19, №4, 69-83.

## Averaging of stochastic radiation models based on probabilistic and computational-statistical analysis

Mikhailov G.A., Ambos A.Yu.

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

E-mail: [gam@sccc.ru](mailto:gam@sccc.ru), [ambos.andrey@gmail.com](mailto:ambos.andrey@gmail.com)

<http://www.sccc.ru/>

On the basis of numerical statistical modelling of radiative transfer process a probability of passing through stochastic medium, averaged by medium realisations, is studied in detail in the present work. It is important practically, in particular, because such averaging is equivalent to averaging over large enough detector surface, if the property of the medium ergodicity is satisfied. This is confirmed by studies of the present work. Studies are performed for so called «mosaic» models of homogeneous isotropic random fields (media) with known correlation functions, which define averaged passing-through probability  $P_0$  to a considerable extent.

The most logically simple approach for estimating such functionals as  $P_0$  is a solution of series of radiative transfer problems for chosen realisations of random medium with the following averaging of obtained passing-through probabilities. However such approach is very time-consuming for the real radiative models. The traditional approaches using closure of the chain of moments and the small-disturbance theory for such models give estimates with badly controllable errors. Therefore in the present work authors used so called «method of double randomization», wherein for each medium realisation only one or several (correspondingly to the moment order) particle trajectories are modelled statistically.

Authors have constructed special algorithms of the «maximal cross-section» method for particle trajectories simulation in «mosaic media», based on the geometrical «flattening» of the attenuation coefficient of medium by adding the artificial «delta-scatterer».

On this base authors studied the possibilities of effective (relatively to  $P_0$ ) averaging of stochastic radiative models, and using the medium ergodicity for estimating readings of large detectors. The asymptotic exponential estimate of the function  $P_0(H)$  is constructed, where  $H$  is the medium layer thickness.

## Осреднение стохастических радиационных моделей на основе вероятностного и численно-статистического анализа

Михайлов Г.А., Амбос А.Ю.

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

E-mail: [gam@sccc.ru](mailto:gam@sccc.ru), [ambos.andrey@gmail.com](mailto:ambos.andrey@gmail.com)

Web: [www.sccc.ru](http://www.sccc.ru)

Практически важно то, что средняя вероятность  $P_0$  прохождения через стохастическую среду может существенно превышать соответствующую вероятность для детерминированной среды со средней плотностью. Поскольку метод Монте-Карло сравнительно трудоёмок, то отображение этого факта в массовых численных радиационных исследованиях целесообразно осуществлять, используя эффективное осреднение уравнения переноса, то есть создание детерминированной радиационной модели, для которой вероятность прохождения равна  $P_0$ . Для построения такого уравнения в работе осредняется «функция пропускания», равная вероятности прохождения кванта по траектории  $L$  длины  $L$ . Если результат такого осреднения близок к экспоненте  $\exp(-\sigma_c L)$  (хотя бы асимптотически),

то величину  $\sigma_c$  можно рассматривать, как коэффициент поглощения в требуемом осреднённом уравнении. Разработана также оценка коэффициента рассеяния  $\sigma_s$  в осреднённой радиационной модели, которая существенно влияет на соответствующую оценку величины  $P_0$  (см. далее п. 6). В работе решается реальная задача оценки показания достаточно протяжённого «нормированного» детектора частиц на верхней границе слоя в случае мононаправленного источника, распределённого равномерно на нижней границе («один квант с единицы площади»). Вследствие эргодичности среды такое показание близко к  $P_0$  с дисперсией, убывающей при увеличении площади детектора, соответственно убыванию корреляционной функции поля интенсивности проходящей радиации. В соответствующих расчётах был использован «метод сопряжённых блужданий» [1].

В работе использованы две модели «мозаичных» случайных полей, которые строятся на основе некоторого разбиения пространства со случайным выбором значения поля в каждой ячейке согласно некоторому распределению (независимо от остальных ячеек).

Первая рассматриваемая модель, называемая далее мозаичным полем Вороного  $\sigma_v(r)$ , строится на основе пуассоновского точечного потока интенсивности  $\lambda_v$ , который определяет разбиение пространства на ячейки, каждая из которых является множеством точек наиболее близких к одной из точек потока (диаграмма Вороного).

Для построения второй модели, называемой далее мозаичным полем Пуассона  $\sigma_p(r)$ , пространство разбивается на ячейки ансамблем базовых гиперплоскостей, определяемых точками пуассоновского потока интенсивности  $\lambda_p$  во вспомогательном параметрическом пространстве. Точка этого пространства объединяет расстояние  $h$  от заданного центра до базовой гиперплоскости и направление её «внешней», то есть направленной от центра, нормали  $n$  к базовой гиперплоскости. Геометрические свойства таких разбиений для обеих моделей детально изучены в [2] (см. также [3], [4], [5]). В работе [3] построено кусочно-постоянное двумерное мозаичное поле Пуассона и показано, что его корреляционная функция экспоненциальна. В работе [5] дано  $l$ -мерное обобщение такого поля, то есть построено  $l$ -мерное кусочно-постоянное экспоненциально коррелированное мозаичное поле. В [5] также показано, что мозаичное поле Пуассона является однородным и изотропным в «узком» смысле. Алгоритм построения реализации трёхмерного поля Пуассона детально описан в [5] (см. также [6]).

Особую роль в прикладных исследованиях играет «корреляционная длина»,  $\rho = \int_0^\infty K(r) dr$  где  $K(r)$  - нормированная корреляционная функция. Для мозаичных случайных полей  $K(r) = P(A_r)$ , где  $A_r$  - событие, состоящее в том, что точки  $r$  и  $r'$  при  $(r - r') = r$  находятся в одной ячейке [5]. В [4] для поля Вороного фактически получено выражение для величины  $\int P(A_r) dr$ , которое даёт оценку  $\rho_p \approx 0.469\lambda_v^{-1/3}$ .

Для мозаичного поля Пуассона  $P(A_r) = e^{-\pi\lambda_p r^2}$  (см., например, [5]). Следовательно  $\rho_p = 1/(\pi\lambda_p)$ . Хотя  $K(r)$  мозаичного поля Вороного не является экспоненциальной [4], однако расчёты показывают, что она близка к ней.

Стандартный «метод обратной функции распределения» моделирования свободного пробега кванта для мозаичных полей затруднён тем, что требует вычисления и анализа расстояний от  $r'$  в направлении  $u$  до плоскостей, разделяющих ячейки. Однако достаточно эффективным оказывается «метод максимального сечения» [7], который реализуется в предположении  $\sigma(r) \leq \sigma_m$  на основе искусственной модификации среды путём дополнения её « $\delta$ -рассеивателем» с сечением  $\sigma_m - \sigma(r)$  без изменения интенсивности излучения [1], [8]. Для модифицированной среды длина пробега моделируется по формуле  $l = -\ln a/\sigma_m$ . В полученной таким образом точке «столкновения» с вероятностью  $\sigma(r) / \sigma_m$  моделируется «физическое» столкновение, а с вероятностью  $1 - \sigma(r) / \sigma_m$  фиксируется «дельта-рассеяние», то есть далее строится новый пробег в том же направлении. При таком моделировании траекторий значения  $\sigma(r)$  достаточно выбирать лишь для тех подобластей, в которых реализуются столкновения. Ясно, что для мозаичных полей это может радикально сократить трудоёмкость моделирования, сравнительно с полным построением реализации  $\sigma(r)$ .

Используемые авторами алгоритмы идентификации точки для мозаичных полей требуют  $O(N)$  операций, где  $N$  - число точек в параметрическом пространстве. Для среды, заключённой в куб объёма  $H^3$ , была получена оценка  $EN_v / EN_p \approx 0.0279 H^2 \rho^{-2}$ . В то же время соответствующие оценки величины  $P_0$  для больших  $H$  практически совпадают, т. е. пуассоновское поле в расчётах предпочтительнее.

Рассмотрим теперь алгоритм статистического моделирования переноса частиц, в котором поглощение учитывается экспоненциальным весовым множителем (см., например, [8]). Предполагается, что  $\sigma(r) = \sigma_s(r) + \sigma_c(r)$ , где  $\sigma_s(r)$  - коэффициент рассеяния, а  $\sigma_c(r)$  - коэффициент поглощения. В предлагаемом алгоритме траектория  $L : r = r_L(t)$ ,  $t > 0$ , строится для  $\sigma_c \equiv 0$  (то есть при  $\sigma \equiv \sigma_s$ ) и вычисляется вспомогательный вес  $J(t; L) = e^{-\tau_c(t; L)}$ ,  $\tau_c(t; L) = \int_0^t \sigma_c(r_L(s)) ds$ . Учитывая вклад траектории с весом  $J(t; L)$ , получаем несмещённые оценки изучаемых функционалов [8]. Такие оценки могут быть сравнительно эффективными. Это видно из того, что в случае «дельта-рассеяния» при мононаправленном точечном источнике соответствующая оценка вероятности прохождения имеет нулевую дисперсию. Экспоненциальный учёт поглощения особенно полезен для оценки влияния малого изменения толщины слоя среды на вероятность прохождения. Для среды с кусочно-постоянным коэффициентом  $\sigma_c(r)$

справедливо равенство  $\tau_c(t;L) = \sum \sigma_{c,i} l_i$ , где  $l_i$  - длина участка траектории в подобласти с коэффициентом  $\sigma_{c,i}$ . Таким образом, возникает задача вычисления длин  $\{l_i\}$  при использовании «метода максимального сечения», для решения которой авторами был разработан специальный геометрический алгоритм.

Для оценки вероятностных моментов серии функционалов  $\{I_k(\sigma)\}$  от интенсивности излучения в стохастической среде можно использовать «метод двойной рандомизации» [8], в котором для каждой реализации поля  $\sigma$  строится лишь одна или несколько (соответственно порядку момента), условно независимых траекторий квантов. Следует отметить, что при возвращении траектории в уже пройденную ячейку мозаичного поля следует использовать уже реализованное значение  $\sigma$ , что усложняет алгоритм. Если же  $\sigma$  при этом выбирается заново, то возникает «ошибка перевыбора», которая растёт при ослаблении анизотропии и для реальных моделей облачности достигает 10%.

Полагая, что поле  $\sigma$  является мозаичным с заданным одномерным распределением, перейдём далее к оценке коэффициентов рассеяния  $\sigma_s$  и поглощения  $\sigma_c$  в требуемой осреднённой радиационной модели. В начале рассмотрим простейший вариант распределения значения  $\sigma: P(\sigma = 0) = p_0, P(\sigma = \sigma_s) = 1 - p_0$ , причём  $1/\sigma_s < d^{-1}$ , где  $d^{-1}$  - среднее расстояние между последовательными пересечениями границ ячеек пробегом частицы. Величина  $1/\sigma_s$  равна среднему значению свободного «пробега рассеяния» (т.е. расстояния между последовательными рассеяниями) в «непустой» ячейке при  $d^{-1} = +\infty$ ; в случае это соотношение будем использовать приближённо для построения требуемой оценки  $\sigma_s$ . Отсюда на основе повторного осреднения по ансамблю остатков свободных пробегов после их пересечений с границами ячеек получаем:

$$\sigma_s^{-1} = (1 - p_0)\sigma_s^{-1} + p_0(d^{-1} + \sigma_s^{-1}), \quad \sigma_s = \frac{1 - p_0}{(1 - p_0)\sigma_s^{-1} + p_0 d^{-1}}$$

при  $\sigma_s^{-1} < d^{-1}$ , то есть при  $\sigma_s > d$ . Такое осреднение целесообразно, так как указанные остатки распределены экспоненциально вследствие пуассоновости потока столкновений. Отметим, что для пуассоновского мозаичного поля  $d^{-1} = \rho = 1/(\pi\lambda_p)$ , а для поля Вороного это соотношение выполняется приближённо с достаточно большой точностью. Такое приближение можно использовать и для произвольного изотропного поля  $\sigma$  на основе его кусочно-постоянной аппроксимации. Заметим, что если  $\sigma_s^{-1} < d^{-1}$ , то целесообразно полагать  $\sigma_s = \sigma_s = (1 - p_0)\sigma_s$ . В работе дано также обобщение формулы (2.1 (h)) на случай, когда в непустой ячейке имеет место нормированное распределение значения  $\sigma$ .

Рассмотрим теперь вопрос об осреднении коэффициента поглощения, т.е. об оценке величины  $\sigma_c \equiv \sigma_c$ , которая совместно с  $\sigma_s$  воспроизводит достаточно точное значение  $P_0$ , хотя бы асимптотически, при толщине слоя среды  $H \rightarrow \infty$ .

Для пуассоновского поля  $\sigma$  построена аналитическая оценка величины  $\sigma_c$  в предположении, что реализуется « $\delta$  - рассеяние», которое не меняет направление пробега кванта. В этом предположении, последовательность  $\{t_i\}$  расстояний от начала траектории до пересечений с границами случайного пуассоновского разбиения является пуассоновским точечным потоком с интенсивностью  $d = \pi\lambda$  [5]. Представление  $EJ(t;L) = EE(J(t;L) | t_1)$  даёт для этой функции интегральное уравнение [6] типа «уравнения восстановления», для которого известно [9] асимптотическое (при  $H \rightarrow +\infty$ ) решение:  $EJ(t;L) = Ce^{-\alpha t}$ , причём  $\alpha = \sigma_c$ , определяется уравнением  $F(\alpha) = E[d - \alpha + \sigma_c(r(t_1))] = d^{-1}$ . Решение этого уравнения существует и единственно в интервале  $(0, \alpha_1)$ , где  $\alpha_1 = d + \min\sigma(r)$ , вследствие того, что  $F(0) \leq d^{-1}$ , а  $F(\alpha_1) = +\infty$ . Расчёты показали, что, по невыясненным пока причинам, оценка из «уравнения восстановления» несколько более точна, чем оценка  $E\sigma_c - \rho D\sigma_c$ , полученная в [6] на основе центральной предельной теоремы для случайного процесса  $\tau_c(t;L)$ . Для непуассоновского поля  $\sigma(r)$  величину  $d^{-1}$ , как и при оценке величины  $\sigma_s$  можно в первом приближении заменить на корреляционную длину  $\rho$ , а для неизотропного – на среднее по направлениям вектора  $r - r'$  штрих значение  $\bar{\rho}$ .

Авторами были проведены тестовые расчёты для мозаичных моделей разорванной облачности, физически аналогичных моделям из [10]. Полученные результаты подтверждают целесообразность сформулированных в настоящей работе рекомендаций, которые тем самым дают дальнейшее развитие исследований, представленных в [10].

*Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований РАН №43; грантов РФФИ №№ 13-01-00746, 15-01-00894А, 13-01-00441 и гранта НШ-5111.2014.1*

#### Литература:

1. Марчук Г. И. Михайлов Г. А. Назаралиев М. А. и др. Методы Монте-Карло в атмосферной оптике. Под общей ред. Марчука Г. И. Новосибирск: Наука, 1976.
2. Serra J. Image analysis and mathematical morphology, Academic press inc., London, 1982, 610 с.
3. Switzer P. A random set process in the plane with a Markovian property // Ann. Math. Statist. - 1965. - vol 36. - P. 1859-1863.
4. Gilbert E.N. (1962). Random subdivisions of space into crystals. Ann. Math. Statist. 33, 958-972..
5. A. Yu. Ambos and G.A. Mikhailov, Statistical modelling of the exponentially correlated multivariate random field, // Rus. J. Num. Anal. Math. Model. - 2011. -Vol. 26, № 3. - P. 213-232.

6. Михайлов Г.А. Пуассоновские модели случайных полей с приложениями в теории переноса. // ЖВМиМФ.- 2012.-Т 52, № 1. - С. 144 - 152.
7. Coleman W.A. *Mathematical Verification of a Certain Monte Carlo Sampling Technique and Applications of the Technique to Radiation Transport Problems* //Nucl. Sci. and Engng. - 1968. - Vol. 32, № 1. - P. 76-81.
8. Михайлов Г.А., *Оптимизация весовых методов Монте-Карло*. М.: `Наука`, 1987 [Engl.transl.: Springer-Verlag, 1992], 239 с.
9. Феллер В. *Введение в теорию вероятностей и ее приложения*, Т. 2.- М.: Мир, 1967, 498 с.
10. Зуев В.Е., Тутов Г.А. *Оптика атмосферы и климат*. Т.9. Томск: изд. Спектр ИОА СО РАН, 1996.

## Real-time data assimilation algorithm for atmospheric transport and transformation models

Penenko A.V., Penenko V.V.

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

An algorithm for chemical data assimilation for in situ concentration measurements has been presented. The algorithm is based on the weak-constrained variational approach and splitting scheme [1]. Emission rates or sources are considered as the control variable that is used to adjust model to measurement data. The design allows to avoid iterative direct and adjoint problems solution for transport and transformation model making it a “real-time” algorithm. Its performance has been evaluated on the real measurement data scenario.

*Work has been partially supported by RFBR Grants 14-01-31482 and 14-01-00125, Programs # 18 of RAS Presidium and II.4 of RAS.*

### References:

1. Penenko, A.V. and Penenko V.V. (2014), *Direct data assimilation method for convection-diffusion models based on splitting scheme*. Computational technologies, 19 Issue 4, 69 (In Russian).

## Алгоритмы реального времени для усвоения данных в моделях транспорта и трансформации атмосферных примесей

Пененко А.В., Пененко В.В.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия  
Новосибирский государственный университет, Россия  
E-mail: a.penenko@yandex.ru

В работе представлен алгоритм усвоения данных контактных измерений концентрации атмосферной химии моделью транспорта и трансформации примесей в атмосфере. Алгоритм основан на вариационном подходе со слабыми ограничениями и схеме расщепления, что позволяет избежать итераций решения прямой и сопряженной задач переноса и трансформации примесей, т.е. алгоритм является «алгоритмом реального времени». Эффективность работы алгоритма была проверена на реальных данных.

Алгоритмы усвоения данных позволяют улучшать прогноз состояния системы на основе совместного использования математических моделей и поступающих данных наблюдений. Обзор методов усвоения данных можно найти в [1,2]. Обобщая его, отметим, что в отличие от усвоения данных в метеорологии, при усвоении химических данных влияние начального состояния системы на её дальнейшее поведение со временем убывает, тогда как влияние источников и параметров модели трансформации оказывают существенное влияние. В нашей работе мы используем неопределенность в источниках примесей в качестве управляющей переменной для усвоения данных. Целью работы является создание алгоритма усвоения данных, способного работать в реальном времени, то есть без итераций, включающих решение прямых задач транспорта и трансформации примесей.

Рассмотрим прямоугольную пространственно-временную область:

$$\bar{x} = (x_1, x_2) \in \Omega = [0, l_1] \times [0, l_2], t \in [0, T], \Omega_T := \Omega \times [0, T] \in \mathcal{Y}^3,$$

ограниченную  $\partial\Omega_T = \partial\Omega \times [0, T]$ . В ней рассмотрим модель транспорта и трансформации системы химических веществ в атмосфере:

$$\frac{\partial\varphi_l}{\partial t} + \text{div}(\bar{u}\varphi_l - \mu \text{grad}\varphi_l) + P_l(\bar{\varphi})\varphi_l = \Pi_l(\bar{\varphi}) + \tilde{f}_l + r_l, (\bar{x}, t) \in \Omega_T. (1)$$

$$\mu_1 \cos(n_1, x_1) \frac{\partial\varphi_l}{\partial x_1} + \mu_2 \cos(n_2, x_2) \frac{\partial\varphi_l}{\partial x_2} + \beta\varphi_l = g, (\bar{x}, t) \in \partial\Omega_T, (2)$$

$$\varphi_l = \varphi_l^0, \bar{x} \in \Omega, t = 0, (3)$$

где  $\bar{\varphi} \in \mathcal{Y}^{Nc}$  – вектор-функция состояния, различные элементы которой  $\varphi_l, l = 1, \dots, Nc$  соответствуют рассматриваемым химическим веществам,  $Nc$  – количество рассматриваемых веществ  $P_l(\bar{\varphi}) > 0, l = 1, \dots, Nc$  – коэффициенты деструкции рассматриваемых веществ,  $\Pi_l(\bar{\varphi}) > 0, l = 1, \dots, Nc$  – операторы продукции,  $\bar{u} = (u_1(\bar{x}, t), u_2(\bar{x}, t))$  – вектор скоростей ветра,  $\bar{\mu} = (\mu_1(\bar{x}, t), \mu_2(\bar{x}, t))$  – диагональ диагонального тензора диффузии,  $\bar{n}$  направление внешней нормали на границе,  $\partial\Omega, \tilde{f}_l, g, \varphi_l^0$  – априорные значения источников и начальных данных  $r$  – управляющая функция (неопределенность), которая добавляется в жесткую структур модели для усвоения данных. Прямая задача состоит в том, чтобы определить  $\bar{\varphi}$  из (1)-(3) по известным  $\tilde{f}_l, g, \varphi_l^0, r$ . Введем оператор  $H$ , соединяющий функцию состояния модели с данными измерений. Предположим, что нам доступны результаты контактных измерений концентраций  $\{\Psi_m\}_m = 1, \dots, M$  в заданные моменты времени  $\{t_m\}_m = 1, \dots, M$  в точках  $\{\bar{x}_m\}_m = 1, \dots, M$  для заданных веществ  $\{l_m\}_m = 1, \dots, M$ . Измерения могут содержать погрешности  $\{\eta_m\}_m = 1, \dots, M$ :

$$\Psi_m = \varphi_{l_m}(\bar{x}_m, t_m) + \eta_m, m = 1, \dots, M. (4)$$

Ошибка измерений  $\eta_m$  предполагается ограниченной во (взвешенной) Эвклидовой норме в пространстве измерений  $\|\bar{\eta}\|_M \leq \delta_{\bar{\eta}}$ . Мы предполагаем, что все функции и модельные параметры достаточно гладкие, чтобы решения существовали и преобразования имели смысл. Задачу определения  $\bar{\varphi}$  для  $t > t^*$  по (1)-(3) и (4) при заданных функциях  $\tilde{f}_l, g, \varphi_l^0$  и результатах измерений  $\{\Psi_m\}_m = 1, \dots, M$  таких, что  $0 < t_m < t^*$  назовем задачей усвоения данных.

Для решения многомерных задач применяется метод расщепления. Мы будем использовать аддитивно усредненные схемы расщепления (аналогично [3]). Основная идея подхода состоит в том, чтобы усваивать данные локально на отдельных шагах расщепления. Вводя временную сетку  $\omega_t = \{0 < t_1 < \dots < t_j < \dots < t_{N_t} = T\}$ . На каждом временном интервале  $[t_{j-1}, t_j]$  приблизим общую модель конвекции-диффузии-реакции (1)-(3) схемой расщепления по физическим процессам и пространственным переменным, порожденной разбиением  $\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = 1, \gamma_k > 0$ .

Рассмотрим шаги расщепления, соответствующие одномерным по пространству моделям процессов транспорта

$$\gamma_k \frac{\partial\varphi_l^{(k)}}{\partial t} + \frac{\partial(u_k \varphi_l^{(k)})}{\partial x_k} - \frac{\partial}{\partial x_k} \mu_k \frac{\partial\varphi_l^{(k)}}{\partial x_k} = \gamma_k \tilde{f}_l + r_l^{(k)}, \varphi_l^{(k)}(\cdot, t_{j-1}) = \varphi_l(\cdot, t_{j-1}), (5)$$

при  $k = 1, 2$  с соответствующими краевыми условиями. Введем в пространственной области сетку с узлами  $\omega_x = \{(x_i, x_s) \mid i = 1, \dots, Nx_1, s = \dots, Nx_2\}$ . Будем считать, что точки измерений также взяты на сетке  $\omega_x \times \omega_t$ . Рассмотрим при  $k = 1$  и некотором заданном  $x_s$  аппроксимацию модели трехдиагональной неявной схемой:

$$-a_i \varphi_{i+1}^j + b_i \varphi_i^j = \varphi_{i-1}^{j-1} + f_i^j + \Delta t r_i^j, 1i = (6)$$

$$-a_i \varphi_{i+1}^j + b_i \varphi_i^j - c_i \varphi_{i-1}^j = \varphi_{i-1}^{j-1} + f_i^j + \Delta t r_i^j, i = 2, \dots, Nx_k - 1 (7)$$

$$-a_i \varphi_{i+1}^j + b_i \varphi_i^j = \varphi_{i-1}^{j-1} + f_i^j + \Delta t r_i^j, 1i = (8)$$

где  $\varphi_i^j = \varphi_l^{(k)}(x_i, x_s, t_j)$ ,  $f_i^j = \gamma_k \tilde{f}_l(x_i, x_s, t_j)$ ,  $r_i^j = \gamma_k r_l^{(k)}(x_i, x_s, t_j)$ . В качестве решения задачи усвоения данных рассмотрим минимум целевого функционала

$$\Phi(\varphi^j, r^j) = \sum_{i=1}^{Nx_k} (\varphi_i^j - \Psi_i^j) M_i^j + \alpha \sum_{i=1}^{Nx_k} r_i^j,$$

на ограничениях (6)-(8). Здесь  $\alpha$  – параметр усвоения,  $M_i^j = 1$ , если в узле с координатами  $(x_i, x_s, x_j)$  есть измерение вещества  $l$ , иначе  $M_i^j = 0$ . Аналогично,  $\Psi_i^j$  равно результату измерения, если в узле с координатами  $(x_i, x_s, x_j)$  есть измерение вещества  $l$ , иначе оно равно 0. Решение задачи оптимизации для  $k = 1, 2$  будет даваться трехдиагональным матричным уравнением [4,5], которое можно решить прямым методом матричной прогонки.

Аналогично решаются задачи на других этапах расщепления по пространству.

Модель процессов трансформации

$$\gamma_k \frac{\partial\varphi_l^{(k)}}{\partial t} + P_l(\bar{\varphi}^{(k)})\varphi_l^{(k)} = \Pi_l(\bar{\varphi}^{(k)}) + \gamma_k \tilde{f}_l + r_l^{(k)}, \varphi_l^{(k)}(\cdot, t_{j-1}) = \varphi_l(\cdot, t_{j-1}), k = 3$$



аппроксимируем схемой типа QSSR [6,7] для каждой  $\bar{x} \in \omega_x$

$$\begin{aligned} \varphi_l^{(k)}(\bar{x}, t_j) &= \varphi_l(\bar{x}, t_{j-1}) e^{-P_l(\bar{\varphi}(\bar{x}, t_{j-1})) \Delta t} + \\ &+ \frac{1 - e^{-P_l(\bar{\varphi}(\bar{x}, t_{j-1})) \Delta t}}{P_l(\bar{\varphi}(\bar{x}, t_{j-1}))} \left( \Pi_l(\bar{\varphi}(\bar{x}, t_{j-1})) + \gamma_k \tilde{f}_l + r_l^{(k)} \right) \Delta t. \end{aligned} \quad (9)$$

В этом случае на ограничениях (12) рассмотрим целевой функционал

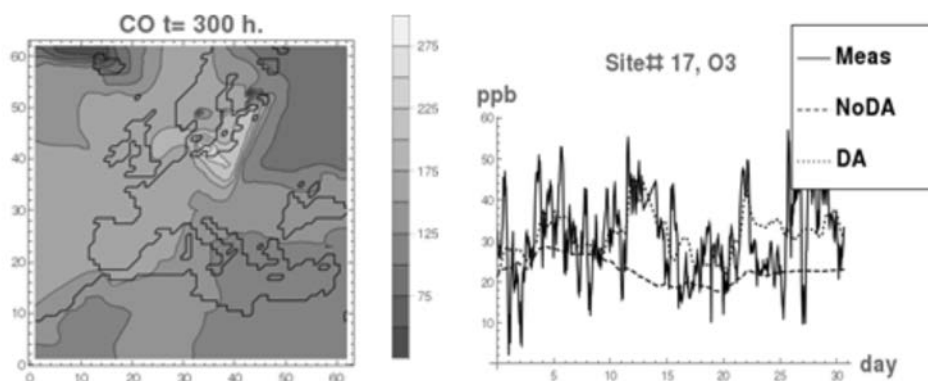
$$\Phi(\bar{\varphi}^{(k)}((x_i, x_s), t_j), \bar{r}^{(k)}) = \sum_{l=1}^{N_c} (\varphi_l^{(k)}((x_i, x_s), t_j) - \Psi_l) M_l + \alpha \sum_{l=1}^{N_c} r_l^{(k)}, \quad (10)$$

где  $M_l = 1$ , если в узле с координатами  $(x_i, x_s, x_j)$  есть измерение вещества  $l$ , иначе  $M_l = 0$ , аналогично,  $\Psi_l$  равно результату измерения, если в узле с координатами  $(x_i, x_s, x_j)$  есть измерение вещества, иначе оно равно 0. Обозначим его минимум  $\bar{\varphi}_l^{(3)}$ .

В качестве оценки решения задачи усвоения данных на шаге  $t_j$  рассмотрим усреднение

$$\varphi_l(\bar{x}, t_j) = \sum_{k=1}^3 \gamma_k \bar{\varphi}_l^{(k)}(\bar{x}, t_j) \quad (11)$$

На Рис.1 приведен пример решения задачи усвоения данных в реальных условиях. В данном примере используется модель, не учитывающая трансформацию химических веществ. В качестве метеопараметров используются результаты расчета по модели EnviroHIRLAM [8], в качестве начальных данных – результаты глобальной модели транспорта и трансформации MOZART\_IFS [9], в качестве данных измерений – данные сети Airbase [10] со станций в Скандинавии за июль 2010 (сценарий подготовлен совместно с А. Махурой и Р. Нутерманом из DMI).



**Рис. 1.** Слева приведен результат решения задачи усвоения данных для одного из рассматриваемых веществ в заданный момент времени. Шкала дана в ppb. Справа приведен результат сравнения результатов усвоения с данными измерений на одном из постов (сплошная линия - результаты измерений, штрихи – решение без усвоения, то есть решение прямой задачи, точки – результат усвоения).

Таким образом, можно заключить, что задачи усвоения данных решаются с неполными данными. Недостаток информации компенсируется математической моделью. Совмещая схему расщепления и задачу усвоения данных, можно построить вычислительно эффективный алгоритм для усвоения данных контактных измерений для моделей конвекции-диффузии-реакции, не требующий для своей реализации итераций.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 14-01-31482, 14-01-00125 и программы Президиума РАН №18 и П.4 РАН.

#### Литература:

1. Baklanov A. et. al. Online coupled regional meteorology chemistry models in europe: current status and prospects // *Atmos. Chem. Phys.* – 2014 – (14) – С.317–398.
2. andu and C. Tianfeng. Chemical data assimilation - an overview // *Atmosphere* – 2011– (2) – С. 426–463.
3. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 785 с.
4. V. V. Penenko Variational methods of data assimilation and inverse problems for studying the atmosphere, ocean, and environment // *Num. Anal. and Appl.* – 2009 – No 4 (2) – С. 341-351.
5. А.В. Пененко, В.В. Пененко Прямой метод вариационного усвоения данных для моделей конвекции-диффузии на основе схемы расщепления, // *Вычислительные технологии* – 2014 – №4(19) – С. 69-83.

6. *Quasi-steady-state-approximation in air pollution modelling: comparison of two numerical schemes for oxidant prediction*/ E. Hessvedt, O. Hov, I. Isaacsen // *Int. J. Chem. Kinet.* – 1978 – (10) – С. 971-994.
7. *V. V. Penenko and E. A. Tsvetova. Variational methods for construction of monotone approximations for atmospheric chemistry models* // *Num. Anal. Appl* –2013–6(3) – С. 210–220.
8. *Baklanov A., U. Korsholm, A. Mahura, C. Petersen, A. Gross, 2008: Enviro-HIRLAM: on-line coupled modelling of urban meteorology and air pollution. Adv. Sci. Res., 2, 41-46*
9. *Flemming, J., A., Inness, H., Flentje, V., Huijnen, P., Moinat, M. G., Schultz, and Stein, O.: Coupling global chemistry transport models to ECMWF's integrated forecast system, Geosci. Model Dev., 2, 253–265, doi:10.5194/gmd-2-253-2009, 2009.*
10. *AirBase - The European air quality database. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/air-base-the-european-air-quality-database-8>*

## The study of ground gas atmospheric composition by differential optical absorption in the UV region of spectrum

<sup>1</sup>Smirnov S.S., <sup>1,2</sup>Geiko P.P.

<sup>1</sup> Tomsk State University, Russia

<sup>2</sup> Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: SSSmirnov@sibmail.com , ppg@imces.ru

Absorption spectroscopy is one of well-established tools for the analysis of chemical composition of gases of the open atmosphere [Platt, 1994]. A typical DOAS instrument consists of a continuous light source, i.e. a Xe-arc lamp, and an optical setup to send and receive the light through the atmosphere. The typical length of the light path in the atmosphere ranges from several hundred meters to many kilometers.

The main aim of research is to analysis of the gas composition of the lower atmosphere by DOAS method.

For account of quantitative concentration of the desired gas were used of the basic equation of absorption spectroscopy, describing pure absorption of a single species in a homogeneous media, equation 1.

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp \left\{ -L \left( \sum_{j=1}^J \sigma_j(\lambda) C_j + \sigma_M(\lambda) C_M + \sigma_R(\lambda) C_R \right) \right\} \quad (1)$$

where  $I_0(\lambda)$  denotes the unattended reference intensities emitted from some suitable source of radiation.  $I(\lambda)$  is the measured intensity of the radiation after it has passed through a layer of thickness  $L$ ,  $C_j$  is the average concentration of species  $j$  at wavelength  $\lambda$ .  $\sigma_j(\lambda)$  - the absorption cross-section of molecule  $j$ , which can be taken from the literature or can be measured in advance in the laboratory,  $\sigma_M(\lambda)$ ,  $\sigma_R(\lambda)$  - the cross-section of Mie and Rayleigh scattering.

The opto-electronic system realizing the active method of differential optical absorption spectroscopy (DOAS) is considered. This system consists of a coaxial telescope, a spectrometer, an analyzer and retroreflector. The source of optical radiation is a Xe-lamp-arc of high pressure.

As a result of experiments time series of concentrations polluting the atmosphere gases such as  $\text{CS}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$ , etc were obtained. The minimally detected concentration on path length 400 m is the unit of ppb for the time of accumulation of 2 min. The results of the field test measurements of pollutants in Tomsk are presented.

Sources of error in the measurement of gas concentrations were analyzed. The main sources of error in the measurement include: non-ideality of the emission spectrum of the lamp (contains subtle structures in the spectrum); the sensitivity of individual pixels of photodiode array (different sensitivity); parasitic structures are formed during recording spectra (reference signal and the trace signal); the neglect of the influence of oxygen absorption; imprecision of determination of the absorption cross-section of gases.

The ways of improvement of the sensitivity of the trace gas analyzer were proposed.

# Restoration of the atmospheric instability parameters using MODIS and radiosonde data

<sup>1</sup>Gorbatenko V.P., <sup>1</sup>Nechepurenko O.E., <sup>2</sup>Belikova M.Yu., <sup>2</sup>Krechetova S.Yu.

<sup>1</sup> Tomsk State University, Russia

<sup>2</sup> Gorno-Altaysky State University, Russia

E-mail: [rector@tsu.ru](mailto:rector@tsu.ru), [office@gasu.ru](mailto:office@gasu.ru)

Web: [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru), [www.gasu.ru](http://www.gasu.ru)

The paper presents the results of the comparison instability indices of atmosphere, restored according to spectroradiometer MODIS, with radiosonde data for aerological station Petropavlovsk-Kamchatsky (Kamchatka Krai).

Using satellite data as a source of data on the spatial localization of convective cells can improve the forecast of dangerous convective phenomena such as hail, squall. For the successful identification it must be checked that the results of satellite measurements do not contradict the data of upper-air measurements of temperature and humidity parameters of the atmosphere.

The relevance of the work is the fact that the information about the comparison of the indices of instability of atmosphere LIFT, TOTL and KIND, restored according to MODIS, is not enough covered in the scientific literature.

The results of the validation of instability indices has shown that for the territory of Kamchatka most homogeneous and consensual are the data obtained at 12 UTC - 24 hours local time. The TOTL and KIND values (obtained by the MOD07) for 00 h UTC are overvalued and LIFT values are understated by comparison with similar indices obtained by radiosonde data.

The results should be considered when restoring the parameters of atmospheric instability in areas not covered by a network of upper-air stations.

*Work carried out in the framework of the Ministry of Education № 5.628.2014/K and with the support of the grant RFBR № 13-05-98024.*

## Восстановление параметров неустойчивости атмосферы по данным MODIS и радиозондирования

<sup>1</sup>Горбатенко В.П., <sup>2</sup>Кречетова С.Ю., <sup>2</sup>Беликова М.Ю., <sup>1</sup>Нечепуренко О.Е.

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (НИ ТГУ), Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «Горно-Алтайский государственный университет» (ГАГУ), Россия

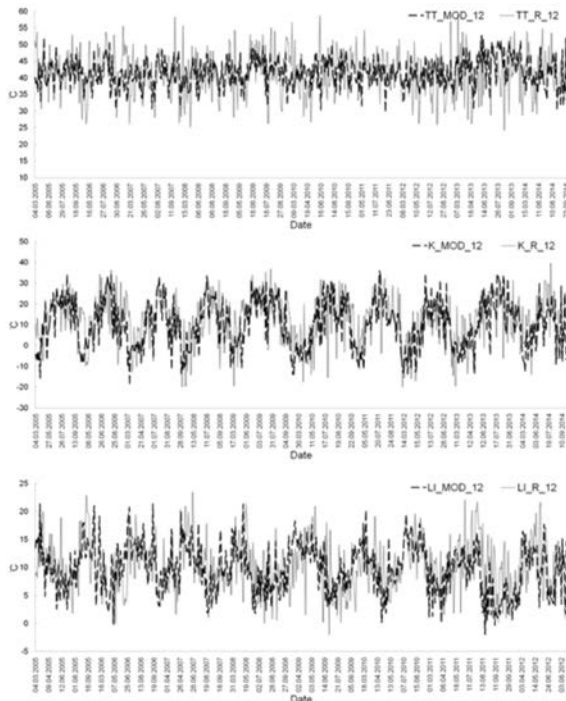
E-mail: [rector@tsu.ru](mailto:rector@tsu.ru), [office@gasu.ru](mailto:office@gasu.ru)

Web: [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru), [www.gasu.ru](http://www.gasu.ru)

В настоящее время широко развиваются и имеют практическое применение в задачах мониторинга гидрометеорологических процессов и явлений данные спутникового зондирования. Для этих целей были созданы космические платформы, оснащенные метеорологическими и геофизическими приборами, с помощью которых оценивают многие характеристики системы «атмосфера – подстилающая поверхность Земли», в частности, профили температуры и влажности, характеристики облачности и т.п. Такими являются, например, космические платформы Terra и Aqua, работающие в рамках космической программы EOS-NASA (США). На их борту установлен спектро радиометр MODIS, предоставляющий широкий спектр мультиспектральных, ежедневных наблюдений Земли, океана и особенностей атмосферы с пространственным разрешением от 250 м до 1000 м, что позволяет восстанавливать тематические продукты, включая характеристики конвекции и разрешением до 5000 м [2].

Использование спутниковых измерений в качестве источника данных о пространственной локализации конвективных ячеек обусловлено, в первую очередь, большой территорией Сибири и Дальнего Востока, где сеть метеорологических станций очень редка [6]. Заблаговременная идентификация пространственного положения и временной динамики мезомасштабных конвективных кластеров позволит уточнить прогноз опасных конвективных явлений, таких как град, шквал [5]. Для успешности идентификации необходимо убедиться в том, что результаты спутниковых измерений не противоречат данным аэрологических измерений температурно-влажностных параметров атмосферы. Валидация индексов неустойчивости атмосферы LIFT, TOTL и KIND [3,4], восстанавливаемых по данным MODIS, в научной литературе освещена недостаточно.

Целью данного исследования является определение степени соответствия значений индексов неустойчивости, восстанавливаемых по данным аэрологического радиозондирования и по данным спектро радиометра MODIS/Terra.



Материалом для исследования послужили данные регулярного зондирования атмосферы на аэрологической станции Петропавловск-Камчатский, расположенной на полуострове Камчатка, и данные продукта MOD07\_L2 [1]. Разница во времени проведения аэрологического зондирования и сканированием территории спектро радиометром MODIS не превышает одного часа. Для сравнения были сформированы пары рядов значений индексов неустойчивости атмосферы, а именно индексов LIFT, TOTL и KIND за теплый период (март-сентябрь) с 2005 по 2014 гг. (LIFT\_00 – 751, LIFT\_12 – 607, TOTL\_00 – 743, TOTL\_12 – 587, KIND\_00 – 704, KIND\_12 – 606 случаев).

На рисунках 1 приведены значения сравниваемых индексов неустойчивости атмосферы, полученные двумя методами для 12 часов ВСВ.

**Рис. 1.** Значения TOTL, KIND и LIFT, рассчитанных по данным аэрологического (К/ТТ/Л/Р\_12) и спутникового (К/ТТ/Л/МОД\_12) зондирования за 12 ч ВСВ

В таблице 1 приведены результаты статистического анализа аэрологического и спутникового зондирования на основе расчетов критерия Фишера и t-критерия Стьюдента для зависимых выборок.

**Таблица 1.** Статистические характеристики и эмпирические значения статистических критериев индексов неустойчивости атмосферы, рассчитанные по данным радиозондов (R) и MOD07\_L2 (MOD)

Статистические характеристики		Среднее	Критерий Стьюдента	СКО	Критерий Фишера
LIFT	MOD_0	7,2	-13,9 (p<0,01)	5,0	0,5 (p<0,01)
	R_0	10,6		4,5	
	MOD_12	9,8	-1,9 (p>0,05)	4,4	1,2 (p>0,05)
	R_12	10,3		4,7	
KIND	MOD_0	13,0	7,8 (p<0,01)	1,3	1,1 (p>0,05)
	R_0	7,7		2,1	
	MOD_12	10,5	-2,9 (p<0,05)	1,7	1,0 (p>0,05)
	R_12	12,5		2,1	
TOTL	MOD_0	44,7	21,1 (p<0,01)	4,5	2,2 (p<0,01)
	R_0	38,5		6,7	
	MOD_12	41,5	0,08 (p>0,05)	4,2	2,4 (p>0,05)
	R_12	41,5		6,5	

Результаты валидации индексов неустойчивости показали, что для территории Камчатки наиболее согласованными и однородными являются данные, полученные в 12 часов ВСВ – в 24 часа по местному времени. Значения индексов TOTL и KIND, полученные по MOD07 за 00 ч ВСВ являются завышенными, а LIFT – заниженными, по сравнению с аналогичными индексами, получаемыми по данным радиозондирования. Причиной такого расхождения может служить то обстоятельство, что на результат анализа влияет ошибка восстановления значения спектро радиометра MODIS при наличии облачности [1]. Над исследуемой территорией количество облачности больше в 00 ч ВСВ, по сравнению с другим сроком наблюдения.

Данные продукта MOD07\_L2 перспективны для разработки новых методов диагноза и прогноза пространственного расположения конвективных ячеек, способных продуцировать такие опасные конвективные явления, как гроза и град. Комплексное использование данных аэрологического зондирования и MOD07\_L2 повысят точность прогноза пространственного положения опасных конвективных явлений.

Полученные результаты следует учитывать при восстановлении параметров неустойчивости атмосферы на территориях, не покрытых сетью аэрологических станций.

Работа выполнена в рамках проекта Минобрнауки № 5.628.2014/К и при поддержке гранта РФФИ № 13-05-98024.

#### Литература:

1. Suzanne W. Seemann, Eva e. Borbas, Jun Li, W. Paul Menzel, Liam E. Gumle MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD07\\_L2/atbd.html](http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD07_L2/atbd.html), свободный (дата обращения: 10.04.2015).
2. Афонин С.В. К вопросу о применимости восстановленных из космоса метеоданных MODIS для атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений / С.В. Афонин // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – № 8. – С. 684–690.
3. Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Золотухина О.И., Тунаев Е.Л. Термодинамические условия формирования мезомасштабной конвекции в атмосфере Западной Сибири // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 11/3. – С. 148–156.
4. Горбатенко В.П., Константинова Д.А. Конвекция в атмосфере над юго-востоком Западной Сибири // Оптика атмосферы океана, 2009. – Т.22 – № 1. – С. 17–21
5. Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Разумова О.В. Идентификация мезомасштабной конвекции и гроз по данным MODIS и аэрологического зондирования // Вестн. Том. гос. ун-та. – 2012. – № 365. – С. 169–174.
6. Щукин Г.Г., Степаненко В.Д. Состояние и перспектива радиометеорологических исследований атмосферы / Вопросы радиометеорологии: сб. статей, СПб.: ВКА имени А.Ф.Можаевского, ООО «Издательство «Балтийская печать». – 2013. – С. 7–26.

## Estimate of the ratio of the ozone formation rate in the atmospheric boundary layer

Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Belan B.D.

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: [bbd@iao.ru](mailto:bbd@iao.ru)

In this paper estimates of the ratio of the ozone formation rate in the atmospheric boundary layer to its income from the free troposphere are presented. Estimates are based on the data derived from in situ airborne measurements carried out over the background region of West Siberia. As a result, it was found that the rate of ozone inflow into the atmospheric boundary layer (ABL) from upper layers is of about 20% of its formation rate within the boundary layer. Vertical profiles of ozone fluxes in the ABL have been calculated by means of k-theory methods using the model proposed by Troen and Mahrt. Results of calculations showed that the noon-time ozone maximum in the ABL is determined by the photochemical production from ozone precursors.

## Оценка скорости образования озона в пограничном слое атмосферы

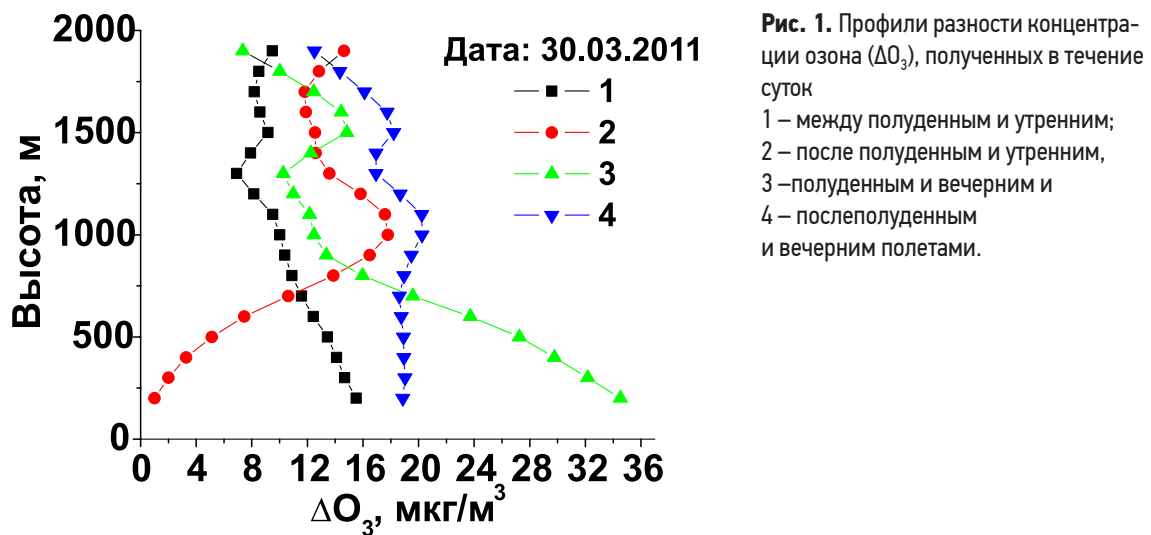
Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Белан Б.Д.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: [bbd@iao.ru](mailto:bbd@iao.ru)

Исследование тропосферного озона в настоящее время представляет значительный интерес с точки зрения его влияния, не только на климат, но и на биосферу в целом. Поскольку озон является четвертым по значимости парниковым газом в атмосфере, задача оценки баланса его источников и стоков является весьма актуальной. В настоящее время нет однозначных выводов о соотношении источников озона в пограничном слое, в частности является ли его доминирующим источником фотохимическая генерация непосредственно в самом пограничном слое или же основной вклад вносит перенос озона из вышележащих слоев атмосферы. Основной причиной существующей неопре-

деленности в этом вопросе, является недостаток экспериментальных данных, отражающих вертикальное распределение озона в пограничном слое с достаточно высоким разрешением.

Основной задачей наших исследований было установление причин появления суточного хода вертикального распределения озона в пограничном слое атмосферы, обнаруженного в результате проведенных самолетных измерений [1,2]. С этой целью были рассчитаны разности профилей концентрации, полученных в ходе суточного цикла измерений. Полученные разности представлены на рисунке 1. Видно, что в период с утра до полудня концентрация озона возрастает во всем пограничном слое. Наибольшее увеличение (почти в два раза) зафиксировано в приземном слое, что свидетельствует в пользу поступления сюда озonoобразующих соединений с подстилающей поверхности и последующей фотохимической генерации озона. В послеполуденное время максимум скорости генерации озона наблюдался уже у верхней границы пограничного слоя, куда при помощи турбулентного обмена также начали поступать газы-предшественники. В свою очередь разность профилей, полученных между послеполуденными и вечерними вылетами, показывает, что в дальнейшем за счет турбулентного обмена концентрация озона выравнивается во всей толще пограничного слоя. Разница между полуденным и вечерним профилями максимальна в нижних слоях, что явно указывает на преобладающий здесь в это время механизм стока озона на подстилающую поверхность. Второй важный вывод касается переноса из вышележащих слоев. Приведенные разности профилей не показали значимой суточной динамики в слое выше пограничного, что вероятно свидетельствует в пользу того, что перенос озона из вышележащих слоев не оказывает значимого влияния на его суточный ход в пограничном слое.



**Рис. 1.** Профили разности концентрации озона ( $\Delta O_3$ ), полученных в течение суток  
1 – между полуденным и утренним;  
2 – после полуденным и утренним,  
3 – полуденным и вечерним и  
4 – послеполуденным и вечерним полетами.

Далее на основе профилей, полученных в ходе всех самолетных измерений, направленных на исследование суточного хода, были оценены величины скорости поступления озона из вышележащих слоев атмосферы и его генерации в пограничном слое по следующей методике. Сначала, рассчитывалась разность между профилями озона, полученными во время дневного и утреннего вылетов, разность делилась на время между вылетами, полученная скорость, показала величину фотохимической генерации озона. Та же процедура проделана с дневным и вечерним профилями, полученная на этом этапе скорость отразила величину стока озона. Для получения величины скорости генерации в течение дня, полученные профили складывались. Затем проводилась процедура интегрирования отдельно для пограничного слоя и свободной тропосферы, полученные величины делились на значение толщины слоя интегрирования, для получения значений в столбе толщиной 1 м. Скорости генерации озона, полученные по самолетным данным сравнивались со скоростями, рассчитанными по данным TOR-станции для дней проведения полетов, расчет проводился аналогично методу, описанному выше, за исключением процедуры интегрирования и нормировки на толщину слоя. Результаты расчетов обобщены в таблице 1.

На основе приведенных данных можно сделать вывод, что скорость поступления озона из вышележащих слоев в 3–10 раз ниже скорости генерации озона в пограничном слое. Средняя скорость поступления озона из свободной атмосферы составляет  $1 \text{ мкг/м}^3/\text{ч}$ , а скорость генерации в пограничном слое порядка  $5 \text{ мкг/м}^3/\text{ч}$ . Таким образом, в результате мы получили весомые аргументы в пользу того, что основная часть озона в пограничном слое образуется посредством фотохимических реакций из газов-предшественников и только 20% его содержания связано с поступлением из свободной атмосферы. Рассчитанные скорости генерации озона по самолетным данным в пограничном слое атмосферы хорошо согласуются со скоростями, рассчитанными по данным TOR-станции, для приземного слоя воздуха. В пограничном слое интенсивность фотохимического образования озона может быть больше, чем в приземном. Этот вывод хорошо согласуется результатами работы [3,4] указывающими, что максимум генерации озона зависит от высоты поступления газов-предшественников.

Таблица 1. Скорости образования озона

Дата	30.03.2011	30.06.2011	16.09.2011	14.12.2011	29.03.2012	24.08.2012	03.02.2013	03.04.2013	08.08.2013	20.10.2013
Средняя скорость генерации в пограничном слое (мкг/м <sup>3</sup> /ч)	5.1	3.5	6.4	5.5	5.4	2.8	4.2	3.3	9.9	4.7
Средняя скорость генерации в приземном слое по данным TOR-станции (мкг/м <sup>3</sup> /ч)	2.2	6.0	6.8	1.1	4.5	4.4	4.1	5.6	5.5	3.9
Средняя скорость поступления из свободной тропосферы (мкг/м <sup>3</sup> /ч)	2.1	0.5	1.6	0.7	1.5	0.6	0.9	0.7	0.9	1.6
Разница между скоростью образования озона в пограничном слое и поступления из свободной тропосферы (мкг/м <sup>3</sup> /ч)	2.9	3	4.8	4.8	3.9	2.2	3.3	2.6	9	3.1
Отношение скорости поступления озона из свободной тропосферы к скорости образования в пограничном слое (%)	41	14	25	12	27	20	20	21	10	34

Приведенные разности вертикальных профилей озона показали, что высота максимума скорости генерации озона имеет внутрисуточную динамику, для определения которой необходимо провести расчет вертикальных потоков озона, позволяющих оценить не только изменения самой высоты, но и скорости генерации озона. С этой целью в работе на основе данных, накопленных в течение всех циклов суточного самолетного зондирования были рассчитаны вертикальные профили потоков озона. Расчеты проведены с применением теории подобия Обухова-Монина и параметризации вертикального профиля коэффициента турбулентной диффузии, которую предложили I. Troen and L. Mahrt [5]. Результаты вычислений приведены на рисунке 2.

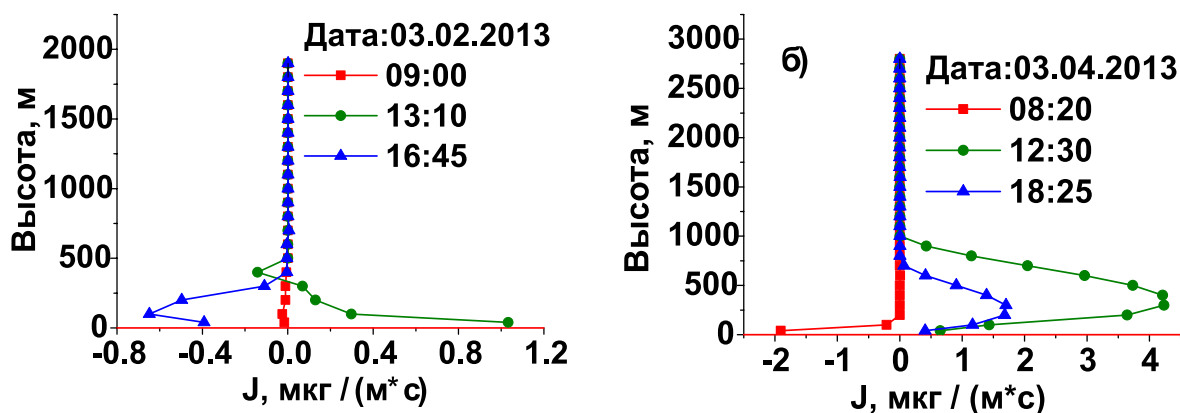


Рис. 2. Вертикальное распределение потоков озона (J) полученные в 03.02.2013 г. (а) и 03.04.2013 г. (б) Положительная величина потоков указывает, что поток направлен вверх.

Вертикальные профили потоков озона показали, что максимальная величина потока в пограничном слое расположена на высоте 200-600 м. Что подтверждает полученный выше вывод о том, что за формирование суточного максимума озона отвечают фотохимические процессы, протекающие внутри пограничного слоя. Высота максимума потока зависит от периода года, зимой она ниже порядка 200-300 м, максимум достигается летом 500-600 м (рисунок не приведен). Величина максимума потока озона так же зависит от сезона года и меняется от 1 в зимний период до 4.2 мкг/м<sup>3</sup> м<sup>2</sup>/с в весенний период.

В работе на основании данных самолетного зондирования показано, что основным источником озона в пограничном слое атмосферы является его фотохимическая генерация из газов предшественников. А перенос из свободной тропосферы составляет в среднем 20% от фотохимической генерации озона.

Работа выполнена при поддержке госконтракта Минобрнауки No14.613.21.0013, идентификационный номер RFMEFI61314X0013.

#### Литература:

1. Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Краснов О.А., Пестунов Д.А., Праслова О.В., Фофанов А.В. и др. Применение самолета Ан-2 для исследования состава воздуха в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 8. С. 714-720.

2. Антохин П.Н., Аришинова В.Г., Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Краснов О.А., Праслова О.В., Рассказчикова Т.М. и др. Суточная динамика вертикального распределения озона в пограничном слое атмосферы в районе Томска // *Оптика атмосферы и океана*. 2013. Т. 26. № 08. С. 665-672.
3. Bloomer B.J., Vinnikov K.Y., Dickerson R.R. Changes in seasonal and diurnal cycles of ozone and temperature in the eastern U.S. // *Atmos. Environ.* 2010. Vol. 44. No. 21-22. P. 2543-2551.
4. Henne S., Klausen J., Junkermann W., Kariuk J. M., Aseyo J. O., Buchmann B. Representativeness and climatology of carbon monoxide and ozone at the global GAW station Mt. Kenya in equatorial Africa // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. Vol. 8. No. 12. P. 3119-3139.
5. Troen I., Mahrt L. A simple model of the atmospheric boundary layer; sensitivity to surface evaporation // *Boundary-Layer Meteorol.* 1986. Vol. 37. P. 129-148.

## Effects of short-time variations of cosmic rays in pressure field of lower atmosphere using Multifield Comparison Measure Method

<sup>1</sup>Artamonova I.V., <sup>2</sup>Volobuev D.M., <sup>2</sup>Makarenko N.G.

<sup>1</sup>Voeikov Main Geophysical Observatory, St.-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Main Astronomical Observatory RAS, St.-Petersburg, Russia

E-mail: artirin@yandex.ru, dmitry.volobuev@mail.ru, ng-makar@mail.ru

Web: [www.voeikovmgo.ru](http://www.voeikovmgo.ru), [www.gao.spb.ru](http://www.gao.spb.ru)

Pressure variation in lower atmosphere which take place after intensive solar proton events and Forbush-decreases of galactic cosmic rays (GCRs) are analyzed for the period 1980-2006. There were plotted groups of charts (multifields) for 48 solar proton events with energies of particles  $E_p > 90$  MeV and for 48 Forbush-decreases of GCRs with amplitudes  $dN/N > 2.5\%$ . These multifields revealed a growth of matrix norm over North Atlantic region and North of European part of Russia during days following the bursts of solar protons and Forbush-decreases of GCRs, respectively. These results confirm hypothesis about relation of regional cyclogenesis processes with short-term variations of solar and galactic cosmic rays.

## Исследование эффектов короткопериодных вариаций космических лучей в поле давления нижней атмосферы методом мультиградиентной меры

<sup>1</sup>Артамонова И.В., <sup>2</sup>Волобуев Д.М., <sup>2</sup>Макаренко Н.Г.

<sup>1</sup>Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Главная астрономическая обсерватория РАН, Пулково, Россия

E-mail: artirin@yandex.ru, dmitry.volobuev@mail.ru, ng-makar@mail.ru

Web: [www.voeikovmgo.ru](http://www.voeikovmgo.ru), [www.gao.spb.ru](http://www.gao.spb.ru)

Проведено исследование вариаций атмосферного давления в нижней тропосфере, наблюдаемых в связи с солнечными протонными событиями и форбуш-понижениями галактических космических лучей (ГКЛ), отобранными за период 1980-2006 гг. Построены выборки карт (мульти-поля) для 48 солнечных протонных событий с энергиями высыпавшихся частиц  $E_p > 90$  МэВ и для 48 форбуш-понижений ГКЛ с амплитудой  $dN/N > 2.5\%$ . Полученные мульти-поля обнаруживают рост матричной нормы над североатлантическим регионом и севером европейской части России в дни, последующие за всплесками солнечных протонов и форбуш-понижениями ГКЛ, соответственно. Эти результаты согласуются с гипотезой о взаимной связи процессов регионального циклогенеза с короткопериодными вариациями космических лучей.

Исследование влияния солнечной активности на вариации параметров нижней атмосферы является актуальной задачей солнечно-земной физики. В качестве одного из наиболее вероятных связующих

<sup>1</sup> Мы используем мульти-поля, как аналог multifield, чтобы избежать недоразумений с русским «мультипольным» разложением.



звеньев между процессами на Солнце и состоянием нижней атмосферы Земли в настоящее время рассматриваются вариации потоков космических лучей солнечного (СКЛ) и галактического (ГКЛ) происхождения с энергиями от  $\sim 100$  МэВ до нескольких ГэВ. Энергии такой величины достаточно, чтобы космические лучи могли проникнуть в атмосферу Земли до высоты тропосферы/нижней стратосферы. При этом интенсивность потоков космических лучей с указанными энергиями в значительной степени модулируется солнечной активностью (см. напр., [1]).

В ряде работ уже указывалось на возможную связь космических лучей с динамическими режимами нижней атмосферы. Так, Веретененко и Тайлом [2, 3, 4], а также Артамоновой и Веретененко [5, 6, 7] было показано, что кратковременные вариации потоков космических лучей во время солнечных протонных событий и форбуш-понижений ГКЛ могут оказывать влияние на эволюцию внетропических барических систем: циклонов и антициклонов, соответственно. Физический механизм на настоящий момент является предметом дискуссии, наиболее вероятной гипотезой с точки зрения авторов является вариант, предложенный группой Тинсли (см. напр., [8]).

Полученные в этих работах выводы были сделаны на основании анализа данных о вариациях высоты основных изобарических поверхностей тропосферы в ходе короткопериодных возмущений интенсивности солнечных и галактических космических лучей. Исследование было проведено методом наложения эпох. Известно, что этот метод является корректным для анализа вариаций одномерных величин. Его применение к многомерным данным требует использования множеств Парето [9]. Это связано с тем, что аномалии двумерного поля одного знака могут иметь различную локализацию и при усреднении (наложении полей) будет получена «размытая» картина. Поэтому идентификация максимумов может быть сделана лишь с точностью до некоторого интервала оптимальности.

В данной работе анализ вариаций атмосферного давления, наблюдаемых в связи с солнечными протонными событиями и форбуш-понижениями ГКЛ, проведён методом мультиградиентной меры сравнения (Multifield Comparison Measure, MCM [10-12]). В отличие от метода наложения эпох, MCM позволяет получить корректные оценки связи набора «карт» или мульти-полей.

## ВВЕДЕНИЕ В МСМ

Метод мультиградиентной меры сравнения мульти-полей основан на анализе величины матричной нормы, полученной по градиентам всех анализируемых полей в конкретной точке пространства. Эвристически идея заключается в том, что два  $C^1$  скалярных поля  $f_1, f_2$  считаются взаимно связанными, если их градиенты «параллельны»:  $\nabla f_1 + \lambda \nabla f_2 = 0$ . Это условие можно проверить, вычисляя скалярные либо векторные произведения градиентов для каждого пикселя некоторой компактной области [12]. Однако, удобнее использовать матрицу градиентов, строки которой соответствуют каждому из полей [10].

Следуя работе [10] введём понятие *матричной нормы*. Пусть  $A$  является вещественнозначной матрицей  $n \times m$ . Норма матрицы  $A$  определяется выражением:

$$\|A\| = \max_{\|x\|=1, x \in \mathbb{R}^n} \|Ax\| \quad (1)$$

где  $\|x\|$  - Евклидова норма вектора  $x \in \mathbb{R}^n$ .

Пусть мульти-поле  $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_m\}$  является кортежем из  $m$  двумерных скалярных  $C^1$  полей  $f_i$ . Тогда дифференциал  $F$  в некоторой точке  $p$  с координатами  $(x, y)$  записывается как матрица частных производных:

$$dF(p) = \begin{bmatrix} \frac{df_1}{dx}(p) & \frac{df_1}{dy}(p) \\ \vdots & \vdots \\ \frac{df_m}{dx}(p) & \frac{df_m}{dy}(p) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Согласно [10-12] *мультиградиентная мера сравнения* в  $\eta_p^F$  точке  $p$  определяется как норма (1) матрицы  $dF(p)$ , т.е.  $\eta_p^F = \|dF(p)\|$ . Раскрыв значение матричной нормы через её определение, получим:

$$\eta_p^F = \left( \max_{x \in \mathbb{R}^n, \|x\|=1} x^T (dF(p))^T (dF(p)) x \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

где верхний индекс  $T$  означает транспонирование.

Воспользуемся спектральной теоремой линейной алгебры и в указанном выражении заменим матричное произведение  $((dF(p))^T (dF(p)))$  произведением  $U^T \Lambda U$ , где  $U$  - ортогональная матрица, столбцы которой состоят из собственных векторов матрицы  $((dF(p))^T (dF(p)))$  и  $\Lambda$  - диагональная матрица, элементы которой являются собственными числами этой матрицы. В результате из (3) получим:

$$\eta_p^F = \left( \max_{x \in \mathbb{R}^n, \|x\|=1} x^T U^T \Lambda U x \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Поскольку  $U$  ортогональная матрица, т.е.  $U^T U = I$ , а  $x$  произвольный единичный вектор, выражение (4) можно переписать как:

$$\eta_p^F = \left( \max_{x \in \mathbb{R}^n, \|x\|=1} x^T \Lambda x \right)^{\frac{1}{2}} = \max \{\sqrt{\lambda}\}, \quad (5)$$

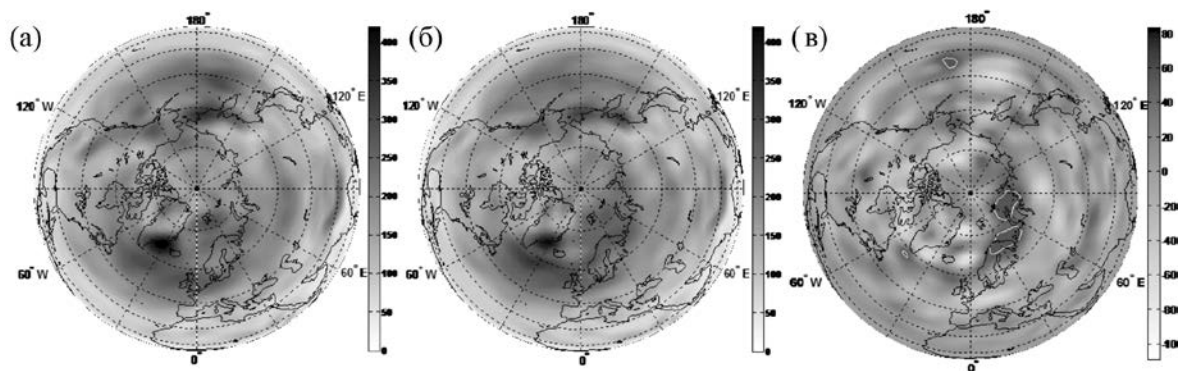
где  $\lambda$  - диагональные элементы матрицы  $A$ , т.е. собственные числа матрицы  $((dF(p))^T (dF(p)))$ .

Таким образом, для того, чтобы сравнить несколько двумерных полей методом МСМ [см. 10-12], необходимо, во-первых, составить матрицу  $F$  с переменными - анализируемыми полями, во-вторых, рассчитать матрицу частных производных  $dF(p)$  по координатам  $x$  и  $y$  в узлах сетки для каждого поля из набора сравниваемых полей и, в-третьих, найти максимум нормы полученной матрицы. Рассчитанная по данному алгоритму величина матричной нормы не зависит от выбора координат, симметрична и устойчива относительно малых возмущений. Ниже приводятся результаты, полученные методом мультиградиентной меры, полученные в среде MatLab.

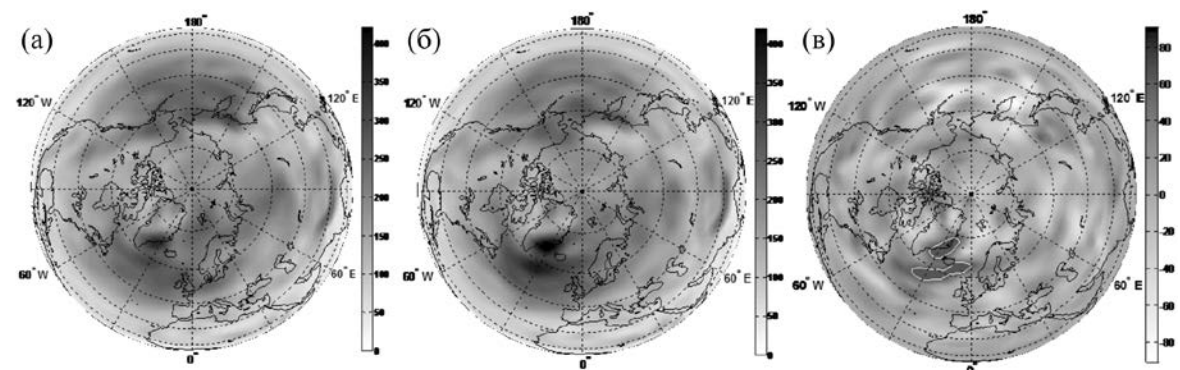
## АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В работе проанализированы вариации атмосферного давления в северном полушарии по данным реанализа NCEP/NCAR для изобарического уровня 1000 гПа, наблюдавшиеся в связи с форбуш-понижениями галактических космических лучей (ФПКЛ) и солнечными протонными событиями (СПС). Для проведения исследования было отобрано 48 форбуш-понижений ГКЛ с амплитудой  $\delta N/N > 2.5\%$  за октябрь-март 1980-2006 гг. на основании данных о скорости счёта нейтронного монитора ст. Апатиты (геомагнитная широта  $63^\circ N$ ). Список из 48 солнечных протонных событий с энергиями частиц  $E_p > 90$  МэВ, произошедших в октябре-марте 1980-1995 гг., взят из работы [3].

Для данных форбуш-понижений и солнечных протонных событий были рассчитаны максимумы нормы матриц градиентов всех 48 анализируемых полей давления в узлах сетки  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ . Даты начала СПС и ФПКЛ при этом принимались за нулевой день. Результаты расчётов представлены на рис. 1 и рис. 2. Построены карты максимумов матричной нормы для невозмущённого уровня – на 9-й день до начала событий (а), в дни максимальных отклонений давления, наблюдаемых в ходе солнечных протонных событий и форбуш-понижений ГКЛ – 1-й и 4-й день после начала соответствующих событий (б), карты разницы матричных норм для возмущённых и невозмущённых условий (в).



**Рис. 1.** Максимум матричной нормы поля атмосферного давления на уровне 1000 гПа в ходе 48 форбуш-понижений ГКЛ: (а) – невозмущенный уровень, (б) – 4-й день после начала ФПКЛ, (в) – разница между (б) и (а), белыми контурами обозначены области, где отклонения от невозмущённого уровня превышают  $3\sigma$ .



**Рис. 2.** Максимум матричной нормы поля атмосферного давления на уровне 1000 гПа после 48 солнечных протонных событий: (а) – невозмущенный уровень, (б) – 1-й день после начала СПС, (в) – разница между (б) и (а), белыми контурами обозначены области, где отклонения от невозмущённого уровня превышают  $3\sigma$ .

Как можно увидеть из рисунков 1 (в) и 2 (в), в случае форбуш-понижений ГКЛ построенные мультиполя обнаруживают рост матричной нормы над Северной Атлантикой, Скандинавией, севером европейской части России и западной Сибири, а также частично над Северным Ледовитым океаном. В случае солнечных протонных событий область роста матричной нормы охватывает только североатланти-

ческий регион. Данные результаты согласуются с выводами, полученными ранее в работах [2-7], в которых было обнаружено усиление циклогенеза в Северной Атлантике после интенсивных солнечных протонных событий и формирование блокирующих антициклонов над Скандинавией, северной Европой и севером европейской части России в ходе форбуш-понижений ГКЛ.

Таким образом, результаты анализа вариаций поля атмосферного давления методом мультиполевой меры сравнения подтверждают более ранние расчёты, выполненные методом наложения эпох. Совпадение результатов может объясняться особенностями структуры термобарического поля нижней атмосферы северного полушария, обусловленными орографией (наличием центра действия атмосферы в Северной Атлантике - Гренландского минимума), а также тем, что короткопериодные вариации интенсивности потоков космических лучей способствуют интенсификации естественных процессов циклогенеза, характерных для того или иного региона.

## ВЫВОДЫ

В данной работе показана связь между короткопериодными вариациями солнечных и галактических космических лучей и давлением в нижней тропосфере на изобарическом уровне 1000 гПа. Сравнение с расчётами, полученными методом наложения эпох, показало, что результаты исследования методом мультиградиентной меры сравнения согласуются с выводами, полученными ранее в работах [2-7] и подтверждают гипотезу о взаимной связи процессов регионального циклогенеза с короткопериодными вариациями космических лучей.

### Литература:

1. Bazilevskaya G.A. Solar cosmic rays in the near Earth space and the atmosphere// *Adv. Space Res.* 2005. V. 35. P. 458.
2. Veretenenko, S.V., P. Thejll Effects of energetic solar proton events on the cyclone development in the North Atlantic // *J. Atmos. Sol.–Terr. Phys.* 2004. V. 66. P. 393–405.
3. Veretenenko, S.V., P. Thejll Cyclone regeneration in the North Atlantic intensified by energetic solar proton events // *Adv. Space Res.* 2005. V. 35. N 3. P. 470–475.
4. Веретененко С.В., П. Тайл Солнечные протонные события и эволюция циклонов в Северной Атлантике // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2008. Т. 48. N 4. С. 542-552.
5. Artamonova I.V., S.V. Veretenenko Galactic cosmic ray variation influence on baric system dynamics at middle latitudes // *J. Atmos. Sol.–Terr. Phys.* 2011. V. 73. N 2-3. P. 366-370.
6. Artamonova I.V., S.V. Veretenenko Atmospheric pressure variations at extratropical latitudes associated with Forbush decreases of galactic cosmic rays // *Adv. Space Res.* 2014. V. 454. N 12. P. 291-2498.
7. Артамонова И.В., С.В. Веретененко Влияние форбуш-понижений галактических космических лучей на развитие антициклонической активности в умеренных широтах // *Известия РАН. Серия физическая.* 2015. Т. 79. N 5. С. 747-749.
8. Tinsley B.A. Influence of solar wind on the global electric current, and inferred effects on cloud microphysics, temperature and dynamics in the troposphere // *Space Sci. Rev.* 2000. V. 94. P. 231-258.
9. Huettnerberger L., Heine C., et al. Towards multifield scalar topology based on Pareto optimality// *Computer Graphics Forum*, 2013. V.32 (3). P.341-350
10. Nagaraj S., Natarajan V., Nanjundiah R. S. A Gradient-Based Comparison Measure for Visual analysis of Multifield Data // *Computer Graphics Forum. Blackwell Publishing Ltd*, 2011. T. 30. №. 3. С. 1101-1110.
11. Zhang E., Natarajan V. Scientific visualization. Derived fields // *Springer.* 2014. P. 139-150.
12. Edelsbrunner H., Harer J., Natarajan V., Pascucci V.: Local and global comparison of continuous functions.// *Proc. IEEE Conf. Visualization (2004)*, pp. 275–280.

## Discrete analytical schemes for modeling of aerosols binary coagulation with integro-differential Smolukhovsky equation

<sup>1</sup>Sorokovoy A.A., <sup>2</sup>Penenko A.V.

<sup>1</sup> Novosibirsk State University, Russia

<sup>2</sup> Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: a.penenko@yandex.ru, AASorokovoy@mail.ru

In the work we study a method of modeling aerosol dynamics with respect to particle diameter. As the model we have considered Smoluchowski coagulation equation.

$$\frac{\partial n(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \int_0^x K(x-y, y) n(x-y, t) n(y, t) dy - \int_0^\infty K(x, y) n(x, t) n(y, t) dy$$

In order to solve this equation we have used the method of discrete analytic schemes [1] that allow to obtain positive physically-plausible solutions. Main goal of this work is to validate approach of discrete analytic schemes for solving integro-differential equations, particularly, Smoluchowski equation of coagulation.

Numerical solution obtained by discrete analytic schemes method has been compared to the known exact solutions, and with the results of other known methods of numerical solution of the Smoluchowski equation. The following results have been obtained:

1. Discrete analytic methods (QSSA, exponential Runge-Kutta) having for an ordinary differential equation the fourth order of convergence on the Smoluchowski equation gives the first order of convergence.
2. Experimental stability threshold discrete analytic methods proved to be several orders of magnitude higher than that of the classical methods of Euler and Runge-Kutta method.
3. For a modification of a discrete analytic method the convergence of the first order has been theoretically demonstrated.

### References:

1. V.Penenko, E.Tsvetova. *Discrete-analytical methods for the implementation of variational principles in environmental applications // Journal of Computational and Applied Mathematics* 226 (2009) 319-330.

## Structure and evolution of polar low in Kara sea by WRF numerical simulation

Verezemskaya P.S., Stepanenko V.M.

Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Russia

E-mail: aves.indemicas@gmail.com

Polar Lows (hereafter PL) are intensive mesoscale cyclones, developing above the sea surface, usually behind the arctic front and characterized by severe weather conditions [1]. All in consequence of the global warming PLs started to emerge in the Russian Arctic water area as well – in summer and autumn, so that interest in natural resources extraction and marine traffic in Arctic region causes the necessity of high-quality PL forecasting. Lack of observational data and wide variety of PL types in different geographical and atmospheric conditions causes the absence of the «universal» concept of PL.

This investigation is aimed at evaluation the role of various mechanisms in the dynamics of a particular real case of polar low development using mesoscale numerical simulations data. Quality of modelling was estimated by comparing model wind and water vapor fields with that received from satellite data. Two numerical experiments were conducted – including microphysics parameterization and switching it off (i.e. omitting phase transitions of water vapour). This has been done in order to assess the role of CISK mechanism. In order to divide low- and upper-level forcing in PL dynamics we used attribution concept applied to quasi-geostrophic (QG) omega equation. Prior to that we ensured that QG theory could be used for this PL case. We have selected PL case in Kara sea occurred on 30th September 2008 Life span of the PL was between 24 to 36 hours.

Numerical experiments were carried out with Weather Research and Forecasting model (WRF), which was installed on supercomputer “Lomonosov” of Research Computing Center of Moscow State University [3]. As initial conditions was used reanalysis data ERA-Interim from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Two numerical experiments were made: with 5 km spatial resolution, explicit convection simulation

and with Goddard center microphysical parameterization and without any vapor phase transformations. In order to conduct the modeling quality estimation we used visible and infrared images from MODIS (Aqua). Atmospheric water vapor  $V$  and surface wind fields  $W$  were resampled by examining AMSR-E microwave radiometer data (Aqua)[2].

Modeling fields were compared with satellite observations and shown good accordance. Then, dynamic characteristics were analyzed. We tested five main polar lows development concepts: convective and baroclinic instability, wind induced surface heat exchange, conditional instability of second kind and potential vorticity forcing [4]. Investigation showed, that neither baroclinic and convective instabilities nor WISHE mechanism triggered and intensified this PL development. Big CISK contribution to the PL increasing is noticeably visible from low-level PV anomaly intensification in “wet” experiment – it rises from 1 to 4,5 PVU during PL lifetime. Wind speeds and absolute vorticity decreases up to 2-3 units in “dry” experiment. The possibility of applying the quasi-geostrophic theory to the mesoscale phenomena was shown with 0.78 correlation. Helmholtz-like quasi-geostrophic omega equation is planning to be resolved for three-dimensional forcing field, not for point or spherical sources, as [5,6].

Role of upper and lower level forcing will be estimated. Green’s function of lower PV anomaly penetrates to the upper-level anomaly location.

#### References:

1. *Polar lows*, J. Turner, E.A. Rasmussen, 612, Cambridge University press, Cambridge, 2003.
2. Zabolotskikh, E. V., Mitnik, L. M., & Chapron, B. (2013). *New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing*. *Geophysical Research Letters*, 40(13), 3347–3350. doi:10.1002/grl.50664
3. V. Sadovnichy, A. Tikhonravov, V. Voevodin, and V. Opanasenko “Lomonosov”: *Supercomputing at Moscow State University*. In *Contemporary High Performance Computing: From Petascale toward Exascale* (Chapman & Hall/CRC Computational Science), pp.283-307, Boca Raton, USA, CRC Press, 2013.
4. B. J. Hoskins, M.E. McIntyre, A.W. Robertson, *On the use and significance of isentropic potential vorticity maps*, *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society*, OCTOBER 1985, № 470, vol. 111(6).
5. Deveson, a. C. L., Browning, K. a., & Hewson, T. D. (2002). *A classification of {FASTEX} cyclones using a height-attributable quasi-geostrophic vertical-motion diagnostic*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 128, 93–117. doi:10.1256/00359000260498806
6. Clough, S., Davitt, C., & Thorpe, A. (1996). *Attribution concepts applied to the omega equation*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122, 1943–1962. doi:10.1256/smsqj.53609

## Структура и эволюция полярного мезоциклона в Карском море по данным численного моделирования WRF

Вереземская П.С., Степаненко В.М.

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

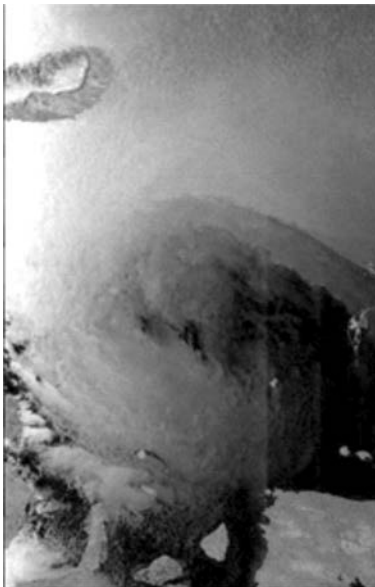
E-mail: [aves.indemicas@gmail.com](mailto:aves.indemicas@gmail.com)

Полярные мезомасштабные циклоны (ПМЦ, polar lows) - это интенсивные вихри, формирующиеся над поверхностью моря к северу от полярного фронта зимой, с горизонтальными размерами до 1000 км, обычно характеризующиеся облачностью в форме спирали или запятой. С ними связаны скорости ветра более 15 м/с и осадки до 40 мм/ч [1]. Особенно часто в Северном полушарии они наблюдаются в морях европейской Арктики и на Дальнем Востоке, где являются значительной угрозой для нефтедобывающей и судопромышленной отраслей. Это определяет потребность этих сфер хозяйства в качественном прогнозе явления. На настоящий день не существует единой концептуальной модели ПМЦ. Этому способствуют труднодоступный для наблюдений регион, многоликость условий, благоприятных для возникновения явления, и малое время жизни мезомасштабных полярных циклонов. В настоящее время недостаток данных наблюдений в приполярных широтах перестает быть лимитирующим, ввиду развития и распространения дистанционных методов, в первую очередь спутникового зондирования. Однако несмотря на увеличение пространственного разрешения глобальных моделей прогноза погоды и широкого применения мезомасштабных региональных моделей, недостаток знаний о механизмах продуцирующих и поддерживающих полярные вихри и неадекватное их воспроизведение в прогностических моделях приводит к неудовлетворительному качеству прогноза. Сложность построения аналитических моделей возникновения и эволюции ПМЦ связана с разнообразием условий,

наблюдаемых в реальной атмосфере, при которых они образуются. Различные по форме и характеру жизненного цикла вихри возникают в акваториях морей Северного Ледовитого, Атлантического и Южного океанов в разные сезоны года. Дополнительную неопределенность вносит рост глобальной температуры в последние 20-30 лет, особенно сильно заметный в полярных областях, который приводит к формированию условий для возникновения ПМЦ в «неклассические», с точки зрения исследователей 80-90х годов, сезоны года в нехарактерных районах.

Цель данного исследования состоит в оценке роли различных физических механизмов в динамике ПМЦ посредством численного расчета мезомасштабной моделью. Для этого проводится оценка возможности влияния механизмов, известных из литературы, на генерацию и интенсификацию конкретного случая ПМЦ. В частности, рассчитывая функцию Грина для квазигеострофического омега-уравнения, приведенного к виду уравнения Гельмгольца, оцениваем роль верхнеуровневой аномалии потенциального вихря в интенсификации нижеуровневой – ПМЦ. Для оценки качества моделирования производится сравнение результатов моделирования с данными спутниковых наблюдений.

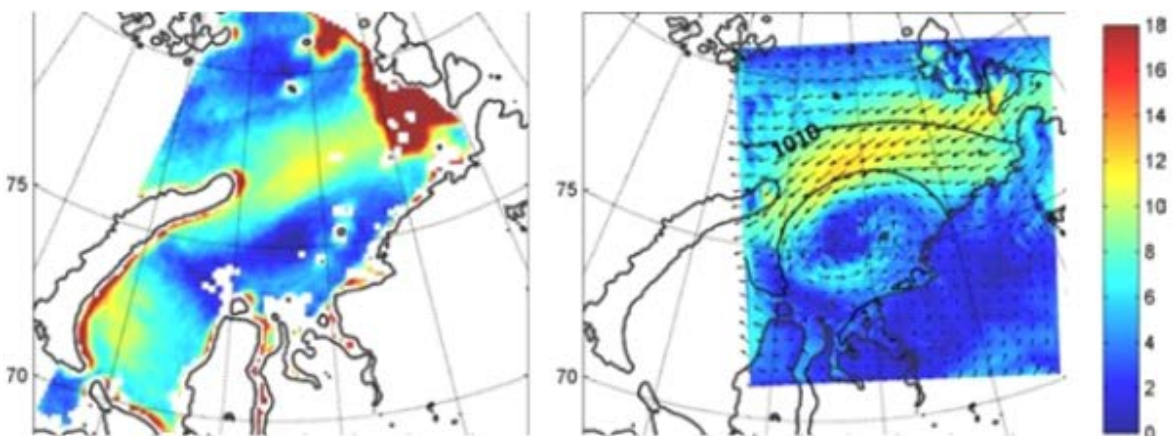
Для численного исследования был выбран неординарный случай возникновения ПМЦ в передней части синоптического циклона 30 сентября 2008 г. (рис. 1) в Карском море. В качестве мезомасштабной модели использовалась модель WRF (Weather Research and Forecasting) с динамическим ядром ARW [4], установленная на суперкомпьютере «Ломоносов» МГУ [2]. Данные спутниковых наблюдений о приводном ветре и интегральном влагосодержании воздуха [3] с приборов AMSR-E (Aqua) и MODIS (Aqua), изображения радиолокационной отражаемости (величина, связанная с приводной скоростью ветра), полученные радиолокатором с синтезированной апертурой ASAR, были предоставлены лабораторией спутниковой океанологии ТОИ ДВО РАН.



**Рисунок 1.** Радиолокационная отражаемость океана по данным радиолокатора ASAR спутника Envisat в срок 15:44 30.09.08

Было поставлено два численных эксперимента с моделью WRF. В базовом эксперименте использовались следующие настройки: схемы CAM (Community atmospheric model) для параметризации коротковолновой и длинноволновой радиации, схема Монины-Обухова для приземного слоя, модель подстилающей поверхности Noah, параметризация турбулентности в планетарном пограничном слое Меллора-Ямады-Янича. Параметризация конвекции была выключена, микрофизические процессы описывались по схеме Годдарда. Второй эксперимент был нацелен на выделение роли скрытого тепла конденсации в интенсификации ПМЦ, для чего в нем были выключены все фазовые переходы влаги. Пространственное разрешение составляло 5 км для обоих экспериментов. В качестве начальных и граничных условий использовались данные реанализа ERA-Interim.

Визуальное сравнение с данными наблюдений о приводном ветре (на 10 м), интегральном влагосодержании в столбе воздуха и облачности показало удовлетворительные результаты: по данным наблюдений (рис. 2, слева) и моделирования (эксперимент базовый, рис. 2, справа) видим, что модель воспроизводит характер распределения приводного ветра в соответствии с циркуляцией и структурой вихря. В эксперименте без описания микрофизических переходов хуже воспроизводится пространственная структура вихря.



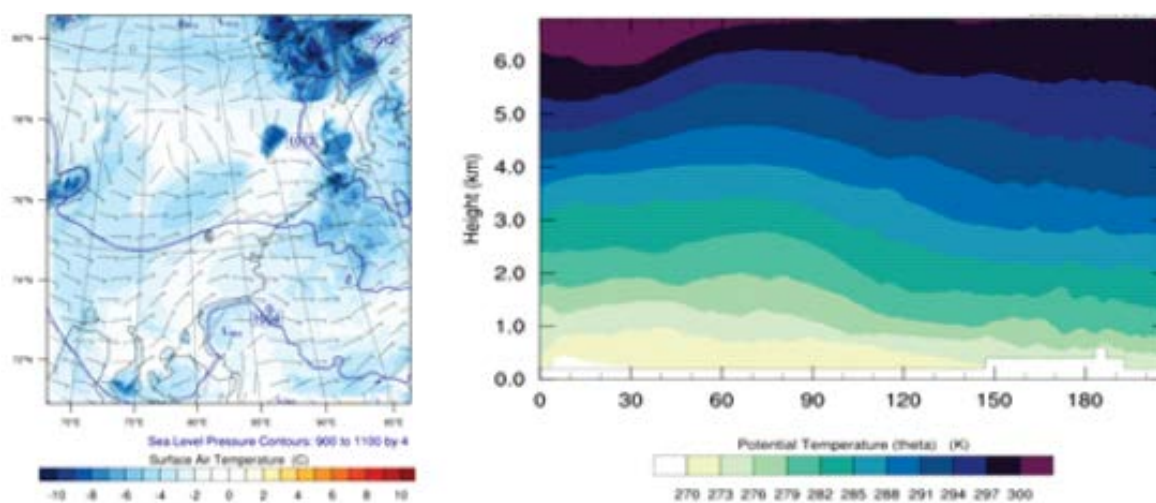
**Рисунок 2.** Карта распределения приводного ветра по данным AMSR-2 (слева) и данным моделирования WRF (справа). Шкала (м/с) для обоих рисунков общая.

По литературным данным были выделены пять основных механизмов, приводящих к возникновению и интенсификации ПМЦ:

- бароклинная неустойчивость в нижней тропосфере,
- конвективная неустойчивость атмосферы,
- усиление за счет вызванного ветром обмена теплом с поверхностью (WISHE – wind-induced surface heat exchange),
- верхнеуровневый форсинг аномалии потенциальной завихренности,
- условная неустойчивость второго рода (CISK – convective instability of second kind).

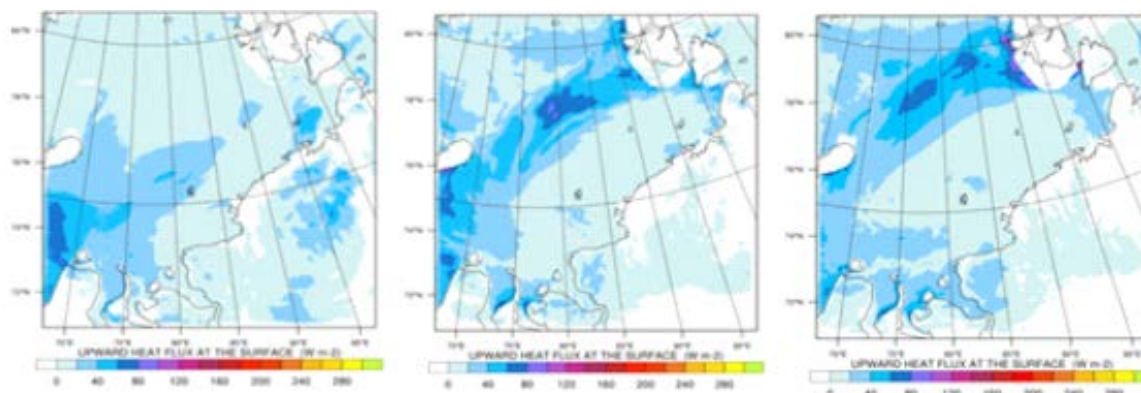
Из результатов идеализированных исследований ПМЦ выяснено, что действие одного из вышеперечисленных механизмов не может, в отличие от совместного действия более двух факторов, объяснить наблюдаемых в природе интенсивности и характера развития ПМЦ. По результатам моделирования были оценены показатели реализации этих механизмов в атмосфере.

Было установлено, что в нижней тропосфере бароклинная зона отсутствовала, ввиду слабо выраженной горизонтальной температурной неоднородности массы воздуха, в которой началось формирование циклона. Так как наличие бароклинной неустойчивости чаще всего является причиной генерации циклона, а не его интенсификации, наличие горизонтальной термической однородности (рис. 3а) на начальных этапах развития исключает возможность ее работы в качестве интенсифицирующего фактора.



**Рисунок 3.** а) Распределение температуры, ветра и давления в приземном слое; б) Меридиональный разрез потенциальной температуры через точку минимального давления. Оба рисунка относятся к моменту времени 16:00 30.09.08.

Исключается по схожим причинам и возможность возникновения ПМЦ за счет реализации конвективной неустойчивости в атмосфере – ввиду значительной устойчивости вертикального профиля потенциальной температуры (рис. 3б) на протяжении всего существования вихря. Интенсификация вихря за счет механизма WISHE оценивается как крайне незначительная: с момента появления первой замкнутой изобары в поле давления над поверхностью моря и до полной диссипации вихря величина потоков скрытого и явного тепла изменялась в пределах от 5 до 80 Вт/м<sup>2</sup> (рис. 4).



**Рисунок 4.** Поток явного тепла по данным WRF 30.09 в 00:00 (а) и 16:00 (б), и 01.10 в 00:00 (в).

Значительный вклад в интенсификацию ПМЦ вносит реализация скрытого тепла конденсации в результате возникновения облачности в средней тропосфере. Облачность возникает из-за вынужденных конвергенций в приземном слое восходящих движений, и в слое от 1.5 до 4 км наблюдается фор-

мирование «теплого», относительно картины в «сухом» эксперименте (+3°C), ядра. Без параметризации фазовых переходов влаги характеристики интенсивности циклона, такие как абсолютная завихренность, скорость ветра и давление на уровне моря, уменьшаются (давление увеличивается) от 7 до 20% от своих значений во «влажном» эксперименте. Большое внимание уделено совместному действию факторов условной неустойчивости второго рода и взаимодействия аномалий потенциального вихря. Вклад CISK в развитие нижней аномалии, соответствующей циклону, велик, что несложно увидеть при сравнении ее интенсивности в «сухом» и «влажном» экспериментах: на стадии небольшого развития вихря максимальное значение потенциального вихря составило 1.2 е.п.в. (единиц потенциального вихря, за единицу принимается фоновое значение для тропосферы) и 5.2 е.п.в. в первом и втором случаях, соответственно.

Так как условная неустойчивость второго рода не может являться единственным механизмом генерации ПМЦ, в качестве другой причины рассматривалась возможность взаимодействия двух аномалий потенциального вихря. Были обнаружены две аномалии потенциального вихря – на уровне 870 – 850 гПа, сформировавшаяся на фоне конвергенции потоков в ложбине в передней части циклона, и на уровне 350 гПа, возникшая после окклюдирования синоптического циклона в этом регионе 25 - 26 сентября. Передача завихренности от верхних уровней к нижним через адвекцию незначительна. Однако, как следует из литературы [5,6], взаимодействие аномалий может объясняться при определенных условиях устойчивости атмосферы влиянием циркуляций, создаваемых нижней и верхней аномалиями, друг на друга. Квазигеострофическая теория предлагает прозрачное описание поведения поля вертикальных скоростей, возникающего на фоне существования аномалий, через омега-уравнение. Решая это уравнение, как это было предложено [5], возможно оценить взаимодействие двух аномалий и показать, что при данных внешних условиях верхняя аномалия может служить триггером развития ПМЦ. Была показана возможность использования квазигеострофической теории для данного мезомасштабного вихря: пространственная корреляция полей полного потенциального вихря и квазигеострофического вихря, приведенного к виду вихря Эртеля (1) [7] составила 0.6.

$$P = \frac{\Theta_0 N_0^2}{\rho_0 g} \left[ \xi_g + f + \frac{f_0}{N_0^2} \frac{g}{\Theta_0} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] \quad (1)$$

Ввиду специфики расчета геострофических скоростей ветра большую неоднородность внесли гравитационные волны в поле давления над сушей, однако для области вихря корреляция составила до 0.78.

Квазигеострофическое омега - уравнение (2), приведенное к виду неоднородного уравнения Гельмгольца (3), имеет фундаментальное решение в неограниченной области (4):

$$N^2 \nabla_h^2 w + f_0^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = f_0 \frac{\partial}{\partial z} (\mathbf{v}_g \nabla \xi_g) - \frac{g}{\Theta_0} \nabla_h^2 (\mathbf{v}_g \nabla \theta) \quad (2)$$

$$\nabla^2 \tilde{w} - \left( \frac{f_0}{2NH_p} \right)^2 \tilde{w} = F \rho_0^{1/2} \exp \left( -\frac{zf_0}{2NH_p} \right) \quad (3)$$

$$\tilde{w} = \iiint_V GF \rho_0^{1/2} \exp \left( -\frac{zf_0}{2NH_p} \right) dV \quad (4)$$

где  $G(r|r_s) = \frac{1}{r} \exp \left( -\frac{f_0}{2NH_p} r \right)$  - функция Грина для неограниченной области,

$\tilde{w} = w \rho_s^{1/2}$  - вертикальная скорость,  $F = 2 \text{div} \mathbf{Q} / N^2$  - источник, свертка правой части уравнения (2).

Выше  $\rho_s$  - стандартный профиль плотности,  $\tilde{w}$  - вертикальная скорость,  $N$  - частота Брэндта - Вайсяля, постоянная в рассматриваемом слое,  $H_p$  - параметр, соответствующий профилю плотности,  $f_0$  - параметр Россби на фиксированной широте,  $\mathbf{v}_g$  - вектор геострофических составляющих скорости ветра,  $\xi_g$  - геострофический вихрь,  $\rho_0$  - плотность воздуха на уровне земли.

Расчет функции Грина показал, что область влияния нижней аномалии захватывает верхнюю аномалию достаточно для утверждения ее влияния на возникновение циклона.

Таким образом, в отношении исследуемого циклона можно заключить следующее:

- квазигеострофическая теория может быть применена к мезомасштабному циклону;
- наибольший вклад в интенсификацию вихря в течение жизни вносит реализация скрытого тепла конденсации в средней тропосфере (механизм конвективной неустойчивости второго рода);
- верхнеуровневая аномалия потенциального вихря лежит в области функции влияния нижней, а значит может служить триггерным механизмом для образования ПМЦ.

#### Литература:

1. *Polar lows*, J. Turner, E.A. Rasmussen, 2003, Cambridge University press, Cambridge, 612 pp.
2. V. Sadovnichy, A. Tikhonravov, Vl. Voevodin, and V. Opanasenko "Lomonosov": Supercomputing at Moscow State University. In *Contemporary High Performance Computing: From Petascale toward Exascale* (Chapman & Hall/CRC Computational Science), pp.283-307, Boca Raton, USA, CRC Press, 2013.
3. Zabolotskikh, E. V., L. M. Mitnik, and B. Chapron (2013), *New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing*, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 3347–3350, doi:10.1002/grl.50664.



4. Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: *A description of the Advanced Research WRF Version 3*. NCAR Tech Notes-468+STR.
5. B. J. Hoskins, M.E. McIntyre, A.W. Robertson, *On the use and significance of isentropic potential vorticity maps*, *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society*, OCTOBER 1985, № 470, vol. 111(6).
6. Clough, S., Davitt, C., & Thorpe, A. (1996). *Attribution concepts applied to the omega equation*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122, 1943–1962. doi:10.1256/smsqj.53609
7. Гуцина Д.Ю. *Синоптическая метеорология. Анализ метеорологических полей: учебное пособие*. - М.: Географический факультет МГУ, 2014.

## Thermodynamic characteristics of the atmosphere in days with thunderstorm on the cosmodrome «Vostochny»

Gromnitskya A.A., Gorbatenko V.P.

Tomsk State University, Russia

E-mail: [rector@tsu.ru](mailto:rector@tsu.ru), [alenagrom15@mail.ru](mailto:alenagrom15@mail.ru)

Web: <http://tsu.ru>

The parameters of the atmospheric instability have a significant impact on the successful launch of a space rocket and its flight. For the study a database of observations of thunderstorm activity at meteorological stations in the area of the cosmodrome “Vostochny” was formed. For studying convection the data of aerologic sounding were used. The thermodynamic parameters of atmospheric (LIFT, SWEAT, KIND, TOTL, CAPE, LFCT) were calculated and statistically processed in the days with thunderstorms. The analysis of time and spatial variability of the parameters submitted: the temperature stratification and vapor, instability energy, wind shear and others. Variability of indices values, that characterize convection depending on the underlying surface and the time of its development, are defined. The thresholds of indices for different probability of thunderstorms were identified. Thresholds of indices LIFT, SWEAT and CAPE are comparable with thresholds, which are represented in the literature.

## Термодинамические характеристики атмосферы в дни с грозой на космодроме «Восточный»

Громницкая А.А., Горбатенко В.П.

Томский государственный университет, Россия

E-mail: [rector@tsu.ru](mailto:rector@tsu.ru), [alenagrom15@mail.ru](mailto:alenagrom15@mail.ru)

Web: <http://tsu.ru>

В настоящее время полным ходом идет строительство космодрома «Восточный» на Дальнем Востоке в Амурской области, целью которого является обеспечение независимого доступа России в космическое пространство. При пуске РКН (ракет космического назначения) огромное влияние на расчёты траектории полета оказывают погодные условия. Бывают случаи, когда из-за ухудшения метеорологических условий переносятся пуски РКН. Большое влияние на ход подготовки, пуск и полет РКН оказывают явления, связанные с развитием конвективной облачности.

Целью работы является исследование характеристик развитой конвекции в районе космодрома «Восточный».

Маркером наличия в атмосфере мощных конвективных процессов является зарегистрированная гроза, представляющая опасность при запуске и сама по себе и по тем характеристикам состояния атмосферы, которые грозу сопровождают.

Для достижения поставленной цели была создана база данных по конвективным характеристикам атмосферы в дни с опасными явлениями, определяемыми по данным сети метеорологических станций, находящихся в радиусе 200 км от района исследования, Шимановск, Свободный, Мазаново, Братолобовка, Благовещенск, Хума и Хэйхэ. База содержит информацию: о времени, когда наблюдалась гроза за период с июня по август 1985-2013 гг. [1, 2] и о значениях термодинамических параметров неустойчивости, полученных по данным аэрологического зондирования атмосферы на станции Благовещенск за срок 12 часов ВСВ (всемирное скоординированное время) [3].

При наличии гроз территория, охваченная конвективной деятельностью, может быть различна, поэтому имеющаяся информация разделена на две группы: дни, когда наблюдались «отдельные грозы» только на одной из станций, входящих в радиус наших исследований и дни, когда грозы регистрировались на двух и более метеорологических станциях – «грозы над всей территорией».

Для характеристики степени развития конвекции были отобраны следующие индексы, наиболее часто используемые в исследованиях такого рода [4-5]:

- LIFT – объединяет влажность и вертикальный градиент в одном индексе, оценивает степень стабильности, которая измеряется разностью между температурами поднимающейся частицы и окружающей среды на уровне 500 гПа, °С;
- SWEAT – оценивает потенциал (вероятность) неблагоприятных явлений погоды, объединяя несколько параметров в одном индексе: слой наибольшего влагосодержания (точка росы на уровне 850 гПа), нестабильность (TOTL), скорость ветра на уровне 850 и 500 гПа, адвекцию теплого воздуха;
- KIND – характеризует температурно-влажностное состояние атмосфере в слое 850-700 гПа, °С;
- TOTL – комплексная характеристика статической стабильности и влажности на уровне 850 гПа, °С;
- CAPE – конвективная потенциальная энергия атмосферы, Дж/кг;
- LFCT – уровень свободной конвекции, гПа [5].

Согласно исследованиям, представленным в литературе [4-7], выделены интервалы значений индексов неустойчивости, которые дают качественную оценку степени развития конвекции (табл. 1) над Европой.

**Таблица 1.** Интервалы значений индексов для различных состояний атмосферы

Состояние атмосферы	Значения индексов				
	LIFT, °C	SWEAT	KIND, °C	TOTL, °C	CAPE, Дж/кг
	> 0	< 100	< 25	< 40	< 0
Слабо неустойчива (наличие ливней, отдельных гроз)	-3 ... 0	100 ... 200	25 ... 30	40 ... 45	0 ... 1000
Неустойчива (наличие ливней и гроз)	-6 ... -3	200 ... 300	30 ... 35	45 ... 50	1000 ... 2000
Сильно неустойчива (на всей территории регистрируются интенсивные грозы, град, ливни)	-9 ... -6	300 ... 400	35 ... 40	50 ... 55	2000 ... 2500
Крайне неустойчива (гроза, град, смерч)	< -9	> 400	> 40	> 55	> 2500

При сравнении средних значений индексов, характеризующих конвекцию в дни с отдельной грозой над исследуемой территорией (табл. 2), с интервалами, которые характерны для Европы (табл. 1), можно заметить, что атмосфера в эти дни, характеризуется как «слабо неустойчивая» (табл. 1) по значениям индексов LIFT, SWEAT и CAPE и можно отметить наличие ливней и отдельных гроз, а значения индексов KIND и TOTL характеризуют атмосферу, как «неустойчивую» (табл. 1). Таким образом, замечено, что атмосфера в дни с отдельной грозой по средним значениям анализируемых индексов различается мало.

Сравнивая статистические характеристики термодинамических параметров «отдельная гроза» и «гроза на всей территории» (табл. 2) можно сделать вывод, что значения индексов имеют незначимые с вероятностью 95 % различия по критерию Пирсона. Хотя согласно таблице 1 численные значения характеристик конвекции при грозах разной интенсивности существенно не отличаются.

**Таблица 2.** Статистические характеристики термодинамических параметров для аэрологической станции Благовещенск при грозах в 12 ВСВ

	отдельная гроза				гроза на всей территории			
	среднее	$\sigma$	макс	мин	среднее	$\sigma$	макс	мин
LIFT, °C	-1,5	2,5		-7,7	-1,7	2,4		-8,8
SWEAT	195	68	454		207	77	466	
KIND, °C	32	5	52		33	4	43	
TOTL, °C	49	9	47		49	4	59	
CAPE, Дж/кг	551	608	3502		620	682	3078	
LFCT, гПа	768	81	933	499	750	88	891	313

Для выявления возможной причины незначительных отличий термодинамических параметров в случае «отдельная гроза» и «гроза на всей территории» были изучены характеристики ветра во время гроз. Замечено, что около 80% случаев дней с грозой преобладает ветер южного, юго-западного и юго-

восточного направлений. При таком направлении ветра радиозонд, выпускаемый с аэрологической станции Благовещенск, летит в направлениях с северной составляющей, т.е. в большинстве случаев траектория радиозонда пересечет очаг неустойчивости атмосферы, и основные ее характеристики могут быть определены. Следовательно, при определении вероятности образования грозы можно не выделять категории «отдельная гроза» и «гроза на всей территории», а давать вероятностный прогноз для общей категории «гроза».

В результате работы было замечено, что в суточном ходе максимальное число гроз (26 %) отмечается в срок близкий к 18 ч по местному времени (09 ВСВ), а сетевое аэрологическое зондирование осуществляется в сроки 09 и 21 ч по местному времени (00 и 12 ВСВ). Поэтому радиозонд, не фиксирует параметры атмосферы во время ее наибольшей неустойчивости. Возможно, это также является одной из причин схожести термодинамических параметров «отдельная гроза» и «гроза на всей территории». Для получения информации о максимально возможных значениях характеристик конвекции над данным регионом необходимы специальные исследования с помощью аэрологических радиозондов, которые необходимо выпускать в срок 09 ВСВ.

В ходе работы были определены пороговые значения термодинамических параметров атмосферы для разной степени вероятности в дни с грозой (табл. 3).

**Таблица 3.** Пороговые значения индексов для различной степени вероятности гроз

Индекс	50%	70%	90%
LIFT	<-2,5	<-3,5	<-5,5
SWEAT	>170	>205	>265
KIND	>33	>35	>37
TOTL	>49	>51	>53
CAPE	>350	>700	>1300

При сравнении градаций приведенных в зарубежных источниках (табл. 1), и градаций, полученных для территории Амурской области (табл. 2), можно сказать, что конвективный потенциал данных территорий не имеет существенных различий, так и пороговые значения будут мало отличаться. По зарубежной классификации значения индекса LIFT от -6 до -3 °С характеризуют атмосферу как «неустойчивую» (табл. 1) и регистрируются ливни и грозы. Для территории Амурской области градация значения индекса LIFT начинается с пределов от -5,5 до -3,5 °С (табл. 3). Пороговые значения индексов LIFT, SWEAT и CAPE (табл. 3), сравнимы с описываемыми в зарубежной литературе и существенно отличаются от значений, полученных для территории Западной Сибири [7, 8].

Используя эти пороги, в исследуемом районе можно прогнозировать пространственное положение грозных очагов с помощью негидростатических моделей типа WRF или привлекая данные метеорологических спутников, на которых установлены спектрорадиометры MODIS [9].

#### Литература:

1. ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». Специализированные массивы для климатических исследований [Электронный ресурс] / URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 9.02.2015);
2. Институт космических исследований РАН «Погода России» - Архив погоды [Электронный ресурс] / URL: [http://meteo.infospace.ru/win/wcarch/html/r\\_sel\\_stn.sht?adm=554](http://meteo.infospace.ru/win/wcarch/html/r_sel_stn.sht?adm=554) (дата обращения: 13.10.2014);
3. University of Wyoming. Department of Atmospheric Science [Электронный ресурс] / URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения 20.03.2015);
4. Andersson, T. A. M. J. C. N. S.: *Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in southern Sweden*, *Meteorol. Mag.*, 116. – 1989. – 141-146 p.;
5. Johns R.H., Doswell C.A. *Severe local storms forecasting*. *Wea. Forecasting*. – 1992. – 558-612 p.;
6. Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A. *Mesoscale convection and dangerous weather phenomena in southeast of Western Siberia // 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, November 1-4, 2011, Chengdu, China. Beijing: Tsinghua University, 2011. – PP. 160-164;*
7. Ершова Т.В., Горбатенко В.П., Клипова О.А. *Термодинамические параметры атмосферы при грозах и ливнях // Вестн. Томского гос. пед. ун-та. 2012. Вып. 7. С. 9-14;*
8. Горбатенко В.П., Константинова Д.А. *Конвекция в атмосфере над юго-востоком Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана, 2009, №12, Т. 22, С.17-21;*
9. Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Разумова О.В. *Идентификация мезомасштабной конвекции и гроз по данным MODIS и аэрологического зондирования // Вестн. Том. гос. ун-та. 2012. № 365. С. 169–174.*

# Turbulence parametrization of heat plume over an urban heat island in stably stratified atmosphere

<sup>1</sup>Kurbatskiy A.F., <sup>2</sup>Kurbatskaya L.I.

<sup>1</sup>Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Novosibirsk, Russia

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

In this paper, computing efficiency of the three-parametrical theory of turbulent transport of a momentum and heat for modelling of structure of a circulating flow over a surface heat source (urban heat island) is investigated. The results of numerical modelling show that the three-parametrical theory allows to receive structure of circulation, which good agreement with the measurements data.

## Параметризация турбулентности теплового факела над городским островом тепла в устойчиво стратифицированной атмосфере

<sup>1</sup>Курбацкий А.Ф., <sup>2</sup>Курбацкая Л.И.

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

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

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

### ВВЕДЕНИЕ

Градиентные модели вихревой диффузии для турбулентных потоков, включающие эффекты плавучести, могут быть оптимальным приближением, сочетающем в себе вычислительную эффективность с приемлемой точностью получаемых результатов [1–2].

В настоящей работе представлены численные результаты основных характеристик проникающей турбулентной конвекции в идеализированной модели городского острова тепла, реализованной в лабораторном эксперименте [3].

### МОДЕЛЬ ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА

В лабораторном эксперименте [3] проникающая турбулентная конвекция индуцировалась постоянным потоком тепла  $H_0$ , создаваемым поверхностным источником тепла в виде круглой пластины  $D$  (Рис. 1 а,б). Этот источник тепла моделирует прототип городского острова тепла с малым относительным удлинением ( $z_i / D \ll 1$ ,  $z_i$  – высота перемешанного слоя, определяемая как высота, на которой достигается максимальная отрицательная разность между температурой в центре факела и окружающей температурой (рис. 1а)) в условиях слабого ветра и устойчивой стратификации окружающей среды.

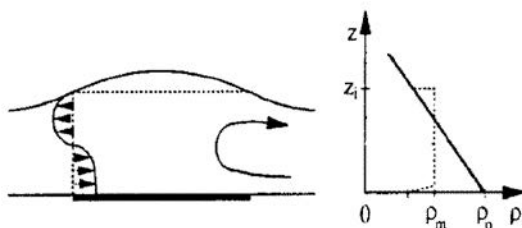


Рис. 1а. Схема циркуляции острова тепла ( $z_i$  – высота перемешивания,  $\rho_0$  – плотность стандартной атмосферы,  $\rho_m$  – плотность в центре теплового факела).

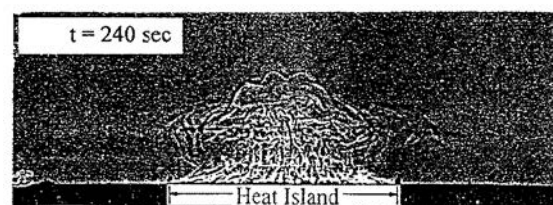


Рис. 1б. Теневая фотография острова тепла, полученная в лабораторном эксперименте [3]. Момент времени  $t = 240$  с соответствует квазиустановившейся циркуляции.

### ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ.

Уравнения термогидродинамики, описывающие циркуляцию над городским островом малого относительного удлинения могут быть записаны в гидростатическом приближении без учета силы Кориолиса и радиации в осесимметричной цилиндрической системе координат (здесь не приводятся). Эффекты плавучести учитываются в приближении свободной конвекции (приближении Буссинеска).

Наиболее простые, явные параметризации турбулентных потоков импульса и тепла имеют вид [2]:

$$-\langle w\theta \rangle = c_T \frac{E^2}{\varepsilon} Fr^{-2} \sqrt{2R} \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1-c_{2\theta}}{c_{1\theta}} \frac{E}{\varepsilon} \sqrt{2R} \cdot Fr^{-2} \langle \theta^2 \rangle, \quad (1)$$

$$-\langle v\theta \rangle = c_T \frac{E^2}{\varepsilon} \sqrt{2R} \frac{\partial T}{\partial r}. \quad (2)$$

Для нормальных турбулентных напряжений используется модель градиентной диффузии Буссинеска, сохраняющая некоторую анизотропию нормальных напряжений

$$\langle v^2 \rangle = \frac{2}{3} E - 2\nu_T \frac{\partial V}{\partial r}, \quad \langle w^2 \rangle = \frac{2}{3} E - 2\nu_T \frac{\partial W}{\partial z}, \quad \langle u^2 \rangle = \frac{2}{3} E - 2\nu_T \frac{V}{r} \quad (3)$$

Турбулентная вязкость в (3) определяется из соображений размерности, следуя невязкой оценке диссипации кинетической энергии турбулентности [4, 5]:

$$\nu_T = c_\mu \cdot E^2 / \varepsilon \quad (4)$$

Откалиброванные коэффициенты в (1) – (4) имеют численные значения [1, 6, 7]:  $c_\mu = 0,09$ ,  $c_{1\theta} = 3,28$ ,  $c_{2\theta} = 0,5$ ,  $R = 0,6$ ,  $c_T = 0,095$ .

Параметры  $E$ ,  $\varepsilon$  и  $\theta^2$  в (1) – (4) находятся из решения замкнутых уравнений переноса (здесь не приводятся, см. [8]).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приводимые ниже численные результаты получены для значений параметров экспериментальной реализации проникающей термической конвекции в [3].

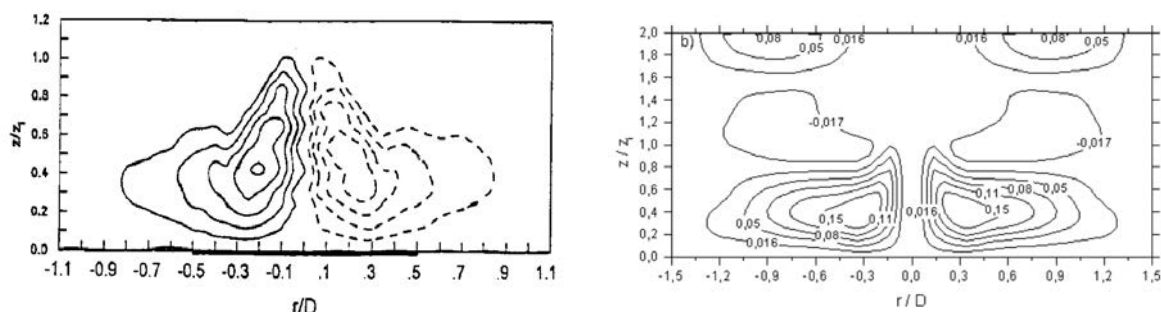


Рис. 2. Линии тока циркуляции воздуха над островом тепла: слева – экспериментальные линии тока, справа – результат вычисления.

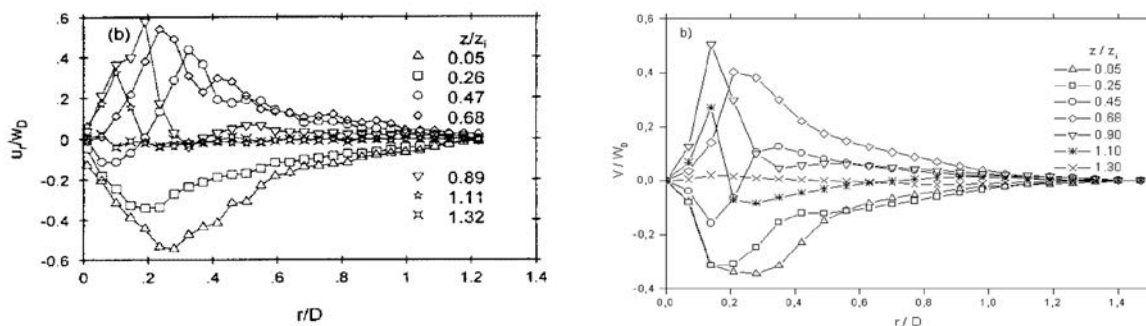
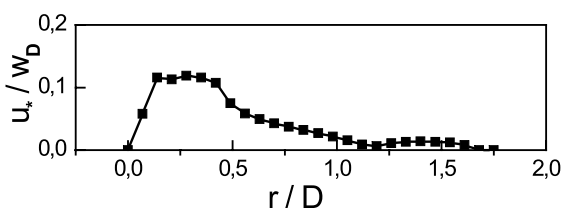


Рис. 3. Профили радиальной (горизонтальной) средней скорости  $V$  на различных высотах над островом тепла: слева – эксперимент [3], справа – вычисление при тех же параметрах (как на рис.2).

Вблизи поверхности величина скорости потока, натекающего с периферии острова тепла, возрастает в направлении к центру, достигая максимума при, примерно, при  $r/D = 0,25$ , затем убывает до нуля в центре острова тепла. Скорость оттекающего потока наверху также возрастает с удалением от центра, достигая максимума, примерно, при  $r/D = 0,25$  (рис. 1а). В отличие от экспериментальных данных [3], вычисленный вертикальный профиль горизонтальной скорости имеет реалистичное поведение вблизи поверхности с обращением скорости в нуль на поверхности (здесь не показано). В эксперименте вязкий подслой не разрешался в силу ограничения лабораторного моделирования острова тепла:  $z_i / D \ll 1$ .



Скорость трения (рис. 4) изменяется по радиальной координате в согласии с изменением горизонтальной скорости (рис. 3).

Рис. 4. Нормализованная скорость трения .

Измеренные вертикальные профили температуры (рис. 5а) и вычисленные профили температуры (рис. 5б) указывают на хорошее перемешивание в нижней и центральной части факела. Такой характер поведения температурных профилей с высотой относится реальным ночным пограничным слоям, в которых преобладают неустойчивые (конвективные) условия, вследствие восходящего потока тепла от урбанизированной поверхности при слабом окружающем ветре. На обоих рис. 5(а, б) видно, что профили температуры внутри факела имеют характерное “вздутие”: температура внутри факела оказывается ниже температуры вне его на той же высоте, фиксируя тем самым область отрицательной плавучести, вследствие возвышения факела в центре. Эта высота возвышения максимальна на оси факела и уменьшается с расстоянием от его центра. Тепловой факел имеет куполообразную верхнюю часть в виде “шляпы” (см. теневую фотографию на рис. 1б).

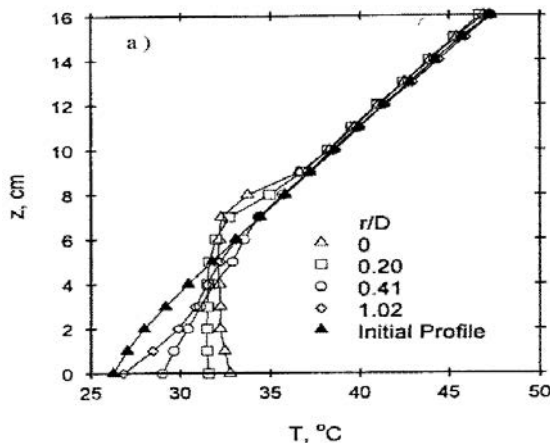


Рис. 5а. Измеренные профили.

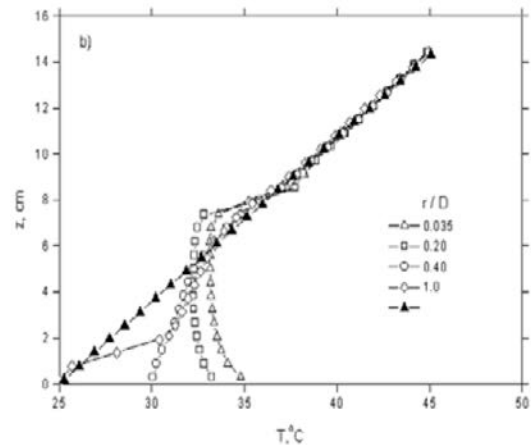


Рис. 5б. Вычисленные профили температуры над островом тепла.

Структура турбулентного теплового факела представлена на рис. 6б распределениями среднеквадратичных флуктуаций горизонтальной и вертикальной турбулентных скоростей по высоте в центре факела. Как данные измерений [3], так и результаты вычислений показывают, что большие значения  $\sigma_v / W_D$  и  $\sigma_w / W_D$  внутри перемешанного слоя быстро убывают с высотой выше слоя вовлечения (для  $z > z_i$ ). Измеренный профиль  $\sigma_v / W_D$  располагается при меньших значениях, чем вычисленный профиль. Как указано в [3], конечные размеры экспериментальной установки все же оказывали влияние циркуляцию, подавляя горизонтальное движение и таким образом понижая уровень значений  $\sigma_v / W_D$ . Можно отметить, что простые параметризации турбулентных потоков (1) – (4) не только правильно воспроизводят характерные особенности распределений  $\sigma_v / W_D$  и  $\sigma_w / W_D$ , но и удовлетворительно отражают их анизотропный характер.

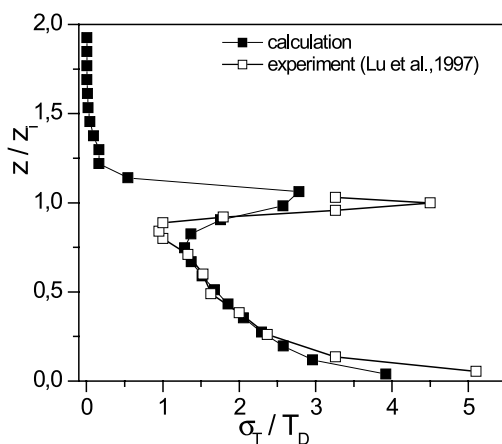


Рис. 6а. Вертикальный профиль дисперсии турбулентных флуктуаций температуры от высоты в центре теплового факела: □ – измерения [3], ■ – численное решение. Профиль  $\sigma_T / T_D$  убывает от максимального значения на подстилающей поверхности до минимального значения на высоте  $z/z_i = 0.85$ .

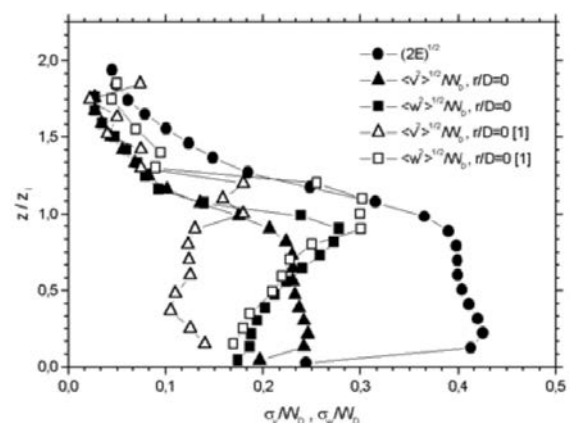


Рис. 6б. Нормализованные распределения среднеквадратичных флуктуаций турбулентной скорости в центре факела по данным измерений [4] ( $Fr = 0,077$ ;  $Re = 8280$ ):  $\Delta$  – профиль горизонтальной дисперсии скорости,  $\square$  – профиль вертикальной дисперсии скорости. Вычисления:  $\blacktriangle$  – горизонтальная дисперсия скорости,  $\blacksquare$  – вертикальная дисперсия скорости;  $\bullet$  – вычисленная интенсивность турбулентности,  $q^2 = \langle u_i^2 \rangle$

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-05-00006а) и программы фундаментальных исследований Президиума РАН №1.

**Литература:**

1. Sommer T. P., & R. M. C. So. *On the modeling of homogeneous turbulence in a stably stratified flow* // *Phys. Fluids*. – 1995. – Vol.7. – P. 2766-2777.
2. Kurbatskii A. F.: *Computational modeling of the turbulent penetrative convection above the urban heat island in stably stratified environment* // *Journal of Applied Meteorology* – 2001 – Vol. 40. – P.1748-1761
3. Lu J., Araya S.P., Snyder W.H., Jr. Lawson R.E.: *A Laboratory Study of the Urban Heat Island in a Calm and Stably Stratified Environment. Part I: Temperature Field; Part II: Velocity Field* // *Journal of Applied Meteorology*. – 1997. – Vol.36. – P.1377-1402.
4. Tennekes H, Lumley J. L. 1972. *A first course in turbulence*. Cambridge, MA: MIT Press.
5. Курбацкий А. Ф. *Лекции по турбулентности. Часть I*. НГУ, 2000.
6. Jin L. H., So R. M. C., Gatski T. B. *Equilibrium states of turbulent homogeneous buoyant flows* // *J. Fluid Mech.* – 2003. – V.482. – P. 207-233.
7. Курбацкий А. Ф. *Лекции по турбулентности. Часть II*. НГУ, 2001.
8. Курбацкий А. Ф., Курбацкая Л. И. *Трехпараметрическая модель турбулентности для атмосферного пограничного слоя над урбанизированной поверхностью* // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2006. – 46(2). – С. 476-494.

# SESSION Modeling and analysis of state of the regional underlying surface and its hydrological regime

## СЕКЦИЯ Моделирование и анализ регионального состояния подстилающей поверхности и ее гидрологического режима

### Turbulence and greenhouse gas dynamics in lake ecosystems

<sup>1</sup>Stepanenko V.M., <sup>2</sup>Mammarella I.

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Russia

<sup>2</sup> Department of Physics, University of Helsinki, Finland

E-mail: [vstepanenkomeister@gmail.com](mailto:vstepanenkomeister@gmail.com),

[ivan.mammarella@helsinki.fi](mailto:ivan.mammarella@helsinki.fi)

The new version of a 1D lake model LAKE is presented. The model includes key processes of oxygen, carbon dioxide and methane production, transport and consumption. Three-dimensional effects are partially included via separate treatment of processes in soil columns originating from different bottom depths. The model takes into account photosynthesis, respiration, biochemical oxygen demand and sedimentary oxygen demand, methane production in anoxic sediments, methane oxidation in the water column. Methane that is produced in sediments is partly transported upwards by diffusion while the remainder is emitted by bubbles. Bubbles evolve in size and gas composition during their rise. The thermodynamic component (ice, snow evolution, water temperature, soil heat and moisture transfer), and turbulence closure are basically that used in (Stepanenko et al. 2011; Stepanenko et al. 2014). The difference is that now all prognostic quantities are expressed in horizontally averaged values, and the momentum equations are supplemented by modified parameterization of seiches originally proposed by Svensson.

The model is verified using the measured data from Kuivajarvi Lake, Finland. The measurements of meteorological, hydrological quantities, gas concentrations in water and air, energy and gas fluxes are performed here by University of Helsinki. We used these data from ice-free season of 2014.

The model shows a realistic growth of the lake mixed layer during the warm season. This factor is crucial for the correct reproduction of greenhouse gases distribution, since due to photosynthesis, respiration and oxidation of methane the maximum oxygen concentration occurs in the mixed layer, while the maximal concentrations of CO<sub>2</sub> and methane are usually found in metalimnion or hypolimnion (Bastviken et al. 2008). Similar to observations, in the model the concentration of methane at the bottom starts to increase in August when the oxygen concentration decreases to very low values. The model also reproduces low concentrations of methane in the mixed layer and close to zero diffusion flux of methane to the atmosphere. Evaluation of the integral components of the balance of methane in the mixed layer of the lake indicates that the emission of methane from shallow sediments (i.e. those in the mixed layer) is mostly offset by oxidation in this layer. At the same time, the diffusion flux of methane through



the thermocline is very small. Possible effects of mixing in the thermocline caused by seiches and other internal waves have been considered by artificial increase in the minimal diffusion coefficient in the model. However, this has not led to an increase in the concentration of methane in the mixed layer, since simultaneously with increasing of the upwards flux of methane through the thermocline the downward diffusion of oxygen enhances as well. Numerical experiments also prove that neglecting surface seiches parameterization leads to laminarization of the hypolimnion (the diffusion coefficient in the  $k-\varepsilon$  model drops to "molecular" value) that causes too early accumulation of methane at the deepest point of the lake.

#### References:

1. Bastviken, D. et al., 2008. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and  $CH_4$  emissions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G2), p.n/a–n/a. Available at: <http://dx.doi.org/10.1029/2007JG000608>.
2. tepanenko, V., Jöhnk, K. & Machulskaya, E., 2014. Simulation of surface energy fluxes and stratification of a small boreal lake by a set of one-dimensional models. *Tellus A*, 1, pp.1–18. Available at: <http://www.tellusa.net/index.php/tellusa/article/view/21389>.
3. Stepanenko, V.M. et al., 2011. Numerical modeling of methane emissions from lakes in the permafrost zone. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 47(2), pp.252–264. Available at: <http://link.springer.com/10.1134/S0001433811020113> [Accessed July 29, 2014].

## Турбулентность и перенос парниковых газов в озерных экосистемах

<sup>1</sup>Степаненко В.М., <sup>2</sup>Маммарелла И.

<sup>1</sup> Московский государственный университет, Россия

<sup>2</sup> Department of Physics, University of Helsinki, Finland

E-mail: [vstepanenkomeister@gmail.com](mailto:vstepanenkomeister@gmail.com), [ivan.mammarella@helsinki.fi](mailto:ivan.mammarella@helsinki.fi)

Пресноводные водоемы суши занимают 1.3-1.8% поверхности суши (Downing et al. 2006), что определяет их незначительное влияние на характеристики глобального климата через потоки тепла, влаги, импульса и радиации в приземном слое. При этом, для некоторых регионов, где доля площади, занимаемая озерами, велика, это влияние оказывается существенным (Martynov et al. 2012; Eerola et al. 2014). Однако, помимо термодинамического, динамического и радиационного взаимодействия с атмосферой, роль пресноводных водоемов в климатической системе определяется также тем, что они являются существенными источниками парниковых газов (Tranvik et al. 2009) -  $CO_2$ ,  $CH_4$  и  $N_2O$ . Согласно существующим на настоящий момент оценкам (Bastviken et al. 2011), глобальная эмиссия метана из озер в атмосферу достигает 50% от потока с переувлажненных территорий (в т.ч. болот). Таким образом, благодаря потокам парниковых газов, озера можно считать глобально значимым фактором климата.

В связи с необходимостью региональных оценок потоков парниковых газов с внутренних водоемов, а также – в перспективе – параметризации этих потоков в климатических моделях, в последнее время стали появляться одномерные модели озера, в которых сопряжены термодинамика, турбулентность и биохимические процессы (Степаненко и др. 2011; Tan et al. 2015). Однако, к настоящему моменту эти модели недостаточно верифицированы на данных наблюдений ввиду необходимости одновременных измерений большого набора метеорологических, гидрологических и химических величин в приводном слое и в самом водном объекте.

В настоящем докладе представлена модель водоема LAKE (Степаненко и Лыкосов 2005; Степаненко и др. 2011; Stepanenko et al. 2014), описывающая основные процессы переноса, источники и стоки тепла, импульса, кислорода, углекислого газа и метана в водоеме и нижележащем грунте. Одномерные уравнения для характеристик водной среды сформулированы относительно осредненных по горизонтали величин. Баротропные (поверхностные) сейши параметризованы с помощью модифицированной схемы Свенссона (Svensson 1978). Трение, потоки тепла и газов на дне воспроизводятся с помощью сопряжения одномерной модели водоема с одномерными вертикальными почвенными колонками, верхние границы которых находятся на разных глубинах водоема. В почвенных колонках рассчитывается диффузионный перенос тепла, метана, а также влагоперенос и фазовые переходы воды. Процессы фотосинтеза, дыхания и биохимического потребления кислорода в толще воды параметризованы согласно (Stefan & Fang 1994) с кусочно-постоянным распределением хлорофилла по глубине. Поток кислорода в донные отложения рассчитывается по модели (Walker & Snodgrass 1986). Модель процессов генерации, переноса и стока метана в целом соответствует схеме, изложенной в (Степаненко и др. 2011), за

тем исключением, что пузырьковый поток метана на поверхности водоема рассчитывается с учетом растворения пузырьков по мере их подъема к поверхности. В модели пузырьки состоят из метана, кислорода, углекислого газа, азота и аргона, и эволюционируют по мере подъема согласно модели Д.Ф. МакГинниса и соавт. (McGinnis et al. 2006).

Представлены результаты валидации модели для озера Куйваярви (Финляндия). Озеро Куйваярви – относительно небольшое (площадь – 0.61 км<sup>2</sup>, длина – 2.6 км) мезотрофное димиктическое озеро со средней глубиной 6.4 м и максимальной глубиной 13.2 м, находится рядом с известной станцией мониторинга атмосферно-биосферного взаимодействия SMEAR II (Station for Measuring Ecosystem–Atmosphere Relations) (Hari & Kulmala 2005). На озере заякорена платформа с приборами, измеряющими как основные метеорологические величины и потоки радиации, так и пульсации температуры, влажности, компонент скорости ветра и концентраций парниковых газов. По данным о пульсациях восстанавливаются потоки соответствующих величин методом ковариации пульсаций (eddy covariance). Кроме того, на озере производятся непрерывные измерения температуры воды и концентрации CO<sub>2</sub> на разных глубинах. Для валидации модели использованы данные перечисленных выше измерений за 2014 г.

Модель демонстрирует реалистичный рост перемешанного слоя в течение теплого сезона (рис. 1). Этот фактор является ключевым для правильного воспроизведения распределения парниковых газов в озере, поскольку в силу процессов фотосинтеза, дыхания и окисления метана максимум концентрации кислорода расположен в перемешанном слое, максимум концентрации CO<sub>2</sub> и метана — в металимнионе или гиполимнионе (Bastviken et al. 2008). Как и в данных наблюдений, концентрация метана начинает расти у дна, начиная с августа (рис. 2), когда концентрация кислорода падает до очень низких значений. Модель также воспроизводит низкие значения концентрации метана в перемешанном слое и близкий к нулю диффузионный поток метана в атмосферу. Оценка составляющих интегрального баланса метана в перемешанном слое водоема показывает, что эмиссия метана с донных отложений, находящихся в перемешанном слое, в основном компенсируется окислением в этом слое. При этом, диффузионный поток метана через термоклин очень мал. Возможные эффекты перемешивания в термоклине, вызванные сейшмами и другими внутренними волнами, были учтены искусственным увеличением минимального ко-

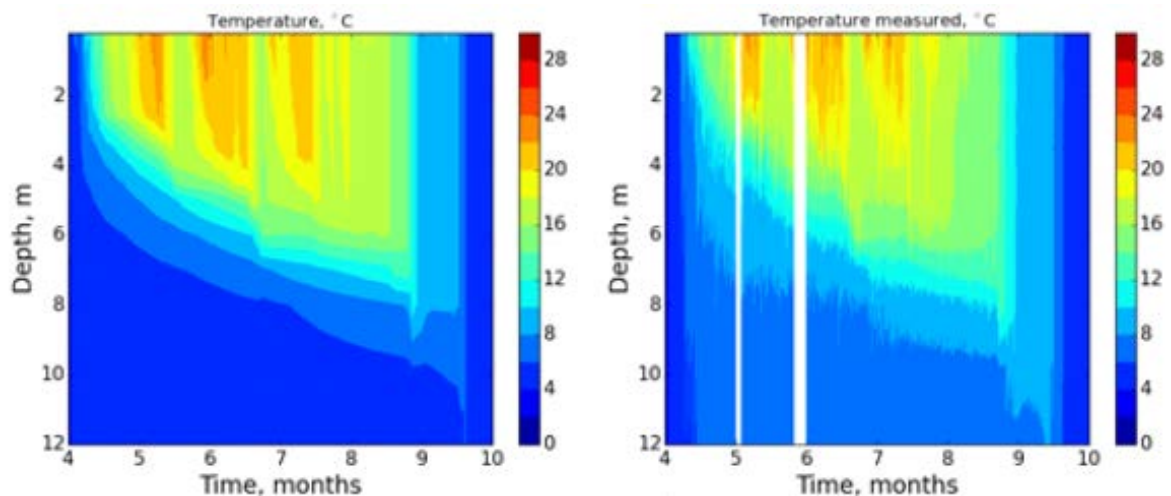


Рис. 1. Температура воды в оз. Куйваярви, 2014 г., по данным модели (а) и наблюдений (б).

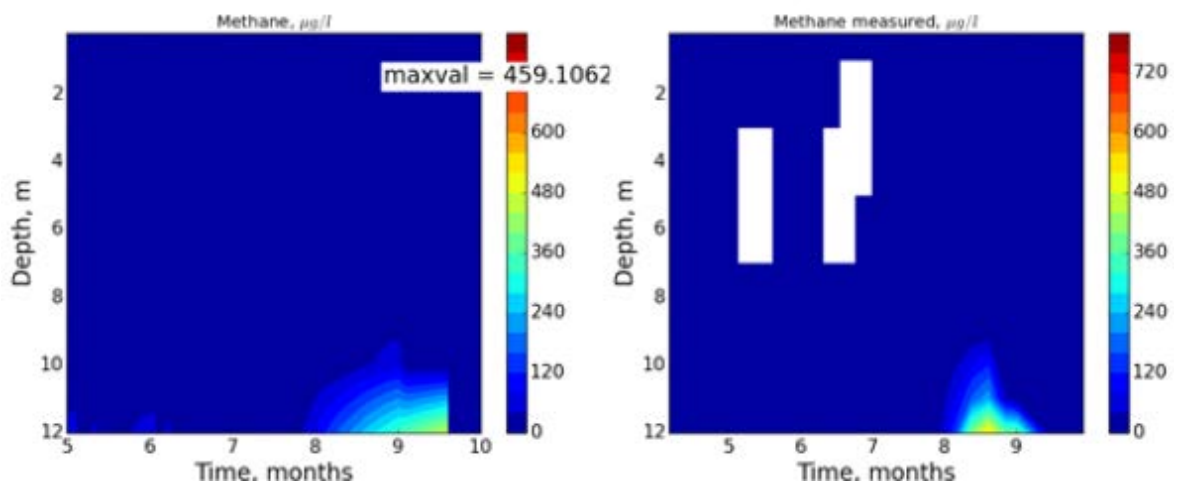


Рис. 2. Концентрация метана в оз. Куйваярви, 2014 г., по данным модели (а) и наблюдений (б).

эффицент диффузии. Однако, это не привело к увеличению концентрации метана в перемешанном слое, поскольку наряду с увеличением потока метана через термоклин снизу происходит усиление диффузии кислорода сверху. Численные эксперименты также показывают, что учет поверхностных сейш приводит к ламинаризации в гипolimнионе (коэффициент диффузии в  $k$ - $\epsilon$  модели падает до «молекулярного» значения), что вызывает раннее, по сравнению с наблюдениями, накопление метана у самой глубокой точки водоема.

#### Литература:

1. Bastviken, D. et al., 2008. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and  $CH_4$  emissions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G2), p.n/a–n/a. Available at: <http://dx.doi.org/10.1029/2007JG000608>.
2. Bastviken, D. et al., 2011. Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink. *Science*, 331(6013), p.50. Available at: <http://www.sciencemag.org/content/331/6013/50.abstract>.
3. Downing, J.A. et al., 2006. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography*, 51(5), pp.2388–2397. Available at: <http://doi.wiley.com/10.4319/lo.2006.51.5.2388>.
4. Eerola, K. et al., 2014. Impact of partly ice-free Lake Ladoga on temperature and cloudiness in an anticyclonic winter situation – a case study using a limited area model. *Tellus A*, 66. Available at: <http://www.tellusa.net/index.php/tellusa/article/view/23929/xml>.
5. Hari, P. & Kulmala, M., 2005. Station for Measuring Ecosystem–Atmosphere Relations (SMEAR II). *Boreal Env. Res.*, 10, pp.315–322.
6. Martynov, A. et al., 2012. Interactive lakes in the Canadian Regional Climate Model, version 5: the role of lakes in the regional climate of North America. *Tellus A*, 64. Available at: <http://www.tellusa.net/index.php/tellusa/article/view/16226/xml>.
7. McGinnis, D.F. et al., 2006. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C9), p.n/a–n/a. Available at: <http://dx.doi.org/10.1029/2005JC003183>.
8. Stefan, H.G. & Fang, X., 1994. Dissolved oxygen model for regional lake analysis. *Ecological Modelling*, 71(1–3), pp.37–68. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304380094900752>.
9. Stepanenko, V., Jöhnk, K. & Machulskaya, E., 2014. Simulation of surface energy fluxes and stratification of a small boreal lake by a set of one-dimensional models. *Tellus A*, 1, pp.1–18. Available at: <http://www.tellusa.net/index.php/tellusa/article/view/21389>.
10. Svensson, U., 1978. A mathematical model of the seasonal thermocline. *Lund Inst. of Technol.*
11. Tan, Z., Zhuang, Q. & Walter Anthony, K., 2015. Modeling methane emissions from arctic lakes: Model development and site-level study. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, p.n/a–n/a. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/2014MS000344>.
12. Tranvik, L.J. et al., 2009. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*. Available at: [http://depot.knaw.nl/6255/1/Tranvik\\_ea\\_4667.pdf](http://depot.knaw.nl/6255/1/Tranvik_ea_4667.pdf).
13. Walker, R.R. & Snodgrass, W.J., 1986. Model for Sediment Oxygen Demand in Lakes. *Journal of Environmental Engineering*, 112(1), pp.25–43. Available at: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1986\)112:1\(25\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9372(1986)112:1(25)).
14. Степаненко, В.М. и др., 2011. Моделирование эмиссии метана из озер зоны вечной мерзлоты. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 47(2), pp.275–288.
15. Степаненко, В.М. и Лыкосов, В.Н., 2005. Численное моделирование процессов теплообмена в системе водоем – грунт. *Метеорология и гидрология*, (3).

## Моделирование мезомасштабных стратифицированных течений над крутыми препятствиями различной формы

Юдин М.С.

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

Настоящая работа является продолжением работы по расчету с помощью с двумерной негидростатической модели конечных элементов распространения сформировавшегося холодного атмосферного фронта над орографическими препятствиями различной формы. Приводятся результаты моделирования скоростей гравитационных течений при обтекании крутых препятствий в

стратифицированной атмосфере для крутого холма и горной долины. Сравнение проведенных модельных расчетов с имеющимися в литературе данными показывает, что модель качественно описывает динамику скоростей гравитационного течения над этими препятствиями.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14-01-00125-а) и Президиума РАН (программа 43).*

## Simulation of mesoscale stratified flows over steep obstacles of various shapes

Yudin M.S.

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

### INTRODUCTION

Gravitational flows in the atmosphere take place in a variety of forms: breeze fronts, storm flows etc. Phenomena of great importance are cold atmospheric fronts propagating near the surface with high speeds. These fronts may be retarded and changed in shape under the influence of the underlying surface. The retardation of a frontal system on the windward side of a mountain is a commonly observed phenomenon.

Atmospheric gravity currents occupy a wide range of length scales from several meters to thousands of kilometers. These currents can be subdivided into classes varying from micro to macroscales. Mesoscale flows lie in an interval approximately from 2 to 2 thousand kilometers. The flows of interest in the present study are mesoscale currents governed mainly by local orographic obstacles. These flows are relatively shallow: they belong to the atmospheric boundary layer and range only a few kilometers from the surface in the lower atmosphere.

Mathematical models of atmospheric phenomena have become an important tool in forecasting the dynamics of atmospheric fronts. These models must contain not only efficient and accurate solvers of the governing equations, but also accurately describe the orographic peculiarities of the terrain. The effects of orography are usually taken into account in these models by introducing systems of coordinates that follow the orography (see, for instance, [1]). In these coordinates the calculation domain becomes rectangular and can be easily divided into a finite-difference grid. An advantage of such transformations is that the boundary conditions at the surface can be taken into account in a relatively simple way.

There are also serious disadvantages of these coordinate systems. The coordinates are often non-orthogonal. Also, they produce additional complicated terms in the governing equations. All these facts make it difficult to conserve in the discretized system the important physical invariants of the original system of partial differential equations. It can also be shown that such transformations are valid only for not too steep orography. Therefore the terrain to be discretized must be rather smooth. In addition, the use of these coordinates in meteorological mathematical models may cause numerical instability in difference approximations that have been previously quite stable in the models without orography [2].

To avoid these difficulties, it seems natural to use mathematical models based on discretizations of finite elements [2]. Such an approach was employed in paper [3] to construct a two-dimensional non-hydrostatic finite-element model for the simulation of the propagation of a well-formed cold atmospheric front over orographic obstacles of various shapes. The finite-element approximations are valid for piecewise-continuous functions. Therefore, it is possible to use this approach in case of orographic structures with high steepness.

The present study is an extension of [3]. It deals with calculation and comparison of velocities of gravitational currents over steep terrain in a stratified atmosphere.

### MODEL FORMULATION

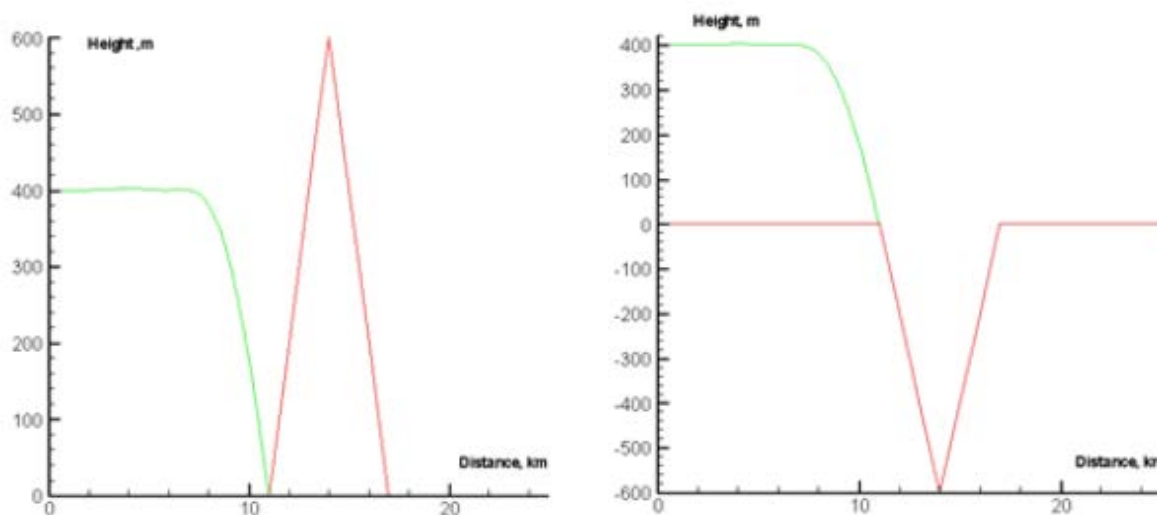
The Navier-Stokes equations for a compressible air flow are used here for the calculation of gravity flows in a stratified atmosphere. The exact form of the equations is given in [3]. A more detailed description of the model can be found, for instance, in [4]. In the present study, a two-dimensional finite-element version of the model is employed [2]. The time discretization is similar to that proposed in [5]. It is also described in paper [3].

### NUMERICAL EXPERIMENTS

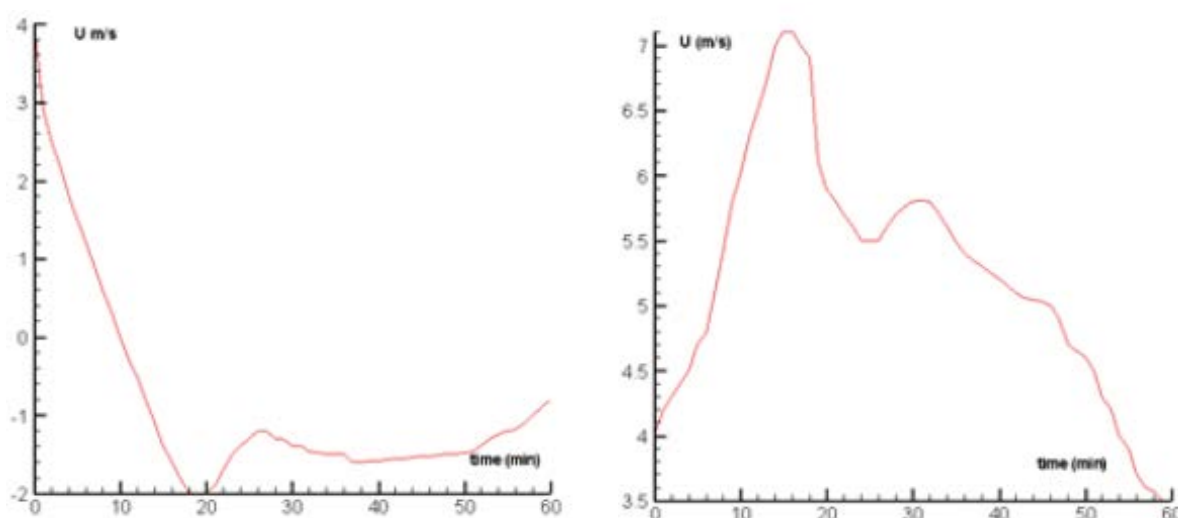
The results of a series of calculations of the velocities gravity currents over steep obstacles with various values of stratification. The model parameters are taken from paper [1]. In that paper a cold front propagating over an axially-symmetric obstacle in the form of a bell-shaped hill and a mountain valley is simulated with a finite-difference model. The height of the hill and, respectively, the depth of the valley is 600 m. The calcula-

tion domain is 25x25 km. In contrast to [1], where the front is generated by a volume of cold air, in the present study the front is initially given in the form of a step- function of 400 m in height.

Figure 1 shows the initial location of the front as it meets with the obstacle: hill (left) and valley (right) at neutral stratification. Figure 2 shows the results of calculations of the evolution of the normal to the front velocity component at the same spatial points.



**Figure 1.** Initial location of the front as it meets with the obstacle : hill (left) and valley (right). Neutral stratification.



**Figure 2.** Results of calculations of the evolution of the normal to the front velocity component at the same spatial points. Neutral stratification.

In paper [6] a table was given for the calculated values of the windward and leeward velocities of a cold front propagating over steep obstacles with varies shapes and stratifications. The height of the front was mistakenly given 200 m greater than it was actually taken in the calculations. The corrected table is given below.

**Table 1.** Cold front propagation over orographic obstacles of various shapes and stratifications

OBSTACLE HEIGHT (m)	INITIAL FRONT HEIGHT (m)	STRATIFICATION (K / 100m)	WINDWARD SPEED (m /s)	LEEWARD SPEED (m /s)
0	400	0.0	4.5	4.5
0	400	0.35	5.1	5.1
600	400	0.0	4.4	3.7
600	400	0.35	4.9	2.7
600	100	0.35	3.0	0.0
600	700	0.35	7.5	4.5
- 600	400	0.0	4.5	3.9

Figure 2 shows that the velocities are in oscillation modes with a period of 15-20 minutes, which corresponds to calculations performed in [1]. A reasonable agreement is obtained between these data and the results of paper [1] calculated with a finite-difference atmospheric model and different numerical scheme for the temperature. In the paper the front is generated by a volume of cold air, but in the present study the front is initially given.

## CONCLUSION

The results of these tentative calculations show that the finite-element model can be used for the simulation of atmospheric front propagation over steep orographic obstacles.

## ACKNOWLEDGEMENT

*This work was supported by the Presidium of RAS, under Program 43, and the Russian Foundation for Basic Research, under Grant 14-01-00125-a.*

### References:

1. Bischoff-Gauss I., Gross G., Wippermann F. Numerical studies on cold fronts. Part 2: Orographic effects on gravity flows // *Meteorol. Atmos. Phys.* - 1989- V.40. - P.159--169.
2. Yudin M.S., Wilderotter K. Simulating atmospheric flows in the vicinity of a water basin. // *Computational Technologies*. V.11, - No. 3,-P. 128-134.
3. Yudin M.S., Study of orography and stratification effects in atmospheric front propagation// *GEO-Siberia-2014. International Sci. Conf.,Proceedings-Novosibirsk:SGGA,2014.v.1.-P.146-150.*, (in Russian).
4. Yudin, M.S. Numerical simulation of orographic waves // *Bull. Nov. Comp. Center, Num. Model. in Atmosph.*, - 1995. - V.2. - P. 101-107.
5. Ikawa M. Comparison of some schemes for non-hydrostatic models with Orography // *J. Meteor. Soc. Japan.*-1988- V. 66,- No. 5,- P. 753-776.
6. Yudin M.S., Atmospheric front dynamics over steep orography: finite element model// *ENVIROMIS-2014. International Sci. Conf.,Proceedings,2014.*,P.71-73.
7. Pielke R.A. *Mesoscale Meteorological Modeling*. Orlando: Academic Press, 1984.
8. Marchuk G.I. *Mathematical Modelling in the Problem of the Environment*. North Holland, Amsterdam, 1982.
9. Marchuk G.I., *Numerical Methods in Weather Prediction*, Academic Press, 1974.
10. Penenko V.V., Aloyan A.E. *Models and methods for environmental problems*. Novosibirsk: Nauka, 1985 (in Russian).
11. Davies, H. C., On the orographic retardation of a cold front // *Beitr. Phys. Atmos.* 1984. \ Vol.57, P.409-418.
12. Schumann U. Influence of mesoscale orography on idealized cold fronts // *J. Atmos. Sci.* \ 1987. \ Vol.44, \ No23. \ P.3423--3441.
13. 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.
14. Wilkinson J.H., Reinsch C., *Handbook for Automatic Computation, Linear Algebra II*, Springer, New York, 1971.
15. Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. *Numerical Recipes*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1986.
16. Ritchie H. Semi-Lagrangian advection on a Gaussian grid // *Mon. Wea. Rev.* 1987. \ Vol.115. \ P.136-146.
17. Krupchatnikoff V.N., Fomenko A.A. Semi-Lagrangian semi-implicit scheme of transport in the climatic model ECSib., Preprint ICMMG, 1997 (in Russian).

## Features of NDVI variations of permafrost regions in the post-fire period

Varlamova E.V., Solovyev V.S.

Yu.G. Shafer Institute of Space Physics Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia  
E-mail: varlamova1@ikfia.sbras.ru, solovyev@ikfia.sbras.ru

The vegetation of the permafrost regions is sensitive "indicator" of the changes in the biosphere caused by global climate change. The study of NDVI variations in permafrost region of East Siberia were carried out on remote sensing (Terra, NOAA) and model (GLDAS) data. Comparison of NDVI, air temperature and soil moisture are conducted. The features of NDVI variations of Central Yakutia territory on a phase of vegetation cover restoration in the post-fire period are presented.

# Особенности вариаций NDVI мерзлотных ландшафтов после лесных пожаров

Варламова Е.В., Соловьев В.С.

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия  
E-mail: varlamova1@ikfia.sbras.ru

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях глобального изменения климата мониторинг изменений природной среды Арктики и прилегающих территорий является одной из наиболее актуальных задач экологии. Как важнейший компонент биосферы и источник ресурсов, растительный покров является чувствительным «индикатором» изменений в биосфере и климате. В мерзлотных регионах состояние растительности зависит от изменений климатических факторов и гидротермического режима мерзлотных почв. За последние 30 лет на северных широтах наблюдается тенденция роста вегетационного индекса NDVI [1-7].

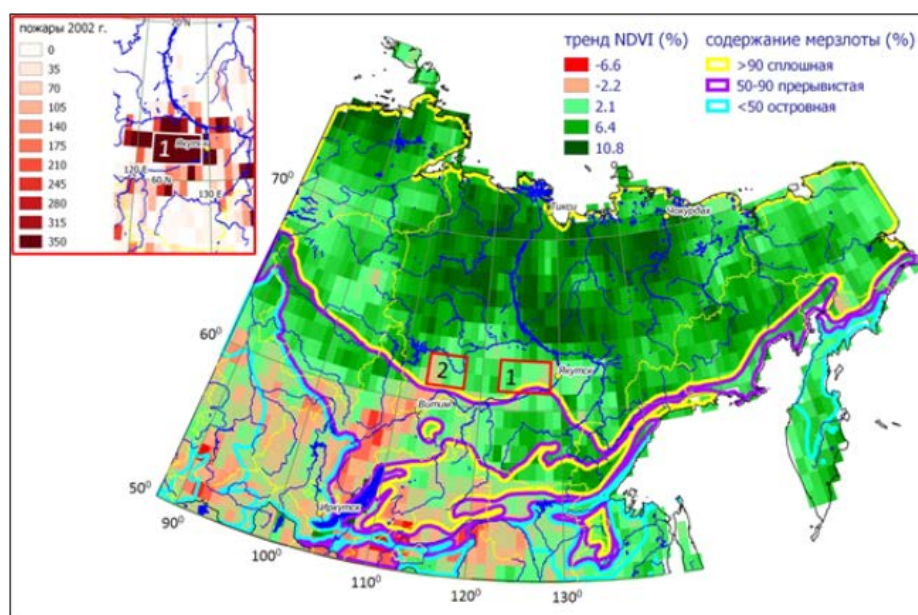
В работе приведены результаты исследования изменений индекса NDVI растительности мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири по данным спутниковых наблюдений. Показаны особенности годовых вариаций NDVI на территории центральной Якутии на фазе восстановления растительного покрова после крупномасштабных лесных пожаров.

## ДАННЫЕ

В работе использованы данные GIMMS/NOAA за период 1982-2001 гг. и MODIS/Terra – 2000-2012 гг. Вегетационный сезон рассматривался с мая по сентябрь. По данным модели GLDAS были построены влажность почвы на глубинах 40-100 и 100-200 см. Значения температуры приземного слоя воздуха взяты из архива данных Росгидромета. Количество и площадь лесных пожаров двух лесхозов оценивалась по данным ГУ «Авиалесоохрана». Все данные взяты из открытых источников (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Giovanni>; <http://glcf.umd.edu/data/gimms>; <http://meteo.ru/data>). Карта распределения лесных пожаров в центральной Якутии построена по данным спутникового мониторинга (NOAA), осуществляемого в ИКФИА СО РАН (г. Якутск).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены карта трендов NDVI растительного покрова в азиатской части России, построенная за период май-сентябрь 2000-2012 гг., а также границы зон с различной степенью содержания вечномерзлых грунтов, показанные различными цветами: желтая – граница зон сплошной мерзлоты, фиолетовая – прерывистой мерзлоты и голубая – островной мерзлоты. Согласно цветовой градации рис. 1 положительным значениям тренда NDVI соответствуют оттенки зеленого цвета, отрицательным – оттенки красного цвета. Из рисунка видно, что на всей территории сплошной многолетней мерзлоты наблюдается положительный тренд NDVI. Зона с наибольшими значениями (~ 6-11%) тренда NDVI располагается севернее Приленского плато. На самом плато положительный тренд NDVI составляет ~



**Рис. 1.** Карта трендов NDVI растительного покрова в азиатской части России (май-сентябрь 2000-2012 гг.), лесных пожаров 2002 г., границы зон распространения вечномерзлых грунтов.

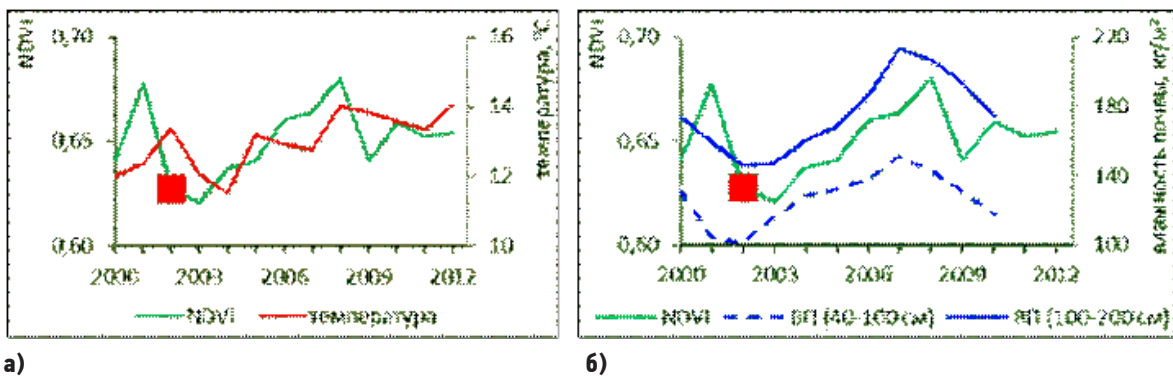
2%. Зоны с отрицательными значениями трендов NDVI наблюдаются в области прерывистой и островной мерзлоты ниже 60 град. с.ш.

В центральной части Якутии на Приленском плато красными прямоугольниками отмечены исследуемые участки 1 и 2. Мерзлотные характеристики (содержание мерзлоты, температура грунтов, льдистость), климат, рельеф и тип растительности участков одинаковы. Различаются участки только наличием/отсутствием лесных пожаров на их территории. В верхнем левом углу рис. 1 показана карта очагов лесных пожаров, которыми в 2002 г. был полностью охвачен участок 1. На участке 2 за исследуемый период пожаров не наблюдалось.

На рис. 2 показаны графики межгодовых вариаций NDVI, температуры воздуха и влажности почвы на участке 1. График вариаций NDVI показан зеленым цветом, температуры приземного слоя воздуха – красным, влажность почвы (ВП) на глубине 40-100 см – штриховым синим, на глубине 100-200 см – сплошным синим. Пожароопасный 2002 год отмечен на графике красным маркером. Как следует из рис. 2, крупномасштабные пожары 2002 г. вызвали резкий спад NDVI. В последующие годы (2004-2008 гг.) наблюдается устойчивый рост NDVI. При этом влажность почвы на двух уровнях глубины также имеет непрерывный рост (до 2007 г.). Следует отметить, что почва на глубине 100-200 см более влагонасыщена, по сравнению с верхними слоями.

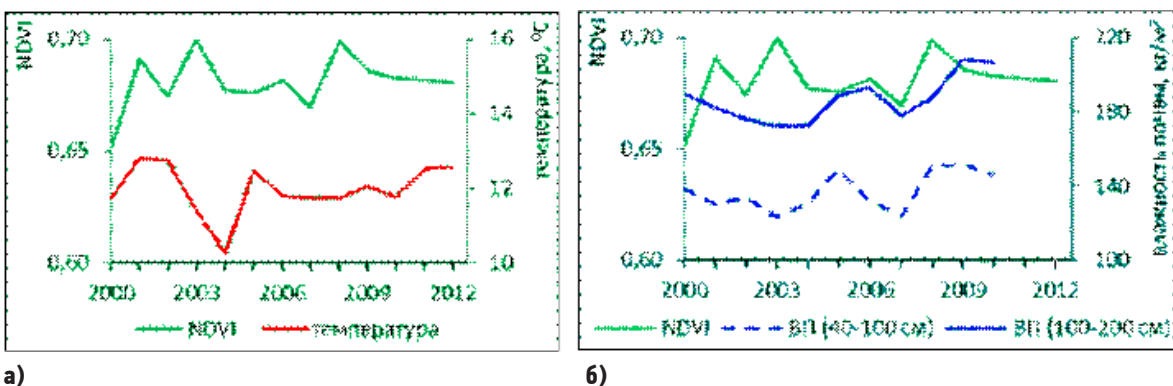
Одновременный рост NDVI и влажности почвы (рис. 2б) объясняется тем, что в условиях резкоконтинентального климата центральной Якутии, характеризующегося низким уровнем осадков (200-250 мм), влагообеспечение растительности в значительной мере происходит за счет сезонной оттайки многолетнемерзлых грунтов. Очевидно резкое падение альbedo поверхности исследуемого участка вследствие лесных пожаров 2002 г. вызвало повышение температуры почвы в результате увеличившегося радиационного нагрева, что спровоцировало интенсивную оттайку нижележащих мерзлых грунтов, следовательно, повышение влажности и, как результат, – рост NDVI. Это подтверждается результатами работы [8], где показано, что пожары 2002 г. в центральной Якутии вызвали повышение температуры грунта на 0,5-10С с увеличением мощности сезонно-талого слоя на 0,3-0,5 м.

С 2007 г. влажность почвы начинает снижаться, через год начинается спад NDVI. Предположительно с ростом NDVI в послепожарные годы начался рост альbedo исследуемого участка. В результате уменьшения потока достигающей почвы тепловой радиации эффективность оттайки упала, соответственно, снизилась влажность почвы, что, спустя год, привело к соответствующему снижению NDVI.



а) б)  
**Рис. 2.** Вариации NDVI, температуры приземного слоя воздуха и влажности почвы на глубине 40-100 и 100-200 см на участке 1.

На рис. 3 также показаны графики межгодовых вариаций параметров (NDVI, температура воздуха, влажность почвы) для участка 2, где лесные пожары за исследуемый период не наблюдались. Легенда графиков рис. 3 аналогична с рис. 2. Как следует из рис. 3 (б), вариации NDVI и влажности почвы участка 2 имеют незначительные межгодовые колебания.



а) б)  
**Рис. 3.** Вариации NDVI, температуры приземного слоя воздуха и влажности почвы на глубине 40-100 и 100-200 см на участке 2.



На рис. 4 показаны вариации NDVI и влажности почвы для участка 1 за более длинный период 1982-2012 гг. Графики вариаций NDVI показаны зеленым цветом: за период 1982-2001 гг. NDVI построен по данным GIMMS (штриховая линия), а за период 2000-2012 гг. – по данным MODIS (сплошная линия). Отметим, что вариации NDVI по двум наборам данных хорошо согласуются. Влажность почвы (ВП) на глубине 100-200 см показан синим цветом. Пожароопасные сезоны 1986, 1993 и 2002 гг. отмечены на графике красными маркерами, степень лесопожарной активности оценивалась по данным наземных наблюдений.

Из рис. 4 видно, что характер поведения NDVI и влажности почвы на участке 1 после лесных пожаров 1986 и 1993 гг. аналогичны ситуации с 2002 г. Разница наблюдается в длительности роста рассматриваемых параметров – в первых двух случаях она короче на 1-2 года. Возможно это обусловлено разным уровнем лесопожарной активности в указанные годы. По данным ГУ «Авиалесоохрана» общая площадь лесных пожаров на территории Горного и Орджоникидзевского лесхозов, на территории которых находится участок 1, составила: в 1986 г. (число пожаров 135) – 28166 Га; в 1993 г. (число пожаров 83) – 30514 Га; в 2002 г. (число пожаров 151) – 212823 Га. Т.е. лесные пожары 2002 г. оказались на порядок катастрофичней и, соответственно, времени на восстановление NDVI и уровня влажности почвы потребовалось больше. Следует отметить резкое падение NDVI в 1998 г. при отсутствии какой-либо заметной реакции в поведении графика влажности почвы. Чем оно вызвано пока остается невыясненным.

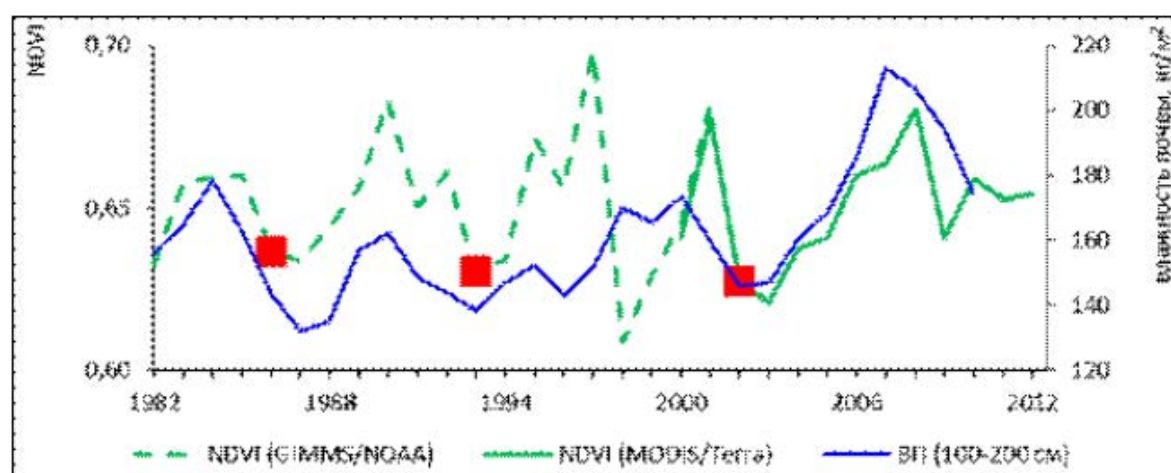


Рис. 4. Вариации NDVI и влажности почвы на глубине 100-200 см на участке 1.

## ВЫВОДЫ

В результате исследований межгодовых вариаций индекса растительности в мерзлотном регионе показано, что наиболее высокая тенденция роста индекса NDVI наблюдается в зоне сплошной многолетней мерзлоты, севернее Приленского плато. Отрицательные значения трендов NDVI наблюдаются в области прерывистой и островной мерзлоты ниже 60 град. с.ш.

В центральной части Якутии после крупномасштабных лесных пожаров 2002 г. в течение нескольких (5-6) лет наблюдался устойчивый рост индекса NDVI, сопровождаемый таким же ростом влажности почвы. Далее отмечается снижение рассматриваемых параметров, что можно интерпретировать как относительное восстановление температурного режима грунтов мерзлотного региона. Аналогичный эффект в поведении NDVI наблюдался в случае лесных пожаров 1986 и 1993 гг., но с меньшей длительностью, т.к. в этих случаях уровень активности лесных пожаров был на порядок ниже, чем в 2002 г.

### Литература:

1. N. Delbart, G. Picard, T. Le Toans, L. Kergoat, S. Quegan, I. Woodward, D. Dye, V. Fedotova. Spring phenology in boreal Eurasia over a nearly century time scale // *Glob. Chang. Biol.* 2008. V. 14. iss. 3. P. 603–614.
2. E. Pudas, M. Leppala, A. Tolvanen, J. Poikolainen, A. Venalainen, E. Kubin. Trends in phenology of *Betula pubescens* across the boreal zone in Finland // *Int. J. Biometeorology.* 2008. V. 52. iss. 4. P. 251–259.
3. J. Ronald Eastman, Florencia Sangermano, Elia A. Machado, John Rogan, Assaf Anyamba. *Global Trends in Seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982–2011* // *Remote Sensing.* 2013. V. 5. iss. 10. P. 4799–4818.
4. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Исследование динамики индекса растительности арктической зоны Восточной Сибири по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2012. Т. 9. № 1. С. 65-70.
5. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Мониторинг растительного покрова арктической зоны Восточной Сибири по спутниковым данным // *Наука и образование.* 2012. №2(66). С. 58-62.

6. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Исследование вариаций индекса NDVI тундровой и таежной зон Восточной Сибири на примере территории Якутии // *Оптика атмосферы и океана*. 2014. Т. 27. № 10. С. 891–894.
7. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Особенности сезонных вариаций индекса растительности NDVI в зоне вечной мерзлоты / *Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы международной науч. конф. / науч. ред. Е.А. Ваганов; отв. за вып. А.В. Машукова – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. С. 52-56.*
8. Федоров А.Н., Мачимура Т., Герасимов Е.Ю. и др. Влияние пожаров на мерзлотные ландшафты в Центральной Якутии // *Наука и образование*. 2008. №4. С. 64-67.

## The study of the spatial distribution of small thermokarst lakes in Western Siberia based on ultrahigh resolution satellite images

<sup>1</sup>Polishchuk V.Yu., <sup>2</sup>Bryksina N.A., <sup>3</sup>Polishchuk Yu.M.

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological System SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

<sup>3</sup>Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: [liquid\\_metal@mail.ru](mailto:liquid_metal@mail.ru), [bryksina83@gmail.com](mailto:bryksina83@gmail.com), [yupolishchuk@gmail.com](mailto:yupolishchuk@gmail.com)

Global warming, the most prominent in the northern latitudes of the planet, leading to an increase in the depth of seasonal thawing, which is accompanied by a decrease in the strength of permafrost and a violation of infrastructure. The main sources of emissions of these gases in the northern territories are considered marshes and wetlands landscapes, thermokarst lake plains, and others. According to [1], a quarter of the world's methane is concentrated in Western Siberia, a large part of which is occupied by a kind of bog-lake landscapes with countless lakes of various sizes and ages.

According to [2], the most active source of methane emissions in the Arctic and sub-Arctic areas are small thermokarst lakes with an area of less than 0.01-0.02 hectares, which is associated with an active thermokarst erosion of coastal boundaries, increasing methane emissions [3]. Because of their small size these lakes are usually not taken into account in the forward estimates of the contribution of methane to the total greenhouse effect. In connection with this remote study the distribution patterns on the areas of thermokarst lakes in the area of permafrost of the Arctic territories is attracting considerable interest. In [4-6] studied the distribution laws of thermokarst lakes with large water surface area (more than 1 ha) from remote sensing data obtained from satellite imagery medium resolution Landsat. However, the distribution of small lakes they studied areas currently underserved. In connection with the purpose of this paper is to study the distribution of remote areas by small thermokarst lakes in the plains in the permafrost zone of Western Siberia.

The studies were conducted using ultrahigh resolution satellite images. To conduct a study on the territory of Western Siberia permafrost were selected eight test sites.

Space satellite imagery was used for research with a spatial resolution of 0.6 m. The selected satellite imagery to eliminate the influence of changes of water content in the study area thermokarst-lake landscapes obtained for a limited time period of warm summer season, not more than two months (from June 28 to 24 August).

In conclusion, we present the main results of the study of the statistical distribution of distance on the areas of thermokarst lakes of small size. Under low in our work are understood thermokarst lakes with an area of up to 200 - 250 m<sup>2</sup>. These lakes cause lately considerable interest among researchers thermokarst processes in the area of permafrost in the Arctic regions due to the fact that they are considered as important sources of methane emissions to the atmosphere in the territory of thermokarst lake-plains in areas of permafrost. The studies were performed on the 8 test sites selected in different zones of Western Siberia permafrost lake area were determined from satellite images ultrahigh resolution. To eliminate the influence of changes of water content in the study area, all pictures are selected in a relatively short period of daylight saving time (less than two months).

It is shown that the area of lakes in the zone of continuous distribution of permafrost on average 1.5-2 times the size of the lakes in the area of discontinuous permafrost. Analysis of the experimental data on the size of thermokarst lakes showed that the histogram distribution of lakes on the areas allow them approximations of degree and exponential functions with a sufficiently high level of determination, but approximating function power form gives higher credibility.

**References:**

1. Zhiliba A.I., Vandysheva G.A., Gorbunov K.G., Zakharov V.I. Global climate change: "methane bomb" - pseudoscientific myth or a potential scenario? // *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 2011. Vol.2. 1, number (3). EDCCrev0001.
2. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Audry S., Viers J., and Dupre B. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia // *Biogeosciences*, 2011. Vol. 8. P. 565-583. doi: 10.5194/bg-8-565-2011.
3. Walter, K. M., Smith L. C., Chapin F. S. Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget // *Phil. Trans. R. Soc.*, 2007. Vol. 365. P. 1657-1676. doi:10.1098/rsta.2007.2036.
4. Polishchuk V.Y., Polishchuk Yu. M. Geo Simulation modeling fields thermokarst lakes in areas of permafrost. - *Khanty-Mansiysk: UTI SUB*, 2013. 129 p.
5. Polishchuk Yu. M., Polishchuk V. Y. Modeling spatio-temporal dynamics of thermokarst in areas of permafrost // *Information Systems and Technology*, 2011. № 3. S. 25-31.
6. Polishchuk V. and Polishchuk Yu. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Chapter 6 // *In Book: Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems (Edited by O. Pokrovsky)*, NY: Nova Science Publishers, 2014. P. 205-234. doi: 10.978-94-007-4569-8.

## Изучение пространственного распределения малых термокарстовых озер Западной Сибири на основе спутниковых снимков сверхвысокого разрешения

<sup>1</sup>Полищук В.Ю., <sup>2</sup>Брыксина Н.А., <sup>3</sup>Полищук Ю.М.

<sup>1</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup> Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

<sup>3</sup> Институт химии нефти СО РАН, Томск, Россия

E-mail: liquid\_metal@mail.ru, bryksina83@gmail.com, yupolishchuk@gmail.com

Глобальное потепление климата, наиболее явно проявляющееся в северных широтах планеты, приводит к увеличению глубины сезонного протаивания, что сопровождается снижением прочности многолетнемерзлых грунтов и нарушением объектов инфраструктуры. Мерзлота, являясь хранилищем законсервированного углерода в обширных мерзлых торфяных болотах Сибири, при повышении среднегодовой температуры воздуха может стать источником возникновения еще большего потепления при высвобождении парниковых газов [1], среди которых метан и углекислый газ являются наиболее важными в связи с их существенным вкладом в парниковый эффект. В качестве основных источников эмиссии этих газов на северных территориях рассматриваются болота и переувлажненные ландшафты, термокарстовые озерные равнины и др. По оценкам [2], четверть мирового объема метана сосредоточена в Западной Сибири, значительную часть территории которой занимают своеобразные болотно-озерные ландшафты с бесчисленным множеством озер разных размеров и возраста.

Согласно [3], наиболее активным источником эмиссии метана в арктических и субарктических районах являются малые термокарстовые озера с площадью менее 0,01-0,02 га, что связано с активной термокарстовой эрозией береговых границ, увеличивающей эмиссию метана [4]. Из-за своих малых размеров такие озера, как правило, не учитываются в прогнозных оценках вклада метана в общий парниковый эффект. В связи с этим дистанционное исследование закономерностей распределения по площадям термокарстовых озер в зоне мерзлоты арктических территорий вызывает значительный интерес. В [5-7] изучены законы распределения термокарстовых озер с большими площадями водного зеркала (более 1 га) по данным дистанционного зондирования, полученным по космическим снимкам среднего разрешения Landsat. Однако вопрос о распределении малых озер по их площадям изучен в настоящее время недостаточно. В связи с изложенным целью настоящей работы является дистанционное исследование распределения по площадям малых озер на территории термокарстовых равнин в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири.

Исследования проведены с использованием космических снимков сверхвысокого разрешения. Для проведения исследования на территории многолетней мерзлоты Западной Сибири были выбраны восемь тестовых участков, расположение которых дано на рис. 1, где также показаны зоны сплошного, прерывистого и островного распространения мерзлоты в соответствии с [8]. Как видно на рис. 1, пять участков находятся в зоне сплошной многолетней мерзлоты, два тестовых участка размещены в зоне прерывистой мерзлоты и один тестовый участок расположен в зоне островной мерзлоты.

Для проведения исследований использовались космические снимки спутника QuickBird с пространственным разрешением 0,6 м. Характеристика местоположения тестовых участков и время съемки даны в табл. 1, из которой видно, что выбранные космические снимки для исключения влияния изменений водности на территории исследований термокарстово-озерных ландшафтов получены в течение ограниченного по времени теплого периода летнего сезона, не превышающего двух месяцев (с 28 июня по 24 августа). На каждом из тестовых участков определялось от нескольких сотен до нескольких тысяч термокарстовых озер. Обработка изображений и анализ полученных данных о площадях озер проводилась с использованием стандартных средств геоинформационных систем ENVI 4.4 и ArcGIS 9.3.

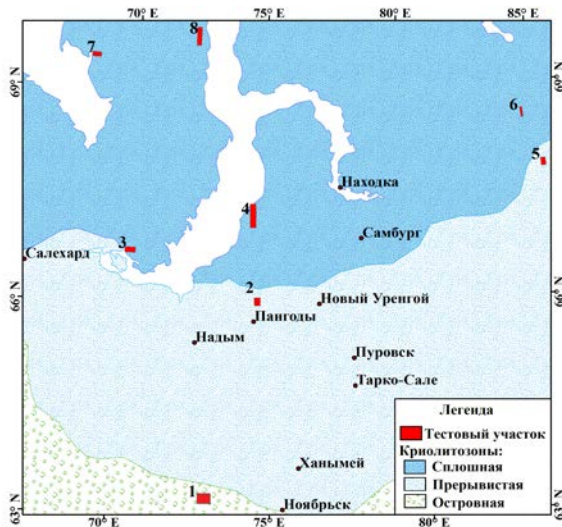


Рис. 1. Расположение тестовых участков на территории мерзлоты Западной Сибири

Для исследования распределения малых термокарстовых озер для каждого тестового участка были сформированы массивы данных, включающие озера с площадью до 200 м<sup>2</sup>. Для общей характеристики сформированных массивов данных о площадях малых озер в табл. 1 приведены данные об основных статистических параметрах выборочных совокупностей малых термокарстовых озер на каждом тестовом участке. Доверительные интервалы в указанной таблице рассчитывались стандартным образом для доверительной вероятности 95 %.

Таблица 1. Статистические характеристики выборочных совокупностей малых озер на разных тестовых участках

№ ТУ	Тип мерзлоты	Объем выборки	Среднее значение площади озер, м <sup>2</sup>	Стандартное отклонение, м <sup>2</sup>	Полуширина доверительного интервала, м <sup>2</sup>
1	Островная	702	39,02	47,69	3,53
2	Прерывистая	1576	40,34	39,52	1,95
5		3663	22,62	36,85	1,19
3	Сплошная	6725	41,97	46,11	1,10
4		283	44,92	47,84	5,57
6		126	54,39	50,87	8,88
7		456	66,66	50,95	4,68
8		509	53,36	45,91	3,99

Для всех исследованных ТУ были построены гистограммы распределения числа малых термокарстовых озер по их площадям на основе результатов дистанционного измерения площадей озер. На рис. 2 для иллюстрации приведены гистограммы распределения озер по площадям, полученные по экспериментальным данным на трех тестовых участках, расположенных в разных зонах мерзлоты. На рис. 2 обозначено:

$K_i$  – относительное число озёр, попадающих в каждый  $i$ -й интервал гистограммы, определяемое по формуле:

$$K_i = \frac{n_i}{N},$$

где  $n_i$  – число озёр в каждом интервале гистограммы;

$i$  – номер интервала;

$N$  – суммарное количество озёр на исследуемом тестовом участке.

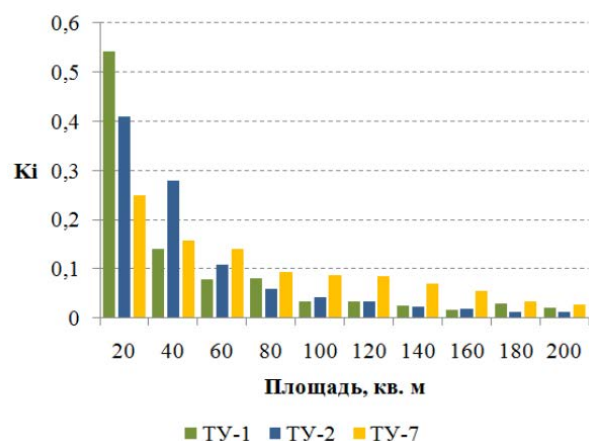
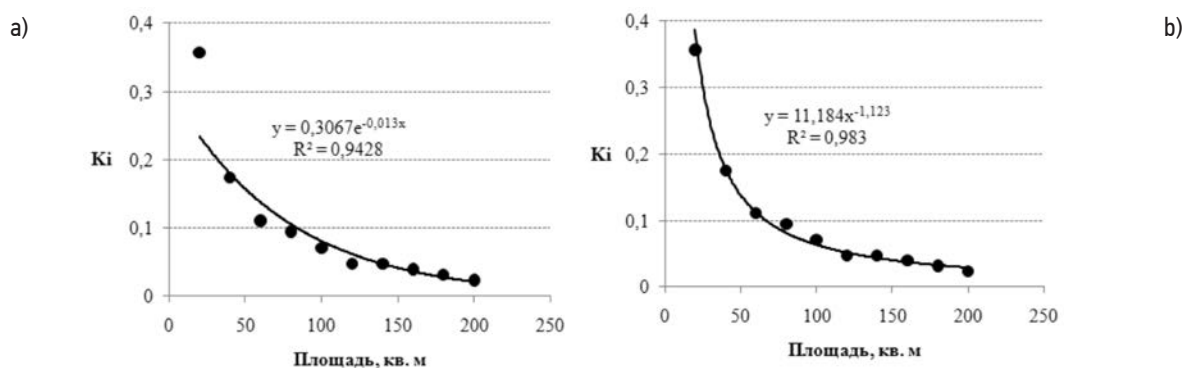


Рис. 2. Примеры гистограмм распределения озер по площадям на тестовых участках в разных зонах мерзлоты.

По аналогии с [6, 7] в настоящей работе проведена аппроксимация гистограмм распределения малых озер по их площадям экспоненциальной функцией на всех ТУ. На рис. 3а представлен пример гистограммы, полученной по данным на ТУ-6, допускающей экспоненциальную аппроксимацию с высоким уровнем коэффициента детерминации (0,94). Укажем, что гистограммы распределения малых озер по площадям на всех тестовых участках допускают и аппроксимацию степенной функцией, что на примере гистограммы на ТУ-6 иллюстрируется графиком на рис. 3б также с высоким уровнем детерминации (0,98).



**Рис. 3.** Гистограмма распределения озер по данным на ТУ-6 и ее аппроксимации экспоненциальной (а) и степенной (б) функциями

В заключение приведем основные результаты дистанционного исследования статистического распределения по площадям термокарстовых озер малых размеров. Под малыми в нашей работе понимаются термокарстовые озера с площадью от единиц до 200 - 250 м<sup>2</sup>. Такие озера вызывают в последнее время значительный интерес у исследователей термокарстовых процессов в зоне мерзлоты на арктических территориях в связи с тем, что они рассматриваются в качестве важных источников эмиссии метана в атмосферу на территории озерно-термокарстовых равнин в зонах многолетней мерзлоты. Исследования выполнены на 8 тестовых участках, выбранных в разных зонах мерзлоты Западной Сибири. Площади озер определялись по космическим снимкам сверхвысокого разрешения, полученных со спутника QuickBird. Для исключения влияния изменений водности на территории исследований все снимки выбраны в сравнительно короткий период летнего времени (менее двух месяцев).

Показано, что площади озер в зоне сплошного распространения мерзлоты в среднем в 1,5-2 раза превышают размеры озер в зоне прерывистой мерзлоты. Анализ полученных экспериментальных данных о размерах термокарстовых озер показал, что гистограммы распределения озер по площадям допускают их аппроксимацию степенными и экспоненциальными функциями с достаточно высоким уровнем детерминации, однако аппроксимирующая функция степенного вида дает более высокую достоверность.

#### Литература:

1. Zimov S.A., Voropaev Y.V., Semiletov I.P., Davidov S.P., Prosiannikov S.F., Chapin III F.S., Chapin M.C., Trumbore S., Tyler S. *North Siberian lakes: a methane source fueled by Pleistocene Carbon* // *Science*, 1997. Vol. 277. P. 800-802.
2. Жилиба А.И., Вандышева Г.А., Грибанов К.Г., Захаров В.И. *Глобальные изменения климата: «метановая бомба» - наукообразный миф или потенциальный сценарий?* // *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*, 2011. Т.2. № 1 (3). EDCCrev0001.
3. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Audry S., Viers J., and Dupre B. *Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia* // *Biogeosciences*, 2011. Vol. 8. P. 565-583. doi: 10.5194/bg-8-565-2011.
4. Walter, K. M., Smith L. C., Chapin F. S. *Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget* // *Phil. Trans. R. Soc.*, 2007. Vol. 365. P. 1657-1676. doi:10.1098/rsta.2007.2036.
5. Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. *Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты.* – Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ, 2013. 129 с.
6. Полищук Ю.М., Полищук В.Ю. *Моделирование пространственно-временной динамики термокарста в зонах многолетней мерзлоты* // *Информационные системы и технологии*, 2011. № 3. С. 25–31.
7. Polishchuk V. and Polishchuk Yu. *Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost.* Chapter 6 // *In Book: Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems (Edited by O. Pokrovsky)*, NY: Nova Science Publishers, 2014. P. 205-234. doi: 10.978-94-007-4569-8.
8. *Атлас СССР / Отв. редактор Т.П. Сидоренкова.* М.: Главное управление геодезии и картографии при СМ СССР, 1984. 260 с.

## Mathematical model and computational method for investigation of a river stream

Churuksaeva V.V., Starchenko A.V.

Tomsk State University, Russia  
E-mail: chu.vv@mail.ru, starch@math.tsu.ru

Depth-averaged hydrodynamic models are widely used to numerically predict flows in natural basins. Modeling flow in rivers and coastal areas is a current problem of an environmental hydrodynamics that includes specific treatment of the free surface. The most general approach is to solve the full 3D equations, but as long as behavior of the free surface is influenced much more by the horizontal velocities than the vertical one and because the size of the spatial domain is very large, solving of depth averaged equation is the main approach in environmental problems.

This paper deals with an unsteady depth averaged flow model based on the RANS approach. Averaged turbulent stresses appearing in the model are computed from the depth averaged modification of the widely used model proposed by Launder & Spalding [1]. The staggered structured grid is used to discretize the spatial domain. The convective flux is discretized with MLU-scheme [2] and MUSCL-scheme. Solution of the discrete system is obtained with a SIMPLE iterative algorithm based on coupled correction of the depth and velocity fields on each time step.

To investigate the applicability of the model some numerical predictions were carried out. Two of them are: the open channel flow around bend and side discharge with contaminant into the moving flow. The results shows that the depth averaged model represents flow patterns near the bend, side inflows, and over complex bathymetry correctly and could be applied for modelling a river flow.

*The work is performed in the framework of the state assignment with the Ministry of education and science of Russian Federation (No.5.628.2014/K).*

### References:

1. Launder B.E., Spalding D.B. *The numerical computation of turbulent flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1974. Vol. 2. No. 3. pp. 269-289.
2. Noll B. *Evaluation of a bounded high-resolution scheme for combustor flow computations // AIAA Journal*. 1992. Vol. 30. No. 1. pp. 64-68.

## Математическая модель и численный метод для расчета течения в русле реки

Чуруксаева В.В., Старченко А.В.

Томский государственный университет, Россия  
E-mail: chu.vv@mail.ru, starch@math.tsu.ru

Осредненные по глубине гидродинамические модели широко применяются для расчета течений в природных водоемах. Для актуальных задач гидродинамики окружающей среды, таких как прибрежные течения в морях и океанах, а также реках, если рассматривать проблему распространения наводнений, необходим учет нестационарного поведения свободной поверхности.

Наиболее общим подходом к расчету таких течений является решение полных трехмерных уравнений гидродинамики с соответствующими условиями для свободной поверхности. Однако поведение свободной поверхности в основном определяется горизонтальной скоростью течения и потому в инженерных приложениях и вычислениях, связанных с исследованием окружающей среды такой подход не является оправданным из-за существенного различия в масштабах происходящих процессов, а также значительных размеров расчетной области. Данный вопрос подробно обсуждается в [1,2]. Обзор литературы также показывает, что полные уравнения или решаются в рамках LES подхода [3,4], или используются для расчета в небольшой области (например, течения в лабораторной установке, как в [4,5]).

Альтернативный подход подразумевает построение турбулентной модели для осредненных течений на основе классических моделей турбулентности для уравнений Рейнольдса. В этом случае генерация турбулентности за счет трения о русловое дно учитывается добавлением источникового члена. Среди осредненных по глубине дифференциальных моделей турбулентности хорошо себя зарекомендовала модификация  $k-\epsilon$  модели, предложенная Роди [6].

В данной работе математическая модель руслового течения строится на основе осредненных по глубине уравнений Рейнольдса для вязкой жидкости

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} &= -gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\bar{\tau}_{xy})}{\partial y} + \frac{(\tau_{xz})_s - (\tau_{xz})_b}{\rho}, \\ \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} &= -gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\bar{\tau}_{yx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\bar{\tau}_{yy})}{\partial y} + \frac{(\tau_{yz})_s - (\tau_{yz})_b}{\rho}. \end{aligned}$$

где  $h(x, y, t)$  – глубина,  $\bar{u}(x, y, t)$ ,  $\bar{v}(x, y, t)$  – осредненные по глубине значения компонент вектора скорости  $w = (u, v)$ ;  $z_b(x, y)$  – рельеф дна;  $\rho$  – плотность;  $(\tau_{xz})_s, (\tau_{xz})_b, (\tau_{yz})_s, (\tau_{yz})_b$  – трение на поверхности и дне, соответственно.

При этом предполагается, что распределение давления является гидростатическим и характеристики потока слабо меняются по глубине, и глубина значительно меньше горизонтальных размеров области, и, соответственно, ограничивает формирование трехмерных вихрей, определяя двумерный характер турбулентности.

Множество предшествующих работ, посвященных расчетам турбулентных потоков мелкой воды, показывает ключевую роль двумерных вихрей при моделировании турбулентных течений мелкой воды, а также важность задания граничных условий на дне и свободной поверхности [7,8].

Осредненные по глубине значения напряжений  $\bar{\tau}_{ij}$  определяются из гипотезы Буссинеска

$$\frac{1}{\rho} \bar{\tau}_{ij} = (\bar{v} + \bar{v}_t) \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \bar{k} \delta_{ij},$$

Турбулентная вязкость  $\bar{v}_t$  и кинетическая энергия турбулентности  $\bar{k}$  находятся с использованием осредненной по глубине  $k$ - $\varepsilon$  модели [6].

$$\begin{aligned} \bar{v}_t &= c_\mu \frac{\bar{k}^2}{\varepsilon}, \\ \frac{\partial(h\bar{k})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{k})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}\bar{k})}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\bar{v}_t}{\sigma_k} \frac{\partial \bar{k}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\bar{v}_t}{\sigma_k} \frac{\partial \bar{k}}{\partial y} \right) + (P_h + P_{kv} - \varepsilon)h, \\ \frac{\partial(h\bar{\varepsilon})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{\varepsilon})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}\bar{\varepsilon})}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\bar{v}_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\bar{v}_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial y} \right) + \left( c_1 \frac{\bar{\varepsilon}}{k} P_h + P_{\varepsilon v} - c_2 \frac{\bar{\varepsilon}^2}{k} \right) h, \end{aligned}$$

где  $P_h = v_t \left[ 2 \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 \right]$ .

Построенная математическая модель, дополненная уравнением концентрации

$$\frac{\partial(h\bar{c})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{c})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}\bar{c})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( h \bar{\Gamma}_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \bar{\Gamma}_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right),$$

позволяет моделировать возможный сценарий распространения загрязняющих веществ, сбрасываемых различными предприятиями в поверхностные воды рек, что является необходимым для прогнозирования и мониторинга состояния экосистемы реки.

В силу того, что в данной ситуации моделируется распространение примеси относительно небольшой массы (в сравнении с массой текущей воды), поступающей в реку с низкой скоростью, вблизи выброса не возникает трехмерных турбулентных эффектов.

Дискретный аналог уравнений модели строится методом конечных объемов на разнесенной по пространству прямоугольной сетке:

Глубина  $h$  определяется в центрах ячеек, а компоненты скорости  $\bar{u}(x, y, t)$ ,  $\bar{v}(x, y, t)$  – на границах. Для аппроксимации конвективных членов используются схемы MLU [9] и MUSCL. В силу того, что характеристики течения мало изменяются с течением времени, для подобной задачи предпочтительнее использовать неявный метод.

Для нахождения решения дискретной системы на основе SIMPLE-алгоритма Патанкара и Сполдинга был построен итерационный алгоритм совместного решения уравнений неразрывности и движения, позволяющий получить корректные численные решения для полей скорости и глубины.

С помощью данного метода были проведены расчеты некоторых тестовых сценариев, иллюстрирующих различные режимы течения, влияние на него трения и рельефа дна.

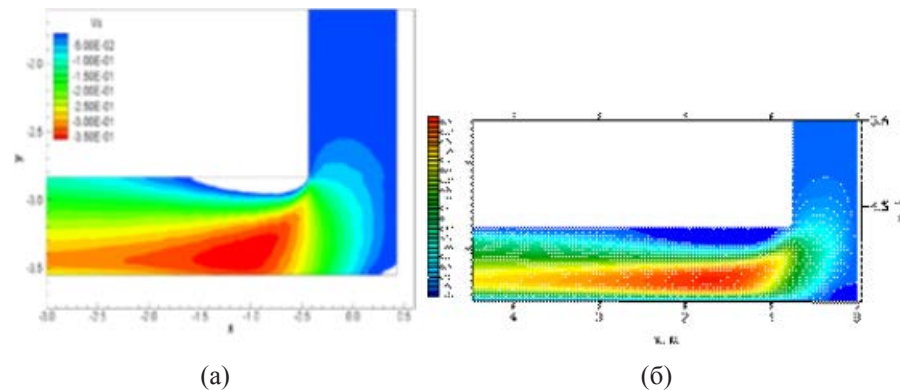
В качестве валидации математической модели и численного метода приведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, а также расчетами, приведенными в [10]. Сравнение позволяет судить о том, насколько гипотеза мелкой воды применима для подобных случаев.

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Одним из самых распространенных приложений двумерной модели мелкой воды является расчет течения в открытых каналах. Резкое изменение направления течения может вызывать проявление трехмерного характера турбулентности, что может ухудшить достоверность численного прогноза с использованием осредненных уравнений.

В качестве расчетной области использовался канал с поворотом под прямым углом. Входной участок имеет ширину 0.86 м и ровное дно. Сразу перед поворотом уровень дна понижается на 0.013 м. Выходной участок имеет ширину 0.72 м и ровное дно. Средняя глубина воды  $h \approx 0.175$  м, величина продольной компоненты скорости  $\approx 0.2$  м/с.

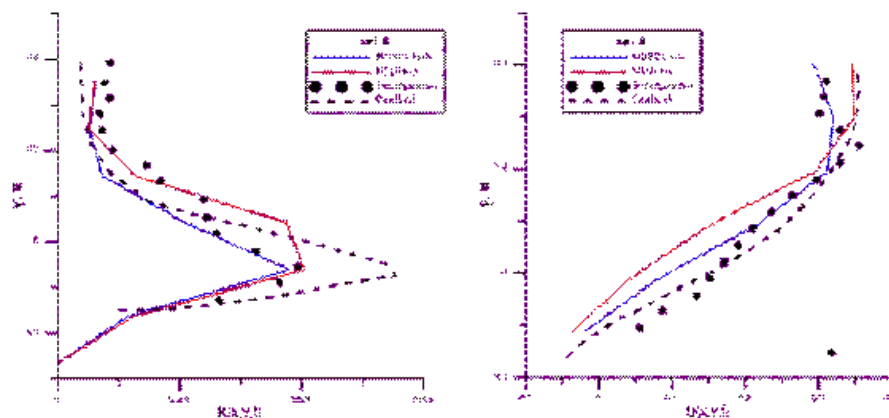
На рисунке 1 приведено сравнение полученных результатов с расчетом из [10], где авторы исследуют течение в открытом канале с применением аналогичной модели.



**Рисунок 1.** Течение в канале с поворотом, продольная компонента скорости  $\bar{u}$ , (а) – расчет из [10], (б) – расчет по рассматриваемой модели.

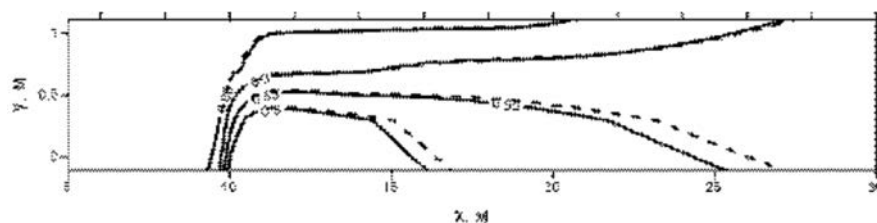
Из рисунка видно, что модель успешно обнаруживает циркуляционную зону за поворотом.

Для более детального сравнения полученных численных расчетов и исследования влияния расчетной сетки на решение, рассмотрим изменение продольной скорости и кинетической энергии турбулентности в поперечном сечении канала с  $x = 1.8$  м, где образуется область циркуляционного течения.



**Рисунок 2.** Кинетическая энергия турбулентности и продольная компонента скорости в сечении  $x = 1.8$  м.

Предложенная модель и численный метод также могут быть использованы при решении задачи расчета распространения бокового выброса в движущийся поток. На основе данных о глубине реки и скорости течения был проведен расчет поля концентрации.



**Рисунок 3.** Концентрация примеси при боковом выбросе в поток (сплошная линия – расчет по схеме MUSCL, пунктирная – по схеме MLU).



Приведенные результаты для поля концентрации качественно согласуются с расчетами из [6]. Проведенное тестирование показывает, что выбор осредненных по глубине уравнений и соответствующей модели турбулентности позволяет получить результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными для случаев течения с резким изменением направления потока, а также при моделировании выброса в движущуюся струю. Оба этих вида течения характерны для движения воды в русле реки, что позволяет применить представленный подход к моделированию речного течения.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № 5.628.2014/К.*

#### Литература:

1. Duc B., Wenka T., and Rodi W. Numerical Modeling of Bed Deformation in Laboratory Channels // *Journal of Hydraulic Engineering*. Сентябрь 2004. Vol. 9. pp. 894-904.
2. Uijttewaal W.S.J. Hydrodynamics of shallow flows: application to rivers // *Journal of Hydraulic Research*. 2014. Vol. 52. No. 2. pp. 157-172.
3. Chaouat B., Schiestel R. Reynolds stress transport modelling for steady and unsteady channel flows with wall injection // *Journal Of Turbulence*. 2002. Vol. 3. pp. 1-16.
4. Kang S., Lightbody A., Hill C., and Sotiropoulos F. High-resolution numerical simulation of turbulence in natural waterways // *Advances in Water Resources*. 2011. Vol. 34. pp. 98-113.
5. Kang S., Sotiropoulos F. Numerical modeling of 3D turbulent free surface flow in natural waterways // *Advances in Water Resources*. 2012. No. 40. pp. 23-36.
6. Роду [11] В. Модели турбулентности окружающей среды // *In: Методы расчета турбулентных течений*. Москва: Мир, 1984. pp. 276-278.
7. Chu V.H., Babarutsi S. Confinement and bed-friction effects in shallow turbulent mixing layers // *Journal of Hydraulic Engineering*. 1988. Vol. 10. No. 114. pp. 1257-1274.
8. Uijttewaal W., Booij R. Effects of shallowness on the development // *Physics of Fluids*. 2000. Vol. 2. No. 12. pp. 392-402.
9. Noll B. Evaluation of a bounded high-resolution scheme for combustor flow computations // *AIAA Journal*. 1992. Vol. 30. No. 1. pp. 64-68.
10. Cea L., Puertas J., and Vazquez-Cendon M.E. Depth averaged modelling of turbulent shallow water flow with wet-dry fonts // *Archives of computational methods in engineering*. September 2007. Vol. 14. No. 3. pp. 303-341.

## Numerical study of water-atmosphere gas exchange for a boreal lake

<sup>1</sup>Guseva S.P., <sup>2</sup>Stepanenko V.M.

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Geography Faculty, Russia

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University (Research Computing Center), Russia

E-mail: [gussonlost@gmail.com](mailto:gussonlost@gmail.com), [stepanen@srcc.msu.ru](mailto:stepanen@srcc.msu.ru)

Web: [www.geogr.msu.ru](http://www.geogr.msu.ru), [www.srcc.msu.ru](http://www.srcc.msu.ru)

Since preindustrial era atmospheric methane concentration has increased about 1.5 times. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change, methane is the second greenhouse gas in its contribution to modern global warming. Though lakes occupy only 1,3 – 1.8% of a terrestrial surface, methane emission from lakes (by different estimates) - is about 25% of the total flux of natural biogenic sources. Taking into account this fact, it is obviously important to consider contribution of lakes to regional empirical estimates of methane fluxes, as well as to develop specific models of methane emissions from lakes, in particular, for their subsequent inclusion in climatic models.

For the quantitative and qualitative description of methane emission it is necessary to have detailed understanding of the mechanisms of regulation of this process and to predict it in the future. As the main research tool we use the lake numerical model LAKE (Stepanenko et al., 2011).

In this work the LAKE model was applied to the small thermokarst lake Seida (Republic of Komi). An attempt to consider the physical processes occurring in the lake was made and thus to obtain a satisfactory agreement with observations. Another important direction of this research was the review and realization in the model of various parametrizations of gas exchange at the air-water interface, which govern the magnitude of methane diffusive flux. The most uncertain element of this parameterization is the gas transfer velocity,  $k$ , that is determined by a complex of insufficiently understood physical processes. These processes characterize a state of the atmospheric surface layer above the water and the top thin layer of the lake.

In current study, we implement four parameterizations of transfer velocity in the LAKE model: empirical relationship of  $k$  with wind speed (Cole J. and Caraco F., 1998), film stagnant model (Whitman, 1923), the surface renewal model (Higbie, 1935; Lamont and Scott, 1970), solid wall model (Deacon, 1977).

Further, we carry out the general analysis of differences between the results of simulations with different experimental setup.

#### References:

1. V. M. Stepanenko, E. E. Machul'skaya, M. V. Glagolev, V. N. Lykossov, Numerical modeling of methane emissions from lakes in the permafrost zone, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2011, Volume 47, Issue 2, pp 252-264
2. J. J. Cole, N. F. Caraco. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of  $sf_6$ . *Limnology and Oceanography*, 43:647–656, 06 1998. doi:10.4319/lo.1998.43.4.0647.

## Моделирование потока метана в атмосферу на примере пресноводного водоема (республика Коми)

<sup>1</sup>Гусева С.П., <sup>2</sup>Степаненко В.М.

<sup>1</sup>Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Россия

<sup>2</sup>Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова (Научно-Исследовательский Вычислительный центр), Россия

E-mail: gussonlost@gmail.com, stepanen@srcc.msu.ru

Web: www.geogr.msu.ru, www.srcc.msu.ru

С доиндустриальной эпохи атмосферные концентрации метана увеличились приблизительно в 1.5 раза. Согласно данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата, метан является вторым по величине парниковым газом, вносящим вклад в глобальное потепление. Хотя озера занимают лишь 1.3-1.8% земной поверхности, эмиссия метана из озер по разным оценкам составляет до 25% от суммарного потока из естественных биогенных источников. Принимая во внимание этот факт, представляется важным учитывать вклад озер в региональные эмпирические оценки потоков метана, а также развивать модели эмиссии метана с озер, в частности, для их последующего включения в климатические модели.

Для количественного и качественного описания эмиссии метана следует иметь детальное представление о механизмах регулирования данного процесса и уметь предсказывать ее в будущем. В качестве основного инструмента в настоящем исследовании используется численное моделирование потоков метана, реализованное в модели водоема LAKE (Stepanenko et al., 2011).

В настоящей работе с использованием модели LAKE проводилось численное исследование для небольшого термокарстового озера Сейда (республика Коми). Была произведена попытка учесть физические процессы, происходящие в озере, и при этом получить удовлетворительное согласие с данными наблюдений. Другим важным направлением исследования являлся обзор и реализация различных параметризаций газообмена на границе “вода-атмосфера”, которые определяют величину диффузионного потока метана из водоема. Основная трудность оценки данной величины заключается в том, что коэффициент газообмена  $k$  определяется сложной и не вполне изученной зависимостью от различных физических процессов, характеризующих как состояние атмосферы над водной поверхностью, так и верхнего слоя водоема. В работе реализованы четыре параметризации коэффициента газообмена: эмпирическая зависимость  $k$  от скорости ветра (Cole J. and Caraco F., 1998), модель тонкой неподвижной пленки (Whitman, 1923), модель обновления поверхности (Higbie, 1935; Lamont and Scott, 1970) и модель твердой стенки (Deacon, 1977). Также проводится общий анализ чувствительности модели к различным параметрам и параметризациям.

#### Литература:

1. В.М. Степаненко, Е.Е. Мачульская, М.В. Глаголев, В.Н. Лыкосов. Моделирование эмиссии метана из озер зоны вечной мерзлоты. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47, № 2. 275-288
2. J. J. Cole, N. F. Caraco. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of  $sf_6$ . *Limnology and Oceanography*, 43:647–656, 06 1998. doi:10.4319/lo.1998.43.4.0647.

# SESSION Modeling and analysis of regional climate

## СЕКЦИЯ Моделирование и анализ регионального климата

### Multiscale version of the global atmospheric model SL-AV model

<sup>1,2</sup> Tolstykh M.A., <sup>1</sup> Volodin E.M.,  
<sup>1</sup> Fadeev R.Yu., <sup>1,2</sup> Shashkin V.V.

<sup>1</sup> Institute of Numerical Mathematics RAS, Russia  
<sup>2</sup> Hydrometcentre of Russia, Russia  
E-mail: [tolstykh@m.inm.ras.ru](mailto:tolstykh@m.inm.ras.ru), [volodin@m.inm.ras.ru](mailto:volodin@m.inm.ras.ru),  
[lord.rrd@gmail.com](mailto:lord.rrd@gmail.com),  
[vvshashkin@gmail.com](mailto:vvshashkin@gmail.com)

The global semi-Lagrangian atmosphere model SL-AV developed at INM RAS and Hydrometcentre of Russia is applied for operational medium-range weather forecast, and also as a component of the probabilistic long-range forecast system. Participation in future CMIP projects would require numerical efficiency of the atmospheric model that is not reached by the current INM RAS climate atmospheric model. On the basis of the existing SL-AV versions, the unified multi-scale model version is developed. This version is intended both for numerical weather prediction and for modeling of climate changes. The specific features of the multi-scale version are described. The numerical experiments on climate modeling with the developed multi-scale version are carried out according to the protocol of the international AMIP2 experiment. First results are presented. The possibility of application of the unified version of the SL-AV model, after some development, for climate changes modeling is shown.

### Многомасштабная версия глобальной модели атмосферы ПЛАВ

<sup>1,2</sup> Толстых М.А., <sup>1</sup> Володин Е.М.,  
<sup>1</sup> Фадеев Р.Ю., <sup>1,2</sup> Шашкин В.В.

<sup>1</sup> Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия  
<sup>2</sup> Гидрометцентр России, Москва, Россия  
E-mail: [tolstykh@inm.ras.ru](mailto:tolstykh@inm.ras.ru)

Глобальная полулагранжева модель общей циркуляции атмосферы ПЛАВ (Полу-Лагранжева, основанная на уравнении Абсолютной завихренности) [1, 2], разработанная в ИВМ РАН и Гидрометцентре России, применяется для оперативного среднесрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России и СибНИГМИ, а также в качестве компонента системы вероятностного долгосрочного прогноза в Гидрометцентре России.

Оригинальными особенностями блока решения уравнений динамики атмосферы модели ПЛАВ являются использование вертикальной компоненты абсолютной завихренности и дивергенции в качестве прогностических переменных и применение конечных разностей четвертого порядка на несмещенной сетке для аппроксимации неадвективных слагаемых уравнений. В модели ПЛАВ наряду с оригинальным блоком решения уравнений динамики атмосферы собственной разработки в основном применяются алгоритмы параметризаций процессов подсеточного масштаба, разработанные под руководством Ж.-Ф.Желена возглавляемым Францией консорциумом по мезомасштабному прогнозу погоды ALADIN/LACE [3, 4]. В модель также включена отечественная параметризация крупномасштабных осадков [5] и модель многослойной почвы [6]. В новые версии модели включены свободно распространяемые параметризации коротковолновой радиации CLIRAD-SW [7, 8] и длинноволновой RRTM-LW [9].

В рамках проекта Российского научного фонда ведется разработка модели общей циркуляции атмосферы нового поколения, предназначенной для моделирования изменений климата. В соответствии с этим подходом модель динамики атмосферы существующей модели климата ИВМ РАН INMCM4 (не позволяющая реализовать требуемую вычислительную эффективность) планируется заменить на глобальную полулагранжеву модель атмосферы ПЛАВ. Новая версия блока динамики данной модели сохраняет массу воздуха и водяного пара с машинной точностью [10], что дает возможность применить модель и для длительных расчетов по воспроизведению климата.

Модель общей циркуляции атмосферы, ориентированная на воспроизведения каких-либо временных масштабов, должна адекватно воспроизводить процессы всех временных масштабов. Кроме того, затраты на поддержку нескольких различных версий одной и той же модели, отличающихся наборами используемых параметризаций, номенклатурой прогностических полей и др. неоправданно высоки. В докладе представлена новая многомасштабная версия модели ПЛАВ на основе унификации нескольких версий, представленных в табл.1. Эта версия может быть использована как для численного прогноза погоды различной заблаговременности, так и для моделирования изменений климата.

Параметризации процессов подсеточного масштаба в основном соответствуют новой версии модели, предназначенной для среднесрочного прогноза погоды. В многомасштабную версию модели включена усовершенствованная схема параметризации широкополосного альbedo снега, в которой изменение этого параметра по мере выпадения свежего снега производится плавно, а также учитывается зависимость альbedo от зенитного угла солнца [11].

В режиме моделирования изменений климата в программном комплексе унифицированной версии модели предусмотрено периодическое изменение нижних граничных условий, а также выдача необходимых характеристик в соответствии с требованиями протоколов международных экспериментов AMIP, CNFRP и т.п. (например, всех компонент потоков импульса, тепла и влаги на поверхности). Вывод данных, необходимый для моделирования изменений климата, был распараллелен с помощью технологии MPI. Горизонтальное разрешение модели в конфигурации для исследования изменений климата составляет 0.9x0.72 градуса по долготе и широте соответственно, 28 уровней по вертикали (совпадает с разрешением оперативной версии, предназначенной для среднесрочного прогноза погоды).

**Таблица 1.** Основные характеристики различных версий модели атмосферы ПЛАВ.

Версия модели	Разрешение	Лок.-конс.	Радиация RRTM+ CLIRAD; аэрозоли	Микрофизика	Паралл.	Возможность ежедневной модификации граничных условий	Номенклатура выводимых полей
Опер. «Сезонная»	1.4°x1.1°, 28 уровней	-	-	-	OpenMP	+	«клим.»
Опер. «среднесрочная»	0.9°x 0.72°, 28 уровней				OpenMP	-	«опер»
Опер. СибНИГМИ	0.5625° по долготе; от 28 до 80 км по широте, 50 уровней	-	-	-	MPI+ OpenMP	-	«опер»
Новая «среднесрочная»	0.225°, по широте от 27 км в юж. полушарии до 18 км в Сев. 51 уровень	-	+	+	MPI+ OpenMP	-	«опер»
Унифицированная	произвольно	+	+	+	MPI+ OpenMP	+	«клим» или «опер»

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

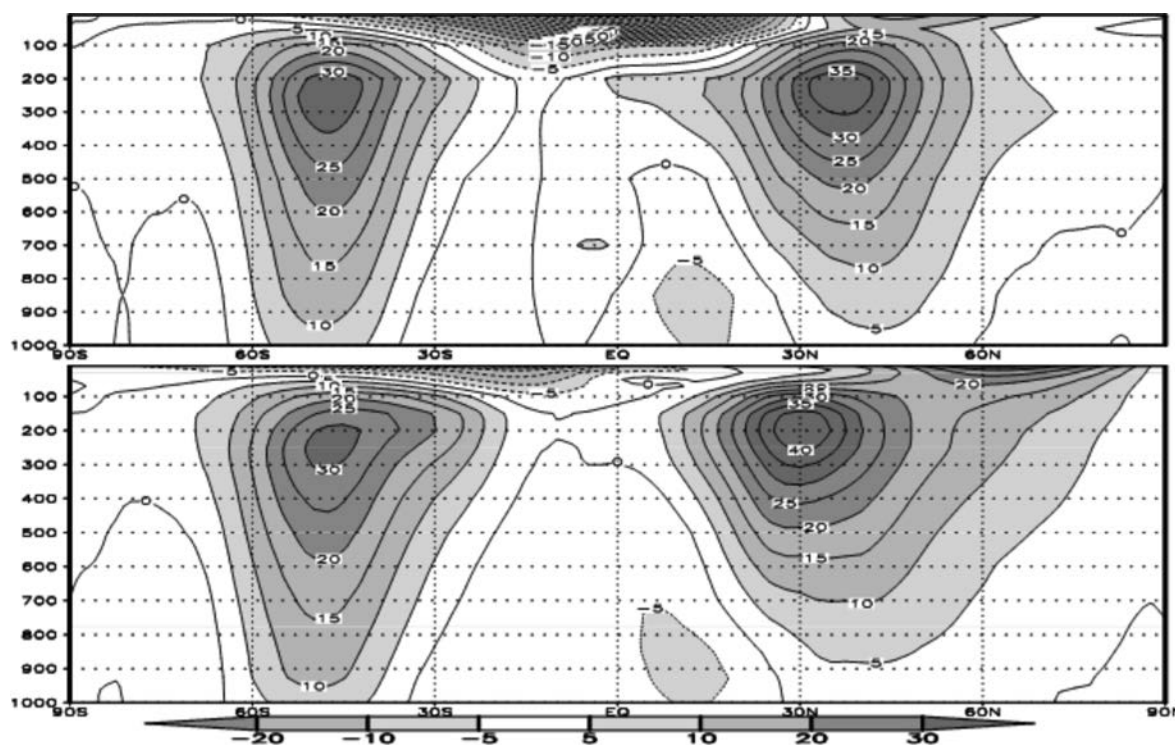
Унифицированная версия модели была сначала проверена на серии среднесрочных прогнозов погоды с заблаговременностью до 120 часов. За счет более совершенных параметризаций процессов подсеточного масштаба и усовершенствований динамического ядра ошибки среднесрочного прогноза несколько меньше у унифицированной версии модели (подробнее см. [11]).

Немаловажным преимуществом унифицированной модели по сравнению с оперативной версией является более эффективное использование вычислительных ресурсов. Унифицированная версия, использующая сочетание технологий MPI и OpenMP, практически линейно масштабируется при разрешении  $0,9 \times 0,72$  градуса и 28 уровнях по вертикали до 64 процессорных ядер, при использовании 128 ядер все еще заметно ускорение выполнения программы по сравнению с 64 ядрами. Это крайне важно для планируемого использования модели для моделирования изменений климата.

С помощью унифицированной версии модели ПЛАВ был выполнен экспериментальный расчет атмосферной циркуляции на шесть лет по протоколу международного эксперимента AMIP2 с известными, меняющимися во времени полями температуры поверхности океана и концентрации морского льда, для начальных данных за 01 января 1979 года.

Предварительные оценки модельной климатологии показывают, что модель воспроизводит основные крупномасштабные особенности наблюдаемой атмосферной динамики. Среднеянварское давление на уровне моря в модели (рисунок 3 в [11]) в основном близко к наблюдаемому (лишь алеутский минимум давления сдвинут в модели к северо-востоку и выражен более сильно по отношению к наблюдениям). Скорость зонального ветра в модели в тропосфере (рисунок 1) также близка к наблюдениям. Некоторое завышение скорости восточного ветра в стратосфере в тропиках может быть связано с особенностями динамической схемы на Экваторе, которые, по-видимому, требуют корректировки. С этими же особенностями может быть связано и появление слабых западных ветров вместо восточных в тропической нижней тропосфере.

Анализ структуры поля потока тепла на север, порождаемого стационарными волнами (зимой), позволяет сделать следующие выводы. В тропосфере северного полушария поток достигает 10-15  $\text{K}\cdot\text{м}/\text{с}$ , что соответствует данным реанализа NCEP/NCAR. В стратосфере модель занижает данную величину (35  $\text{K}\cdot\text{м}/\text{с}$  по сравнению с 60  $\text{K}\cdot\text{м}/\text{с}$  по архиву NCEP/NCAR). Поскольку поток температуры пропорционален вертикальному потоку энергии волн Россби, можно констатировать, что стационарные волны распространяются в стратосферу в модели несколько менее эффективно, чем в природе. Такой недостаток присущ многим моделям общей циркуляции атмосферы.



**Рисунок 1.** Среднеянварская скорость зонального ветра ( $\text{м}/\text{с}$ ), осредненная вдоль круга широты по данным модели (вверху) и реанализа ERA (внизу).

В целом, качество воспроизведения современного климата моделью ПЛАВ можно считать неплохим, и после некоторой настройки модель, по-видимому, может быть успешно состыкована с моделью

океана. В заключении следует заметить, что данные расчеты выполнялись с помощью версии модели, имеющей апостериорный корректор массы атмосферы. В дальнейшем для моделирования изменений климата планируется применять локально-консервативную версию динамического блока модели [9].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность применения модели ПЛАВ как для среднесрочного прогноза погоды, так и, после некоторой доработки, для моделирования изменений климата.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-27-00126) в Институте вычислительной математики РАН.

### Литература:

1. Толстых М.А. Полулагранжева модель атмосферы с высоким разрешением для численного прогноза погоды // *Метеорология и гидрология*. 2001. № 4. С. 5-16.
2. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. М, Обнинск: ОАО ФООП, 111 стр.
3. Geleyn J.-F., Bazile E., Bougeault P., Deque M., Ivanovici V., Joly A., Labbe L., Piedelievre J.-P., Piriou J.-M., Royer J.-F. Atmospheric parameterization schemes in Meteo-France's ARPEGE N.W.P. model // *Parameterization of subgrid-scale physical processes, ECMWF Seminar proceedings*. - Reading, UK: 1994. P. 385-402.
4. Gerard L., Piriou J.-M., Brožkova R., Geleyn J.-F., Banciu D. Cloud and Precipitation Parameterization in a Meso-Gamma-Scale Operational Weather Prediction Model // *Mon. Weather Rev.* 2009 V. 137. P. 3960-3977.
5. Кострыкин С.В., Эзау И.Н. Динамико-стохастическая схема расчета крупномасштабных осадков и облачности // *Метеорология и гидрология*. 2001. № 7. С. 23-39.
6. Володин Е.М., Лыкосов В.Н. Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность - почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 1998. Т. 34, № 4. С. 453-465.
7. Chou, M.-D., Suarez M. J. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies – 1999. NASA Tech. Memo. 10460, V. 15, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 48 pp.
8. Tarasova T., Fomin B. The Use of New Parameterizations for Gaseous Absorption in the CLIRAD-SW Solar Radiation Code for Models // *J. Atmos. and Oceanic Technology*. 2007. V. 24, № 6. P. 1157–1162.
9. Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J. and Clough S.A.: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102, N 16, 663-16, 682.
10. Shashkin V.V., Tolstykh M.A. Inherently mass-conservative version of the semi-Lagrangian Absolute Vorticity (SL-AV) atmospheric model dynamical core // *Geoscientific Model Development*, 2014. V 7. P. 407-417.
11. Толстых М.А., Желен Ж.-Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Красюк Т.В., Кострыкин С.В., Мизяк В.Г., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Шляева А.В., Эзау И.Н., Юрова А.Ю. Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ // *Метеорология и гидрология*, 2015, №6 (принято к печати).

## Influence of Siberian rivers runoff on the balance of fresh water in Arctic Ocean

Kuzin V.I., Platov G.A., Lapteva N.A.

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

E-mail: kuzin@sccc.ru

Climatic changes in the past decades in the world, more so than anywhere else, has the impact in the high latitudes of the Northern Hemisphere. The problem of describing these changes is very complex and requires consideration of many factors, including the formation and melting of ice, the influx of Atlantic and Pacific waters, as well as the runoff of the northern rivers.

This paper presents a study of the Siberian river fresh water anomalies distribution in the Arctic Ocean in XXI century based on the simulations by the river runoff and the ICMMG Arctic Ocean circulation model. The input data is the output of the models provided to IPCC RCP 8.5 CMIP5 scenario. Calculations of the interan-

nual variability of the river runoff in the XXI century have the general positive trends, but it have significant differences in the fresh water input to the Kara Sea and the Eastern Arctic seas. Model runoff in accordance with the precipitation increases, which may be a response to climate change in different regions in Siberia, as it was observed in recent decades. From the analysis of the results the river fresh water distribution in the Arctic Ocean, it follows that the most important role of fresh water trajectory anomalies becomes in a period of changes of the atmospheric circulation. The increase in export of fresh water through the Fram Strait and then decrease is in accordance with the AO/NAO indices is fixed. Similar, but much smaller, changes occur to the export of fresh water through the Canadian straits.

## Влияние стока Сибирских рек в XXI веке на баланс пресной воды в Северном Ледовитом океане

Кузин В.И., Платов Г.А., Лаптева Н.А.

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

### ВВЕДЕНИЕ

В климатической системе Земли Арктика играет важную роль. В частности это относится к гидрологической составляющей климатических процессов в Арктике и Северном Ледовитом океане (СЛО).

Общее количество пресной воды оцениваемое относительно среднего значения солености 34.8 промилле составляет по оценкам  $74 \times 7.4$  тыс.куб. км [1].

Крупные реки российского Севера дают около 2.24 тыс. куб. км в год, что составляет около 70% от всего речного стока [2]. Наибольшую величину стока дают такие реки как Енисей, Лена и Обь, что составляет около 45% притока всей пресной воды в СЛО [3]. На основе данных по гидрологическим станциям для остальных сибирских рек годовые стоки имеют меньшие значения, однако для изучения пресноводного баланса в СЛО они также должны быть учтены. Суммарные годовые расходы за периоды измерений в XX веке претерпевает существенные межгодовые вариации. Расход пресной воды из СЛО происходит через пролив Фрама и проливы Канадского Архипелага. Эта вода, будучи вынесена в виде льда или потока воды пониженной солености за пределы СЛО в северные моря Атлантики, является существенным регулятором в формировании термохалинной структуры и меридиональной циркуляции не только Северной Атлантики, но и всего Мирового океана [4, 5].

Интересным представляется вопрос: будет ли процесс увеличения речного стока, наблюдавшийся в конце XX и начале XXI века, продолжаться и в дальнейшем, продуцируя обратные связи в климатической системе. В работе рассматриваются результаты моделирования межгодовых изменений пресноводного баланса, которые могут происходить в Северном Ледовитом океане в XXI веке при вариациях речного стока сибирских рек, рассчитанных на основе результатов расчетов по моделям сценария RCP 8.5 проекта CMIP-5 по модели речного стока и модели циркуляции СЛО.

### 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА

Модель речного стока является линейной резервуарной моделью. Модель составлена из линейных резервуаров или каскада резервуаров в ячейках сетки. Скорость изменения стока из ячейки или каскада ячеек в простейшем варианте модели Калинина-Милюкова [6, 7] определяется на основе решения интеграла свертки (Дюамеля).

В конкретной реализации модели использовалась структура, предложенная в институте Макса Планка в Гамбургского университета [6]. В этом подходе поток воды на суше разделяется на три составляющие: поверхностный сток, грунтовый сток, речной сток.

Инфильтрация воды в грунт проводилась в каждой ячейке на основе характеристик поверхности и процента среднего грунтового влагосодержания на основе гидрологических данных для каждого бассейна. В каждой ячейке производится учет процентного содержания болот и озер.

В модели учитывались бассейны рек: Обь-Иртыш, Ангара-Енисей, Лена, Пур, Таз, Хатанга, Анабар, Оленек, Яна, Индигирка, Колыма. При проведении численных экспериментов по климатической модели речного стока было выбрано разрешение составляющее  $1/3$  градуса по широте и долготе соответственно.

Был проведен численный эксперимент для XXI века (период 2006 - 2100 гг.) на основе данных расчетов по моделям GFDL-ESM2M, MIROC5, INMCM4 сценарного эксперимента RCP 8.5. Анализ результатов по стокам в различные акватории СЛО показывает, что существуют заметные различия в

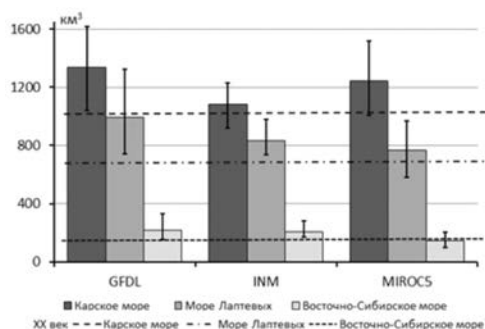
притоках в Карское море и в восточные моря Арктики. В стоках для модели INMCM4 в Карское море и для модели MIROC5 в восточные моря наблюдается дефицит поступления воды в СЛО до 2040 года. После этого, значения стока увеличиваются, превышая климатические. Для остальных моделей сток превышает климатический для всего периода. При этом наблюдается положительный линейный тренд стока во всех случаях, что может являться откликом на климатические изменения в Сибири при увеличении  $\text{CO}_2$ , приводящие к росту стока сибирских рек, наблюдаемых в последние десятилетия (Рис. 1). Для восточных рек этот тренд более выражен. Рассчитанные стоки являются данными для расчетов динамики баланса пресной воды в Северном Ледовитом океане по модели циркуляции СЛО.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕЧНЫХ ВОД В СЛО

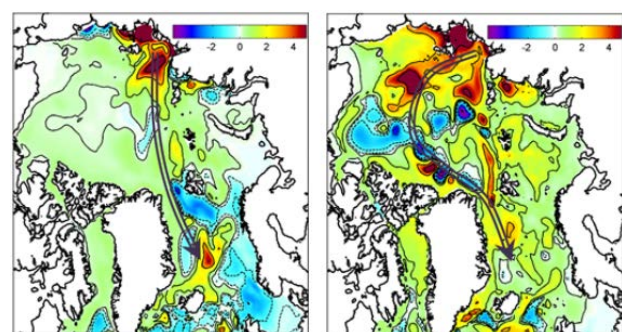
Для выяснения будущего вклада межгодовой изменчивости стока сибирских рек в баланс пресной воды в СЛО использовалась региональная модель Арктики и северной Атлантики ИВМиМГ СО РАН [8]. Область решения включает в себя арктический бассейн, северную и экваториальную Атлантику, начиная с  $20^\circ\text{S}$ . Характеристики нижней атмосферы, брались из данных портала CMIP-5, полученных по результатам работы моделей GFDL-ESM2M, MIROC5, INMCM4 для сценарного эксперимента RCP 8.5, охватывающего период с 2006 года по 2100 год.

По модели циркуляции СЛО было проведено два расчета с региональной моделью. В первом для всех рек региона Арктики и северной Атлантики задавался климатический расход, построенный на основе данных [2, 9], а во втором – наряду с этими данными отдельно для сибирских рек задавался расход, полученный на основе результатов экспериментов, полученных по модели речного стока. Основные черты циркуляции СЛО связаны с внешним, по отношению к системе океан-лед, атмосферным воздействием. Особенности движения атмосферы могут быть выражены в значениях индекса североатлантической осцилляции NAO и индекса арктической осцилляции AO. Для их оценки в XXI веке необходимо использовать результаты сценарных расчетов. Сингулярное разложение временного хода вектора состояния баротропного океана показывает, что для первых четырех мод разложения временной ход коэффициентов разложения показывает, что наиболее чувствительной к колебаниям индексов является первая мода разложения. В основном это отличие заключается в ином характере циркуляции при отрицательных значениях атмосферных индексов. В первой половине столетия, когда реализовывалась фаза положительных индексов циркуляции, вынос отклонений содержания пресной воды из района возмущений (Карское море и море Лаптевых) в сторону пролива Фрама происходит практически по прямой линии, соединяющей эти два района, благодаря трансполярному дрейфу, и распространяется далее вдоль южного побережья Гренландии в Атлантический океан. Во второй половине XXI века фаза индексов циркуляции была отрицательной, поэтому траектория движения аномалий пресной воды, соответствующая изолиниям функции тока этого периода, пролегает далеко за пределами хребта Ломоносова (Рис. 2).

Из анализа результатов численного моделирования распространения пресной воды в Арктике следует, что наиболее важной роль аномалий пресной воды становится в периоды смены атмосферной циркуляции.



**Рис. 1.** Изменения годовых речных стоков в XXI веке для трех моделей ИПСС. Вертикальные линии обозначают амплитуду межгодовой изменчивости в указанный период. Горизонтальные линии представляют климатические значения для XX века.



**Рис. 2.** Картина распространения аномалий пресной воды: а) в период положительного значения NAO (AO) – 2027 г. и б) в период отрицательного значения NAO (AO) – 2073 г., согласно модели ИВМ РАН на период 2006–2100 гг. по сценарию RCP 8.5. Сплошные контуры соответствуют положительным значениям аномалии, пунктирные – отрицательным. Стрелки обозначают преобладающее направление перемещения аномалий.



**Литература:**

1. Serreze M.C., Barrett A.P., Slater A.G., Woodgate R.A., Aagaard K., Lammers R.B., Steele M., Moritz R., Meredith M., Lee C.M. "The large-scale freshwater cycle of the Arctic". *Journal of Geophysical Research*. 2006. 111: C11010.
2. Aagaard K., Carmack E.C. "The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation". *J. Geophys. Res.* 1989. 94. C10. 14,485-4,498. doi: 10.1029/JC094iC10p14485.
3. Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.I., Lamers R.B., Peterson B.J., Vorosmarty C.J. "The dynamics of river water inflow to the Arctic Ocean". *Proc. NATO Advanced Research Workshop on the Freshwater Budget of the Arctic Ocean*. Tallin, Estonia. NATO. 2000. 281-296.
4. Лаппо С.С. "К вопросу о причинах адвекции тепла на север через экватор в Атлантическом океане". *Исслед. процессов взаимодействия океана и атмосферы*. М. 1984. 125-129.
5. Broecker W.S. "Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: Will man-made CO<sub>2</sub> upset the current balance?" *Science*. 1997. 278.
6. Hagemann S., Dumenil L. "Hydrological discharge model". *Technical report No 17, MPI*. Hamburg. 1998. 42.
7. Бураков Д.А. "К оценке параметров линейных моделей стока". *Метеорология и гидрология*. 1989. 10. 89-95.
8. Golubeva E.N., Platov G.A. "On improving the simulation of Atlantic Water circulation in the Arctic Ocean". *J. Geophys. Res.* 2007. 112. C04S05. doi:10.1029/2006JC003734.
9. Vörösmarty C.J., Fekete B.M., Tucker B.A. "Global River Discharge, 1807-1991". *Version. 1.1 (Riv-DIS)*. 1998. Data set. Available on-line [<http://www.daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. doi:10.3334/ORN-LDAAC/199.

## The new in the analysis of geophysical data with complicated structure

**Cheredko N.N., Krutikov V.A., Tartakovsky V.A., Markelova A.N., Volkov V.Yu., Polischuk V.Yu., Ivanova E.V.**

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: [atnik3@rambler.ru](mailto:atnik3@rambler.ru)

It is the number one the nature of modern changes and forecast of surface temperature. Most the complexity lies in the fact that monitoring data contain many the hidden information. Perhaps, for this reason there are problems in modelling of climate processes. In this regard it is important to revert to the instrumental measurements. It is related to the need to accounting of nonlinear interactions of various factors. It is necessary to install the new attributes of objects, to formulate concepts, patterns of functioning. We have developed approaches that use physical principles and rules of selection, based on the experience of meteorological analysis. The specific objectives of this study are the discovery in data series of spatial-temporal structures, revealing their properties and relationships. To solve such problems methods of multivariate statistics are now widely used. However, formal approaches limit the development. We provide algorithms for identifying and allocating a general signal is proposed in the aggregate of habitat-forming and climate-forming processes. This is done based on the assessment the degree of their coherence taking into account the manifestations of external forcings. The new idea is that the external forcing, that initiates the processes of different nature, is manifested in a similarity of their essential features. Changes in total external forcings can the system to transition to a new qualitative state result. Coherence is proposed to determine the coincidence of essential features that need to be installed. To this end, are introduced and are allocated components of data sets with coinciding and with noncoinciding essential features. This computing technology allows to allocate the climatic structure in the fields of elements of climate and monitor the impact of factors of different scale in the formation of these structures with annual resolution. Criteria for selection of classes is synchronous changes of the processes within the class, and the measure of the consistency is the correlation coefficient. Are shown the results of the analysis of the spatial patterns in the surface air temperature Eurasia. The method of structure extraction is proposed; it based on cluster analysis. It has allowed to discovery sources, which form the climate structures throughout Northern Eurasia. As analyzed the characteristics in the series surface temperature was to used phase for the first time. A new iterative algorithm for separating climatic zones, based on phasing temperature series with a typical phase. The phase of temperature fluctuations during the year was calculated, which ceteris paribus is the most low-frequency characteristic of fluctuations. The natural origin of the phase modulation validated by coincidence of

known concepts of geography climate with climatic classes allocated by forming the typical phases in the iteration process. Furthermore this approach has been used and proved effective for the analysis of dendrochronological series from areas with optimal conditions for the growth of woody vegetation.

## Новое в анализе геофизических данных сложной структуры

Чередыко Н.Н., Крутиков В.А., Тартаковский В.А., Маркелова А.Н., Волков В.Ю.,  
Полищук В.Ю., Иванова Э.В.

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

**В**опрос номер один современных дискуссий о климате – природа современных изменений приземной температуры и прогноз ее тренда на ближайшие десятилетия. В обоснованности выводов работ этого направления важнейшим является объективный непредвзятый анализ эмпирических данных. Основная сложность: данные, полученные из систем мониторинга различных природно-климатических процессов, содержат большей частью скрытую информацию, так как каждый член временного ряда измерений является результатом совместного действия комплекса разнообразных факторов средообразующих и климатообразующих процессов, характеризующихся нелинейностью взаимодействий, различиями механизмов и степени воздействия. Классический статистический анализ временных зависимостей природно-климатических процессов ограничен в возможностях интерпретации полученных результатов, как правило, показывает отсутствие связей, либо их незначительность. В этой связи актуально выявление новых признаков и закономерностей динамики климатической системы в различных пространственных и временных масштабах с целью оптимизации моделирования таких процессов.

В данной работе развивается новый подход к анализу природно-климатических процессов через идентификацию и выделение набора мод изменчивости в рядах данных и оценку степени их согласованности с учетом проявлений внешних вынуждающих воздействий (ВВВ), через выявление в полях природно-климатических параметров устойчивых пространственно-временных структур, оценку их свойств и взаимосвязей с ВВВ. За основу принята гипотеза, что ВВВ инициирует колебания в динамике природно-климатических процессов и, по своей природе, должно проявляться в некотором априорном сходстве элементарных процессов, вызванных этим воздействием. Данная методология может рассматриваться как феноменологическая.

Синхронность или согласованное поведение природно-климатических процессов – важнейшее следствие космо-земных связей и их принципиальное свойство. Процессы на Солнце и в солнечной системе вносят в изменения параметров разных геосфер циклическую модуляцию, формирующую некоторую согласованность в их динамике. Изменения совокупного ВВВ могут привести систему к переходу в новое качественное состояние. Согласованность предлагается определять совпадением существенных признаков, которые надо установить. С этой целью для каждого из исходных временных рядов вводятся и выделяются составляющие, которые отличаются совпадением (coincident signs – CS) или несовпадением (noncoincident signs – NS) существенных признаков, без конкретных предположений о характере и механизмах процессов различной природы на разных уровнях. Мера согласованности составляющих оценивается коэффициентом корреляции. Выделенные ортогональные составляющие сохраняют в себе информацию исходного ряда и при этом максимизируют новые свойства исследуемых процессов. Необходимо учитывать при сопоставлении массивов данных, характеризующих изменчивость космофизических, образующих ВВВ, и природно-климатических процессов, что сложный, нелинейный механизм воздействия может формировать в одних и тех же данных одновременно составляющие и с положительным, и с отрицательным откликом на него. Однако можно предположить, например, в отношении поля приземной температуры, без конкретизации механизмов притока и стока, что CS-составляющие характеризуют приток энергии от Солнца, способствующий росту температуры, а NS-составляющие определяют долю энергии Солнца, приводящую к уменьшению температуры. В отношении, например, ряда чисел Вольфа, размерность которого относительна, составляющие могут служить неким индикатором перераспределения ВВВ. В сумме две составляющие равны исходному ряду исследуемой величины.

Рассматриваются примеры использования предлагаемого комплекса алгоритмов в различных задачах анализа природно-климатических процессов.

(i) Предложен алгоритм декомпозиции геофизических рядов данных – совместная фильтрация. Основная задача подхода состоит в том, чтобы, не делая конкретных предположений о характере про-

цессов различной природы на разных уровнях, отыскать элементы согласованности между рядами данных. Задача декомпозиции рядов решается путем их сортировки в спектральной области. В качестве существенного признака предложено использовать совпадение знаков коэффициентов Фурье. Тогда реализации общего сигнала во временных рядах природно-климатических данных будут сформированы гармоническими составляющими одинаковой частоты с одинаковыми знаками при коэффициентах Фурье. Перемена знака коэффициента Фурье нарушит априорное сходство сигналов, связанное с их происхождением, если соответствующая базисная функция вносит значительный вклад в разложение. Степень согласованности оценивается коэффициентом корреляции Пирсона, который достигает максимума после декомпозиции временных рядов.

Одно из направлений использования предлагаемого подхода связано с исследованием влияния солнечной активности, как интегрального фактора проявлений внешних вынуждающих воздействий, в рядах динамики природно-климатических процессов.

Данный подход реализован на примере ряда чисел Вольфа и рядов приземной температуры, полученных на метеостанциях России и прилегающих территорий. Ряд чисел Вольфа использован, как комплексный показатель космо-земных связей, так как Солнце вносит основной вклад во ВВВ и модулирует вариации других космофизических факторов через вариации солнечной активности.

Также, данный подход оказался эффективным для анализа дендрохронологических рядов, полученных на территориях с оптимальными условиями роста древесной растительности. Основная сложность такого анализа, как известно, связана с плохой согласованностью этих рядов, как между собой, так и с измеренными параметрами окружающей среды. Реализован подход в задаче декомпозиции древесно-кольцевых хронологий ширины (TRW) и значений  $\delta^{18}\text{O}$  в целлюлозе годичных колец деревьев с рядом чисел Вольфа. Для декомпозиции были выбраны хронологии, построенные для территорий удаленных друг от друга на значительные расстояния и отличающихся по условиям роста древесной растительности. По объективным причинам, включающим значительную удаленность местообитаний деревьев друг от друга, разные условия роста, незначительная чувствительность деревьев в тех местообитаниях, где сочетание гидротермических условий оптимально, значимой корреляции между TRW-хронологиями в большинстве случаев обнаружено не было. Однако корреляция между их одноименными составляющими оказалась статистически значимой. Подтверждено более синхронное изменение составляющих по сравнению с исходными временными рядами. Корреляция между одноименными составляющими TRW-хронологий и рядов чисел Вольфа, также, гораздо выше, чем между исходными рядами и в большинстве случаев является статистически значимой с доверительной вероятностью 95%. Связь составляющих  $\delta^{18}\text{O}$ -хронологий с рядом чисел Вольфа слабее, чем с общими сигналами TRW-хронологий, что, возможно, связано с тем, что ВВВ влияет на соотношение стабильных изотопов кислорода через физические параметры окружающей среды, прежде всего, через температуру и относительную влажность. В то время как на ширину годичных колец влияет весь комплекс факторов, куда входят, также, колебания численности насекомых, фитопатологии, изменения градиента потенциала электрического поля, интенсивности приземного ультрафиолетового излучения с длиной волны 290-320 нм и пр.

(ii) Для изучения сложных систем различной природы предложен метод и алгоритм выявления структур (МВС). Данный подход основан на предположении, что структура любой природной системы должна проявляться в данных наблюдений этой системы, обнаружение чего дает возможность проводить анализ и получать новые, более глубокие знания о системе. В определенном смысле МВС реализует совместно идеи кластерного анализа, методов классификации и распознавания образов. Этот метод адаптирован к анализу полей метеорологических величин. Позволяет выделять естественные структуры, включающие элементы, связанные между собой сильнее, чем с другими элементами. Такой анализ позволяет выявлять связи и совокупное их проявление, что не всегда очевидно. Кроме того, подход расширяет возможности моделирования природных систем путем структуризации с заданными свойствами полей исследуемых параметров.

Алгоритм реализован для полей приземной температуры и давления Северного полушария.

В приземном температурном поле России и прилегающих стран выделены пространственные структуры, соответствующие зонам действий определенных закономерностей согласованности с ВВВ. В основе процедуры предположение, что если температурная шкала допускает нулевые средние, то для любой метеостанции либо среднее значение CS составляющей температурного ряда, либо среднее его NS составляющей равно нулю, и наоборот. Достаточно плотная сеть метеостанций позволяет выделять зоны действия этой закономерности, границей которых будет нулевая изотерма. Таким образом, CS и NS составляющие в среднем формируют зоны положительных или отрицательных температур, соответственно.

Классификация поля приземного давления позволяет выделять роль подстилающей поверхности в формировании климата различных регионов, выявлять эволюцию барического поля. В поле давления Северного полушария было выделено три типа типового поля: летний, зимний и переходных периодов. Такой подход позволяет, также, выделять центры действия атмосферы, оценивать их динамику в годовом ходе и объективно обосновывать их географическое положение.

(iii) Согласованное поведение процессов внутри класса предлагаем использовать в качестве критерия в еще одном способе выделения климатических структур. Мерой согласованности принят коэффициент корреляции. В качестве анализируемой характеристики впервые в исследованиях климата и задачах классификации полей элементов климата введена фаза температурных колебаний в годовом ходе, которая при прочих равных условиях является наиболее низкочастотной характеристикой колебания. Разработан новый итерационный алгоритм выделения климатических зон, на основе фазировки температурных рядов с некоторой типовой фазой. Алгоритм верифицирован на данных среднемесячных температур 332 метеостанций России и прилегающих стран с использованием пакета Mathcad. Также, в климатических исследованиях впервые в алгоритмы анализа данных вводится аналитический сигнал.

Положение главной моды усредненного по 332 температурным рядам модуля преобразования Фурье на частоте  $1/56$  рад, наличие закономерно убывающих мод на кратных частотах позволяет принять, что порождающие спектр процессы могут рассматриваться как узкополосные колебания, в большей степени модулированные по фазе, чем по амплитуде. Проведенный анализ показал, что синхронное поведение фаз температурных рядов в пределах выделенных зон поддерживается в значительной степени общегеографическими факторами: особенностями ландшафтной структуры подстилающей поверхности согласно закономерностям климатической компоненты разной степени дифференциации.

Для разных пороговых значений коэффициента взаимной корреляции  $r$  получено пространственное распределение метеостанций, фазы температурных рядов которых  $\{\varphi_m\}$  имеют наиболее тесную связь с найденной типовой фазой  $r\Phi_k$  ( $k$  – номер класса), т.е. выделены искомые климатические классы. При повышении порогового уровня взаимной корреляции  $r$  увеличивается степень дифференциации в структуре климатического поля, начиная от одного класса при  $r = 0,4$  до девяти классов при  $r = 0,8$ . Этот результат позволяет отслеживать влияние факторов различного масштаба в формировании климатических структур. При этом, внутри мелких групп остается связь с более крупными структурами, выделенными по меньшему порогу взаимной корреляции. С увеличением подробности разбиения на классы проявляется большее влияние региональных факторов, но каждый класс несет информацию и глобальных сигналов.

Естественное происхождение фазовой модуляции подтверждено совпадением климатических структур, выделенных путем формирования типовых фаз в итерационном процессе, с классами классической генетической классификации климата. Однако полученное совпадение не абсолютно, что закономерно вследствие наблюдаемых изменений климата и, соответственно, соотношений вклада различных климатообразующих факторов в эти изменения. Можно заключить, что выделенные естественные таксоны уточняют иерархию классических генетических климатических структур в условиях изменения климата. Полагаем, необходимо регулярное обновление информации о структуре полей параметров климата для теоретических и практических задач. Для этой цели вполне оправдан предложенный объективный метод выделения структур, позволяющий проводить районирование территории любого размера до заданного исследователем качественного уровня.

Предложенный подход к анализу геофизических данных и разработанные на его основе алгоритмы позволяют решать спектр задач в любом пространственно-временном масштабе, расширяя возможности моделирования природно-климатических процессов.

## The structures extraction method as a way of the research of the pressure field dynamics of the atmospheric boundary layer on the territory of Northern hemisphere

<sup>1</sup>Ivanova E.V., <sup>2</sup>Kataev S.G., <sup>1</sup>Tartakovsky V.A., <sup>1</sup>Krutikov V.A.

<sup>1</sup> Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS,

<sup>2</sup> Tomsk State Pedagogical University, Tomsk, Russia

E-mail: ehllai@rambler.ru

Nowadays, the interest in the climate changes problem is increasing. That's way the detailed study of climatic variations at the regional level and their appropriate recording in the global climatic models is vital.

The aim of the given research is to detect the dynamics of the pressure field of the bottom layer in the Northern Hemisphere using the *structures extraction method* (SEM).

The research problems are the following: a) to determine the space distribution of the structures (SDS) of the fields of the average monthly value of pressure in the Northern hemisphere and to make their mapping; b) to evaluate SDS dynamics for the period of 1955 – 2000 years.

As the benchmark data the average monthly values of pressure in the mesh points with 10 degrees width in latitude and longitude (288 points) on the territory of the Northern hemisphere for the period of 1955 – 2000 years were used.

The classification of the field pressure has been done. It has been detected that the stations quantity in one class varies in the limits of 2 – 120 for January and up to 148 for July. The minimum class average pressure value for January equals 1003.5 hPa (the 1st class), and the maximum - 1026.0 hPa (the 17th class).

The maps of distribution pressure field classes over the Northern hemisphere have been made. Three model fields have been detected. The first model field is typical for winter period. In January the 12th class occupies the greatest part, it's the higher pressure zone. Classes 18 -19 characterize the location of the Azores and the Hawaiian maximum (1040 hPa in the centre). Classes 1 – 5 characterize the low pressure zone above the Labrador Basin of the Atlantic Ocean and over the Norwegian Sea, the Barents Sea, the Bering Sea (1005 hPa in the centre).

The second model field is characteristic for summer period. The 5th class (1011,2 hPa) occupies the greatest area, there is deep (998 hPa) Iran – Tarski minimum the 1st class in the Southern Asia tropics. High pressure areas (14th – 17th classes) descend to the equatorial zone and they are located above the Atlantic and the Pacific Oceans (1026 hPa in the centre).

The third type of field is characteristic for spring and autumn transitional periods. It shows the steady formation and the development of the Hawaiian and the Atlantic maximum in April and the formation of the Azores and the Hawaiian maximum in September.

The research of the pressure field dynamics was conducted in the following way. The whole interval of 45 years was divided into 3 periods: from 1955 till 1970; from 1970 till 1985; from 1985 till 2000. The classification was held for each period and a space structure of classes was found for each month. The data analysis allows to state that the basic features of the pressure field behavior remain unchangeable during these periods.

SEM (the Structures Extraction Method) allows to see in a new light the problem of the extraction and the formation of the atmospheric action centers, to evaluate their dynamics in an annual course and to validate their geographical position more objectively.

## Метод выделения структур как способ исследования динамики поля давления приземного слоя атмосферы на территории северного полушария

<sup>1</sup>Иванова Э.В., <sup>2</sup>Катаев С.Г., <sup>1</sup>Тартаковский В.А., <sup>1</sup>Крутиков В.А.

<sup>1</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup> Томский государственный педагогический университет, Томск, Россия

E-mail: ehllai@rambler.ru

Интерес к проблеме изменения климата в настоящее время неуклонно возрастает. Целый ряд научных исследований направлен на изучение климатических изменений, происходящие в крупных регионах мира, оказывающих влияние на функционирование всей системы Земли. Поэтому детальное изучение климатических изменений на региональном уровне и их адекватный учет в глобальных климатических моделях весьма важны.

Особенно много работ посвящено статистическому анализу изменений глобального климата и моделированию пространственной и временной структуры климатических параметров. Так большинство исследователей к причинам глобального потепления относят - увеличение в атмосфере парниковых газов и изменение циркуляции атмосферы. Последняя гипотеза наименее разработана. Известно, что циркуляция атмосферы однозначно определяется полем давления [1].

При исследовании наиболее общих закономерностей изменения глобального климата целесообразно использовать глобальные (или полушарные) данные.

В этой связи целью настоящей работы является выявление динамики поля давления приземного слоя атмосферы на территории Северного полушария с использованием *метода выделения структур* (МВС).

**Достижение данной цели требует решения следующих основных задач:**

а) определить пространственное распределение структур (ПРС) полей среднего месячного значения давления в Северном полушарии и произвести их картирование; б) оценить динамику ПРС за период 1955 – 2000 годы.

В качестве исходных данных были использованы среднемесячные значения давлений в узлах сетки с шагом 10 градусов по широте и по долготе (288 точек) за период 1955 – 2000 годы на территории Северного полушария.

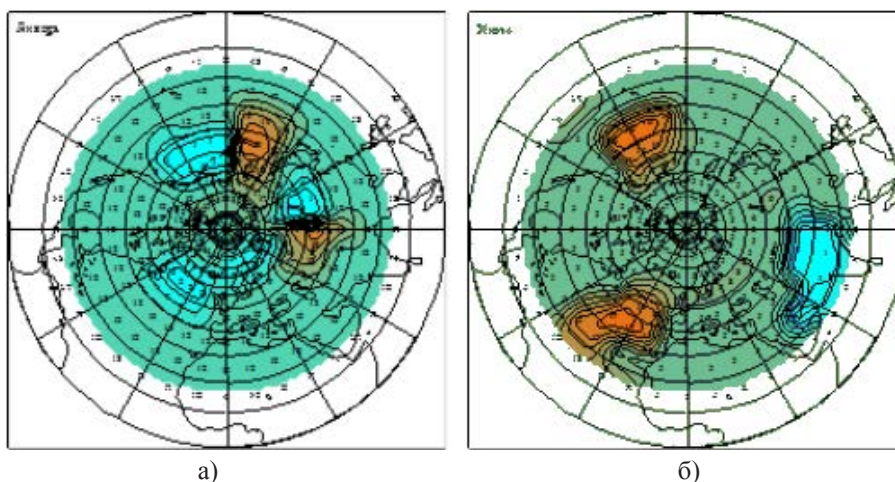
Классификация поля давления позволяет разбить исследуемое пространство на отдельные непересекающиеся области (классы). Это дает возможность провести затем анализ характеристик как внутри каждого класса, так и между классами. В частности, привязка классов к ландшафтам позволяет понять роль подстилающей поверхности при формировании климата [2,3].

В качестве характеристик классов поля давления были использованы: количество станций, попадающих в каждый класс, среднее значение давления для каждого класса, дисперсия для каждого класса, сопряженность выделенных классов и др.

В таблице 1 приведены характеристики классов поля давления для января и июля месяца. Следует отметить, что все классы были упорядочены по возрастанию и первый класс всегда имеет наименьшее значение давления, а последний – наибольшее. Эта процедура позволила сравнивать классы между собой за различные месяцы и таким образом выявлять эволюцию барического поля.

**Таблица 1.** Характеристики классов поля давления в январе и июле месяце.

№ класса	N	$P^-$	$\sigma^2$	N	$P^-$	$\sigma^2$
1	2	3	4	2	3	4
Январь				Июль		
1	12	1003,5	52,6	8	998,5	1,0
2	4	1003,8	43,1	3	1001,2	6,6
3	2	1005,0	68,5	36	1010,6	11,8
4	2	1006,8	13,4	2	1010,9	16,6
5	9	1008,7	44,9	148	1011,3	2,1
6	15	1009,8	58,7	4	1011,3	8,4
7	5	1009,9	43,0	43	1011,7	10,5
8	2	1013,4	29,6	7	1012,5	6,1
9	6	1014,5	32,2	3	1015,2	7,3
10	5	1014,5	42,3	3	1015,3	5,7
11	5	1014,5	31,6	2	1017,4	3,4
12	120	1017,3	8,1	3	1017,6	7,2
13	2	1017,4	29,1	3	1022,7	5,1
14	46	1017,9	37,7	3	1023,0	6,3
15	16	1020,3	38,7	4	1023,1	0,9
16	2	1025,8	33,2	3	1025,5	1,9
17	6	1025,9	26,4	2	1026,0	1,9
18	3	1028,3	7,6			
19	8	1032,7	6,8			
20	3	1038,6	9,3			



**Рисунок 1.** Распределение классов поля давления над Северным полушарием: а) – в январе; б) – в июле.

В результате исследования было выявлено, что количество станций, попадающих в один класс, меняется в пределах от 2 - 120 для января и до 148 для июля месяца. Минимальное среднеклассовое значение давления для января составляет 1003,5 гПа (1 класс), а максимальное – 1038,6 гПа (20 класс).

Для июля минимальное среднеклассовое значение давления составляет 998,5 гПа (1 класс), а максимальное – 1026,0 гПа (17 класс).

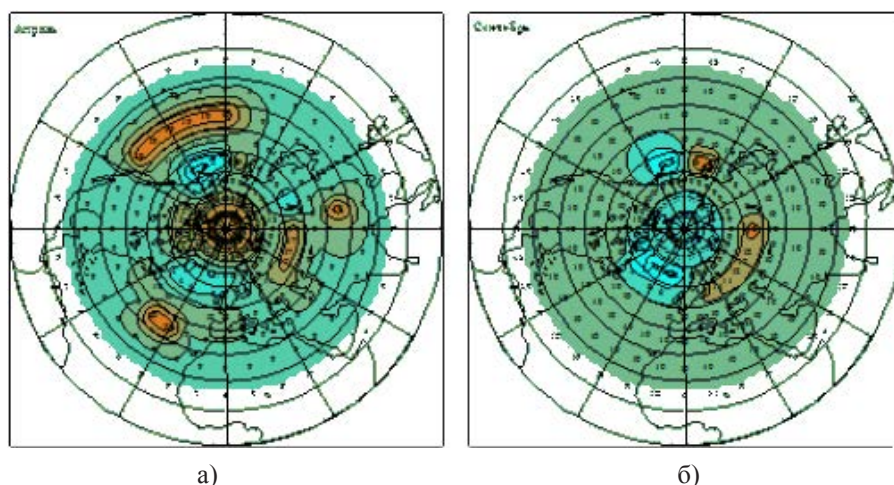
В результате исследования были построены карты распределения классов поля давления над Северным полушарием. Выявлены типовые поля, которые условно можно разделить на три типа. На рисунке 1а представлено типовое поле, характерное для зимнего периода. Наибольшую площадь занимает 12 класс – область повышенного давления. Классы 18-19 в январскую часть года, зимнюю в северном полушарии, характеризуют местоположение Азорского и Гавайского максимумов, образуя два очага высокого давления (до 1040 гПа в центре).

Классы 1-5 характеризуют области низкого давления: первая область находится над Лабрадорской котловиной Атлантического океана и простирается до Норвежского и Баренцево морей; вторая область наблюдается над Беринговым морем, давление в центре этих областей немного меньше 1005 гПа.

На рисунке 1б представлено типовое поле, характерное для летнего периода. В летнюю часть года на суше давление нормальное или пониженное – наибольшую площадь занимает 5 класс со среднеклассовым значением давления 1011,2 гПа, в тропиках Южной Азии стоит глубокий (998 гПа) Ирано-Тарский минимум – 1 класс. Области высокого давления (классы 14-17), спускаются к экваториальной зоне и располагаются над Атлантическим и Тихим океанами с максимальными значениями 1026 гПа в центре.

Наиболее сложным типом распределения поля давления является третий тип поля, который включает в себя признаки, как первого, так и второго полей. На рис. 2 приведено распределение классов поля давления для весеннего переходного периода (а - апрель) и для осеннего переходного периода (б - сентябрь).

Рис. 2а показывает устойчивое образование и развитие Гавайского и Атлантического максимумов – 19 и 20 класс соответственно. На рис. 2б на фоне повышенного давления происходит формирование Азорского и Гавайского максимумов.



**Рисунок 2.** Распределение классов поля давления над Северным полушарием: а) - в апреле; б) - в сентябре.

Исследование динамики структуры поля давления проводилось следующим образом. Весь интервал в 45 лет разбивался на 3 периода: с 1955 по 1970 гг.; с 1970 по 1985 гг.; с 1985 по 2000 гг. Для каждого периода проводилась процедура классификации и находилась пространственная структура классов для каждого месяца. Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что основные особенности поведения поля давления в эти периоды остаются неизменными.

МВС позволил по-новому взглянуть на проблему выделения и формирования центров действия атмосферы, оценить их динамику в годовом ходе и более объективно обосновывать их географическое положение.

#### Литература:

1. Хромов С.П. и Петросян М.А. Метеорология и климатология. 6 переработанное и переизданное издание. М. МГУ Изд-во Колос С. 2006. 582 с.
2. Кусков А.И., Катаев С.Г. Проблемы исследования геофизических полей // Вестн. ТГПУ. 2000. Вып. 2 (18). С. 21-27.
3. Катаев С.Г. Алгоритмические и программные средства аналитического и неразрушающего контроля параметров природной среды на основе метода выделения структур: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.11.13 [Место защиты: Томский Политехнический университет].— Томск, 2013. — 355 с.

## Experimental study of urban heat island of biggest Arctic cities: methods and first results

<sup>1</sup>Konstantinov P.I., <sup>2</sup>Baklanov A.A., <sup>1</sup>Varentsov M.I., <sup>3</sup>Repina I.A., <sup>1</sup>Samsonov T.E.,  
<sup>1</sup>Shuvalov S.E., <sup>1</sup>Grishenko M.Yu.

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Russia

<sup>2</sup> World Meteorological Organization, Switzerland

<sup>3</sup> Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

E-mail: kostadini@mail.ru

Urban Heat Island (UHI) effect (Magee et al, 1999) in high latitudes is very poorly described in scientific literature. Actually, we know nothing about behavior of the heat islands during the polar night, while anthropogenic heat is the main source of thermal energy.

This study is aimed to mitigate this lack of information about climatology of UHI formation in Russian cities of Arctic zone. In this paper, we consider the results of experimental research of the UHI of 4 biggest Arctic Cities (Murmansk, Norilsk, Apatity and Vorkuta), which were obtained during the expedition of Russian Geographic Society in 2013-2014.

**Due to severe climatic conditions, we ought to use three types of different measurements techniques:**

1. Mounting of two automatic weather stations (AWS) in rural zone and city center
2. Development of small temperature sensors (iButton) network in the city and suburbs
3. Regular car-based temperature sounding of the city with AWS.
4. Using MTP-5 microwave temperature profiler.

This research allowed to collect unique data about UHI in high latitudes. Analysis of the collected data showed the existence of UHI with the difference between city center and surrounding landscape up to 5-7 degrees Celsius. UHI characteristics in view of synoptic conditions was analyzed for several typical situations, for some cities (Norilsk) the negative correlation of the UHI power with air temperature was determined.

### References:

1. Magee N., Curtis J., Wendler G., *The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska// Theor. Appl. Climatol.* 1999. V. 64, pp 39-47

## Экспериментальное исследование островов тепла крупнейших арктических городов: методика и первые результаты

<sup>1</sup>Константинов П.И., <sup>2</sup>Бакланов А.А., <sup>1</sup>Варенцов М.И., <sup>3</sup>Репина И.А., <sup>1</sup>Самсонов Т.Е.,  
<sup>1</sup>Шуvalов С.В., <sup>1</sup>Грищенко М.Ю.

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО), Женева, Швейцария

<sup>3</sup>Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

E-mail: kostadini@mail.ru

### ВВЕДЕНИЕ

Огромное внимание мирового сообщества специалистов в области городской метеорологии приковано в настоящий момент к мегаполисам тропической зоны – это связано с заметным недостатком фундаментальных знаний о климатических особенностях подобных территорий в принципе, так и урбанизированных территорий в частности. Тем более удивителен тот факт, что к настоящему моменту крайне мало информации о микроклиматических особенностях городов, расположенных по другую сторону от умеренного пояса - за полярным кругом. Имеются лишь единичные исследования, проведенных на Аляске и показавших существование в зимнее время мощных островов тепла в относительно небольших городах Барроу и Фэрбанксе. Так, температура в центре последнего, несмотря на относительно небольшое (35 тыс. человек) и традиционную для Америки малоэтажную застройку, в зимние месяцы в среднем более чем на 1° выше, чем в расположенном за пределами города аэропорту (Magee и др.,



1999). Можно ожидать, что в более крупных городах с более плотной застройкой данный эффект будет значительно сильнее.

Изучение полярных островов тепла также имеет важный экологический аспект: так как в условиях полярной ночи они создаются главным образом за счет антропогенных источников тепла, их изучение позволит получить данные о тепловом загрязнении окружающей среды.

К примеру, российские Норильск и Мурманск, расположенные на широте почти 70° с.ш, являются двумя крупнейшими в мире городами, расположенным за полярным кругом, и многократно превосходят Барроу и Фэрбанк по площади и населению. Значительная площадь Норильска, высокая плотность застройки, а также низкие зимние температуры, определяющие большие энергозатраты на отопление, делают его одним из лучшим мест для изучения эффекта острова тепла северных городов вообще.

В связи с этим была сформирована основная тема исследования: провести экспериментальное исследование городского острова тепла в крупных городах севера России: в Апатитах, Воркуте, Мурманске и Норильске (крупнейшие российские города за полярным кругом) в условиях полярного дня и полярной ночи путем проведения метеорологических наблюдений в центре города и в фоновых условиях на удалении от городской застройки.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ:

Поскольку существующих данных метеорологических станций сети РосГидромет недостаточно для оценки городского острова тепла (в лучшем случае в каждом из городов есть максимум одна станция), искомую информацию возможно получить лишь экспериментальным способом. Для надежности мы использовали сразу три различных метода исследований городского микроклимата:

1. Автоматические метеостанции (АМС) Davis Vantage Pro 2 (Рис. 1, 2), измеряющие температуру, влажность и скорость ветра, и хорошо себя зарекомендовавшие в многочисленных кафедральных экспедициях за счет относительно низкой стоимости, надежности и хорошей точности измерений температуры (0.5° С).
2. Термодатчики iButton от американской фирмы Maxim Integrated (<http://www.maximintegrated.com/>), представляющие собой измеритель и дата-логгер температуры воздуха (с точностью 0.5° С) в металлическом корпусе (Рис. 2, внизу).
3. Мобильные комплексы на основе Davis Vantage Pro 2 (рис.3).



**Рис.1.** Установка метеостанции в пригороде Норильска в пургу, при температуре -22 градуса и при ветре 17 м/с. Фото М.И.Варенцова.



**Рис.2.** Высокоточный измерительный комплекс Davis Vantage Pro на центральной площади города Апатиты. Термохронные датчики (внизу слева).



**Рис.3.** Мобильный измерительный комплекс Davis Vantage Pro на основе арендованного Renault Duster. Фото М.И.Варенцова.

Подобная методика позволяет подробно картировать с небольшой погрешностью всю температуру на улицах города, тем более, северные города довольно компактны. Именно с помощью сочетания данных способов была получена карта, показывающая насколько неоднородна может быть температура ночью в пределах небольшого (59 тыс жителей) города Апатиты (рис.4)

Хорошо видно, что на небольших расстояниях при антициклональном типе погоды термические контрасты в пределах небольшого города могут достигать 4-5 градусов. В отдельные сроки разность температур достигает 5-7 градусов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Аналогичные измерения были проведены во всех городах проекта. Впервые в истории Норильска, Воркуты, Мурманска и Апатит измерены пространственные характеристики городского острова тепла для соответствующих синоптических условий. Результаты получились довольно неожиданными. Так в Норильске и в Апатитах разница температур между центром города и окрестностями составляет до 5-7 градусов, в Мурманске и Воркуте различия получились более сглаженными. Согласно предварительным результатам (рис.5), подобные пилотные исследования могут иметь исключительный экономический эффект.

Согласно оценкам для Апатитов, регулярная ошибка в оценке температуры воздуха на один градус, приводит в течение отопительного периода (251 день в Апатитах) к дополнительным тратам более чем 8 с половиной миллионов рублей. В настоящий момент с помощью модели COSMO\_CLM оцениваются изменения полей температуры и влажности воздуха в городах Арктической зоны РФ в XXI веке, а также изучение четырехмерной пространственно-временной структуры городского острова тепла.

Экспериментальная часть работы и теоретические обобщения в области первичной обработки данных выполнены при поддержке гранта Русского Географического Общества №27/2013 «Климатические тайны Арктики: исследование климата полярных мегаполисов», оценка экспериментальных методик и разработка технологии моделирования будущих изменений явления - за счет гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК- 6037.2015.5.

#### Литература:

1. Magee N., Curtis J., Wendler G., *The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska*// *Theor. Appl. Climatol.* 1999. V. 64, pp 39-47
2. P. Konstantinov, A. Baklanov, M. Varentsov, E. Kukanova, I. Repina, S. Shuvalov, and T. Samsonov. *Experimental urban heat island research of four biggest polar cities in northern hemisphere. In Geophysical Research Abstracts, volume 16 of EGU General Assembly, pages EGU2014-10699-1, Germany, 2014. Germany.*

Апатиты. Поле температур воздуха ночью 29.01.14

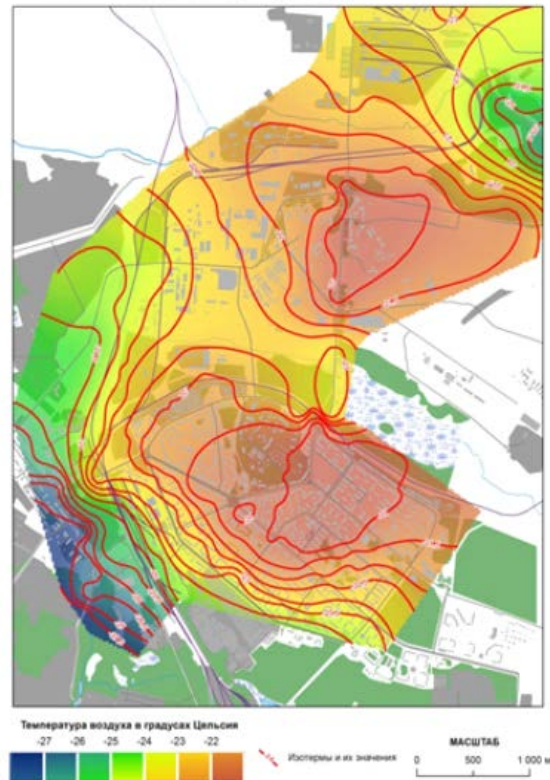


Рис.4. Температура воздуха в пределах города Апатиты в период 02:00-04:00 29.01.2014.



Рис.5. Оценка экономии электроэнергии (по предварительным данным) на примере отопительного сезона в Апатитах.

## The influence of heat fluxes over the Arctic Ocean on the temperature conditions over the North Eurasia

Moraru E.I., Loginov S.V.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: [janey@sibmail.com](mailto:janey@sibmail.com)  
Web: [www.imces.ru](http://www.imces.ru)

Significant climate changes are observed in the polar latitudes of the North Hemisphere, with the greatest climatic variations during the last decade. These climate variations significantly influence the climate of surrounding areas and planate climate in general.

The Barents Sea is selected as the study area in the Arctic Ocean, because this region has the lowest concentration of sea ice. The Western Siberia and North-Western Russia are selected as the study areas over the

North Eurasia based on the decomposition of the air temperature series on the empirical orthogonal functions. These regions correspond areas of the greatest variability of air temperature over the North Eurasia.

The decrease of ice area, ice thickness and ice concentration associated with global warming influences the variation of exchange of heat and moisture between the ocean and atmosphere, especially during the last decade. The maximum correlations are observed between the heat characteristics in the Barents Sea and the air temperature over the North-Western Russia

## Анализ влияния тепловых потоков в Арктическом секторе на температурные условия в Северной Евразии

Морару Е.И., Логинов С.В.

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

E-mail: [janey@sibmail.com](mailto:janey@sibmail.com)

Web: [www.imces.ru](http://www.imces.ru)

Существенные изменения климата наблюдаются в полярных широтах Северного полушария, притом наибольшие климатические вариации относятся к последнему десятилетию. Эти изменения могут оказывать существенное воздействие на климат окружающих территорий и климат планеты в целом. Многими исследователями отмечается, что в результате глобального потепления уменьшается толщина, концентрация и площадь морского льда, что оказывает существенное влияние на тепло-влагообмен между океаном и атмосферой.

Целью исследования является оценка пространственно-временной изменчивости тепловых потоков на границе океан-атмосфера в районах Арктических морей, а также их связь с температурным режимом в Северной Евразии за период 1979 – 2012 гг.

Оценка временной изменчивости температуры воздуха ( $T_{\text{возд}}$ ) в районах Северной Евразии проводилась по данным реанализа JRA55 с пространственным разрешением  $1,25^\circ \times 1,25$ . Анализ изменчивости температуры поверхности океана (SST) и концентрации морского льда (Ice) проводился по данным центра NOAA с пространственным временным разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$ . Исследование пространственно-временной изменчивости потоков явного (S) и скрытого (LE) тепла в Арктических морях осуществлялось по среднемесячным данным реанализа OAFflux с пространственным разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$ .

Важной особенностью Северного Ледовитого океана, влияющей на изменчивость тепловых характеристик на границе океан-атмосфера, является наличие морского льда, занимающего большую часть поверхности океана. Пространственное распределение концентрации морского льда в Северном Ледовитом океане за период 1979 – 2012 гг. в январе и июле приведён на рис. 1. Видно, что концентрация морского льда и его площадь существенно уменьшаются в тёплый период года, по сравнению с зимними месяцами. С ноября по апрель практически все шельфовые моря Арктического бассейна (Карское, Лаптевых и Восточно-Сибирское моря) покрыты льдом с концентрацией 0,9 – 1. Исключением является Баренцево море, концентрация в котором не превышает 0,2. В тёплый период года средняя концентрация морского льда в Баренцевом море за период 1979 – 2012 гг. близка к 0. В остальных морях летом она колеблется в пределах 0,2 – 0,4, с максимумом в районе Восточно-Сибирского и Лаптева морей.

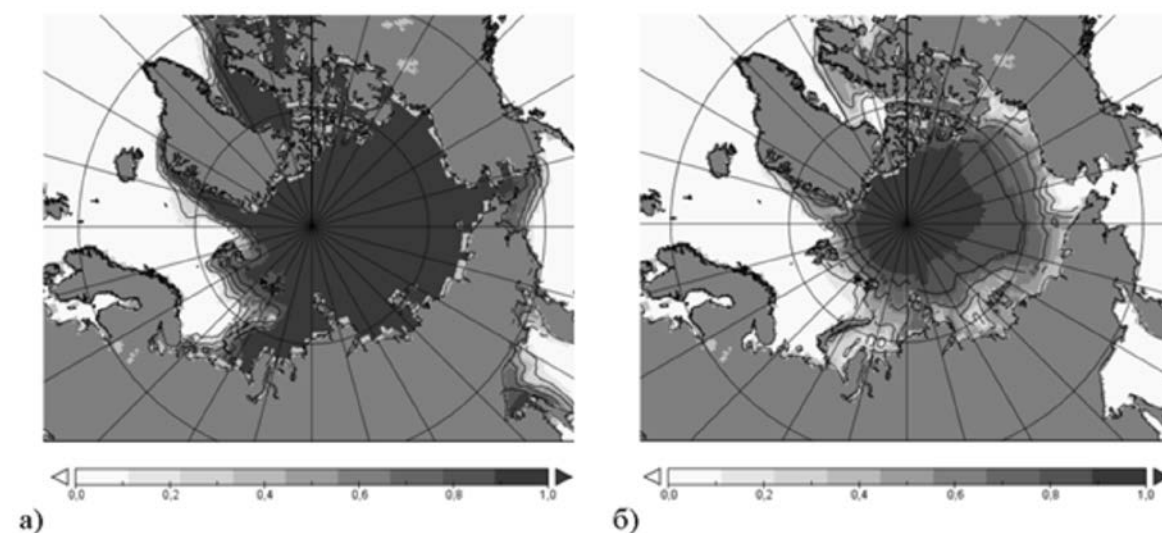
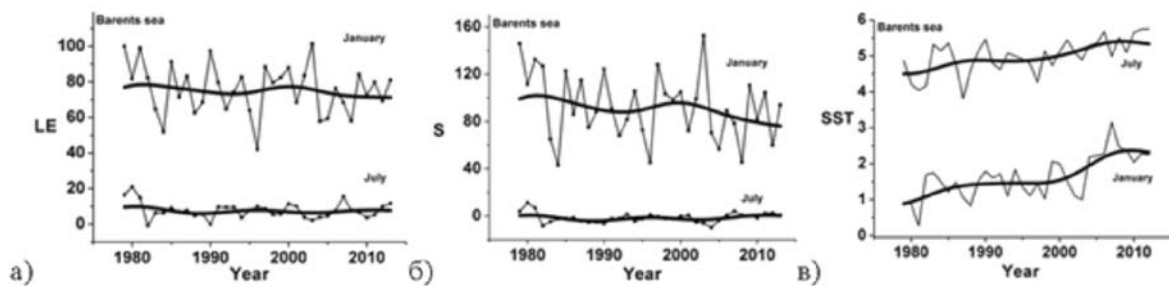


Рис. 1. Пространственное распределение средней концентрации морского льда в Северном Ледовитом океане в январе (а) и июле (б) за период 1979 – 2012 гг.

В качестве района исследования выбран район Баренцева моря, который имеет наименьшую концентрацию морского льда (0,2 зимой, 0 летом). При оценке временной изменчивости концентрации за период 1979 – 2012 гг. заметен чёткий отрицательный тренд концентрации, толщины и площади морского льда в холодный период года. Данный факт можно объяснить увеличением температуры воздуха в последнее десятилетие, а также температуры поверхности океана (рис. 2в), особенно в зимние месяцы. Отмечается потепление поверхностных арктических вод с 2000 по 2008 гг., с последующим замедлением потепления по 2012 гг.

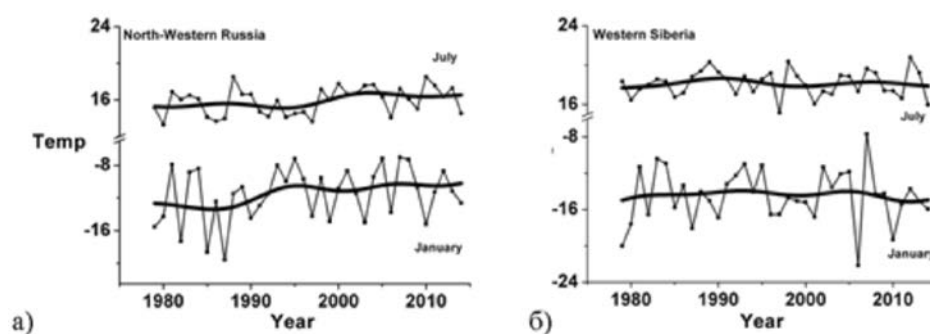
Уменьшение площади, толщины и концентрации льда, связанное с глобальным потеплением, влияет на изменчивость тепло- и влагообмена на границе океан-атмосфера, особенно в последнее десятилетие. На рис. 2 приведен временной ход среднемесячных потоков скрытого (а) и явного (б) тепла в районах Баренцева моря. В январе отмечается отрицательная тенденция тепловых потоков за последнее десятилетие (-15 Вт/м<sup>2</sup>/10 лет для явного тепла, -7 Вт/м<sup>2</sup>/10 лет для скрытого), что можно объяснить уменьшением разности температур поверхности океана и воздуха в районе Баренцева моря. В июле, наоборот, разность температур увеличивается, в результате чего появляется небольшой положительный тренд тепловых потоков (2,9 Вт/м<sup>2</sup>/10 лет для явного тепла, 1,4 Вт/м<sup>2</sup>/10 лет для скрытого).



**Рис. 2.** Межгодовая изменчивость среднемесячных потоков скрытого (а) и явного (б) тепла и температуры поверхности океана (в) в Баренцевом море за период 1979 – 2012 гг.

Для оценки связи между тепловыми потоками в районах шельфовых морей Северного Ледовитого океана с температурным режимом на материке за период 1979 – 2012 гг. в Северной Евразии выделалось несколько районов. Применялась методика разложения рядов температуры воздуха на естественные ортогональные функции. Эти районы соответствуют районам наибольшей изменчивости температуры воздуха в Северной Евразии. Погрешность разложения составила 13 %. В результате выделены следующие районы: Северо-Запад России (60 - 66°с.ш., 30 – 60°в.д.) и Западная Сибирь (50 - 66°с.ш., 60 – 90°в.д.).

Временной ход температуры воздуха в этих районах приведён на рис. 3. Видно, что температура в Западной Сибири имеет небольшой отрицательный тренд в последнее десятилетие (в январе -0,7°С/10 лет, в июле -0,4°С/10 лет). В Северо-Западном районе России температура воздуха практически постоянна (в январе -0,4°С/10 лет, в июле -0,2°С/10 лет). Таким образом, отмечается отрицательный тренд температуры воздуха во всех исследуемых районах Северной Евразии, с максимальным похолоданием в зимние месяцы.



**Рис. 3.** Межгодовая изменчивость температуры воздуха в районах Северной Евразии: Северо-Запад России (а) и Западная Сибирь (б) за период 1979 – 2014.

**Таблица 1.** Коэффициент корреляции между тепловыми характеристиками (SST, S, LE) в Баренцевом море и температурой воздуха (Твозд) в районах Северной Евразии. Уровень доверительной вероятности 0,1.

	Район Евразии	Январь	Апрель	Июль	Октябрь
SST-Temp	Северо-Запад России	0,3	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>
	Западная Сибирь	0,2	<b>0,4</b>	0,3	0,2
S-Temp	Северо-Запад России	-0,3	<b>-0,5</b>	-0,3	<b>-0,6</b>
	Западная Сибирь	0,4	0,1	0,1	-0,1
LE-Temp	Северо-Запад России	-0,2	<b>-0,4</b>	<b>-0,4</b>	<b>-0,5</b>
	Западная Сибирь	0,3	0,1	0,1	0,1

Оценка связи между тепловыми потоками в районах шельфовых морей Северного Ледовитого океана с температурным режимом в районах Северной Евразии за период 1979 – 2012 гг. оценивалась с помощью методов корреляционного анализа (табл. 1). Максимальные корреляционные связи наблюдаются между тепловыми характеристиками в Баренцевом море и температурой воздуха на Северо-Западе России ( $-0,5 \div -0,4$  с потоком скрытого тепла,  $-0,6 \div -0,5$  с потоком явного тепла и  $0,4 \div 0,5$  с температурой поверхности океана). Такие связи можно объяснить близким расположением районов друг относительно друга и особенностью циркуляции. Опираясь на отрицательные связи можно предположить о наличии существенной роли адвекции. Связи с температурой воздуха в других исследуемых районах Северной Евразии незначимы.

Таким образом, уменьшение площади, толщины и концентрации морского льда, связанное с глобальным потеплением, влияет на изменение тепло- и влагообмена на границе океан-атмосфера, особенно в последнее десятилетие. Максимальные корреляционные связи наблюдаются между тепловыми характеристиками в Баренцевом море и температурой воздуха на Северо-Западе России. Опираясь на отрицательные связи можно предположить о наличии существенной роли адвекции.

## Modeling of atmospheric transport pollutant from a point source in the Southern Baikal region

<sup>1</sup>Pyanova E.A., <sup>2</sup>Faleychik L.M.

<sup>1</sup> Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia

E-mail: [pianova@ngs.ru](mailto:pianova@ngs.ru), [lfaleychik@bk.ru](mailto:lfaleychik@bk.ru)

The results of a numerical study of atmospheric circulations and pollutant transport in an area located around Lake Baikal in the summer are presented. The study is based on a non-hydrostatic mesoscale model of atmospheric dynamics and a model of passive pollutant transport adapted for an area with complex terrain. The pre-processing of the input information about the underlying surface, visualization and spatial analysis of the scenario experiment results are carried out in the ArcGIS environment using GIS tools and a special technique developed by the authors. The results of modeling the pollutant transport from a point source in the city of Shelekhov obtained with these models are in qualitative agreement with the available observational data. The effects of temperature stratification of the atmosphere on the pollutants carried by north-west winds towards Lake Baikal are shown.

*This work was supported by the Presidium of RAS under program № 43, the Russian Foundation for Basic Research under grant № 14-01-00125-a, and SB RAS Basic Research project IX.88.1.6.*

## Моделирование атмосферного переноса примеси от точечного источника в Южном Прибайкалье

<sup>1</sup>Пьянова Э.А., <sup>2</sup>Фалейчик Л.М.

<sup>1</sup> Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия

E-mail: [pianova@ngs.ru](mailto:pianova@ngs.ru), [lfaleychik@bk.ru](mailto:lfaleychik@bk.ru)

Представлено описание летнего численного эксперимента по изучению формирования атмосферных циркуляций и процессов переноса пассивной примеси в Южном Прибайкалье. Моделирование проведено для условного среднего 22 июля. Выбор данного сценария обусловлен тем, что в работе [1] представлены некоторые результаты наблюдений за распределением концентраций диоксида серы над рассматриваемой территорией в указанный летний период 2013 года. При моделировании была попытка на качественном уровне воссоздать наблюдаемые метеорологические условия и возможный процесс переноса примеси. О количественном согласовании речи пока не идет, поскольку на момент проведения численного эксперимента реальными данными о выбросах авторы не располагали.

Коротко изложим основные моменты, относящиеся к результатам наблюдений, представленные в работе [1]. При прохождении корабля по маршруту Большие Коты – Иркутская ГЭС – Большие Коты были отмечены два максимума концентрации диоксида серы в первой половине дня и один максимум на обратном пути во второй половине дня. Меньший из двух максимумов был зафиксирован в районе

Большие Коты – Листвянка, второй, с большими значениями – в средней части Иркутского водохранилища. В районе ГЭС максимумов не наблюдалось. На обратном пути по тому же маршруту значения концентраций диоксида серы в средней части водохранилища заметно уменьшились, а границы этого максимума сильно размылись. В период наблюдений отмечался слабый северо-западный ветер. Авторы в работе [1] предположили, что наблюдаемые максимумы были получены в результате того, что маршрут корабля пересек шлейф выбросов от предприятия Шелехова. Опираясь на это предположение, в своем исследовании мы особое внимание уделили моделированию переноса примеси от условного источника, расположенного на территории Шелехова.

Для моделирования атмосферных циркуляций и переноса пассивной примеси над рассматриваемой территорией использовалась негидростатическая модель динамики атмосферы и уравнение конвекции-диффузии с начальными и краевыми условиями. Более подробное описание моделей и уравнений можно найти в работах [2, 3]. Модели были адаптированы к орографическим условиям Байкальского региона. Подготовка и обработка исходных данных о моделируемой области, визуализация и анализ результатов сценарных расчетов осуществлялась в геоинформационной среде ArcGIS с использованием авторской технологии и ГИС-инструментария [4 - 6].

В качестве расчетной модельной области выбрана территория размером  $666 \times 710 \text{ км}^2$ , охватывающая озеро Байкал и части территорий Иркутской области, Республики Бурятия и Забайкальского края. Высота расчетной области 6 км. Несмотря на то, что изучение процессов переноса примеси велось в основном только для Иркутско-Черемховской равнины, суточный ход атмосферной динамики моделировался над заметно большей территорией. Это сделано для того, чтобы заведомо избежать недоучета влияния на территорию Южного Прибайкалья атмосферных потоков, формирующихся в результате взаимодействия таких факторов, как протяженное и холодное в летний период озеро Байкал, и высокие горные цепи, склоны которых в летний период нагреваются очень неравномерно.

По модели атмосферной динамики рассчитывался суточный ход метеорологических элементов, соответствующий типичным ситуациям для июля. Были рассмотрены два метеорологических сценария: эксперимент с устойчивой температурной стратификацией для нижних слоев фоновой атмосферы и эксперимент с нейтральной стратификацией. Данные о средних характеристиках для температуры, влажности и других метеопараметров, на основе которых моделировалось их суточное изменение, были взяты из климатических справочников.

Первые сутки расчетов модель адаптировалась к температурным и орографическим неоднородностям подстилающей поверхности. Опытным путем было установлено, что на вторые сутки модель уже выходит на квазистационарный режим, поэтому условный источник, расположенный в Шелехове, включался в начале вторых модельных суток. Высота точечного источника полагалась 100 м, мощность его в экспериментах была задана как одна условная единица примеси за единицу времени  $\Delta t = 60 \text{ с}$ .

Численные расчеты проводились на сетке  $667 \times 711 \times 50$  узлов с шагами по горизонтали  $\Delta x = \Delta y = 1 \text{ км}$ , по вертикали –  $\Delta z = 100\text{-}200 \text{ м}$ . Во всех численных экспериментах на верхней границе расчетной области задавался северо-западный внешний фоновый поток  $4 \text{ м/с}$ .

Далее на рис. 1-3 представлены некоторые результаты сценарных расчетов – изолинии концентрации пассивной примеси в различные моменты времени на высоте 100 м над поверхностью в юго-западной части расчетной области.

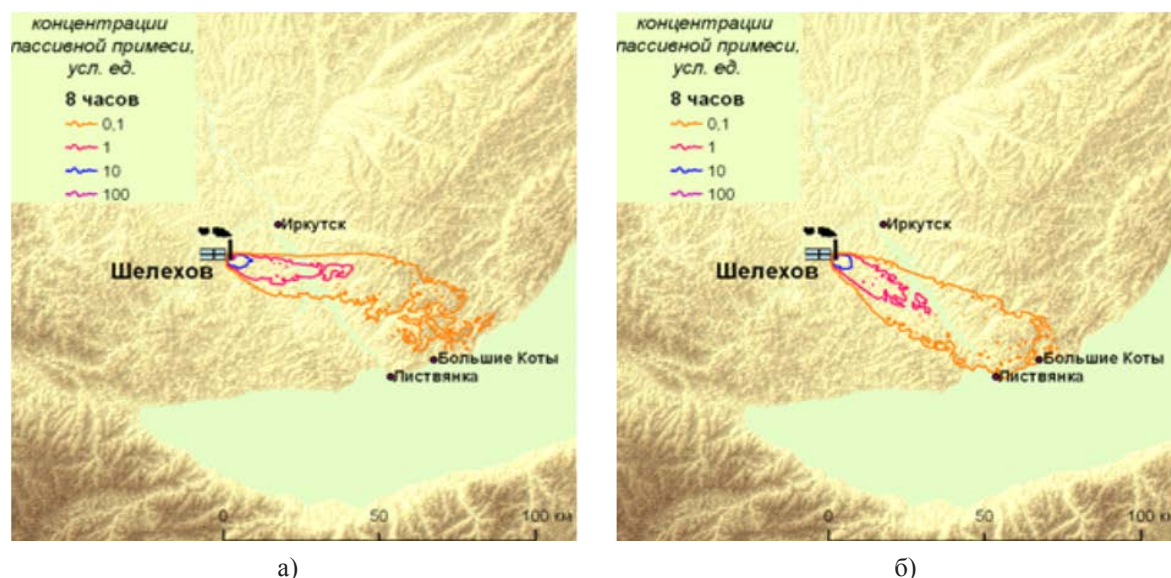
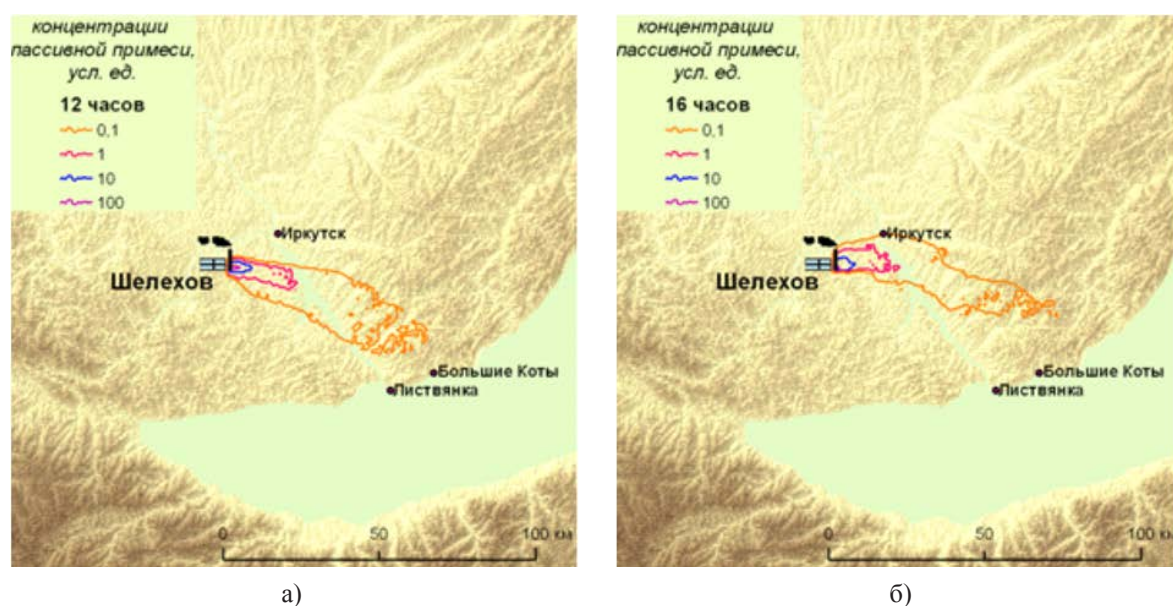


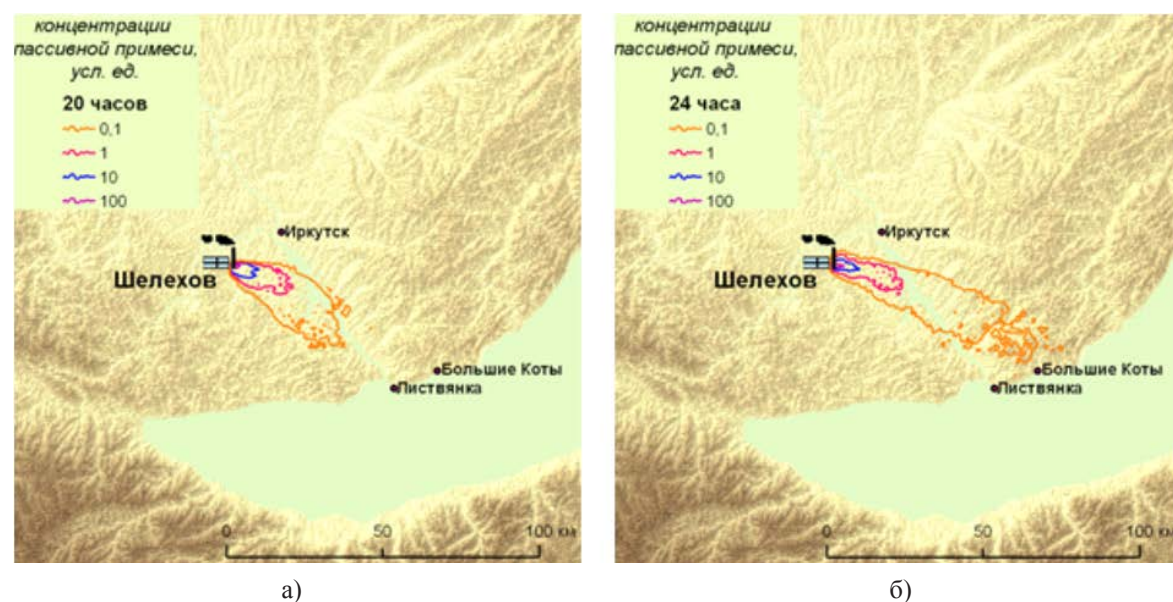
Рис. 1. Результаты расчетов на момент 8 ч утра местного времени, а) – устойчивая стратификация нижних слоев фоновой атмосферы, б) – нейтральная.

Анализ сценарных расчетов показал некоторое различие в поведении полей ветра и шлейфа пассивной примеси от источника выбросов для экспериментов с различной температурной стратификацией нижних слоев фоновой атмосферы. В утренние часы – в это время в расчетах формируется устойчивая стратификация атмосферы в обоих экспериментах – шлейф трассера достигает побережья Байкала в районе между Листвянкой и Большими Котами. Это хорошо видно на рисунке 1б, соответствующем эксперименту с нейтральной стратификацией в начальный момент времени. В расчетах с устойчивой стратификацией побережья Байкала достигают только более низкие концентрации порядка 0.01 условной единицы. Явно это на рисунке 1а не отражено, поскольку для наглядности рисунков ограничили внешней изолинией, соответствующей 0.1 условной единицы. При этом на рисунках хорошо видно, что изолиния со значением 1 пересекает Иркутское водохранилище примерно в его середине. Такое поведение полей концентрации пассивной примеси согласуется с максимумами диоксида серы, зафиксированными наблюдателями при прохождении исследовательского судна по маршруту Большие Коты – Иркутск [1].

К полудню и в начале второй половины дня, когда подстилающая поверхность прогревается, и хорошо развивается турбулентное перемешивание, шлейф примеси, по данным численных расчетов, укорачивается (рис. 2а, б). При этом в расчетах с устойчивой фоновой стратификацией во второй половине дня наблюдалось заметное отклонение верхней части шлейфа к северо-востоку (рис. 2б), в то время как в эксперименте с нейтральной стратификацией сохранялось направление распространения трассера на



**Рис. 2.** Результаты расчетов для сценария с устойчивой стратификацией фоновой атмосферы, а) в 12 часов местного времени, б) – в 16 часов.



**Рис. 3.** Результаты расчетов для сценария с нейтральной стратификацией нижних слоев фоновой атмосферы, а) в 20 часов местного времени, б) – в 24 часа.

юго-восток. Таким образом, расчеты с устойчивой фоновой атмосферой показали меньшее соответствие имеющимся наблюдениям, поскольку такое поведение трассера предполагает увеличение концентрации примеси в районе Иркутской ГЭС, которое не было зафиксировано наблюдателями.

Расчеты для сценария с нейтральной стратификацией нижних слоев фоновой атмосферы показали, что во второй половине дня поведение шлейфа примеси не противоречит тому факту, что в средней части Иркутского водохранилища максимум все еще наблюдался, но значительно уменьшился (рис. 3а). В ночное время, когда в обоих экспериментах опять сформировалась устойчивая стратификация, и турбулентное перемешивание ослабло, в численных расчетах наблюдался перенос пассивной примеси в направлении Байкала (рис. 3б), что способствует образованию утреннего максимума в районе между Большими Котами и Листвянкой.

Таким образом, полагаем, что результаты численного эксперимента с нейтральной стратификацией нижних слоев фоновой атмосферы качественно согласуются с результатами наблюдений, представленными в [1]. Различия в поведении шлейфа пассивной примеси в экспериментах с различной стратификацией требуют более подробного рассмотрения.

Ранее авторами настоящей работы были проведены сценарные численные эксперименты, в которых на более грубой сетке по горизонтали (5 км × 5 км) исследовались процессы формирования атмосферных циркуляций и трансформации фонового набегающего потока над неоднородной орографией Байкальского региона, а также влияние формирующихся ветровых потоков на перенос примеси от источников Иркутско-Черемховского промышленного комплекса [7]. Эти исследования согласуются с теми результатами, которые получены при расчетах на более подробной сетке и часть которых представлена в данной работе. Считаем, что результаты настоящей работы можно рассматривать как уточняющие и дополняющие в цикле работ и исследований мезоклимата Байкальского региона.

Авторы выражают глубокую признательность и благодарность Е.А. Цветовой и В.В. Пененко за внимание к работе.

*Работа выполняется при поддержке Программы фундаментальных исследований № 43 Президиума РАН, проекта РФФИ № 14-01-00125-а, проекта IX.88.1.6 Фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН. Расчеты выполнены на ССКЦ СО РАН.*

#### **Литература:**

1. Особенности пространственного распространения диоксида серы в Прибайкалье по данным маршрутных измерений и численных экспериментов / В. А. Оболкин, В. Л. Потемкин, В. Л. Макухин, Е. В. Чипанина, И. И. Маринайте // *Метеорология и гидрология*. – 2014. – № 12. – С. 35–41.
2. Пьянова Э. А., Фалейчик Л. М. Информационно-вычислительная технология для сценарных оценок динамики и качества атмосферы // *Вычислительные технологии*. – 2012. – Т. 17. – № 1. – С. 109–119.
3. Пьянова Э. А. Исследование трансформации воздушного потока над термически и орографически неоднородной подстилающей поверхностью // *Вычислительные технологии*. – 2005. – Т. 10. – № 3. – С. 106–111.
4. Фалейчик Л.М. Геоинформационное обеспечение численного моделирования локальных атмосферных процессов // *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии*. – 2012. – Т. 10. – № 2. – С. 14–24.
5. Фалейчик Л.М., Пьянова Э.А. Использование ГИС-технологий и математического моделирования для оценки изменений состояния природной среды под влиянием хозяйственной деятельности человека // *Вестник Забайкальского государственного университета*, 2008. – № 5. – С. 117–127.
6. Фалейчик Л.М., Пьянова Э.А. Технология геоинформационного анализа результатов численного моделирования для оценки состояния окружающей среды // IV конф. «Геоинформационные технологии и космический мониторинг». – Ростов н/Д: «ЦВВР», 2011. – С. 233–238.
7. Ryanova E. A., Penenko V. V., Faleychik L. M. Simulation of atmospheric dynamics and air quality in the Baikal region // *Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 929247 (November 25, 2014) [Electronic resource]*. – Англ. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2074998>.



# Simulation of heat and mass transfer in Lake Baikal in winter taking into account the phase transitions in water-methane system

Tsvetova E.A.

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

At the end of the twentieth century, the large deposits of methane hydrates were discovered at the bottom of Lake Baikal. In this connection, there was a need to consider a new class of problems hydrothermodynamics to study physical processes in the hydrate - gas - water system, taking into account the possible mechanisms of transformation in the specific conditions of the lake.

We consider a problem of modeling hydrothermodynamics of heterogeneous system, which includes water and methane. Over time, the system state is changed with phase transitions. All phases are modeled as continuous media. The main phase is liquid, which is regarded as the carrier medium. In each volume of the simulation domain, we determine the portions of each phase, which are modified by the hydrothermodynamics and the interactions between phases.

For modeling hydrothermodynamics of lake waters as the carrier medium, the mathematical model in the non-hydrostatic approximation is used. It is represented by a system of partial differential equations for the three components of the velocity vector, the equation for the temperature, the equation of state and the continuity equation. The system of equations takes into account the Coriolis force, transport and turbulent diffusion for heat and momentum.

Phase behavior of methane is described by a system of equations of the convection-diffusion - reaction type. It is assumed that the dissolved methane moves with a velocity of the carrier medium and the gaseous and solid phases are obtained additional lifting rates due to buoyancy forces. Thermal effects, taking into account the latent heat of phase transition, are included in the equation for the temperature. The system of equations is supplemented by an appropriate set of boundary and initial conditions.

We present the results of a scenario calculation associated with the modeling of a ring structure, which the astronauts saw on the ice of Lake Baikal in 2009.

Analysis of numerical experiments with methane prompted us to the conclusion that methane plays a significant role not only in the appearance of the local ring structures near the surface, but it also participates in the fundamental governing processes.

In particular, the experiments have shown that the compensating currents, formed by the mixture lifting, give rise to thermobaric instability and downwelling water to great depths. Note that the barrier to exchange between surface and deep waters of Lake Baikal in winter is a layer of temperature maximum between 150-300 m depths. This is the layer of warm water, above and below of which the more cold water is placed. It is formed in the lake during the autumn convection due to decreasing the temperature of maximum density with increasing pressure.

Thus, the following conclusion was made with the results of the simulation. The rise of methane hydrate and its subsequent transformation can be the cause of the rings on the ice of Lake Baikal, and can serve as one of the triggers of deep convection leading to the renewal of deep waters.

*The work is supported by the programs 18 and 43 of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, as well as the RFBR project 14-01-00125.*

## Моделирование тепло-массообмена в Байкале в зимний период с учетом фазовых переходов в системе вода-метан

Цветова Е.А.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия  
E-mail: e.tsvetova@ommgp.sgcc.ru

В конце двадцатого века на дне озера Байкал были открыты большие залежи гидратов метана. В связи с этим возникла потребность в рассмотрении нового класса задач гидротермодинамики для изучения физических процессов в системе гидрат - газ - вода с учетом возможных механизмов трансформации в специфических условиях озера.

Причинами появления метана в озере может быть попадание газогидрата в воду в результате оползней и подвижек грунта, извержений подводных вулканов, просачивания пузырей из пористого дна в районах выхода газа и т.д. Метан может быть в трех состояниях (фазах): в составе газогидрата (твердый), в пузырях (газ) и растворенный в воде.

Для качественных оценок поведения метана в воде обычно строится фазовая диаграмма, которая показывает, при каких условиях окружающей среды по давлению и температуре и в каких состояниях одновременно может существовать метан. Рассматривая фазовую диаграмму для Байкальских условий, можно увидеть, что в толще вод (максимальная глубина Байкала 1637 м) может происходить как разложение, так и образование гидратов. В газовой фазе и в растворенном виде метан может находиться во всей толще. Имеются также специфические участки, где могут присутствовать и все три и две фазы одновременно. Существенно то, что фазовые переходы осуществляются при определенных условиях, зависящих от текущего состояния всей системы.

Гидрат представляет собой кристаллическую структуру, похожую на снег. Идеальная формула газогидрата метана имеет вид  $CH_4(H_2O)_{5,85}$ , молекулярный вес 121,3 г/моль. Плотность гидрата равна  $0,9 \text{ г/см}^3$ , насыщенность газом  $G=13.2\%$ . Так как газогидрат легче воды, он будет всплывать, оказавшись в воде. Во время подъема с кристаллами происходит два процесса: растворение и диссоциация. Эти два процесса имеют совершенно разную природу по отношению к внутренней устойчивости кристаллов. В первом случае, при подъеме до глубины приблизительно 380 м, гидрат внутренне устойчив, но под действием окружающей водной среды с поверхности кристаллов вымываются молекулы. На этом участке подъема масса гидрата практически не меняется, поскольку скорость его растворения невелика, всего несколько мм/год.

На глубинах около 380 м газогидрат подвергается диссоциации на газ и воду. Это другой процесс, он происходит за счет того, что гидрат становится неустойчивым внутренне, происходит разрыв внутренних связей в самих молекулах, в результате чего осуществляется фазовый переход. Процесс происходит довольно быстро. На меньших глубинах в равновесном состоянии газогидрат уже не может находиться. Однако, все-таки, некоторая его часть может добраться до поверхности, не успев разложиться. Это зависит от того, насколько большими изначально были кристаллы всплывающих фрагментов. Заметим, что процессы разложения и образования газогидрата происходят с поглощением и выделением тепла, что влияет на термодинамику системы.

Что касается пузырей, возникающих при разложении гидрата, то их поведение зависит от многих факторов. При подъеме пузырей давление вокруг них уменьшается, что должно приводить к расширению газа. В то же время газ выходит из пузыря, что приводит к уменьшению объема. В соревновании между этими двумя процессами участвуют первоначальный размер пузыря, его газовый состав, состояние окружающей среды, глубина и т.д. Существенное значение имеет множество факторов: поднимается ли единичный пузырь или происходит коллективное всплытие, объединяются пузыри или нет и т.д. В теории переходы между газовой фазой и растворенным метаном описываются законом Генри.

Как видно из этого краткого обзора, поведение столь сложной системы, в которой поступающая примесь не остается пассивной, а оказывает существенное влияние на гидродинамику и термическое состояние всей системы, требует соответствующих математических моделей и постановок задач.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рассматривается задача о моделировании гидротермодинамики гетерогенной системы, в состав которой входит вода и метан. С течением времени система трансформируется с учетом фазовых переходов. Все фазы моделируются как сплошные среды. Основная фаза - жидкость, которая рассматривается как несущая среда. В каждом конкретном объеме области моделирования мы определяем доли каждой фазы, которые изменяются под действием гидротермодинамических процессов, а также в результате взаимодействия между собой.

Для моделирования гидротермодинамики воды в озере, как несущей среды, используется математическая модель в негидростатическом приближении (Цветова, 1999, 2011). Она представлена системой уравнений в частных производных для трех компонентов вектора скорости, уравнения для температуры, уравнения состояния и уравнения неразрывности. В системе уравнений учитываются силы Кориолиса, перенос и турбулентная диффузия тепла и моментов количества движения.

Поведение фаз метана описывается системой уравнений типа конвекции-диффузии-реакции. Предполагается, что растворенный метан движется со скоростью несущей среды, а газовая и твердая фазы получают дополнительную скорость подъема за счет сил плавучести. Термические эффекты, учитывающие скрытую теплоту перехода фаз, включены в уравнение для температуры. Система уравнений дополняется соответствующим набором краевых и начальных условий.

Поскольку модели содержат большое количество параметров и неопределенностей, связанных с конкретными условиями постановки задач и сценариев расчета, численные эксперименты проводятся с использованием различных параметризаций тепло-массообмена в системе.

Один из таких сценариев был связан с моделированием кольцевой структуры, которую увидели космонавты на льду Южного Байкала в апреле 2009 года. Естественно было предположить, что эта структура явилась результатом неизвестного события, которое привело к попаданию газогидрата в воду вблизи дна и в его последующей трансформации.

В данном случае нас интересовали процессы зимнего периода, когда поверхность Байкала покрыта льдом. В это время года в водной толще озера типичным является специфическое распределение температуры по вертикали, содержащее слой мезотермического максимума. В этом слое, находящемся на глубинах 150-300 м, вода теплее, чем в выше и ниже лежащих горизонтах. Причина его регулярного образования состоит в том, что из-за больших глубин и понижения температуры максимальной плотности с увеличением глубины (давления), озеро Байкал, в отличие от более мелких водоемов, не перемешивается от поверхности до дна в результате осенней (и весенней) естественной конвекции. Образовавшийся слой мезотермического максимума играет роль «жидкого дна», препятствующего обмену между поверхностными водами и остальной водной толщей.

Горизонтально однородное и реальное вертикальное распределение температуры воды было взято в качестве начальных данных для сценария моделирования. По сценарию в определенном месте области на дне производится одномоментный выпуск газогидрата в покоящуюся среду. Далее рассматривается поведение системы во времени. Поступление гидрата изменяет результирующую плотность системы. Гидрат всплывает, увлекая за собой окружающие воды. До глубин порядка 380 м гидрат поднимается практически без потерь. Далее начинается его интенсивное разложение, приводящее к понижению температуры окружающей жидкости и образованию газа. Благодаря силе плавучести, новая смесь продолжает подниматься до определённой высоты, где её плотность сравнивается с плотностью воды, находящейся на данной глубине. Часть водных масс начинает включаться в возвратные циркуляции вокруг струи, а часть по инерции проскакивает выше и достигает нижней границы льда, создавая сложную трехмерную структуру в поверхностном слое (рис. 1а).

Вблизи поверхности под действием силы Кориолиса в горизонтальной плоскости закручивается локальная циркуляция. Её длительное существование приводит к уменьшению толщины льда. В результате более тонкий лёд напитывается водой. И поэтому весной с больших высот (с космической станции, как это было в 2009 г., или со спутника) появляется возможность наблюдать на льду кольцевые структуры. Поскольку линейные размеры кольцевых структур довольно велики (до 5 км), с близких расстояний они не заметны. Таковы наши сегодняшние представления о природе кольцевых структур на льду озера (Гранин и др., 2015).

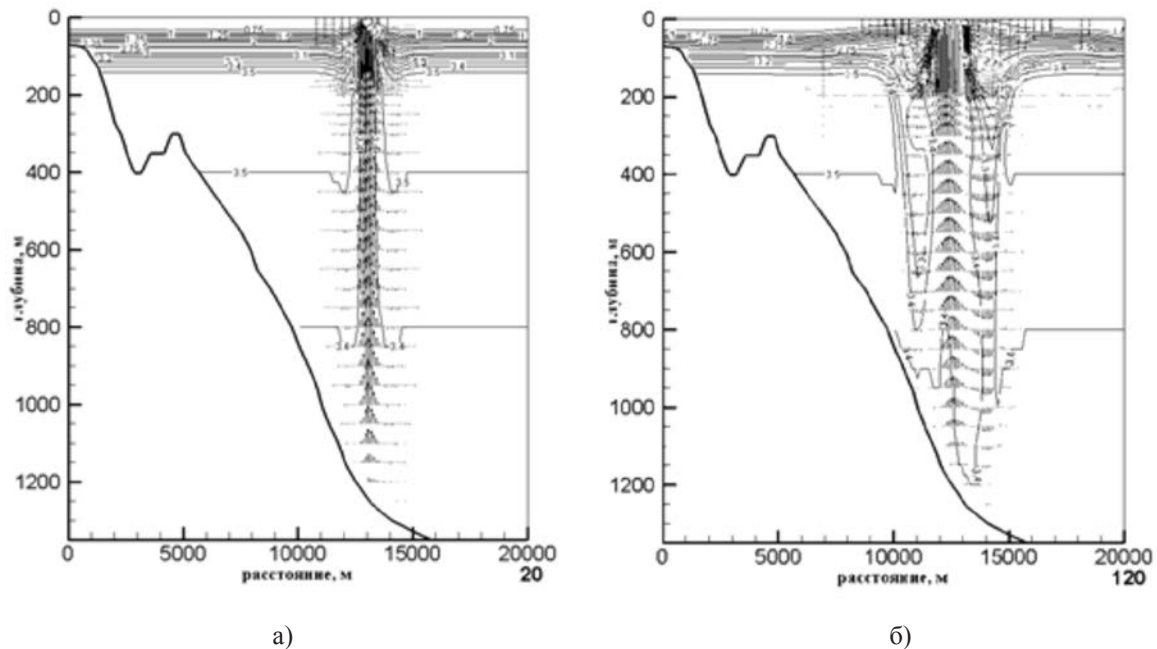
Анализ результатов численных экспериментов с участием метана натолкнули нас на мысль, что метан играет существенную роль не только в появлении локальных кольцевых структур вблизи поверхности, но также и участвует в фундаментальных управляющих процессах в глубоких водах.

Суть в том, что многолетними наблюдениями за температурой в озере было установлено, что толща воды ниже 250 м, не соприкасающаяся непосредственно с атмосферой и находящаяся далеко от деятельного поверхностного слоя, имеет небольшой, но постоянный градиент температуры, который указывает на непрерывный поток тепла вниз. Тем не менее, даже в течение многих десятилетий, не было замечено какого-либо потепления глубинных вод (Шимараев и др., 1994). Это наблюдение привело к предположению, что в Байкале работают какие-то компенсирующие механизмы, охлаждающие глубокие слои и перемещающие поверхностные воды на большие глубины. Доказательством существования таких механизмов являются наблюдения внезапных минимумов температуры и появления повышенных концентраций растворенного кислорода в самых глубоких слоях озера (Schmid и др., 2008; Weiss и др., 1991).

Эта загадка привлекла внимание ученых, и было выдвинуто несколько гипотез о возможных механизмах обновления вод. Основной вывод: это результат действия эпизодических событий, тем или иным образом запускающих глубокую конвекцию (здесь нужно вспомнить об уменьшении температуры максимальной плотности с ростом глубины). В работе (Tsimitri и др., 2015) перечислены все имеющиеся на настоящий момент гипотезы и проанализированы данные наблюдений в Южном Байкале за 13 лет, свидетельствующие о поступлении холодной воды на экстремальные глубины. В частности, о зимне-весеннем периоде, который как раз мы и рассматриваем, в статье сказано следующее. Некоторые наблюдаемые события невозможно связать с Экмановским переносом, который постулируется как основной механизм запуска конвекции. Такой перенос возникает при ветрах определенного направления и формирует нисходящие прибрежные течения, которые, неся более низкую температуру, чем окружающая вода, по крутым склонам постепенно опускаются до максимальных глубин. Действительно, если принять во внимание, что озеро длительное время полностью отделено от атмосферы ледовым покровом, то эта гипотеза совершенно непригодна для объяснения подобных случаев. В связи с этим авторы резонно констатировали, что эти события были инициированы другим механизмом.

Теперь имеет смысл возвратиться к нашему сценарию и предположить, что таким механизмом могут быть процессы, связанные с трансформацией метангидратов. В процессе подъема струя разрушает слой мезотермического максимума снизу, а вода, вовлеченная в возвратные течения, формирующиеся вокруг ядра, на определенных глубинах имеет температуру, близкую к температуре максимальной плот-

ности на данной глубине. Это формирует условия для возникновения термобарической неустойчивости и инициирует процесс опускания вод либо до дна, либо до тех глубин, которые по физическим условиям соответствуют их плотности (рис. 1б).



**Рис. 1.** Температура и течения на вертикальном разрезе области через центр струи. а) через 2 часа; б) через 12 час после начала эксперимента.

Таким образом, можно сделать следующий вывод. Подъем газогидрата и его последующая трансформация может быть причиной появления колец на льду Байкала, а также служить одним из спусковых механизмов, запускающих глубокую конвекцию и обновление глубинных вод.

*Работа поддержана Программами №№ 18 и 43 Президиума РАН, а также проектом РФФИ 14-01-00125.*

#### Литература:

1. Tsvetova E.A. *Mathematical modeling of Lake Baikal hydrodynamics* // *Hydrobiologia*. 1999. V. 407. P. 37–43.
2. Цветова Е.А. Моделирование локальных явлений, связанных с присутствием метана в водной толще озера Байкал // В сб. мат. 39 конференции «Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования», 2011, Ростов-на-Дону, Изд. ЮФУ, стр. 230-234.
3. Н.Г. Гранин, В.В. Козлов, Е.А. Цветова, Р.Ю. Гнатовский. Полевые исследования и некоторые результаты численного моделирования кольцевой структуры на льду озера Байкал // *ДАН*, 2015, т.461, №3, 343-347.
4. Shimaraev, M. N., V. I. Verbovov, N. G. Granin, and P. P. Sherstyankin (1994), *Physical Limnology of Lake Baikal: A Review*, *Baikal Int. Cent. Of Ecol. Res.*, Irkutsk.
5. Schmid, M., N. M. Budnev, N. G. Granin, M. Sturm, M. Schurter, and A. Wuest (2008), *Lake Baikal deepwater renewal mystery solved*, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L09605, doi:10.1029/2008GL033223.
6. Weiss, R. F., E. C. Carmack, and V. M. Koropalov (1991), *Deep-water renewal and biological production in Lake Baikal*, *Nature*, 349(6311), 665–669, doi:10.1038/349665a0.
7. Tsimitri, C., B. Rockel, A. Wuest, N. M. Budnev, M. Sturm, and M. Schmid (2015), *Drivers of deep-water renewal events observed over 13 years in the South Basin of Lake Baikal*, *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 1508–1526, doi:10.1002/2014JC010449.

# Evaluation of Coincidence in Environmental Processes

Markelova A.N., Cheredko N.N., Volkov J.V., Tartakovsky V.A.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: [annanikmark@rambler.ru](mailto:annanikmark@rambler.ru), [atnik3@rambler.ru](mailto:atnik3@rambler.ru), [yvvolkov@tpu.ru](mailto:yvvolkov@tpu.ru), [trtk@list.ru](mailto:trtk@list.ru)

A new approach to the analysis of environmental processes consisting in identification and isolation of an integral signal from the signal combination based on the evaluation of their coincidence level taking into account any external forcing influence is now in progress.

A hypothesis taken as a base is as follows: an external forcing influence initiates oscillations in environmental processes dynamics and, due to its nature, should be expressed in a certain a priori similarity of the elementary processes induced by this influence. The coincidence is suggested to be evaluated by matching of essential features to be further defined. The algorithm suggested is based on the isolation of the components characterized either by their coincidence (coincident signs – CS) or noncoincidence (noncoincident signs – NS) in time series of the parameters being studied, no certain assumptions on the nature and the mechanisms of the processes of different kinds on different levels being made. The level of coincidence (synchrony) of the components can be expressed as a correlation coefficient. The task of the series decomposition can be solved by their sorting in a spectral domain. The use of the algorithms developed maximizes the correlation coefficients of the environmental processes characteristics series components, that provides an optimal solution for a decomposition task, the solution being a unique one for a given series set and a functional basis chosen, the noise level and a suppression filter being strictly defined.

The pairwise filtration should define the components possessing a highest possible correlation relationship. It should be noted that the Fourier coefficient sign reversal can destroy an a priori signals similarity based on their origin in case the correspondent basis function contributes significantly to the decomposition. This fact can also be used as a criterion for the Fourier coefficients signs as essential indicators.

Changes in the total external influence can make the system to transform to a qualitatively new condition. The characteristics defined can be further taken into account in environmental processes modeling. So, the synchronous behavior of the processes can be used as a criterion for selection of the classes in the climatic classification task.

In our report we show some examples of the use of the approach suggested: the analysis of the solar activity influence, assumed as an integral factor of external forcing influences, on the environmental processes dynamics (climatic parameters dynamics and the isolation of an integral signal in each series of a radial increment of trees (TRW-chronologies) and of an isotope composition ( $\delta^{18}\text{O}$ - chronologies) of a wood cellulose); the analysis of dendrochronological series obtained on the territory of optimal condition for forest vegetation, to isolate an integral signal, expressing a maximal synchrony with other series; the solution of the task of climatic structures selection in the fields of climatic elements.

## Оценка согласованности природно-климатических процессов

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

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: [annanikmark@rambler.ru](mailto:annanikmark@rambler.ru), [atnik3@rambler.ru](mailto:atnik3@rambler.ru), [yvvolkov@tpu.ru](mailto:yvvolkov@tpu.ru), [trtk@list.ru](mailto:trtk@list.ru)

Земля находится под влиянием внешних физических полей, которые оказывают вынуждающее воздействие на все процессы, протекающие в ее оболочках. Внешнее вынуждающее воздействие (ВВВ) является основным источником энергии для этих процессов. Известно, что природно-климатические процессы тесно связаны между собой, поэтому на каждый отдельный процесс ВВВ осуществляется сложным образом, как напрямую, так и опосредованно через другие процессы. В результате в рядах данных геофизического и экологического мониторинга информация о ВВВ на природно-климатические процессы является скрытой (искаженной). В данной работе развивается новый подход к анализу природно-климатических процессов через идентификацию и выделение общего сигнала в совокупности временных рядов данных на основе оценки степени их согласованности с учетом проявлений внешнего вынуждающего воздействия.

В основе предлагаемого подхода лежит гипотеза о том, что ВВВ инициирует природно-климатические процессы и должно проявляться в их согласованном поведении. Под согласованным поведением понимается сходство существенных признаков процессов, определение которых позволяет построить

алгоритм для выделения из временных рядов общего сигнала. В качестве существенного признака предлагается использовать знаки коэффициентов Фурье. Тогда реализации общего сигнала во временных рядах природно-климатических данных будут сформированы гармоническими составляющими одинаковой частоты с одинаковыми знаками при коэффициентах Фурье. Степень согласованности оценивается коэффициентом корреляции Пирсона, который достигает максимума после декомпозиции временных рядов. Описанный подход мы применили для анализа согласованных вариаций древесно-кольцевых хронологий и обнаружили, что даже в оптимальных условиях для роста деревьев в рядах их радиального прироста формируется общий сигнал.

При сопоставлении массивов данных, характеризующих изменчивость космофизических факторов, образующих ВВВ, и природно-климатических процессов, необходимо учитывать, что сложный, нелинейный механизм воздействия может формировать в одних и тех же данных одновременно составляющие и с положительным, и с отрицательным откликом на него. Мы выполнили анализ временных рядов температуры воздуха, ширины и значений  $\delta^{18}\text{O}$  в целлюлозе годовичных колец деревьев, как источников проху- данных природно-климатической информации, с целью установить возможное наличие в этих рядах составляющих, одна из которых имеет положительную связь с ВВВ, другая - отрицательную. В качестве рядов данных, представляющих ВВВ, мы выбрали ряды среднегодовых значений чисел Вольфа, так как Солнце вносит основной вклад во ВВВ и модулирует вариации других космофизических факторов через вариации солнечной активности.

Для решения поставленной задачи мы применили метод декомпозиции по выбранному ряду. Выбранным рядом является ряд чисел Вольфа. Для пар рядов - ряда чисел Вольфа ( $s_k$ ) и каждого ряда, представляющего природно-климатические процессы ( $x_{k,l}$ ), введем составляющие с совпадающими существенными признаками (coincident signs – CS) и -составляющие с несовпадающими существенными признаками (non-coincident signs – NS). Исследуемые временные ряды можно дополнить и продолжить по непрерывности на всю действительную ось периодически четным образом. Для подобных рядов существуют прямое и обратное преобразования Фурье, а при принятых условиях продолжения коэффициенты Фурье не будут комплексными числами. CS- и NS-составляющие рядов температуры/дендро-хронологий ( $\hat{x}_{k,l}$  и  $\tilde{x}_{k,l}$ ) и рядов чисел Вольфа ( $\hat{s}_{k,l}$  и  $\tilde{s}_{k,l}$ ) вычислены следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k,l} &= \sum_{v=0}^{N-1} \hat{X}_{v,l} \exp\left(\frac{i2\pi vk}{N}\right) & \hat{s}_{k,l} &= \sum_{v=0}^{N-1} \hat{S}_{v,l} \exp\left(\frac{i2\pi vk}{N}\right) \\ \hat{X}_{v,l} &= \begin{cases} X_{v,l}, \text{sign}S_v = \text{sign}X_{v,l} \\ 0, \text{sign}S_v \neq \text{sign}X_{v,l} \end{cases} & \hat{S}_{v,l} &= \begin{cases} S_{v,l}, \text{sign}S_v = \text{sign}X_{v,l} \\ 0, \text{sign}S_v \neq \text{sign}X_{v,l} \end{cases} \\ \tilde{x}_{k,l} &= \sum_{v=0}^{N-1} \tilde{X}_{v,l} \exp\left(\frac{i2\pi vk}{N}\right) & \tilde{s}_{k,l} &= \sum_{v=0}^{N-1} \tilde{S}_{v,l} \exp\left(\frac{i2\pi vk}{N}\right) \\ \tilde{X}_{v,l} &= \begin{cases} 0, \text{sign}S_v = \text{sign}X_{v,l} \\ X_{v,l}, \text{sign}S_v \neq \text{sign}X_{v,l} \end{cases} & \tilde{S}_{v,l} &= \begin{cases} 0, \text{sign}S_v = \text{sign}X_{v,l} \\ S_{v,l}, \text{sign}S_v \neq \text{sign}X_{v,l} \end{cases} \end{aligned}$$

Отметим, что результаты декомпозиции выбранного ряда ( $s_k$ ), его CS- и NS-составляющие -  $\hat{s}_{k,l}$  и  $\tilde{s}_{k,l}$  зависят от индекса  $l$ , то есть индивидуальны для каждого  $x_{k,l}$ . Выполненная декомпозиция оставляет без изменения значения исходных коэффициентов Фурье  $X_{v,l}$  и  $S_{v,l}$ , но каждый коэффициент попадает либо в CS-, либо в NS- составляющую. CS- и NS-составляющие одного и того же ряда ортогональны друг другу.

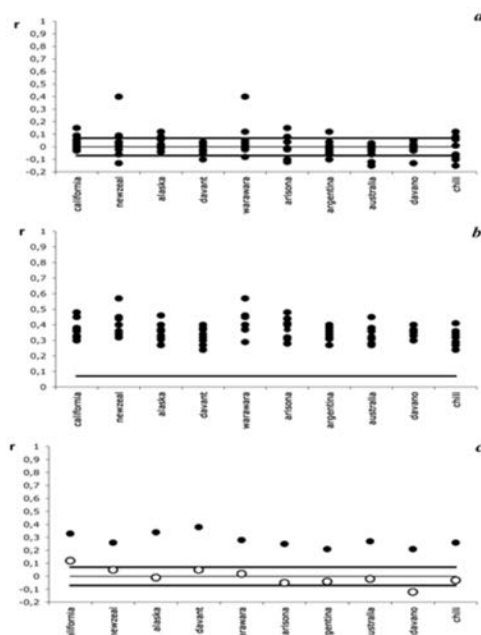
С помощью описанного выше алгоритма была выполнена декомпозиция древесно-кольцевых хронологий ширины (TRW) и значений  $\delta^{18}\text{O}$  в целлюлозе годовичных колец деревьев. Для декомпозиции были выбраны хронологии, построенные для территорий удаленных друг от друга на значительные расстояния и отличающихся по условиям роста древесной растительности. Восемь TRW-хронологий, построенных для США (Калифорния, Аризона, Аляска), Аргентины, Чили, Варавары, Новой Зеландии, Австралии были взяты из баз данных National Geophysical Data Center, National Climatic Data Center. Три TRW-хронологии и три  $\delta^{18}\text{O}$ -хронологии Предбайкалья (Иркутская область, Россия) предоставлены сотрудниками СИФИБР СО РАН. 23 TRW-хронологии юга Западно-Сибирской равнины (Томская область, Россия) были построены авторами данной работы.

По объективным причинам: значительная удаленность местообитаний деревьев друг от друга, разные условия роста, незначительная чувствительность деревьев в тех местообитаниях, где сочетание гидротермических условий оптимально, - значимой корреляции между TRW-хронологиями в большинстве случаев обнаружено не было. Однако корреляция между их одноименными составляющими оказалась статистически значимой, они изменяются более синхронно по сравнению с исходными временными рядами (рис.1).

Корреляция между одноименными составляющими TRW-хронологий и рядов чисел Вольфа, также гораздо выше, чем между исходными рядами и в большинстве случаев является статистически значимой с доверительной вероятностью 95 %.

Связь составляющих  $\delta^{18}\text{O}$ -хронологий с одноименными составляющими ряда чисел Вольфа слабее, чем в случае с TRW-хронологиями. Возможно, это связано с тем, что внешнее вынуждающее воз-

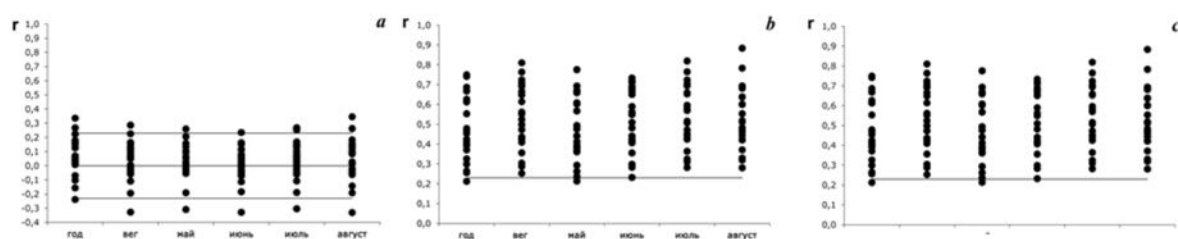
действие влияет на соотношение стабильных изотопов кислорода через физические параметры окружающей среды, прежде всего, через температуру и относительную влажность. В то время как на ширину годовичных колец влияет весь комплекс факторов, куда входят, также, колебания численности насекомых, фитопатологии, изменения градиента потенциала электрического поля, интенсивности приземного ультрафиолетового излучения с длиной волны 290-320 нм и пр.[1].



**Рис. 1.** Коэффициенты корреляции (а) между TRW-хронологиями, (б) между их составляющими, (с) между TRW-хронологиями и рядом чисел Вольфа (белые точки), между составляющими TRW-хронологий и ряда чисел Вольфа (черные точки). На рисунке представлены хронологии: Калифорния, Аризона, Аляска, Аргентины, Чили, Варавары, Новой Зеландии, Австралии, Даван (Россия).

Особенный интерес вызывают результаты фильтрации дендрохронологий юга Западно-Сибирской равнины совместно с рядами среднемесячных значений чисел Вольфа. График изменения коэффициентов корреляции между одноименными составляющими TRW-хронологий и чисел Вольфа по месяцам показывает, как изменяется чувствительность составляющих к вариациям солнечной активности в течение вегетационного сезона. Видно, что она усиливается. Это может быть связано с годовым движением Земли по орбите. Об усилении/ослаблении влияния солнечной активности на процессы в биосфере в зависимости от положения Земли относительно плоскости солнечного экватора писал С.М. Шугрин [2]. В мае-июне

Земля располагается напротив солнечного экватора, где активные области обычно не наблюдаются. Следовательно, процессы, которые протекают в них, в том числе и образование солнечных пятен, должны оказывать меньшее влияние на рост деревьев. Активные области обычно формируются на Солнце выше 4–5 градусов в его южном и северном полушариях. В течение вегетационного периода влияние СА на рост деревьев должно усиливаться, так как Земля постепенно передвигается в область влияния солнечного излучения, приходящего с более высоких гелиоширот. Осенью, в сентябре, Земля достигает положения, когда угол между плоскостью эклиптики и плоскостью солнечного экватора максимален - 7,2 град.



**Рис. 2.** Коэффициенты корреляции чисел Вольфа с TRW-хронологиями (а), между CS-составляющими (б) и NS-составляющими этих рядов (с).

Таким образом, синхронность или согласованное поведение природно-климатических процессов - важнейшее следствие солнечно-земных связей. Процессы на Солнце вносят в изменения параметров разных геосфер циклическую модуляцию, формирующую некоторую согласованность в их динамике. Предлагаемый подход к исследованию проявлений ВВВ в древесно-кольцевых хронологиях, как источнике информации о природно-климатических процессах, оказался информативным. Фильтрация древесно-кольцевых хронологий по выбранному ряду чисел Вольфа выделяет составляющие с максимальной корреляционной связью между исследуемыми процессами, которая соответствует известным представлениям о некоторых особенностях солнечно-земных связей.

#### Литература:

1. Сидякин В.Г. *Космическая экология* / В.Г. Сидякин, Н.А. Темурияни, В.Б. Макеев, Б.М. Владимирский. Киев: Наукова думка, 1985. 176 с.
2. Шугрин С.М. *Космическая организованность биосферы и ноосферы* / С.М. Шугрин. Новосибирск: Наука. - 1999. - 496 с.

## Monitoring of wildfires in boreal forests of Eastern Siberia on remote sensing data

Tomshin O.A., Solovyev V.S.

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia  
otomshin@ikfia.sbras.ru, solo@ikfia.ysn.ru

Forest fires dynamic in boreal forests of Eastern Siberia (mostly Yakutia) and its relations with short-term weather history and atmospheric aerosols perturbations during May-September 2001-2014 were studied on remote sensing data. It is clarified, that temperature anomalies in May-June (comparing to long-term mean) preceded to occurrence of large-scale forest fires. Significant growth of aerosol optical depth (AOD) and aerosol index (AI) is observed during maximum (July-August) of seasonal variations of forest fires. It is shown, that AI is more sensitive to level of forest fires activity, then AOD. This is due to limitations of AOD retrieval algorithm under heavy haze conditions.

## Мониторинг лесопожарной активности в бореальных лесах Восточной Сибири по данным дистанционного зондирования

Томшин О.А., Соловьев В.С.

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия  
otomshin@ikfia.sbras.ru, solo@ikfia.ysn.ru

### ВВЕДЕНИЕ

Лесные пожары (ЛП) являются важным природным фактором, оказывающим существенное влияние на биоразнообразие и ресурсный потенциал лесных экосистем [1-3]. В результате ЛП в атмосферу выбрасывается огромное количество продуктов горения – смесь различных газов и дымовых частиц, влияющих на атмосферные процессы. На местах пожаров резко снижается альbedo земной поверхности и нарушается температурный баланс почвы, что сопровождается оттайкой вечномёрзлых грунтов в бореальных лесах Сибири. Разрушение вечной мерзлоты ведет к выбросу большого количества содержащихся в ней парниковых газов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ . Исследованиям крупномасштабных лесных пожаров, атмосферных аэрозолей посвящены публикации [4-8].

В работе представлены результаты анализа сезонной динамики ЛП в бореальных лесах Восточной Сибири (преимущественно Якутии) и её связи с краткосрочной предысторией температуры воздуха и возмущениями аэрозольной компоненты атмосферы.

### ДААННЫЕ

Для исследования пространственно-временной динамики ЛП и вариаций аэрозольной оптической толщины атмосферы (АОТ) и аэрозольного индекса (АИ) использовались данные радиометров MODIS/(Aqua, Terra), OMI/(Aura) [9] и AVHRR/NOAA [2], полученные в период май-сентябрь 2001-2014 гг. Анализ вариаций температуры приземного слоя воздуха проводился по данным проекта NCEP/NCAR Reanalysis [10].

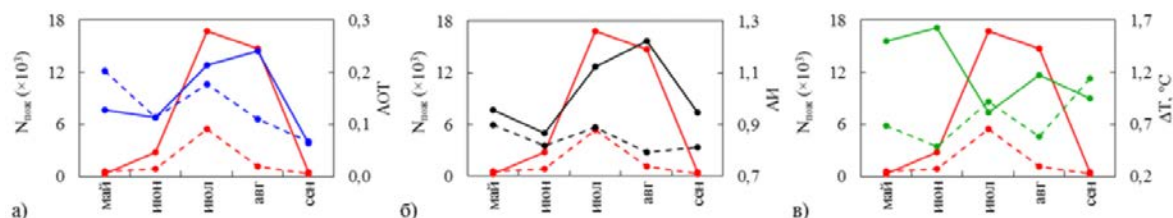
### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для пожароопасных сезонов с высоким (2002, 2012-2014 гг.) и низким (2001, 2003-2011 гг.) уровнем пирогенной активности на территории Восточной Сибири, построены среднемесячные графики числа «пожарных» пикселей (Nпож) и значений АОТ/АИ (рис. 1а, б). Красными линиями показаны вариации Nпож в годы с высоким (сплошная линия) и низким (пунктирная линия) уровнем пожарной активности. Аналогично обозначены соответствующие вариации АОТ (синие линии) и АИ (чёрные линии).

Сезонный ход пирогенной активности на территории Якутии характеризуется низким уровнем в мае-июне, максимумом в июле-августе, а в сентябре ЛП затухают (рис 1). Похожим образом ведут себя вариации аэрозольных показателей (рис 1а, б), при этом сезонный ход атмосферных аэрозолей в годы с низким уровнем пирогенной активности сильно отличается от вариаций в пожароопасные годы. Значения АОТ/АИ (2001, 2003-2011 гг.) с мая по сентябрь плавно снижаются, за исключением небольших



локальных максимумов в июле. Графики АОТ/АИ в пожароопасные годы ведут себя иначе: общее плавное снижение (май-июнь) сменяется существенным ростом во второй половине лета. Наибольший прирост наблюдается в значениях АИ, показывающего присутствие в атмосфере аэрозолей сажевого происхождения, сильно поглощающих ультрафиолет. Можно отметить, что реакция АОТ на пирогенную активность ниже чем у АИ, т.к. АОТ в условиях сильной задымленности не рассчитывается и, соответственно, среднее по площади значение оказывается априори заниженным.

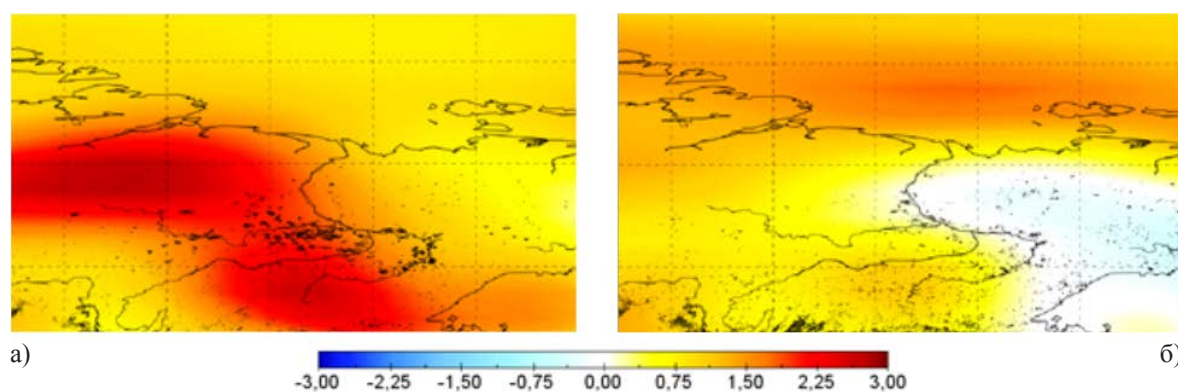


**Рис. 1.** Сезонные (май-сентябрь) вариации кол-ва «пожарных» пикселей  $N_{\text{пож}}$  (красные линии), обнаруженных на территории Якутии и вариации: а) АОТ (синие линии), б) АИ (черные линии) и в)  $\Delta T$  (зеленые линии), рассчитанные для периодов с высоким (2002, 2012-2014 гг., сплошные линии) и низким уровнем пожарной активности (2001, 2003-2011 гг., пунктирные линии).

Максимальные значения АОТ/АИ наблюдаются в августе, затем происходит резкое снижение до уровня невозмущенных значений. Аналогичное поведение наблюдается в динамике пирогенной активности: в мае-июне количество «пожарных» пикселей незначительно, затем во второй половине лета их число резко возрастает, а в сентябре лесные пожары затухают.

На рис. 1в представлен сезонный ход отклонений значений температуры приземного слоя воздуха ( $\Delta T$ ) от среднемноголетних (1980-2010) в годы с высоким и низким уровнем пожарной активности. Из графика видно, что в пожароопасные годы в течение мая-июня наблюдаются повышенные значения температуры (сплошная зеленая линия) по сравнению с не пожароопасными годами (пунктирная зеленая линия). В условиях резко-континентального климата Якутии, характеризующегося крайне низким уровнем осадков, малоснежными холодными зимами, низкой атмосферной влажностью, аномальные температуры воздуха в весенний период резко повышают риск возникновения лесных пожаров. Отметим, что значения температуры в период июль-сентябрь пожароопасных сезонов не сильно отличаются от аналогичных значений в годы с невысоким уровнем пирогенной активности.

На рис. 2 представлена карта пространственного распределения  $\Delta T$  в период май-июнь и итоговые (за лесопожарный сезон) пройденные огнём площади (чёрные объекты): а) в пожароопасные годы 2002, 2012-2014 гг., б) в не пожароопасные годы 2001, 2003-2011 гг.



**Рис. 2.** Карта распределения  $\Delta T$  в период май-июнь в а) пожароопасные (2002, 2012-2014) и б) не пожароопасные (2001, 2003-2011) годы. Чёрными объектами (точками) показаны пройденные огнём итоговые территории, определенные по данным MODIS.

В пожароопасные годы в мае-июне зоны с аномальными значениями температуры (на 2-3°C выше среднемноголетних за 1980-2010 гг.) разместились над большей частью Восточной Сибири (рис. 2а). На эти же области пришлось основная масса крупномасштабных ЛП. В годы с низким уровнем пожарной активности распределение температуры более однородно (рис. 2б) и значения  $\Delta T$  превышают среднемноголетние не более чем на +1.3°C, при этом очаги ЛП равномерно распределены по всей исследуемой территории и носят точечный характер.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что в краткосрочной предыстории (май-июнь) высокому уровню лесопожарной активности на территории Якутии предшествовали аномальные значения температуры. На фазе максимума (июль-август) сезонного хода лесных пожаров наблюдается значительный рост АОТ и АИ, что дополняет ранее полученные результаты о доминирующей роли лесных пожаров в формировании сезонных вариаций атмосферных аэрозолей [4]. Аэрозольный индекс показывает большую чувствительность к уровню пирогенной активности, чем АОТ. Это объясняется ограничениями методики восстановления АОТ в условиях сильной задымленности атмосферы в результате лесных пожаров.

### Литература:

1. Щербаков И.П., Забелин О.Ф., Карпель Б.А. и др. *Лесные пожары в Якутии и их влияние на природу леса*. Новосибирск: Наука. 1979. 226 с.
2. Соловьев В.С., Козлов В.И., Муллаяров В.А. *Дистанционный мониторинг лесных пожаров и гроз в Якутии, отв. редактор Соловьев С.И. ИКФИА СО РАН. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН. 2009. 108 с.*
3. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Ваганов Е.А., Сухинин А.И., Максюттов Ш.Ш., МкКаллум И., Лакида И.П. *Влияние природных пожаров в России 1998-2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // Доклады академии наук. 2011. Т. 441. № 4. С. 544-548.*
4. Соловьев В.С., Будищев А.А. *Возмущения аэрозольной оптической толщины атмосферы, вызванные лесными пожарами в Якутии // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 7. С. 626-629.*
5. Томшин О.А., Протопопов А.В., Соловьев В.С. *Исследование вариаций атмосферного аэрозоля и угарного газа в области лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 145-150.*
6. Tomshin O. A., Solovyev V. S. *The impact of large-scale forest fires on atmospheric aerosol characteristics // International Journal of Remote Sensing. 2014. V. 35, № 15. P. 5742-5749.*
7. Афонин С.В., Белов В.В., Панченко М.В., Сакерин С.М., Энгель М.В. *Корреляционный анализ пространственных полей аэрозольной оптической толщины на основе спутниковых данных MODIS // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т.21. № 6. С. 510-515.*
8. Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В. *Сравнительный анализ спутниковых аэрозольных данных типа MODIS Aerosol Products // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т.21. №3. С. 235-239.*
9. Acker J.G., Leptoukh G. *Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data // Eos, Transactions AGU. 2007. V. 88. № 2. P. 14-17.*
10. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. *The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. № 77. P. 437-470.*

## Integration of the lake model to the general circulation model INMCM4

<sup>1</sup>Bogomolov V., <sup>2</sup>Stepanenko V., <sup>3</sup>Volodin E.

<sup>1</sup> Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> Moscow State University, Research Computing Center, Faculty of Geography, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: Bogomolo@scert.ru, vstepanenkomeister@gmail.com

The lake model (Stepanenko, etc., 2011.) was integrated into the general circulation model INMCM4 (Volodin, etc., 2010) for calculation of lakes thermal capacity, turbulent heat transfer, sensible heat flux, latent heat flux. The main challenge from atmospheric modeling for the lake parameterization is the need to consider all the lakes in the atmospheric model domain. Hence, we should know the parameters of all the lakes on the territory. These data will be utilized by the lake model used as a lake parameterization. To provide these data we need a database of lakes. Sensitivity tests with the lake model FLake (Mironov, 2006) have shown the crucial influence of the lake depth on modeling results. So, the digital map of lake coverage, lake depth and new land mask were created on the basis of the database of 14 000 freshwater lakes (Kourzeneva, 2012.).

# Интеграция модели озера в совместную модель общей циркуляции атмосферы и океана

<sup>1</sup>Богомолов В.Ю., <sup>2</sup>Степаненко В.М., <sup>3</sup>Володин Е.М.

<sup>1</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

E-mail: [Bogomolo@scert.ru](mailto:Bogomolo@scert.ru), [vstepanenkomeister@gmail.com](mailto:vstepanenkomeister@gmail.com)

Проводимые нами численные эксперименты с климатическими моделями показали, что на данный момент, в климатических моделях, апробированных на Северном полушарии большая часть процессов протекающих в активном слое, особенно относящихся к его гидрологической компоненте, параметризуются, либо рассчитываются с явными упрощениями. В большинстве известных моделях прогноза погоды и климата, таких как GME/COSMO (Mironov 2012), CLIMo (Kheyrollah 2012), HIRLAM (Rontu 2012) и т.д. используется модель водоема Flake (<http://www.flake.igb-berlin.de/index.shtml>). Данная модель достаточно точно воспроизводит температуру поверхности воды, потоки тепла и импульса в атмосферу, но при этом явно не восстанавливает профиль температуры в водоеме, так как не рассчитывает для уравнение теплопроводности, представляя этот профиль параметрически в виде верхнего перемешанного слоя и термоклина. Это не позволяет явно воспроизводить вертикальное перемешивание. В свою очередь, поскольку механизм перемешивания водоема является ключевым при моделировании биохимических циклов в озере, использование в дальнейшем данной модели для расчетов потоков  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  с водоемов представляется нецелесообразным.

В единственной российской совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM4 считается, что ячейка поверхности суши может содержать следующие ее типы: растительность, открытая почва, снег и внутренние водоемы. В модели температура поверхности суши, а также потоки явного и скрытого тепла для указанных четырех типов поверхности, вычисляются отдельно. Расчёт потоков для случая внутреннего водоема, как и для случая капель воды, захваченных растительностью, происходит исходя из предположения, что влажность воздуха над поверхностью равна насыщенной, но слой воды не имеет собственной дополнительной теплоёмкости. Кроме того, почва, расположенная под различными типами поверхности внутри модельной ячейки сетки, имеет одни и те же вертикальные профили температуры, влажности, концентрации льда. Это довольно грубое приближение для водоемов, поскольку характер вертикального теплообмена в них кардинально отличается от такового в почве. По существу такая же физическая параметризация используется для всех переувлажненных территорий, таких как болота и тундра летом. Это приводит к недооценке роли данных экосистем северных регионов в формировании как минимум регионального климата.

Для учета теплоёмкости водоемов, турбулентного характера теплообмена в них и их участия в формировании потоков скрытого и явного тепла в атмосферу необходимо включение в климатическую модель параметризации термогидродинамики озера и подробной цифровой карты внутренних водоемов, учитывая, что недавно стали доступны данные не только по пространственному распределению водоемов, но и по их глубине (<http://www.flake.igb-berlin.de/ep-data.shtml>).

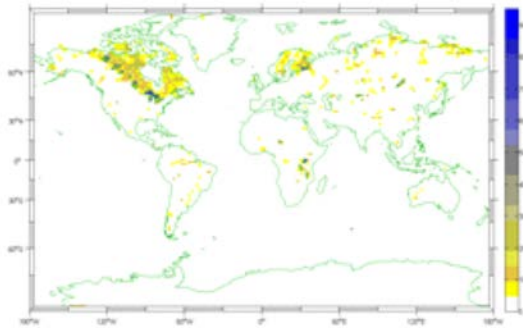
Для достижения поставленных целей и задач нами была интегрирована в существующую совместную модель общей циркуляции атмосферы и океана ИВМ РАН (Володин и др., 2010), поддерживаемую и разрабатываемую Е.М. Володиным, модель озера, разработанную В.М. Степаненко (Степаненко и др., 2011), а также подключена к модели INMCM4 состоящая из 14 типов маска суши, созданная нами с использованием цифровой карты внутренних водоемов для всего Земного шара.

На данный момент совместная модель общей циркуляции атмосферы и океана INMCM4 имеет разрешение в блоке атмосферы  $2 \times 1.5$  градуса по долготе и широте, соответственно, и 21 уровень по вертикали, в океанском блоке  $1 \times 0.5$  градуса по долготе и широте и 40 уровней по вертикали. Модель использовалась для численных экспериментов в рамках программы CMIP5 (Coupled Models Intercomparison Project 5), и ее результаты среди других моделей приведены в 5-м Оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) (IPCC, 2013).

Одномерная модель водоема, развиваемая в НИВЦ МГУ (Степаненко и др., 2011), включает явное описание процессов теплообмена в слоях воды, льда, снега, нижележащей почвы. Во всех слоях решаются уравнения переноса-диффузии с источниками на многослойной численной сетке. Используются  $k$ -epsilon параметризация турбулентности для описания перемешивания в водной толще. Для использования в районах с вечной мерзлотой в модели предусмотрена возможность фазовых переходов влаги в почве. Важно также и то, что модель содержит блок процессов образования, переноса и эмиссии метана, что позволит в перспективе в рамках климатической модели ИВМ РАН оценивать влияние эмиссий метана с внутренних водоемов на изменение климата, активно дискутируемое в современной литературе. Модель неоднократно использовалась в сравнениях с другими одномерными моделями и

данными наблюдений (Stepanenko et al., 2010; Stepanenko et al., 2013; Stepanenko et al., 2014; Thiery et al., 2014).

Созданная цифровая карта водоемов включает в себя два двумерных массива на сетке климатической модели (Рис. 1.): доля площади ячеек, занятая водоемами суши, и средняя глубина водоемов в ячейке. В основе данной карты лежит банк данных, состоящая из порядка 14 000 пресноводных озер и данным по глубинам (Kourzeneva, E. 2012.).



**Рис. 1.** Карта содержания водоемов в ячейках сетки модели ИВМ РАН от 0 до 1.

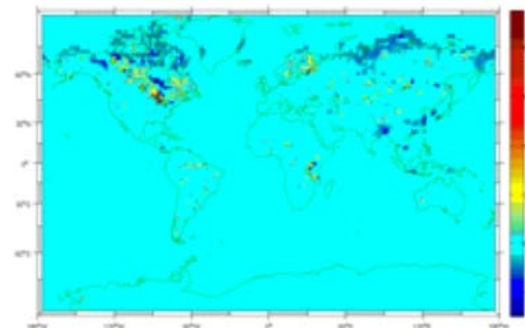
Существующая маска типов суши для модели INMCM4 включала в себя 13 типов (Wilson & Henderson-Sellers 1985), 13-ый тип, соответствовал так называемым «переувлажненным территориям», которые включали в себя и озера. На основе полученной цифровой карты водоемов и маски суши модели INMCM4 была сформирована новая маска, содержащая уже 14 типов, где 14-ым типом являются озера, распределение которых получено на основе созданной ранее цифровой карты озер.

При этом, из тринадцатого типа была исключена доля озер и добавлена в 14 тип. Другие же типы были откорректированы с использованием весовой функции. В старой маске существовало 1018 ячеек включающих озера, в новой - 2422 ячейки (Рис.2).

**Рис.2.** Разница доли озер в ячейках сетки в новой маске и старой маске.

Данная маска получена с использованием разработанного нами пакета программ на основе языка FORTRAN. Данный пакет программ позволяет формировать маски с добавлением нового типа и коррекции существующих типов с использованием весовой функции.

В данный момент проводятся расчеты с климатической моделью ИВМ РАН по оценке влияния включения водоемов на потоки явного и скрытого тепла на подстилающей поверхности и метеовеличины в приземном слое для условий современного климата.



#### Литература:

1. Mironov D., Ritter B., Schulz J., Buchhold M., Lange M., Machulskaya E. 2012. Parameterisation of sea and lake ice in numerical weather prediction models of the German Weather Service. *Tellus A* 2012, 64, 17330, DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.17330.
2. H. Kheyrollah Pour, C. Duguay, A. Martynov, L. C. Brown. 2012. Simulation of surface temperature and ice cover of large northern lakes with 1-D models: a comparison with MODIS satellite data and in situ measurements. *Tellus A* 2012, 64, 17614, DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.17614.
3. L. Rontu, K. Eerola, E. Kourzeneva, B. Vehviläinen. 2012. Data assimilation and parametrisation of lakes in HIRLAM. *Tellus A* 2012, 64, 17611, DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.17611.
4. Богомолов В.Ю., Гордов Е.П., Крупчатников В.Н. Моделирование региональных полей метеорологических величин с высоким пространственным шагом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2009, Выпуск Кузбасс-2, с. 50-53. Pr 50, 66.
5. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM 4.0. *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2010. Т. 46. № 4. С. 448-466.
6. В.М. Степаненко, Е.Е. Мачульская, М.В. Глаголев, В.Н. Лыкосов. Моделирование эмиссии метана из озер зоны вечной мерзлоты. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 47(2):275–288, 2011.
7. IPCC. 2013. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
8. V.M. Stepanenko, A. Martynov, S. Goyette, X. Fang, M. Perroud, and D. Mironov. First steps of a lake model intercomparison project. *Boreal Environment Research*, 15:191–202, 2010.
9. V.M. Stepanenko, A. Martynov, K.D. Johnk, Z.M. Subin, M. Perroud, X. Fang, F. Beyrich, D. Mironov, and S. Goyette. A one-dimensional model intercomparison study of thermal regime of a shallow, turbid midlatitude lake. *Geosci Model Dev*, 6:1337–1352, 2013.

10. Stepanenko Victor, Klaus D. Johnk, Machulskaya Ekaterina, Perroud Marjorie, Subin Zack, Nordbo Annika, Mammarella Ivan, and Mironov Dmitri. Simulation of surface energy fluxes and stratification of a small boreal lake by a set of one-dimensional models. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 66, 2014.
11. Kourzeneva, E., Asensio, H., Martin, E. and Faroux, S. 2012. Global gridded dataset of lake coverage and lake depth for use in numerical weather prediction and climate modeling. *Tellus A*. 64, 15640. DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.15640.
12. Wilson M.F., Henderson-Sellers A. A global archive of land cover and soils data for use in general circulation climate models. *J. Climatology* 1985, V5, N119-143.

## Variability of atmospheric circulation in response to climate change in West Siberia at the end of XX and at the beginning of XXI centuries

<sup>1</sup>Kharyutkina E.V., <sup>1</sup>Loginov S.V., <sup>1,2</sup>Martynova Yu.V.

<sup>1</sup> Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> Siberian Research Hydrometeorological Institute of Roshydromet, Novosibirsk, Russia

E-mail: [kh\\_ev@imces.ru](mailto:kh_ev@imces.ru)

In this study the variability of spatial and temporal distributions of temperature and pressure and atmospheric circulation parameters correlated to this variability is investigated for the territory of West Siberia (50–70°N, 60–90°E) was carried out using observational data at meteorological stations over the period of 1976–2014.

The climatic tendencies in the end of XX and in the beginning of XXI centuries were assessed through the comparison of temperature and pressure variability estimates for two time intervals: 1976–2005 and 1985–2014. It was established that climatic changes during the second period as before have the tendency to annual average temperature increase, but the warming process was less intensive during the first period. A large role in the decrease of the temperature growth rates belongs to the winter months when the warming process is replaced by the cooling process. Furthermore, there is a tendency to pressure rise for the second time interval.

It is important to take into account the variability of atmospheric circulation parameters for regional climate research. Changes in circulation can be revealed through zonal and meridional wind speed components in the lower troposphere and eddy circulation. Areas of increased values of geopotential height trends were revealed over the Urals in the middle troposphere (500 hPa) in winter months 2002–2011; and areas of decreased values – over the eastern part of West Siberia. Also zonal wind speed component and vorticity parameter decrease was observed over this part of the territory.

It was revealed that global circulation indices with the highest correlation with temperature for the territory of West Siberia have changed their phase during the first decade of XXI century: AO index – from positive to negative and SCAND – conversely, from negative to positive. Their interannual variability and eigen vectors (EOFs) can indicate that meridional temperature gradient decrease and weakening of midlatitude west transport probably cause the development of blocking processes.

*The work has been supported by the grant of the RF President MK-5969.2015.5.*

## Изменчивость атмосферной циркуляции в условиях происходящих климатических изменений в Западной Сибири в конце XX и начале XXI веков

<sup>1</sup>Харюткина Е.В., <sup>1</sup>Логинов С.В., <sup>1,2</sup>Мартынова Ю.В.

<sup>1</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup> Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Новосибирск, Россия

E-mail: [kh\\_ev@imces.ru](mailto:kh_ev@imces.ru)

С начала XXI века существенно замедлился рост глобальной температуры поверхностного воздуха [1] и глобальной температуры поверхности океана [2]. При этом во многих исследованиях отмечается различный отклик региональных климатических систем на глобальное потепление. В частности, по данным [3], температурные изменения в Западно-Сибирском регионе оказываются наименьшими, в сравнении со всеми другими регионами России. С этой точки зрения, представляется ак-

туальным исследование регионального изменения климата Западной Сибири в условиях происходящего замедления роста глобальной температуры.

В данной работе для территории Западной Сибири были получены средние поля температуры воздуха и давления, а также поля их линейных трендов для всего временного интервала 1976-2014 гг., а также отдельно для периодов с 1976 по 2005 гг. и с 1985 по 2014 гг. По результатам анализа данных инструментальных наблюдений выявлено, что, в целом, наблюдается уменьшение скорости роста температуры, а в зимние месяцы начала XXI века уменьшение величины тренда температуры сопровождается ростом величины тренда давления в зимние месяцы.

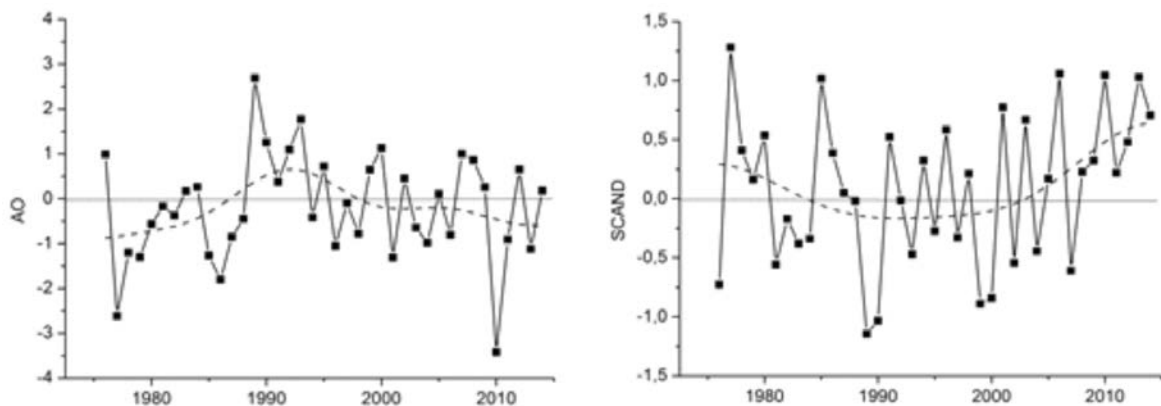
Глобальное потепление сопровождается, в первую очередь, изменением общей циркуляции атмосферы, что приводит к перераспределению тепла и влаги и к изменению пространственно-временных особенностей климата. А при исследовании климата региона, представляющего собой ограниченную территорию, особенно важно учитывать изменение характеристик циркуляции атмосферы.

Изменения циркуляции выявляются через поля зональной и меридиональной составляющих скорости ветра в нижней тропосфере, а также характеристик вихревой циркуляции. Так, для зимних месяцев (декабря, января и февраля) за 2002–2011 гг. были построены карты пространственного распределения трендов высоты геопотенциала на нескольких изобарических уровнях тропосферы. Области повышенных значений этой величины над Уралом и области пониженных значений над восточной частью Западной Сибири отчетливо выделяются на уровне 500 гПа. При этом в центральной и восточной частях территории наблюдается уменьшение зональной составляющей скорости ветра и величины ротора скорости, отвечающего за антициклональный тип циркуляции. Построенная временная изменчивость величины завихренности для находящихся на территории Западной Сибири вихрей, в которых вращение происходит по часовой стрелке (антициклоническая завихренность), говорит о том, что в теплый период года вихревая активность проявляется слабо, и с годами продолжает ослабевать. В зимние месяцы начала XXI века, напротив, наметился рост антициклонической завихренности.

В качестве индексов, описывающих основные циркуляционные моды атмосферы над Западной Сибирью, из набора циркуляционных индексов Северного полушария были выбраны: индекс Арктической осцилляции (АО) и Скандинавский индекс (SCAND).

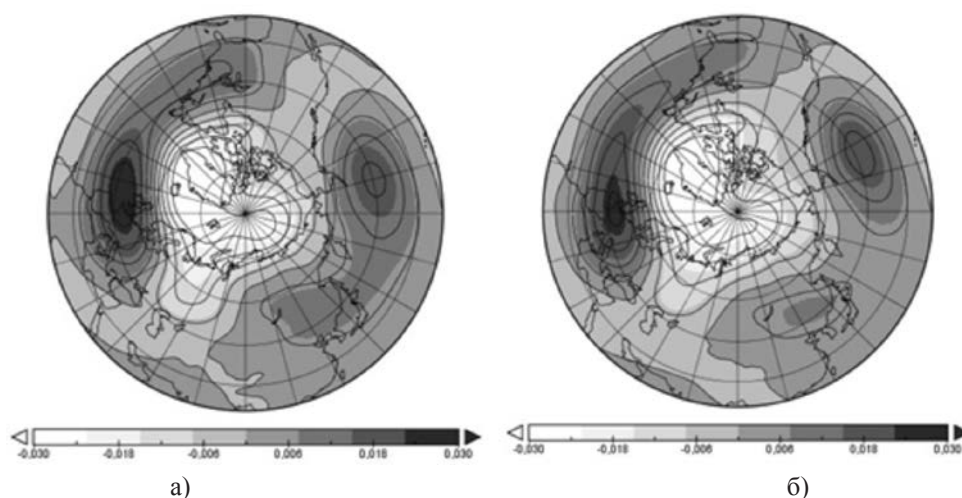
Во временном ходе индексов глобальной циркуляции с 1976 по 2014 гг. выявлено, что со второй половины 90-х годов для АО обозначился переход от положительной фазы индекса к отрицательной, а для SCAND – переход от отрицательной к положительной (рис. 1). Уменьшение индекса АО говорит о снижении приземной температуры в умеренных широтах. Положительные же фазы индекса SCAND отвечают за развитие блокирующих систем над Скандинавским полуостровом, препятствующих западному переносу и приводящих к понижению температуры на территориях, расположенных восточнее [4, 5].

Так как индексы циркуляции представляют собой главные компоненты разложения поля аномалий геопотенциала по эмпирическим ортогональным функциям на уровне 700 гПа, был проведен анализ временной динамики полученных главных компонент, связанных с развитием описанных выше циркуляционных механизмов.

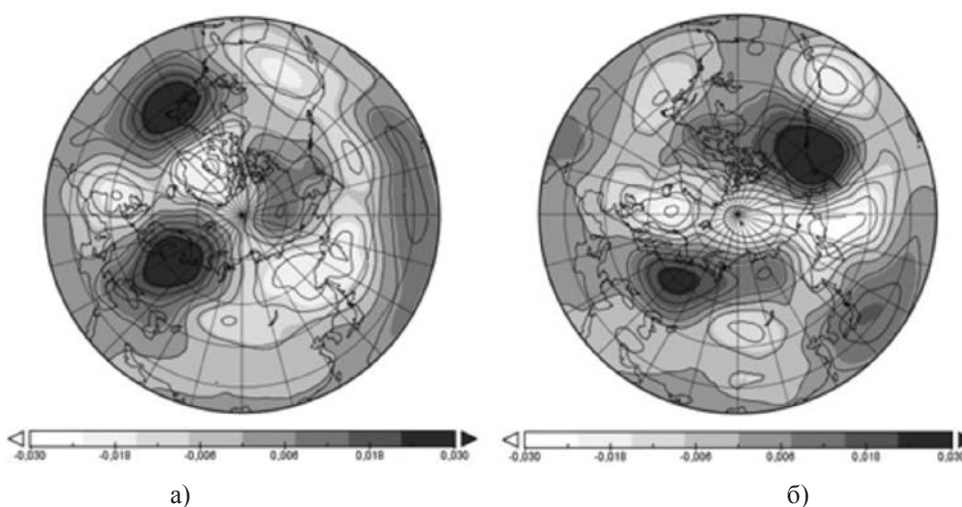


**Рис. 1.** Межгодовой ход оценок индексов атмосферной циркуляции в зимний сезон для территории Западной Сибири за период 1976-2014 гг. (пунктирная линия - сглаживание по ФНЧ).

Собственный вектор индекса АО (первой главной компоненты) изменился незначительно при переходе от периода 1976-2005 гг. к периоду 1986-2014 гг., однако происходит уменьшение области максимальных значений, расположенной над Атлантикой и Европой, что приводит к уменьшению меридионального градиента и ослаблению западного переноса в умеренных широтах (рис.2).



**Рис. 2.** Пространственное распределение ЗОФ-1 (индекс АО) в зимние месяцы (декабрь-февраль) за период: а) 1976-2005 гг.; б) 1986-2014 гг.



**Рис. 3.** Пространственное распределение ЗОФ-9 в зимние месяцы (декабрь-февраль) за период: а) 1976-2005 гг.; б) 1986-2014 гг.

Что касается пространственного распределения индекса SCAND (девятой главной компоненты), то во втором периоде отчетливо формируются все характерные центры действия: 2 максимума – над Скандинавией и Японией; 2 минимума – над Испанией и Монголией, причем первый центр находится севернее от своего стандартного положения (рис.3). Эта тенденция соответствует его положительной фазе и согласуется с выводами о развитии процессов блокирования, полученных при исследовании временной изменчивости индекса (рис.1).

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-5969.2015.5.*

#### **Литература:**

1. Trenberth K.E. and Fasullo J.T. An apparent hiatus in global warming? // *Earth's Future*. 2013. N 1. P. 19-32. DOI: 10.1002/2013EF000165.
2. Chen X. and Ka-Kit Tung. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration // *Science*. 2014. V 345. N 6199. P. 897-903.
3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2013 г. Росгидромет. Москва. 2014. 109 с.
4. Попова В.В., Шмакин А.Б. Региональная структура колебаний температуры приземного воздуха в Северной Евразии во второй половине XX - начале XXI веков // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2010. Т.46. № 2. С. 161-175.
5. Barnston A. G., Livezey R. E. Classification, Seasonality, and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns // *Monthly Weather Review*. 1987. № 6. P. 1083-1126.

# Influence of a city on the variability of climatic characteristics

<sup>1,2</sup>Voropay N.N.

<sup>1</sup> Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

E-mail: voropay\_nn@mail.ru

Climatic conditions in the cities are considerably differed from the surrounding rural areas, and these changes are higher in cities with large area. City heat island is one of the main features of the urban climate. Heat island is characterized by elevated air temperatures compared to the countryside. Great influence on the urban climate has an air pollution with various contaminants. The source of anthropogenic aerosol are industrial emissions of solid and liquid particles, heating system and transport. Increase of aerosol concentration over cities dramatically reduces incoming solar radiation. Raised amount of condensation nuclei in the air over cities and strengthening of upward air movements lead to an increase in cloud cover and local precipitation.

Placement of industrial plants in the Predbaikalie region is not uniform. Almost two-thirds of factories is located in the Irkutsk-Cheremhovo industrial area - a narrow strip stretched 150 km from Cheremhovo to Shelekhov. It is limited agricultural areas of the Ust-Orda Buryat Ocrug in the North, and sparsely populated taiga areas in the south.

The Irkutsk-Cheremhovo industrial area have extremely unfavorable weather conditions for the purification of the atmosphere (Linevich, Sorokin, 1992). Local changes of atmospheric transparency occurring in Irkutsk due to industrial air pollution may reduce the influx of solar radiation by 10-20%.

The Irkutsk city heat island effect is visible at comparison of long-term observations at weather stations Irkutsk and Homutovo, located 25 km from the city. The maximal effect occurs in winter months when differences between urban and rural areas exist even at mean monthly air temperature (up to 5°C). The temperature contrasts in summer months are smoothed and the difference in temperature rarely exceeds 0.5°C. At the same time in June in most cases the average monthly temperature in Homutovo by 0.6-1.1 °C higher than in Irkutsk. The long-term fluctuations in air temperature at both stations occur synchronously with regional and global variations. Trends in the monthly average and annual air temperature over the past 50 years in urban and rural areas do not differ from each other. Annual temperature trends are 0.46-0.47 °C / 10 years.

The highest repeatability in the study area have north-west winds. Impact of industrial centers should be most noticeable in the settlements located in the direction of the prevailing wind – at the south spurs of the Lena-Angara plateau. On the background of general decrease in annual precipitation, some increase occurs at weather stations Bohan, Ust-Orda, Homutovo (with rate 0.2-1.3 mm / yr). Analysis of the seasonal changes in precipitation shows that in winter increase of precipitations occurs also at northern and mountain areas, which is likely due to the influence of local physiographic conditions.

## Влияние города на изменчивость климатических характеристик

<sup>1,2</sup> Воропай Н.Н.

<sup>1</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup> Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

E-mail: voropay\_nn@mail.ru

**К**лиматические условия в городах обычно заметно изменены по сравнению с окружающими районами, причем эти изменения при прочих равных условиях тем больше, чем больше территория города. Имеются данные о том, что в крупных городах изменения климата возникли сотни лет тому назад. Так, например, Н.Е.Ландсберг [1956] приводит свидетельство современника о сильном загрязнении воздуха в Лондоне в XVII веке, которое значительно ослабляло солнечную радиацию в городе по сравнению с сельской местностью.

Одна из главных особенностей городского климата - возникновение в городе “острова тепла”, который характеризуется повышенными по сравнению с загородной местностью температурами воздуха. Этот эффект исследовался во многих экспериментальных работах, для его изучения проводились дистанционные измерения радиационной температуры подстилающей поверхности, было предложено несколько численных моделей. Многие авторы [Landsberg, 1970; Берлянд, Кондратьев 1972; Непредна-



меренные воздействия..., 1974; Марчук, Пененко и др., 1979; Трофимова, Коновалова, 1988; Кислов, Константинов, 2011] отмечают, что «остров тепла» обычно имеет сложную структуру, причем каждый квартал городской застройки является источником тепла для окружающих незастроенных участков. Средняя температура воздуха в большом городе чаще всего выше температуры окружающих районов на 1-2°C, однако, ночью при небольшом ветре разность температур может достигать 6-8°C. При сильных ветрах эта разность обычно уменьшается. Эффект городского «острова тепла» имеет сезонный характер. Фиксируются также различия между дневным и ночным временем суток, причем, ночью эти эффекты проявляются значительно сильнее [Zhong Baolin, 1996].

В некоторых работах, например [Kato, 1996], решается задача разделения влияния эффектов «острова тепла» и собственно потепления. Выявлено, что в городах с населением свыше 100 тыс. человек за период 1920-1992 гг. эффект «острова тепла» составил 1.0-2.5°C/100 лет, что сравнимо с величиной потепления.

Большое влияние на климат городов оказывает загрязнение воздуха различными примесями. Источником этих примесей являются выбросы промышленных предприятий, отопительных систем и транспорта. Часть антропогенного аэрозоля в городах образуется из выбросов твердых и жидких частиц, другая часть возникает из поступающих в атмосферу газов.

Увеличение концентраций аэрозоля над городами резко уменьшает солнечную радиацию, поступающую к земной поверхности. По данным Landsberg [1970], в больших городах прямая солнечная радиация часто уменьшается на величину около 15%, ультрафиолетовое излучение - в среднем на 30% (в зимние месяцы оно может полностью исчезнуть), продолжительность солнечного сияния - на 5-15%. Главную роль в ослаблении солнечной радиации в городах играет тонкий нижний слой воздуха, в котором содержится наибольшее количество аэрозольных частиц. В пределах этого слоя обычно резко понижена горизонтальная видимость часто до 10-20% ее значений в загородных районах.

Повышенное количество ядер конденсации в воздухе над городами и усиление восходящих движений воздуха приводят к увеличению облачности и осадков. Имеются данные о том, что в некоторых промышленных центрах существует недельный цикл в количестве выпадающих осадков, объясняемый их уменьшением в выходные дни, когда промышленные предприятия не работают [Будыко, 1971].

Заслуживает внимания то, что по мере развития урбанизации в районах с наиболее высокой плотностью населения некоторые черты городского климата распространяются на обширные территории, достигающие сотен километров. В этих условиях происходит суммирование влияния на климат многочисленных близко расположенных населенных пунктов, каждый из которых действует как источник тепла и загрязнения воздуха.

Концентрация производства на территории Предбайкалья неравномерна, она особенно велика в Иркутско-Черемховском промышленном районе, где находится почти две трети промышленности. Между тем он представляет узкую полосу, протянувшуюся на 150 км от Черемхова до Шелехова. На севере он ограничивается развитым в сельскохозяйственном отношении западным участком Усть-Ордынского Бурятского автономного округа, а на юге - малонаселенной таежной местностью.

На рассматриваемой территории метеорологические условия экстремально неблагоприятны для очищения атмосферы [Линевиц, Сорокина, 1992]. Здесь базируется Азиатский антициклон, получающий основное развитие в зимние месяцы. Этот период характеризуется большим числом безветренных дней, глубокими температурными инверсиями. Например, в зимнем Иркутске повторяемость слабых ветров составляет 70%, приземных температурных инверсий - 80%, периодов застоя воздуха - 44%. Наиболее низкие температуры воздуха в это же время обуславливают максимальное тепло- и топливопотребление, а следовательно, наивысшее загрязнение атмосферы продуктами сгорания топлива.

Для выявления влияния города на изменения прямой радиации нами было проанализировано многолетнее распределение ее интенсивности на станциях Иркутск и Ильчир в течение года (1961-1986 гг.). В условиях безоблачного неба приход солнечной радиации, как известно, определяется высотой солнца и прозрачностью атмосферы. При выборе станций мы руководствовались тем, что они находятся практически на одной широте (около 52° с.ш.), т.е. высота солнца в течение всего года в сроки наблюдений для них одинакова. Величина же прозрачности в Иркутске должна быть существенно ниже, так как он является одним из наиболее крупных промышленных центров Восточной Сибири. И действительно, интенсивность прямой солнечной радиации в полдень на перпендикулярную поверхность при безоблачном небе (масса атмосферы  $m=2$ ) на станции Ильчир, в среднем на 0,14 кВт/м<sup>2</sup> выше, в течение года эта разность колеблется в пределах от 0,1 кВт/м<sup>2</sup> (май) до 0,19 кВт/м<sup>2</sup> (январь). Таким образом, локальные изменения прозрачности атмосферы в Иркутске, которые могут происходить за счет промышленных выбросов, снижают приход радиации на 10-20%.

Многолетние данные о среднегодовых температурах указывают на потепление климата за последние 100 лет, причем, большая часть этого потепления приходится на последние 30-40 лет [IPCC, 2013]. Частично оно связано с ростом городов. Метеорологическая станция Иркутск имеет период наблюдений за температурой воздуха с 1882 г. по настоящее время. В XIX веке станция располагалась вдали от города. В течение XX века, в период индустриализации, Иркутск, являясь областным центром, вырос.

Площадь города увеличилась в десятки раз. Теперь территория метеостанции находится в центре города. И одним из факторов изменения климата является сам город. При анализе многолетних рядов наблюдения на метеорологической станции Иркутск и метеорологической станции Хомутово, расположенной в 25 км от города, заметен эффект «острова тепла». Максимально он проявляется в зимние месяцы, когда даже в средних месячных значениях температуры воздуха существуют различия (до 5 °С в отдельные годы) между городом и сельской местностью (табл. 1). В летние месяцы температурные контрасты сглаживаются, и разница температур редко превышает 0,5 °С. При этом в июне в большинстве случаев наблюдается обратная ситуация – средняя месячная температура в Хомутово на 1,1-0,6 °С выше, чем в Иркутске. При этом многолетние колебания температуры воздуха на обеих станциях происходят синхронно с региональными и глобальными. Тенденции изменения средних месячных и годовых значений температуры воздуха за последние 50 лет в городе и сельской местности почти не отличаются друг от друга (табл. 2) и для средних годовых температур составляют 0,46-0,47 °С/10 лет.

Как отмечают некоторые авторы, факторов, способствующих увеличению количества осадков в городах, множество. Но они все взаимосвязаны и маскируют влияние друг друга. Согласно Г.Е.Ландсберг [1983], модификация и увеличение осадков в городе по сравнению с неурбанизированными территориями происходит по трем главным причинам. Первая - наличие острова тепла, которое приводит в городах к более интенсивному движению воздуха по вертикали, что в свою очередь является основным условием образования осадков. Вторая причина - эффект препятствия, то есть замедление движения синоптических систем, в которых происходят осадкообразующие процессы. Во многих случаях оба фактора действуют одновременно, в связи с чем, выделить вклад каждого из них в суммарном возмущении, вносимом городом в поле осадков, очень трудно. Третьей причиной, влияющей на образование осадков, является загрязнение атмосферы. Но оно вторично по сравнению с аэро- и термодинамическим воздействием.

Необходимо учитывать, что на рассматриваемой территории наибольшую повторяемость имеют северо-западные ветры, то есть влияние промышленных центров должно быть наиболее заметно в населенных пунктах, расположенных в направлении преобладающего переноса, а именно на южных отрогах Лено-Ангарского плато. Это подтверждают результаты регрессионного анализа, согласно которым, на фоне общего понижения годового количества осадков по территории на таких станциях как Бохан, Усть-Ордынский, Хомутово наблюдается их повышение (0,2-1,3 мм/год). Если рассматривать изменения в режиме осадков по сезонам, то можно отметить, что к выше перечисленным в зимний период добавляются станции, расположенные в северных и горных районах, что, скорее всего, связано с влиянием местных физико-географических условий.

**Таблица 1.** Разница между средними месячными и средними годовыми температурами воздуха на метеостанциях Иркутск и Хомутово ( $T_{\text{Иркутск}} - T_{\text{Хомутово}}$ ) за период 1960-2008 гг., °С.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Среднее	4,25	4,15	2,73	0,46	0,17	-0,2	0,04	0,23	0,51	1,37	2,96	3,67	1,69
Минимум	3,3	3	1,6	0	-0,3	-0,9	-0,3	-0,2	0,2	0,9	2,1	2,5	1,33
Максимум	5	5,3	3,9	1,2	0,7	0,3	0,7	0,7	1	1,9	3,9	4,6	2,08

**Таблица 2.** Тенденции изменения температуры воздуха (°С/10 лет) за период 1961-2008 гг.

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Хомутово	0,38	1,09	0,47	0,41	0,39	0,36	0,40	0,34	0,36	0,41	0,56	0,49	0,47
Иркутск	0,41	1,09	0,52	0,46	0,39	0,30	0,36	0,31	0,33	0,46	0,47	0,51	0,46

#### Литература:

1. Landsberg H.E. *The climate of towns. Man's role in changing the face of the Earth* // University of Chicago Press. - 1956. - P.584-606.
2. Landsberg H.E. *Man-made climatic changes* // Science. - 1970. - vol.170. - P.1264-1265.
3. Берлянд М.Е., Кондратьев К.Я. *Города и климат планеты.* - Л.: Гидрометеоиздат, 1972. - 40 с.
4. *Непреднамеренные воздействия на климат / Под ред. М.И. Будыко.* - Л.: Гидрометеоиздат, 1974. - 260 с.
5. Марчук Г.И., Пененко В.В., Алоян А.Е., Лазриев Г.Л. *Численное моделирование климата города* // Метеорология и гидрология. – 1979. - №8. – С.5-15.
6. Трофимова И.Е., Коновалова Т.И. *Климато-экологическое состояние территорий городов и их окружения* // Экологические проблемы урбанизированных территорий. - Иркутск, 1988. - С.72-81.

7. Кислов А. В. Константинов П. И. Детализированное пространственное моделирование температуры Московского мегаполиса // *Метеорология и гидрология* - № 5, 2011; 25-32.
8. Zhong Baolin // *Qixiang*. = *Meteorol. Mon.* - 1996. - 22, N5. - P.23-24.
9. Kato H. A statistical method for separating urban effect trends from observed temperature fbd its application to Japanese temperature records // *J. Meteorol. Soc. Jap.* - 1996. - 74, N5. - p.639-653.
10. Будыко М.И. Климат и жизнь. - Л.: Гидрометеиздат, 1971. - 472 с.
11. Линевиц Н.Л., Сорокина Л.П. Климатический потенциал самоочищения атмосферы: опыт разномасштабной оценки // *География и природные ресурсы*. - 1992. - №4. - С.160-165.
12. IPCC, 2013: *Climate Chang 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D/ Qin, G.-K. Plattner, M.Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A.Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.

## Current changes of resources moistening during vegetation season in the South of Western Siberia

Polyakov D.V., Kuzhevskaya I.V.

Tomsk State University, Russia

Web: [ggf.tsu.ru/content/faculty/structure/chair/meteorology/](http://ggf.tsu.ru/content/faculty/structure/chair/meteorology/)

E-mail: [denissinoptik1988@mail.ru](mailto:denissinoptik1988@mail.ru)

Conscious the dynamics of climate change in recent decades has intensified the study in the field of the natural processes, which are determined by climatic factors. Climate change on the regional level has their particular consequences and the disruption to the economy. Understanding this situation identified the focus of this research to the study of modern climate change small regions during vegetation period, the example of the south of Western Siberia. Study of modern climate change in the south of Western Siberia based on an assessment of indicators of climate variability. For these indicators in this study are the resources moistening: the amount of precipitation for the period with average daily temperatures over 5 °C ( $\Sigma P_5$ ) (vegetation season) and the hydrothermal coefficient of T.G. Selyaninov.

Thus, the modern tendencies in resource moistening south of Western Siberia following can be noted: during the last decades, studied territories are found mainly positive anomalies of  $\Sigma P_5$ . It was an effect on the limitation or impossibility of field work, which ultimately reduced the quality of the harvest, increasingly frequent instances of under extreme hydrothermal regime in recent decades have a negative impact on agriculture, due to severe instability moisture regime.

The main trend changes moistening resources - a small decrease of aridity during the period of the contemporary wave of warming (since 1976). Assessment of linear trend  $\Sigma P_5$  is 2.0%/norms/10 years the south of Western Siberia. On the whole south of Western Siberia moisture over the past 36 years experiences insignificant increase, accounting for 0.01 un./10 years. The observed increase of resources for moistening on the study area revealed significant fluctuations in the background. we cannot argue about the same direction as the trend because the observed increase in precipitation can change the decrease (antipersistent).

Using the method of EV-diagrams were able to identify a tendency to increase the interannual variability of  $\Sigma P_5$  and hydrothermal coefficient. The increase in climate variability resources moisture to some extent destabilizes agriculture in a changing climate conditions.

## Тенденции современных изменений ресурсов увлажнения за период вегетации на территории юга Западной Сибири

Поляков Д.В., Кузевская И.В.

Томский государственный университет, Россия

Web: [ggf.tsu.ru/content/faculty/structure/chair/meteorology/](http://ggf.tsu.ru/content/faculty/structure/chair/meteorology/)

E-mail: [denissinoptik1988@mail.ru](mailto:denissinoptik1988@mail.ru)

Динамика изменения климата, осознанная в последние десятилетия, активизировала изучение в области природных процессов, которые определяются климатическими факторами. Можно сказать, что изменения климата в отдельных регионах России полностью не вписываются в общую

парадигму глобального изменения климата. Изменения климата на региональном уровне имеют свои особые последствия и проблемы для отраслей экономики. Понимание данной ситуации определили нацеленность данного исследования на изучение современных изменений климата небольших регионов за период вегетации, на примере юга Западной Сибири.

Изучение современных изменений климата на территории юга Западной Сибири основано на оценке индикаторов изменчивости. В качестве данных индикаторов в данном исследовании выступают ресурсы увлажнения: суммы атмосферных осадков за период со среднесуточной температурой, превышающей 5 °С (период вегетации) -  $\sum OC_5$  и гидротермический коэффициент Т. Г. Селянинова. Для территории юга Западной Сибири с её развитым аграрным сектором, подобное исследование особенно актуально. Данное исследование проводилось без учёта почвенных характеристик, которая наряду с климатом, является одним из основных факторов формирования жизни растений.

Для выделения видимых флуктуаций и динамики изменения основных показателей увлажнения были рассмотрены количественные данные об аномалиях ( $\Delta$ ) пространственно осредненных по территории исследования  $\sum OC_5$  и ГТК.

Из полученных результатов следует, что отмечается динамика постепенного роста положительных  $\Delta \sum OC_5$ . Отметим тот факт, что с середины 80-х XX в. по настоящее время наблюдается рост значений положительных аномалий и их превалирование над отрицательной составляющей с явно возросшей амплитудой между ними.

Большая часть периодов вегетации (3 из 5 самых экстремальных) с существенным дефицитом осадков ( $\Delta \sum OC_5 \geq -\sigma$ ) сконцентрированы до 90-х XX в., где самый большой дефицит осадков был в 1972 г. Отрицательная аномалия от базовой нормы, равная 214,1 мм составила -76,9 мм, т.е. 64 % нормы. С начала 90-х XX в. произошла разбалансировка системы  $\Delta \sum T_5$ . Наблюдается превалирование положительных аномалий над отрицательными, где впервые стали отмечаться особо экстремальные положительные аномалии ( $\Delta \sum OC_5 \geq 2\sigma$ ) по увлажнению за вегетационный период (1993, 1996, 2002, 2007 и 2009 г.). Исключительным оказался 2009 г., где  $\Delta \sum OC_5$  составила 89,6 мм (142 % нормы).

Из анализа  $\Delta \sum OC_5$ , 10 можно сказать, что наряду с рисками, связанные с засушливыми явлениями, в последние десятилетия участились проблемы, приводящие к переувлажнению почвы. Это стало сказываться на ограничении или невозможности проведения полевых работ, что в итоге снижало урожай в целом.

Из полученных результатов по  $\Delta$ ГТК, можно говорить о том, что периоды вегетации все чаще стали характеризоваться экстремальностью, особенно это стало проявляться с начала 90-х XX в. Это обусловлено тем, что 3 из 5 самых экстремальных сезонов, как по дефициту, так и по увлажненности территории исследования наблюдаются последние 15-18 лет. Так, например в 2009 году наблюдалась одна из самых сильных положительных аномалий ( $\Delta$ ГТК  $\geq 2\sigma$ ). Таким образом, участвовавшие случаи проявления условий экстремальности гидротермического режима по ГТК за последние десятилетия стали негативно сказываться на сельском хозяйстве, благодаря выраженной неустойчивости режима увлажнения.

Наблюдаемая в последние десятилетия экстремальность показателей увлажнения, связана с проявлением свойств меняющегося климата. Таким образом, становится актуальным рассмотрение вопроса о том, в какую сторону происходят изменения режима увлажнения (тенденция в сторону гумидности или аридности) на протяжении современной волны глобального потепления с 1976 г.

Оценки линейного тренда  $\sum OC_5$ , показывают, что для юга Западной Сибири оценка линейной скорости роста  $\sum OC_5$  составляет +2,0 % нормы/10 лет (вклад в общую изменчивость 1%) – тренд статистически не значим на уровне 5 %. Данные результаты также подтверждается с помощью R/S анализа, где временной ряд рассматриваемого показателя испытывает неустойчивую тенденцию (антиперсистентен). Региональный тренд выявляется на фоне очень значительных флуктуаций с периодом несколько лет или десятилетий. Таким образом, ни в коем случае нельзя с уверенностью утверждать именно о наличии тренда, а не об определенной фазе таких колебаний, хотя для некоторых пунктов (Бакчар-Северное) наблюдается явный рост атмосферных осадков за период вегетации.

В целом для юга Западной Сибири увлажненность за последние 36 лет испытывает незначительное увеличение, составляя 0,01 ед./10 лет и вклад в дисперсию 0 %, т.е. тренд не значим на уровне 5 %.

Дополнительно, для анализа текущих изменений  $\sum OC_5$  и ГТК полезно использовать метод EV-диаграмм (для скользящих 30-летних периодов с 1961 по 2012 гг.). Следует, что с 1961 по 2012 г произошло увеличения  $\sum OC_5$  суммы выпадающих атмосферных осадков за период вегетации – от 214,1 до 231,6 мм. Так же можно отметить тенденцию к увеличению межгодовой изменчивости атмосферных осадков за рассматриваемые периоды. Так, например среднеквадратическое отклонение  $\sum OC_5$  возросло с 29,3 до 42,6 мм. Повышение изменчивости сумм атмосферных осадков можно отнести к негативным последствиям изменения климата, т.е. повышение его экстремальности. 30-летние средние значения ГТК увеличились с 0,95 до 0,99. Межгодовая изменчивость ГТК за рассматриваемые периоды, также немного возросла с 0,20 до 0,22. Таким образом, основная тенденция изменений гидротермического режима – небольшое уменьшение аридности происходит на фоне современной волны потепления.

Обеспеченность 30-летней скользящей оценки повторяемости современного (1983–2012 гг.) состояния системы для  $\Sigma OC_5 = 231,6$  мм равная 231,6 мм, которая составляла 28,5 % за период 1961–1990 гг., возросла с 28,5 % (1961–1990 гг.) до 58,7 % к 2010 г. Таким образом, современные  $\Sigma OC_5$  за период 1961–1990 гг. наблюдались около трех раз за 10 лет, то к 2010 г. этот показатель повысился практически в два раза. Повторяемость современного состояния системы ГТК составляла в 1961–1990 гг. 45,2 % и увеличилась к 1981–2010 гг. на 6,9 % до уровня 52,1 %.

Таким образом, в современных тенденциях ресурсов увлажнения юга Западной Сибири можно отметить следующее:

В последние десятилетия на территории исследования отмечаются в основном положительные аномалии атмосферных осадков. Это стало сказываться на ограничении или невозможности проведения полевых работ, что в итоге ухудшало качество урожая;

Небольшое увеличение гумидности климата ведет к неоднозначным последствиям на территории исследования: благоприятные в более засушливых районах, пагубное – в достаточно увлажненных;

Увеличение климатической изменчивости ресурсов увлажнения в определенной степени дестабилизирует сельское хозяйство в изменяющихся климатических условиях;

Наблюдаемый рост ресурсов увлажнения на территории исследования выявляется на фоне значительных флуктуаций, но благодаря свойству антиперсистентности ряда данных, мы не можем утверждать об одной направленности тенденции, потому как наблюдаемый рост осадков может смениться их уменьшением.

# SESSION Data and information- computational systems for Earth sciences

## СЕКЦИЯ Данные и информационно- вычислительные системы для наук о Земле

### Complex approach for studying wildfires in Central Siberia

<sup>1</sup>Panov A.V., <sup>2</sup>Chi X., <sup>1</sup>Prokushkin A.S.,  
<sup>1</sup>Bryukhanov A.V., <sup>1</sup>Korets M.,  
<sup>1</sup>Ponomarev E.I., <sup>1</sup>Krivobokov L.V.,  
<sup>1</sup>Sidenko N.V., <sup>1</sup>Timokhina A.V.,  
<sup>2</sup>Andreae M.O.

<sup>1</sup>V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>Max-Planck-Institute for Chemistry, Germany  
E-mail: alexey.v.panov@gmail.com

Calculations of direct emissions of greenhouse gases from boreal wildfires remain uncertain due to problems with emission factors, available carbon, and imprecise estimates of burned areas. Even more varied and sparse are accurate in situ calculations of temporal changes in boreal forest carbon dynamics following fire.

Linking simultaneous instrumental atmospheric observations, GIS-based estimates of burned areas, and ecosystem carbon uptake calculations is vital to fill this knowledge gap. Since 2006 ZOTTO ([www.zottoproject.org](http://www.zottoproject.org)) a research platform for large-scale climatic observations is operational in Central Siberia (60°48'N, 89°21'E). The data of ongoing greenhouse gases measurements at the tower are used in atmospheric inversions studies to infer the distribution of carbon sinks and sources over central Northern Eurasia.

We present our contribution to reducing uncertainties in estimates of fire influence on atmospheric composition and post-fire ecosystem carbon uptake deduced from the large-scale fires that happened in 2012 in the tall tower footprint area. Assessment of air composition in fire plumes was based on time series of CO/CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> mixing ratios measured at 300 m a.g.l.. Burned areas were estimated from Landsat ETM 5,8 satellite images, while fires were detected from Terra/Aqua MODIS satellite data. The magnitude of ecological change caused by fires was measured and mapped with a Normalized Burn Ratio (NBR) index and further calibrated by a complementary field based Composite Burn Index (CBI). Measures of fire radiative power (FRP) index provided information on fire heat release intensity and on the amount and completeness of biomass combustion. Based on the analyzed GIS data, the system of study plots was established in the 5 dominating ecosystem types where the estimation of carbon pools and their mapping was organized with a laser-based field instrumentation system. Based on the derived data set the biomass burning emissions from dominating ecosystem types in Central Siberia were calculated. Estimations of direct emissions were supplemented by soil respiration measurements within the plots by an automated soil flux system (LI 8100A).

The highest biomass burning emissions were found in pine forests (1300 - 1850 gC/m<sup>2</sup>). For mixed and dark forests fire emissions didn't exceed 550-600 gC/m<sup>2</sup>. In turn the maximal soil respiration rates (up to 3,2 μmolC/m<sup>2</sup>/s) were found in wet and less disturbed mixed forest stand and could be attributed to autotrophic respiration, and the lowest rates (1 – 1,2 μmolC/m<sup>2</sup>/s) of primarily heterotrophic origin were typical within the dry pine stands with the highest burn severity.

*The work was supported financially by Max Planck Society (Germany), project of RFBR # 15-45-04423, grant of president MK-1691.2014.5, and RSF grant # 14-24-00113.*

## Комплексный подход в исследовании лесных пожаров в Средней Сибири

<sup>1</sup>Панов А.В., <sup>2</sup>Чи Сяйгуань, <sup>1</sup>Прокушкин А.С., <sup>1</sup>Брюханов А.В., <sup>1</sup>Корец М.А., <sup>1</sup>Пономарев Е.И., <sup>1</sup>Кривобоков Л.В., <sup>1</sup>Сиденко Н.В., <sup>1</sup>Тимохина А.В., <sup>2</sup>Майнрат Андреа

<sup>1</sup> Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Институт химии им. М. Планка, Германия

E-mail: alexey.v.panov@gmail.com

### ВВЕДЕНИЕ

Бореальные (таежные) леса Сибири играют исключительно важную экологическую роль. Их средообразующие и средостабилизирующие функции, по своей биосферной и экологической значимости, намного превышают ресурсный потенциал. Однако само существование и нормальное экологическое функционирование таежных лесов в значительной степени определяется нарушениями из которых природные пожары имеют первоочередное значение. Так происходящие изменения климата по оценкам специалистов (Soja et al., 2007; Иванова и др., 2007) ведут к увеличению экстремальных пожароопасных сезонов, частоты и площади пожаров, сокращению межпожарных интервалов. Показано, что динамика возгораний лесов Сибири за последние десятилетия демонстрирует устойчивую тенденцию к росту по количеству пожаров, и по пройденной ими площади (Цветков, Буряк, 2014).

В июле – августе 2012 года в России на значительной территории Сибирского Федерального округа (СФО) возникла экстремальная пожарная обстановка, вызванная аномальной жарой, отсутствием осадков и частыми сухими грозами. За сравнительно небольшое время ситуация приобрела масштабы региональной катастрофы, когда площади отдельных активных зон горения в лесах Сибири превышали десятки тысяч гектаров. Суммарная площадь лесных пожаров в России в 2012 году составила более 2 млн гектаров, из которых на территорию СФО приходилось свыше половины (до 1.3 млн га) (ЕМИСС; <http://www.fedstat.ru>). И это лишь данные официальной статистики, которые в значительной мере занижаются, и могут различаться с результатами спутникового мониторинга как минимум в 2 – 3 раза, (Kukavskaya et al., 2013). Помимо площадей, не оцененным остается масштаб количеств углеродсодержащих газов и аэрозолей, выделенных в атмосферу при горении биомассы, и степень их воздействия на планетарную климатическую систему. Также, в ходе самих пожаров и в последующие годы в ходе широкомасштабной смены возрастных поколений и хвойных видов на мелколиственные происходит изменение экологических функций экосистем. Нарушаются естественные гидрологические и экологические режимы территорий пройденных пожарами, изменяются биогеохимические циклы элементов, и стабилизирующие функции бореальных лесов. С учетом масштабов ежегодного растущего воздействия пожаров и увеличения площадей трансформированных ими лесных экосистем, изменения экологических функций бореальных лесов Сибири приобретают биосферное значение (Ваганов и др., 1998).

Комплексность воздействия обуславливает трудность оценки истинных масштабов ущерба, нанесенного лесными пожарами в Сибири и принятия реальных мер по борьбе с ними. Потому задача формирования современных мультидисциплинарных методов и подходов в исследовании пожаров, их развития и систематизирования, остается не только фундаментальной для познания биосферных процессов и их прогноза, но имеет и стратегическое значение.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования пожарного воздействия на процессы атмосферно – экосистемного обмена в работе использован комплексный подход, объединяющий анализ данных дистанционного зондирования (ДДЗ), инструментальные оценки физико-химического состава атмосферы в дымовых шлейфах (данные обсерватории “ЗОТТО”), и лесобиологические исследования на стационарных пробных площадях в зоне охвата измерений обсерватории (наземная верификация). Крупномасштабные лесные пожары

2012 года в районе исследования предоставили уникальную возможность для пилотных работ с целью тестирования и развития данного подхода. Площади, пройденные огнем в результате лесных пожаров 2012 г. в среднетаежной подзоне Приенисейской Сибири в непосредственной близости от обсерватории “ZOTTO” – станции высокоточного атмосферного мониторинга (60 с.ш. 90 в.д.), превысили 850 тысяч гектаров, что дало возможность организовать здесь систему долгосрочного стационарного лесобиологического мониторинга в преобладающих типах леса, с целью анализа изменений (кратковременных, долговременных) баланса потоков углерода в ходе пирогенных сукцессий, и выявления влияния этих изменений на сопряженные инструментальные оценки физико-химического состава атмосферы.

Определение границ территорий пройденных пожаром и предварительная оценка степени послепожарной нарушенности растительности на выбранном пробном полигоне в районе исследований выполнялась на основе данных мультиспектральной спутниковой съемки Landsat 5 и 8 с пространственным разрешением 30 м. Оценка степени нарушенности растительности пожаром и, опосредованно, интенсивность горения определялась на основе нормализованного индекса интенсивности пожара  $NBR$  (Normalized Burn Ratio), который вычислялся как нормализованное зональное отношение:

$$NBR = (R_4 - R_7) / (R_4 + R_7) \quad (1),$$

где  $R_4$  и  $R_7$  – отражательная способность в ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном спектральных каналах соответственно.

Поскольку  $NBR$  характеризует интенсивность поглощения солнечной радиации хлорофиллом и влагой растительности, содержание которых может меняться по причинам не связанными с последствиями пожара, то в работе был использован разностный индекс  $dNBR$ , рассчитанный как:

$$dNBR = (NBR_{до\ пожара} - NBR_{после\ пожара}) * 10^3 \quad (2),$$

Для ранжирования непрерывной шкалы индекса  $dNBR$  по степени повреждения растительности или интенсивности пожара использовался комплексный индекс пожарной нарушенности  $CBI$  (Composite Burn Index), рассчитанный по эмпирическому алгоритму в ходе наземных исследований на пробных площадях, как непрерывная безразмерная величина, характеризующая величину общего пожарного воздействия на экосистему, складывающегося из бальной оценки повреждения пожаром на всех ярусах и структурных элементах растительности, включая живой напочвенный покров, кустарники, подлесок, деревья по группам высоты и структуру полога.

Интегральная мощность теплоизлучения от пожаров растительности изучалась посредством съемки аппаратурой TERRA/Modis, на которой фиксировалась радиояркостная температура поверхности в диапазоне 4 мкм. Соотношение, характеризующее связь между мощностью излучаемого теплового потока от пожара и радиояркостными температурами цели и фона на изображениях в диапазоне 4 мкм, было впервые предложено в работе. Показатель, получивший название FRP (Fire Radiative Power), вычислялся как:

$$FRP = 4.34 \cdot 10^{-19} (T_4^3 - T_{4bg}^8) \quad (3),$$

где  $T_4$  – радиояркостная температура термически активного пикселя (цели) в 21 канале радиометра Modis ( $\lambda = 3.989 - 3.929$  мкм),  $T_{4bg}$  – радиояркостная температура для фоновой поверхности снимка, измеренная в том же спектральном диапазоне.

Для учета площадных характеристик излучающей поверхности соотношение было адаптировано к виду:

$$FRP = 20.25 \cdot S \cdot (R_4 - R_{4bg}), R = \sigma \cdot T^4 \quad (4),$$

где  $R_4$  и  $R_{4bg}$  – энергетическая светимость, вычисляемая на основе закона Стефана-Больцмана в диапазоне 4 мкм,  $\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная,  $S$  – площадь термически активной зоны.

Наземная верификация данных дистанционного зондирования проводилась в ходе лесобиологических исследований на территории пробного полигона. Фитоценотическая структура и другие особенности разных типов экосистем, и их динамика изучались на свежих (2012 г.) горях в преобладающих типах экосистем среднетаежной подзоны Сибири: сосняк лишайниковый, сосняк зеленомошный, смешанный тип леса, тип леса с преобладанием темнохвойных пород деревьев, и сосновый рям. Количественные и качественные характеристики насаждений на пробных площадях были определены с помощью программно-измерительного комплекса (ПИК ГИЛ), с картированием и оценкой запасов, пространственной структуры и жизненного состояния древостоя, запасов и распределения фитодетрита (сухостой, валеж, пни).

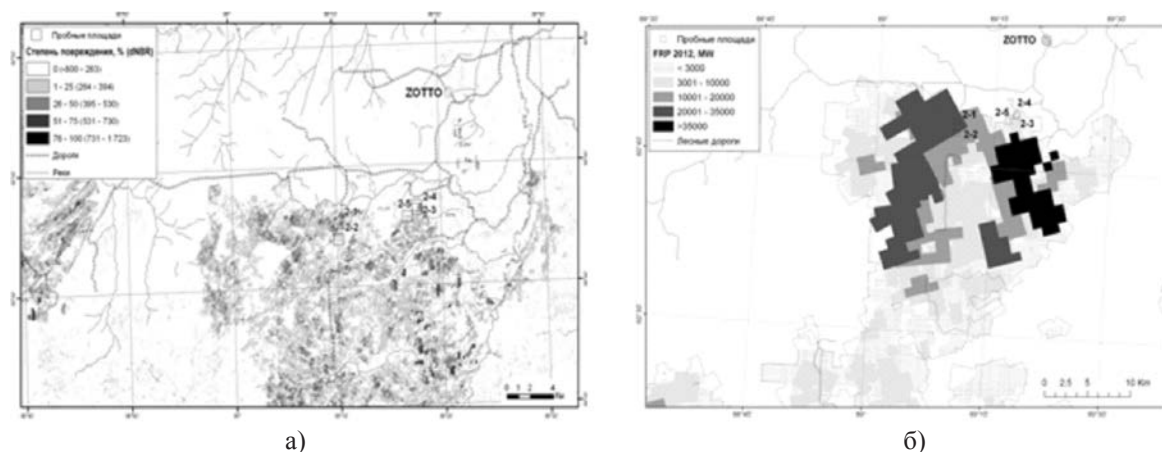
Атмосферный блок исследований базировался на потенциале обсерватории “ZOTTO”, оснащенной комплексом современного газоаналитического оборудования. Для анализа были использованы данные по концентрации основных углеродсодержащих газов ( $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ), в пограничном слое атмосферы (ПСА) с мачты на высоте 300 м, откуда поток атмосферного воздуха поступал по трубопроводам к регистрирующему комплексу обсерватории. Концентрация  $CO_2/CH_4$  в ПСА измерялась газоанализатором EnviroSense 3000i (Picarro Inc., США), монооксида углерода ( $CO$ ) – анализатором угарного газа ARMA-370 (Horiba Inc., Япония). Посредством статистического анализа рядов инструментальных



оценок содержания углеродсодержащих газов в ПСА, из общего массива данных выявлялись случаи превышений фоновых концентраций, обусловленных переносом воздушных масс от очагов пожаров к регистрирующему комплексу обсерватории. Для оценки переноса воздушных масс от зон активного горения к регистрирующему комплексу обсерватории были использованы измерения 48 сроков усредненных суточных значений ветровых характеристик, полученных с помощью 3D акустоанемометра 1210-R3/R3-50 (Gill Instruments Ltd., Великобритания). Обратные лагранжевы траектории переноса воздушных масс рассчитывались с использованием траекторной модели HYSPLIT (Draxler, Rolph, 2003), предоставленной лабораторией ARL NOAA. Расчет траекторий производился из набора метеорологических полей Реанализа (REANALYSIS). Расчет эмиссионных отношений и коэффициентов углеродсодержащих газов, а также показателей эффективности горения в дымовых шлейфах лесных пожаров разной интенсивности проводился согласно методу баланса углерода (Andreae, Merlet, 2001).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

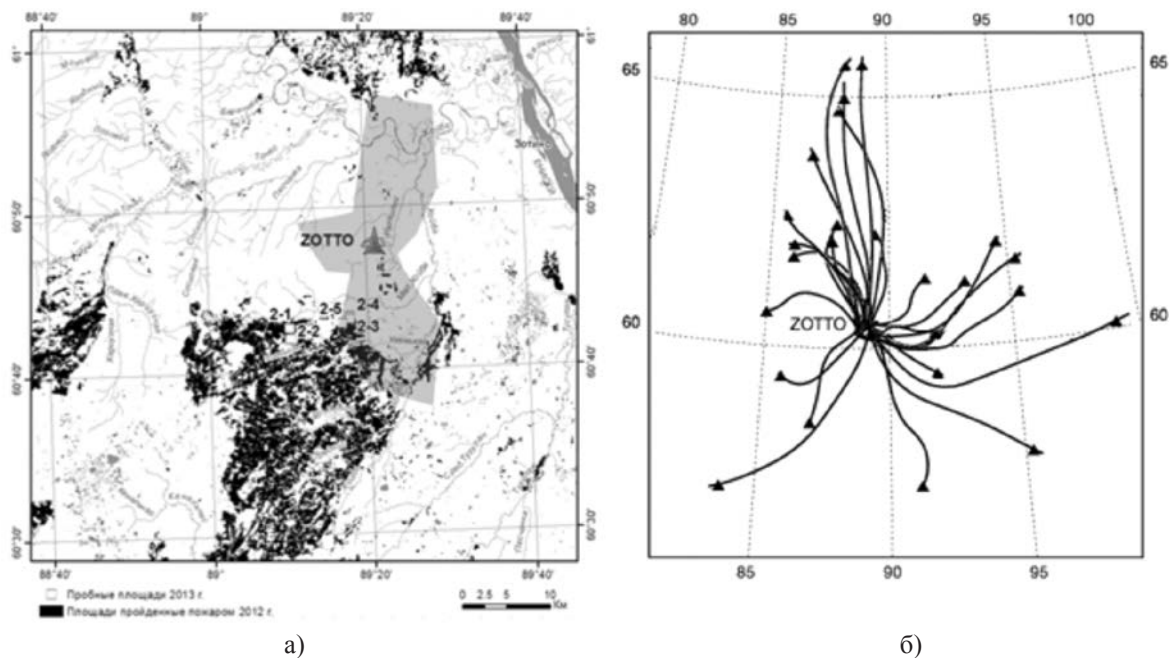
Для нарушенной пожарами территории опытного полигона были получены индексы  $dNBR$  на основе сравнительного анализа сцен Landsat 2011 г. (допожарное состояние) и 2013 г. (после пожара), что позволило оценить как площади, так и интенсивности пожаров прошедших в июле – августе 2012 года в районе исследований. Посредством величины индекса  $CBI$ , рассчитанного в ходе наземных исследований для пробных площадей в ключевых типах леса с различной структурой насаждений и степенью повреждения пожаром, проведено предварительное ранжирование индекса  $dNBR$  по степени пожарного воздействия на растительный покров (рис. 1 а). Для дополнительной верификации площадных характеристик пожарных повреждений лесов на территории опытного полигона, и качественной оценки воздействия огня, изучены диапазоны вариации показателя теплоизлучения ( $FRP$ ) (рис. 1 б).



**Рис. 1.** Отображение исследуемых ландшафтов пройденных пожарами с использованием ранжированного по степени нарушения индекса  $dNBR$  (а), и вариации показателя теплоизлучения  $FRP$  (б). 2.1 – 2.5 – стационарные пробные площади в преобладающих типах леса.

На основе ранжированного индекса  $dNBR$  и наземной лесобиологической оценки насаждений пройденных пожарами установлено, что степень пожарного повреждения экосистем варьирует в диапазоне от 25 до 50%. Отмечен общий рост степени повреждения экосистем со снижением процента лиственных и увеличением присутствия темнохвойных пород деревьев и ростом запасов лесных горючих материалов (ЛГМ), что подтверждается средними значениями мощности теплоизлучения, которые возрастают со сменой типа леса от 2100 МВт в сосняках до 3200 МВт в темнохвойных лесах. Так, наибольшая степень повреждения (до 50%) зафиксирована на участках с доминированием в составе темнохвойных пород деревьев, что обусловлено наличием больших запасов ЛГМ и прохождением части этих лесов верховыми пожарами, о чем свидетельствуют значения мощности теплоизлучения, в отдельные сроки достигавшие 24400 МВт. Следующие по величине значения  $dNBR$ , порядка 40 - 45%, отмечены в светлохвойных насаждениях с доминированием в составе сосны. При этом степень повреждения сосновых насаждений незначительно снижается с ростом увлажненности местопроизрастания от 40 – 45% в сухих сосняках лишайниковых, до 30 – 40% в более увлажненных сосняках зеленомошных. Через год после пожара на пробной площади отмечена частичная гибель соснового древостоя, и наибольший процент отпада был зафиксирован на участках с заглублением пожара в подстилку, что свидетельствует о преобладании устойчивых низовых пожаров. Однако отдельные высокие значения мощности теплоизлучения (до 19000 МВт) также свидетельствуют о периодическом возникновении верховых пожаров. Минимальные значения степени пожарного повреждения отмечены в смешанных типах леса (25 - 30%), с преобладанием лиственных пород.

Результаты дистанционных оценок и наземных наблюдений были сопряжены со статистическим анализом рядов данных высокоточных инструментальных наблюдений содержания основных углеродсодержащих газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ) в ПСА в период наличия очагов активного горения в зоне охвата измерений обсерватории, локальными метеорологическими параметрами (ветровые характеристики) (рис. 2 а), и обратным лагранжевым траекторным моделированием переноса воздушных масс (рис. 2 б).



**Рис. 2.** Территории пройденные пожаром разной интенсивности в июле – августе 2012 года с розой ветров (300 м н.у.м) в период наличия зон активного горения (17.07.12 – 10.08.12) (а), и рассчитанные 24-х часовые обратные лагранжевы траектории переноса воздушных масс посредством модели NOAA HYSPLIT (б).

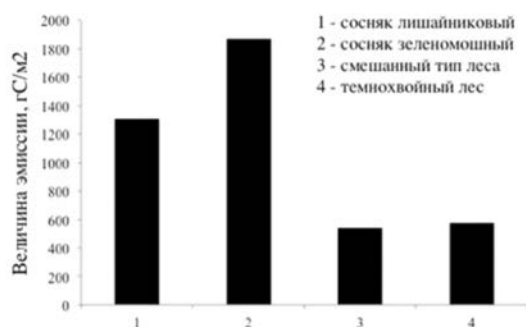
Выявлен интегрированный пожарный сигнал в превышении фоновых концентраций углеродсодержащих газов в ПСА, обусловленный переносом воздушных масс от зон активного горения к регистрирующему комплексу обсерватории. Сигнал фиксировался при приходе воздушных масс с западных направлений, посредством характерного для данных широт западного переноса, как с опытного полигона (10 км в юго-западном направлении от станции), так и территории лежащей в 30 км к северо-западу. Установлено, что период воздействия зон активного горения на измерения обсерватории достигал 3 недели (17.07.12 – 10.08.12), и формировал в инструментальных оценках содержания углеродсодержащих газов устойчивый нарастающий сигнал с пиковыми значениями в период с 25.07.12 по 01.08.12. На уровне пиковых величин отмечено превышение концентрации монооксида углерода ( $\text{CO}$ ) более чем на 3 ppт (3000%), диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) на 30 ppт (8%), и метана ( $\text{CH}_4$ ) на 2 ppт (205%), при их фоновых значениях на уровне 0,1 ppт для  $\text{CO}$ , 390 ppт для  $\text{CO}_2$ , и 1.9 ppт для  $\text{CH}_4$ .

Посредством выявленного пожарного сигнала в атмосферных наблюдениях и наземных оценках параметров и степени пожарного повреждения экосистем на территории опытного полигона в зоне охвата измерений обсерватории рассчитаны эмиссионные факторы для основных углеродсодержащих газов ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) в дымовых шлейфах лесных пожаров.

**Таблица.** Эмиссионные факторы основных углеродсодержащих газов в дымовых шлейфах лесных пожаров

Источник	Район исследования	Эмиссионный фактор, г С / кг сух. массы		
		$\text{CO}_2$	$\text{CO}$	$\text{CH}_4$
Наше исследование	Средняя Сибирь	1551	116	4,0
Andreae and Merlet, 2001	Зона бореальных лесов (компиляция литературных данных)	1569	107	4,7
Weidenmyer et al., 2006	Зона бореальных лесов (GLC 2000, Зоны 4 - 5)	1569	89	4,8
Urbanski, Hao, Baker, 2009	Зона бореальных лесов (компиляция литературных данных)	1604	105	4,5

На основе полученных эмиссионных коэффициентов проведен расчет эмиссий углеродсодержащих газов в атмосферу от лесных пожаров в июле – августе 2012 года для преобладающих типов леса Средней Сибири (рис.3). Так, наибольшие значения были отмечены в сосняках - зеленомошном (до 1850 гС/м<sup>2</sup>) и лишайниковом (1300 гС/м<sup>2</sup>). Принимая во внимание, что степень пожарного повреждения сосновых насаждений увеличивается от 30 – 40% в более увлажненных сосняках зеленомошных до 45% в сухих сосняках лишайниковых, а запасы ЛГМ, наоборот, снижаются, это может свидетельствовать о том, что в сосновых лесах, относительно однородных по структуре и условиям произрастания, определяющую роль в формировании эмиссионного потока углерода в атмосферу при пожаре играют запасы ЛГМ, высокое соотношение в них количества гигроскопичных фракций (опада, мхов, лишайников, подстилки), с низким влагосодержанием (8-10%), и, в меньшей степени - условия произрастания.



**Рис. 3.** Эмиссии углеродсодержащих газов в атмосферу при горении биомассы в преобладающих типах леса в среднетаежной подзоне Сибири.

В свою очередь отмечено общее снижение уровней эмиссии углеродсодержащих газов до 550 – 600 гС/м<sup>2</sup> в смешанных типах леса, и темнохвойных насаждениях, что обусловлено как составом ЛГМ с большим количеством вегетирующих трав и кустарничков, имеющих устойчивое высокое влагосодержание (120-140%) (Иванова и др, 2014), так и условиями произрастания. Данные экосистемы более сложны по составу и структуре, и неоднородны по метеорологическим факторам и рельефу, что лимитирует скорость распространения пожара, длительность прохождения, итоговые площади, и его энергетические и физико-химические характеристики на различных стадиях.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Общества Макса Планка (Германия), Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта №15-45-04423, и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-1691.2014.5.). Работа Н.В. Сиденко по статистическому анализу метеорологических параметров в районе исследования поддержана грантом РНФ (№14-24-00113).

#### Литература:

1. Ваганов Е.А., Плешиков Ф.И. Система мониторинга лесов как основа их рационального использования и устойчивого развития // Сиб. экол. журн. 1998. № 11. С. 3–8.
2. Иванова Г.А., Иванов В.А., Кукавская Е.А., Конард С.Г., Макрей Д.Д. Влияние пожаров на эмиссии углерода в сосновых лесах Средней Сибири // Сиб. экол. журн. 2007. № 6. С. 885–895.
3. Цветков П.А., Буряк Л.В. Исследования природы пожаров в лесах Сибири // Сибирский лесной журнал. 2014. № 3. С. 25–42.
4. Andreae, M. O., Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning // *Global Biogeochem. Cycles*. 2001. V.15. P. 955–966.
5. Kukavskaya E.A., Soja A.J., Petkov A.P., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Conard S.G. Fire emissions estimates in Siberia: evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption // *Can. J. For. Res.* 2013. №. 43. P. 493–506.
6. Soja A.J., Tchebakova N.M., French N.H.F., Flannigan M.D., Shugart H.H., Stocks B.J., Sukhinin A.I., Varfenova E.I., Chapin F.S., Stackhouse P.W. Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations // *Global and Planetary Change*. 2007. V. 56. P. 274–296.
7. Wiedinmyer C., Quayle B., Geron C., Belote A., McKenzie D., Zhang X., O'Neill S., Wynne K. K. Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling // *Atmos. Environ.* 2006. V. 40. № 19. P. 3419–3432.
8. Urbanski S. P., Hao W. M., Baker S. Chemical composition of wildland fire emissions // *Wildland fires and air pollution. The Netherlands: Elsevier*. 2009. P. 79–107.

## Fire emissions estimates in Siberia: Impact of vegetation types, meteorological conditions, forestry practices and fire regimes

<sup>1</sup>Kukavskaya E.A., <sup>2</sup>Conard S.G., <sup>1</sup>Ivanova G.A., <sup>3</sup>Buryak L.V., <sup>1</sup>Zhila S.V., <sup>3</sup>Kalenskaya O.P., <sup>3</sup>Zarubin D.S.

<sup>1</sup>V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>US Forest service, Rocky Mountain Research Station, USA

<sup>3</sup>Siberian State Technological University, Krasnoyarsk, Russia

E-mail: kukavskaya@ksc.krasn.ru

Boreal forests play a crucial role in carbon budgets with Siberian carbon fluxes and pools making a major contribution to the regional and global carbon cycle. Wildfire is the main ecological disturbance in Siberia that leads to changes in forest species composition and structure and in carbon storage, as well as direct emissions of greenhouse gases and aerosols to the atmosphere. At present, the global scientific community is highly interested in quantitative and accurate estimates of fire emissions. Little research on wildland fuel consumption and carbon emission estimates has been carried out in Russia until recently. From 2000 to 2007 we conducted a series of experimental fires of varying fireline intensity in light-coniferous forest of central Siberia to obtain quantitative and qualitative data on fire behavior and carbon emissions due to fires of known behavior. From 2009 till present burned areas in dark-coniferous and deciduous forests were examined to determine fuel consumption and carbon emissions. In addition we examined a number of burned logged areas to assess the potential impact of forest practices on fire emissions. We have combined and analyzed the scarce data available in the literature with data obtained in the course of our long-term research to determine the impact of various factors on fuel consumption and to develop models of carbon emissions for different ecosystems of Siberia. It was found that carbon emissions vary drastically (from 0.5 to 51.2 tC/ha) as a function of vegetation type, weather conditions, anthropogenic effects and fire behavior characteristics and periodicity. Our study provides a basis for better understanding of the feedbacks between wildland fire emissions and changing anthropogenic disturbance patterns and climate. The data obtained could be used by air quality agencies to calculate local emissions and by managers to develop strategies to mitigate negative smoke impacts on the environment and human health.

*This research was supported by the Grant of the President of the Russian Federation # MK-4646.2015.5, RFBR (grant # 15-04-06567), and NASA Land Cover and Land Use Change Program.*

## Оценка пирогенной эмиссии углерода в лесах Сибири: Влияние лесорастительных и метеорологических условий, лесохозяйственной деятельности и пожарных режимов

<sup>1</sup>Кукавская Е.А., <sup>2</sup>Конард С.Г., <sup>1</sup>Иванова Г.А., <sup>3</sup>Буряк Л.В., <sup>1</sup>Жила С.В., <sup>3</sup>Каленская О.П., <sup>3</sup>Зарубин Д.С.

<sup>1</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Лесная служба США, Научная станция Скалистых гор, США

<sup>3</sup>Сибирский государственный технологический университет, Красноярск, Россия

E-mail: kukavskaya@ksc.krasn.ru

Бореальные леса играют важную роль в глобальном цикле углерода в связи с большим количеством углерода, аккумулированном в них (Crutzen et al. 1979, Apps et al. 1993). В мире насчитывается примерно 1,2 млрд. га бореальных лесов, при этом около 2/3 из них находится в России (FIRESKAN 1996). Формируемые на территории Сибири запасы и потоки углерода вносят значительный вклад в глобальный баланс углерода (Ваганов и др. 2005). В настоящее время мировое научное сообщество проявляет все больший интерес к точным количественным оценкам эмиссии парниковых газов. Значимость лесов как потенциальных стоков углекислого газа атмосферы признана на международном уровне Рамочной конвенцией ООН об изменении климата (1992) и Киотским протоколом (1997, 2012).

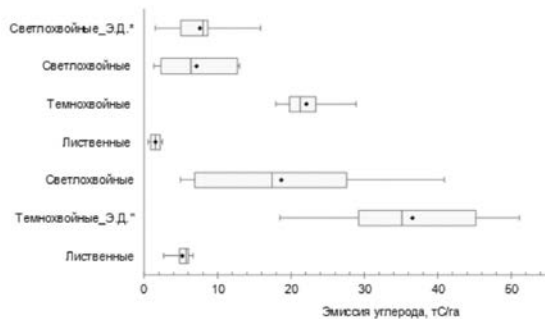
В России в рамках «Плана мероприятий по обеспечению к 2020 году сокращения объема выбросов парниковых газов...», утвержденного распоряжением Правительства 2 апреля 2014 г., предусматрива-

ется мониторинг объема выбросов парниковых газов на территории страны. Лесные пожары вносят значительный вклад в общий поток углерода в атмосферу, и в отдельные годы эмиссия при пожарах может достигать величины техногенной эмиссии углекислоты, обусловленной сжиганием ископаемого топлива, промышленными и сельскохозяйственными работами (Исаев, Коровин 1999). Пирогенная эмиссия углерода является результатом физико-химического процесса горения органического вещества, аккумулированного в напочвенном покрове и других компонентах экосистем. Величина эмиссии углерода рассчитывается на основе данных по площади, пройденной огнем, запасу горючих материалов в экосистеме и полноте их сгорания с учетом коэффициентов, которые связывают количество сгорающего вещества с интересующим компонентом эмиссии (например, CO или CO<sub>2</sub>) (Seiler, Crutzen 1980). Оценки эмиссии углерода при пожарах на территории России по данным разных источников значительно варьируют - от 5 до 500 МтС/год (Dixon, Krankina 1993; Исаев, Коровин 1999; Soja et al. 2004; Кудияров и др. 2007; Vivchar et al. 2010; Shvidenko et al. 2011 и др.). Большая вариабельность оценок связана с применением различных методик, алгоритмов и использования косвенных признаков и допущений при расчете выхода углерода при пожарах (Kukavskaya et al. 2013). В настоящее время имеется целый спектр различных баз данных по площадям, пройденным пожарами, и карт растительного покрова Земли, однако, запасы лесных горючих материалов и полнота их сгорания до сих пор являются мало изученными на территории РФ (Soja et al. 2004, Kukavskaya et al. 2013). В связи с этим, возникла насущная потребность в дополнении имеющихся сведений по количеству сгорающего органического вещества и эмиссии углерода, получении новых оценок и моделей для различных лесорастительных условий с учетом метеорологических факторов и антропогенного воздействия на лесные экосистемы Сибири.

Наиболее точные оценки сгорающего вещества, а, следовательно, и эмиссии углерода, могут быть получены при проведении экспериментов по моделированию пожаров и измерении до- и после-пожарной биомассы. В рамках международного проекта «Оценка и мониторинг воздействия гарей и интенсивности пожаров на эмиссии, баланс углерода, состояние и устойчивость лесов Средней Сибири» в период с 2000 по 2007 гг. были проведены исследования по моделированию распространения пожара в сосняках (*Pinus sylvestris*) и смешанных насаждениях с преобладанием лиственницы (*Larix sibirica*) на территории Красноярского края (McRae et al. 2006). Получены количественные и качественные данные по до- и после-пожарному состоянию экосистемы, степени воздействия пирогенного фактора на различные компоненты экосистемы и эмиссии углерода (Кукавская, Иванова 2006; Ivanova et al. 2011; Иванова и др. 2014). Однако, полученные экспериментальные данные не охватывают всего многообразия лесорастительных условий Сибири. Недостаток данных по эмиссии углерода может быть восполнен обследованием свежих гарей и пожарищ и определением количества сгорающего органического вещества по разнице запасов на площадях пройденных огнем и в ненарушенных насаждениях (deGroot et al. 2009). С 2009 г. по настоящее время мы проводим обследование нарушенных пожарами участков в широком диапазоне условий горения и типов леса. Комплексная методика проведения наземных исследований включает определение лесоводственно-таксационных характеристик насаждений, геоботаническое и лесопирологическое описания. Описание участков, таксация древостоев, отбор образцов при полевых работах и последующая обработка и анализ отобранных материалов проводятся с использованием общепринятых в практике лесоведения, лесной таксации и пирологии российских и зарубежных методик (Сукачев, Зонн 1957; Курбатский 1970; McRae et al. 2006 и др.). Для сравнительной оценки закладка пробных площадей на горевшем участке и в ненарушенном насаждении осуществляется в одинаковых лесорастительных условиях, участки располагаются в непосредственной близости друг от друга и имеют изначально одинаковые лесотаксационные характеристики. Эмиссия углерода принимается равной 50% от сгорающего запаса (Levine, Cofer 2000). Для наиболее точной оценки эмиссии углерода при пожарах подбираются участки, на которых пожар распространялся в год исследований. Кроме того, проводятся обследования территории вырубок, которые зачастую являются чрезвычайно пожароопасными в связи с присутствием на них большого запаса горючих материалов и создания условий для их высыхания. Давность рубки на изученных участках составляла от нескольких месяцев до пяти лет. На тех участках, которые были пройдены рубками главного пользования, осуществлялось восстановление основных таксационных характеристик древесного яруса по зависимостям диаметра дерева на высоте груди от диаметра пня, полученным в ненарушенных насаждениях для всех лесообразующих пород.

В ходе обследования гарей и пожарищ в светлехвойных насаждениях Средней Сибири выявлено, что эмиссия углерода варьирует от 1,3 до 13,0 тС/га (рисунок 1). Данные значения хорошо коррелируют с экспериментальными данными по выходу углерода, полученными при проведении контролируемых выжиганий в насаждениях средней и южной тайги, где эмиссия углерода составила от 1,5 до 15,9 тС/га в зависимости от интенсивности горения. Наибольшее количество углерода (до 95%) выделилось при сгорании мхов, лишайников и подстилки. Выход углерода на участках лесных земель, пройденных сплошными рубками, составил 7,5 - 40,9 тС/га, что в 1,5-5 раз превышает эмиссию углерода при пожарах в насаждениях такого же типа леса и при одинаковых погодных условиях. На вырубках на сгоревшие порубочные остатки приходится от 50 до 80% от общей эмиссии. Наибольшая разница в величине

эмиссии углерода в насаждениях и на вырубках наблюдается при большой захлавленности участков порубочными остатками и при ранневесенних пожарах, когда на территории, пройденной рубкой, горючие материалы уже достигли пожарной зрелости, а под пологом древостоя распространению огня препятствует высокое влагосодержание лесных горючих материалов.



**Рис. 1.** Эмиссия углерода в различных насаждениях и на вырубках Средней Сибири. Прямоугольник показывает нижний и верхний квартили; линии за пределами прямоугольника – минимальное и максимальное значения; линия внутри прямоугольника – медиана; точка – среднее значение.

Примечание: \* - экспериментальные данные по McRae et al. 2006, Кукавская и Иванова 2006, Ivanova et al. 2011; " - экспериментальные данные по Валендик и др. 2011.

Запасы напочвенного покрова в длительно не горевших темнохвойных насаждениях существенно превышают таковые в светлохвойных лесах. В связи с этим количество сгорающего органического вещества, а, следовательно, и эмиссия углерода в данных типах леса в 2 и более раз превышает выход углерода при пожарах в сосновых и лиственничных насаждениях зеленомошной группы типов леса средней и южной тайги Средней Сибири. На обследованных нами участках в смешанных насаждениях с преобладанием кедра и участием в составе древостоя ели, пихты и лиственницы выход углерода при пожарах достигал 28,9 тС/га (рисунок 1). Согласно литературным данным (Валендик и др. 2011) при пожарах на вырубках в темнохвойных насаждениях эмиссия углерода варьирует от 22,0 до 51,2 тС/га.

Эмиссия углерода при пожарах в березовых и березово-осиновых разнотравных насаждениях составила 0,5-2,5 тС/га. Меньшая эмиссия углерода в лиственных насаждениях по сравнению с выходом углерода в светлохвойных и темнохвойных лесах обусловлена не большим запасом горючих материалов в данных типах леса, а также преобладанием беглых весенних пожаров, при которых сгорает небольшое количество горючих материалов. При пожарах на вырубках выход углерода в лиственных насаждениях увеличился до 6,7 тС/га, что в 3-5 раз больше, чем эмиссия углерода в насаждениях. При этом доля порубочных остатков в общем объеме выделившегося углерода возросла с 3 до 20%. Однако, в целом рубки в лиственных насаждениях, проводимые, как правило, для удовлетворения потребностей местного населения, не существенно увеличивают запасы горючих материалов, а возникающие на таких участках весенние беглые пожары не оказывают значительного влияния на параметры баланса углерода.

В одном и том же типе леса величина эмиссии углерода может существенно варьировать в зависимости от доступного для горения органического вещества, определяющегося запасами горючих материалов и метеорологическими условиями на момент возникновения пожара. Установлена хорошая корреляция ( $r = 0,72$ ) эмиссии углерода при пожарах в насаждениях от показателя ПВ-1. Вариабельность эмиссии углерода при пожарах на вырубках обусловлена как метеорологическими условиями, так и различиями в способах рубок и очистки лесосек. Величина выхода углерода при пожарах на вырубках в значительной степени определялась запасом горючих материалов ( $r = 0,68$ ). В летний период обильное разрастание травяного покрова на вырубках с давностью рубки 3 и более лет способствует снижению интенсивности горения, вследствие этого эмиссия углерода здесь в 1,2-1,4 раза меньше, чем на свежих вырубках.

Увеличение частоты и повторяемости засух, а также антропогенной нагрузки в ряде южных регионов Сибири приводят к сокращению межпожарных интервалов. В сложившихся условиях не успевает накопиться большой слой горючего материала, и пожар распространяется по опавшему, представленному отмершей прошлогодней травой, хвоей/листвой, мелкими ветками. Такая ситуация наблюдается в Забайкальском крае, где периодичность пожаров на одной территории может составлять 2-3 года, а в ряде случаев даже 1 год (Буряк, Каленская 2014; Kukavskaya et al. 2014). На таких участках лесных земель эмиссия углерода, как правило, не превышает 2 тС/га.

Таким образом, эмиссия углерода может существенно варьировать в зависимости от лесорастительных и метеорологических условий, лесохозяйственной деятельности человека и пожарных режимов. В настоящее время возникла насущная потребность точных и объективных оценок эмиссии углерода при пожарах в Сибири в связи с их существенным вкладом в региональный и глобальный баланс углерода и воздействием на химию атмосферы. Установление взаимосвязей выхода углерода при пожарах на разных категориях участков лесных земель с рядом показателей (таких как метеорологические условия, степень нарушенности территории и характеристики поведения пожаров) необходимо для моделирования глобальных процессов, в том числе связанных с изменением климата. Проводимые нами исследования необходимы для усовершенствования методики расчета эмиссий на территории РФ и проектирования стратегий пожароуправления. Полученные результаты лягут в основу создаваемой базы данных по эмиссии углерода при пожарах в Сибири.

**Литература:**

1. Apps M.J., Kurz W.A., Luxmoore R.J., Nilsson L.O., Sedjo R.A., Schmidt R., Simpson L.G., Vinson T.S. 1993. The changing role of circumpolar boreal forests and tundra in the global carbon cycle // *Water Air and Soil Pollution*, 70 (1-4), 39-53.
2. Crutzen P.J., Heidt L.E., Krasnec J.P., Pollock W.H., Seiler W. 1979. Biomass burning as a source of atmospheric gases CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, CH<sub>3</sub>Cl and COS // *Nature*, 282, 253-356.
3. de Groot W.J., Pritchard J.M., Lynham T.J. 2009. Forest floor fuel consumption and carbon emissions in Canadian boreal forest fires // *Can. J. For. Res.*, 39(2), 367–382. doi:10.1139/X08-192.
4. Dixon R.K., Krankina O.N. 1993. Forest fires in Russia: carbon dioxide emissions to the atmosphere // *Can. J. For. Res.*, 23, 700 – 705.
5. FIRESCAN, Fire in ecosystems of boreal Eurasia: The Bor forest island fire experiment Fire Research Campaign Asia-North (FIRESCAN), 1996. In "Biomass Burning and Global Change", edited by J.S. Levine, pp. 848-873, MIT Press, Cambridge, Mass.
6. Ivanova G.A., Conard S.G., Kukavskaya E.A., McRae D.J. 2011. Fire impact on carbon storage in light conifer forests of the Lower Angara region, Siberia // *Environmental Research Letters*, 6, 045203. doi:10.1088/1748-9326/6/4/045203.
7. Kukavskaya E.A., Buryak L.V., Conard S.G., Ivanova G.A., Kalenskaya O.P. 2014. Effects of repeated fires in the forest ecosystems of Siberia // *MAIRS Open Science Conference. Future Earth in Asia, April 7-10, 2014 Beijing, China. Abstracts. P.172.*
8. Kukavskaya E.A., Soja A.J., Petkov A.P., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Conard S.G. 2013. Fire emissions estimates in Siberia: Evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption // *Canadian Journal of Forest Research*, 43(5), 493-506. doi: 10.1139/cjfr-2012-0367.
9. Levine J.S., Cofer W.R. 2000. Boreal forest fire emissions and the chemistry of the atmosphere // *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in North American Boreal Forests, Ecol. Stud. Ser.*, edited by E.S. Kasischke, and B.J. Stocks, Springer, New York. III, 31–48.
10. McRae D.J., Conard S.G., Ivanova G.A., Sukhinin A.I., Baker S., Samsonov Y.N., Blake T., Ivanov V.A., Ivanov A.V., Churkina T., Hao W., Koutzenogij K., Kovaleva N.M. 2006. Variability of fire behavior, fire effects, and emissions in Scotch Pine forests of central Siberia // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(1), 45–74.
11. Seiler W., Crutzen P.J. 1980. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere // *Climatic Change*, 2 (3), 207-247. doi:10.1007/BF00137988.
12. Shvidenko A., Schepaschenko D., Sukhinin A., McCallum I., Maksyutov S. 2011. Carbon Emissions from Forest Fires in Boreal Eurasia between 1998-2010 // *The 5th International Wildland Fire Conference. Sun City, South Africa.*
13. Soja A.J., Cofer W.R., Shugart H.H., Sukhinin A.I., Stackhouse P.W., McRae D.J., Conard S.G. 2004. Estimating fire emissions and disparities in boreal Siberia (1998 through 2002) // *Journal of Geophysical Research*, 109 (D14), D14S06. doi:10.1029/2004JD004570.
14. Vivchar A.V., Moiseenko K.B., Pankratova N.V. 2010. Estimates of carbon monoxide emissions from wildfires in northern Eurasia for air quality assessment and climate modeling // *Izvestiya atmospheric and oceanic*, 46(3), 281-293.
15. Буряк Л.В., Каленская О.П. 2014. Воздействие пожаров на лесные экосистемы Восточного Забайкалья // *Лесные биогеоценозы бореальной зоны: география, структура, функции, динамика. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 70-летию создания Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. Красноярск, 16-19 сентября 2014 г. Новосибирск: Издательство СО РАН, 191-194.*
16. Ваганов Е. А., Ведрова Э. Ф., Верховец С. В., Ефремов С. П., Ефремова Т. Т., Круглов В. Б., Онучин А. А., Сухинин А. И., Шибистова О. Б. 2005. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // *Сибирский экологический журнал*, 12(4), 631-649.
17. Валендик Э.Н., Верховец С.В., Кисляхов Е.К., Иванова Г.А., Брюханов А.В., Косов И.В., Голдаммер И.Г. 2011. Технологии контролируемых выжиганий в лесах Сибири отв. ред. Е. С. Петренко ; Сиб. федер. ун-т, Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т леса им. В.Н. Сукачева. Красноярск : Сиб. федер. ун-т., 159 с.
18. Иванова Г.А., Конард С. Г., Макрае Д.Д., Безкорвайная И.Н., Богородская А.В., Жила С.В., Иванов В.А., Иванов А.В., Ковалева Н.М., Краснощекова Е.Н., Кукавская Е.А., Орешков Д.Н., Перевозникова В.Д., Самсонов Ю.Н., Сорокин Н.Д., Тарасов П.А., Цветков П.А., Шишикин А.С. 2014. Воздействие пожаров на компоненты экосистемы среднетаежных сосняков Сибири. Наука, Новосибирск. Сибирское отделение Российской академии наук Институт леса им. В.Н. Сукачева, 232 с.

19. Исаев А.С., Коровин Г.Н. 1999. Углерод в лесах Северной Евразии // *Круговорот углерода на территории России*, 63 – 95.
20. Киотский протокол к Рамочной конвенции ООН об изменении климата 1997. Женева: ООН. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kprus.pdf>.
21. Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова А.А., Лопес де Гереню В.О., Уткин А.И., Чертов О.Г. 2007. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России (отв. ред. Г.А.Заварзин); *Ин-т физ.-хим. и биол. проблем почвоведения РАН. М.: Наука*, 315 с.
22. Кукавская Е. А., Иванова Г. А. 2006. Воздействие лесных пожаров на биомассу сосновых насаждений Средней Сибири // *Вестник КрасГАУ*, вып. 12, 156–162.
23. Курбатский Н.П. 1970. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // *Вопросы лесной пирологии, Красноярск*. 5–58.
24. План мероприятий по обеспечению к 2020 году сокращения объема выбросов парниковых газов до уровня не более 75 процентов объема указанных выбросов в 1990 году. Утверждено распоряжением правительства Российской Федерации от 2 апреля 2014 г. № 504-р
25. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата. Женева: ООН, 1992. – <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convru.pdf>
26. Сукачев В.Н., Зонн С.В., Мотовилов Г.П. 1957. *Методические указания к изучению типов леса*. М.: Наука, 60 с.

## Evaluation of the vegetation structure and productivity of wetland ecosystems using satellite data

<sup>1</sup>Alekseeva M.N., <sup>2</sup>Dyukarev E.A., <sup>2</sup>Golovatskaya E.A.

<sup>1</sup> Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: [egor@imces.ru](mailto:egor@imces.ru), [golovatskaya@imces.ru](mailto:golovatskaya@imces.ru)

The use of satellite images for a comprehensive study of natural objects, including the assessment of the current resource potential of wetlands and speed of peat accumulation is relevant in the study of remote areas of wetlands in Western Siberia. Structure of bog complexes is well reflected in the satellite images due to its indicator properties the texture and color contours of bog microlandscapes. Satellite images allow to evaluate the current state of wetland ecosystems and their violations in connection with the anthropogenic impact.

The land cover structure were mapped using satellite images Landsat key area located at the South Taiga zone of Wets Siberia. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) maps obtained by the MODIS satellite were used for reconstruction of wetland vegetation productivity.

## Оценка структуры и продуктивности растительного покрова болотных экосистем по спутниковым данным

<sup>1</sup>Алексеева М.Н., <sup>2</sup>Дюкарев Е.А., <sup>2</sup>Головацкая Е.А.

<sup>1</sup> Институт химии нефти СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

E-mail: [egor@imces.ru](mailto:egor@imces.ru), [golovatskaya@imces.ru](mailto:golovatskaya@imces.ru)

Использование космических снимков для комплексного исследования природных объектов, в том числе для оценки современного ресурсного потенциала болот и скорости возобновления торфяных ресурсов, актуально в условиях труднодоступных и заболоченных территорий Западной Сибири. Изучение биологической продуктивности растительных сообществ является одной из важных задач в исследовании круговорота углерода в болотных экосистемах, так как именно биологическая продуктивность отражает количество углерода, накопленное в виде органического вещества растений и не затраченное на процессы дыхания и разложения.



Следует отметить, что данных по биологической продуктивности болот сравнительно немного. В связи с чем представляется актуальным применение дистанционных методов, в частности данных космической съемки для оценки биологической продуктивности олиготрофных болот, как составляющей их углеродного баланса.

В настоящей работе с использованием космических снимков Landsat составлены карты наземного покрова южнотаежного ключевого участка (КУ) «Икса-Бакчар». По картам NDVI полученным по данным спутника MODIS выполнено сравнение данных наземных исследований продуктивности растительности КУ.

Формирование обучаемых эталонов и автоматическая классификация космических снимков Landsat проведены с использованием инструментальных средств системы ERDAS Imagine. Обучающие выборки были сформированы для 26 типов наземного покрова [1]. Используемая классификация наземного покрова разработана специально для исследуемой территории. Классификация, безусловно, не охватывает всего разнообразия типов болотных систем Сибири и не является единственно возможной, но она оказалась удобной для картографического сопровождения исследования болот на территории КУ, включая пространственную оценку чистой первичной продукции, углеродного баланса болот и микроклиматических исследований.

Результаты автоматической классификации с обучением подвергались коррекции средствами ERDAS Imagine. Проведена генерализация полученных классов путем фильтрации результатов с выбором преобладающего класса в скользящем окне 3x3 пикселя. Формирование отдельных растровых и векторных слоев каждого класса растительного покрова проводилось с использованием средств ArcGIS.

Площади, занимаемые различными классами, и их доля от площади КУ и основного класса приведены в таблице 1. Около половины территории КУ занимают леса (51,6%), часть из которых, переувлажнена. Водораздельные болота представлены крупными болотными массивами открытого (15%) и залесенного (14,9%) типов. Болота вдоль речных долин составляют всего 7,4 % от площади КУ. 8,4% занимают земли сельскохозяйственного назначения.

**Таблица 1.** Классы наземного покрова КУ «Икса-Бакчар» и их площади (S) и средние NDVI за июль 2000-2005 гг.

№	Класс	Площадь, га	Доля от S КУ, %	Доля от S основного класса, %	NDVI
<b>Леса</b>		<b>755443</b>	<b>51,6</b>		
1	Темнохвойный лес	354404	24,2	46,9	0,79
2	Лиственный лес	295378	20,2	39,1	0,82
3	Смешанный лес	105661	7,2	14,0	0,83
<b>Болота водораздельные</b>		<b>437967</b>	<b>29,9</b>		
Залесенные		218332	14,9		
4	Рослый рям	80776	5,5	37,0	0,77
5	Средний рям дренированный	7008	0,5	3,2	0,83
6	Низкий рям дренированный	11638	0,8	5,3	0,71
7	Низкий рям	65812	4,5	30,1	0,75
8	Мелкомочажинно-рямовый комплекс	47033	3,2	21,5	0,75
9	Среднемочажинно-рямовый комплекс	6065	0,4	2,8	0,74
Открытые		219635	15,0		
10	Грядово-мелкомочажинный комплекс	5578	0,4	2,5	0,7
11	Грядово-среднемочажинный комплекс	57248	3,9	26,1	0,71
12	Грядово-крупномочажинный комплекс	28034	1,9	12,8	0,69
13	Шейхцериево-сфагновая топь	37733	2,6	17,2	0,74
14	Осоково-сфагновая топь	46348	3,2	21,1	0,75
15	Сфагновые сплавины	39957	2,7	18,2	0,76
16	Водные объекты	4738	0,3	2,2	
<b>Болота террасовые</b>		<b>108983</b>	<b>7,4</b>		
17	Заболоченный сосновый лес	15259	1,0	14,0	0,8
18	Согра	8354	0,6	7,7	0,8
19	Сосново-разнотравно-моховое	15503	1,1	14,2	0,76
20	Березово-разнотравно-гипновое	54133	3,7	49,7	0,8

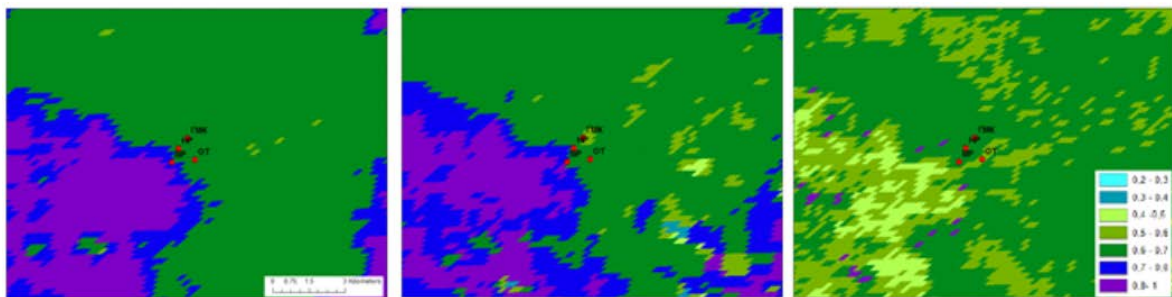
№	Класс	Площадь, га	Доля от S КУ, %	Доля от S основного класса, %	NDVI
21	Ерниково-осоково-гипновое	15735	1,1	14,4	0,77
<b>Прочие земли</b>		<b>162443</b>	<b>11,1</b>		
22	Поля, луга, пашни	122855	8,4	75,6	0,78
23	Пойма	3956	0,3	2,4	0,79
24	Населенные пункты	5450	0,4	3,4	0,76
25	Мелиорированное болото залесенное	21667	1,5	13,3	0,8
26	Мелиорированное болото открытое	8519	0,6	5,2	0,73
<b>Всего</b>		<b>1464840</b>			

Для исследования динамики продуктивности выделенных на KC Landat классов растительности нами использовался продукт MOD13Q1, который представляет карты NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Данный продукт доступен в сети интернет и рассчитан по данным космической съемки с космического аппарата MODIS за 16-дневный период, и имеет пространственное разрешение 250 м (рис.1).

Расчет вегетационного индекса NDVI основан на особенностях поглощения солнечной радиации в красной области электромагнитного спектра хлорофиллом и отражения ее в инфракрасной области спектра клеточными структурами листа. NDVI рассчитывается по формуле [2]:

$$NDVI = \frac{P_{NIR} - P_{RED}}{P_{NIR} + P_{RED}},$$

где  $P_{NIR}$  - значения яркости пикселя в ближнем инфракрасном диапазоне,  $P_{RED}$  - в красном диапазоне.



**Рис. 1.** Карты NDVI а) 10.06.2011, б) 28.07.2011 и в) 14.09.2011. Точками показаны площадки наземных исследований: ВР- высокий рям, НР-низкий рям, ОТ- осоковая топь, ГМК - грядово-мочажинный комплекс.

Для точек наземных исследований в ArcGIS определялись значения NDVI за период с мая по сентябрь в 2000-2011 гг. Так же для классов наземного покрова рассчитывались средние значения NDVI для каждого месяца теплого периода. Корреляционный анализ рядов вегетационных индексов и средних за лето значений запасов фитомассы низкого рьяма и открытой топи показал, что наблюдается положительная связь с NDVI. При этом наличие связи обусловлено вариациями фитомассы сфагновых мхов, кустарничков в рассматриваемых фитоценозах.

Вегетационные индексы для классов растительного покрова выбраны из карт NDVI с использованием средств ArcGIS и характеризуют осредненные за 2000-2005 гг. максимальные за вегетационные периоды фитомассы каждого класса растительности (см. Табл.1).

Анализ осредненных за июль месяц 2000-2005 гг. значений NDVI показывает, что наиболее низкая фитомасса характерна для низкого рьяма (класс 6), грядово-мочажинных комплексов (10-12), и открытого мелиорированного болота (26). Максимальные значения NDVI характерны для лиственных, смешанных лесов.

В период вегетации наименьшие значения NDVI в высоких и низких рьямах (0,61-0,69) отмечены в начале и конце вегетационного периода (май, сентябрь). Наибольшие значения NDVI высоких и низких рьямов (0,69-0,80) наблюдаются в середине вегетационного периода. Для осоково-сфагновой топи значения NDVI, в целом ниже, в весенний и осенний период они составляют от 0,49 до 0,63, в середине вегетационного периода - от 0,64 до 0,77.

Сравнение продукции болотных фитоценозов с вегетационными индексами показало следующее: практически для всех фитоценозов, за исключением высокого рьяма, выявлена связь между чистой первичной / наземной продукцией и NDVI, причем для открытой топи наличие связи обусловлено продукцией трав и сфагновых мхов, а для низкого рьяма кустарничками.

Запасы фитомассы определяются как характером растительности, так и погодными условиями. В среднем запасы надземной фитомассы незначительно отличаются на исследуемых олиготрофных фитоценозах: максимальными запасами надземной фитомассы кустарничково-травяно-сфагнового яруса характеризуется высокий рям ( $637 \pm 140$  г/м<sup>2</sup>), затем следуют низкий рям ( $607 \pm 147$  г/м<sup>2</sup>) и открытая топь ( $444 \pm 96$  г/м<sup>2</sup>). Известно, что в высоком и низком рямах максимальный вклад в фотосинтезирующую фитомассу вносят зеленые части мхов (от 77,3 до 81,6 %), а также достаточно велико и содержание листьев кустарничков (в среднем 19,5%). На открытой топи большой процент в запасе фитомассы имеют зеленые части трав (до 17%). Чистая первичная продукция исследуемых фитоценозов изменяется от  $532 \pm 93$  г/м<sup>2</sup> на открытой топи до  $647 \pm 137$  г/м<sup>2</sup> на высоком ряме. Основной вклад в продукцию на исследуемых фитоценозах вносят корни трав и кустарничков (44–60%) и сфагновые мхи (20–35%). На высоком и низком ряме также велика доля кустарничков (26–33%), а для открытой топи более значимый вклад имеет травянистая растительность (15%). Значения EVI для разных фитоценозов мало отличаются и изменяются в течение периода исследования от 0,24 до 0,50. Максимальные значения характерны для середины вегетационного периода.

Значения NDVI можно использовать для расчета запасов фитомассы и продукции для рямов и открытых топей. Наиболее достоверная связь между вегетационными индексами и запасами фитомассы и продукцией болотных фитоценозов получена для открытой топи. Так как для низкого, и особенно высокого ряма, значения этих индексов в основном характеризуют запасы фитомассы и продукцию древесного яруса, который экранирует травяно-кустарничково-сфагновый покров – значения запасов фитомассы и продукция которого измеряются при наземных исследованиях. Для низкого ряма, однако, получены достаточно высокие коэффициенты корреляции, по-видимому, разреженный (сомкнутость крон 0,3) древесный ярус позволяет оценить NDVI не древесного яруса, как на высоком ряме (где сомкнутость крон 0,9), а кустарничкового яруса.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (Грант №13-05-98048-р\_суб\_а).*

#### Литература:

1. Алексеева М.Н., Преис Ю.И., Дюкарев Е.А. Пространственная структура наземного растительного покрова и типа верхнего слоя торфа северо-восточных отрогов большого васюганского болота по дистанционным и наземным данным // Известия ТПУ. 2015. Т.326. №4. С. 81-90.
2. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28-32.

## High-precision laser-based instrumentation system as a tool for assessing impact of various factors on Scots pine fire-resistance in Central Siberia

Bryukhanov A.V., Panov A.V., Sidenko N.V.

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

E-mail: [institute\\_forest@ksc.krasn.ru](mailto:institute_forest@ksc.krasn.ru)

Web: <http://forest.akadem.ru>

A laser-based field instrumentation system together with the other measurements (assessment of biomass stores, forest conditions, undergrowth, vegetation and soil descriptions etc.) provides us a comprehensive picture of spatial development of wildfires within the plots. This system permits estimating the relationships between the spatial parameters and intensity of burning and thus giving us an extent of fire damage of trees with the other related characteristics within the plot (i.e. location of undergrowth, slash, etc.). Moreover it permits assessing the impact of landscape characteristics and natural barriers on the spread of fire edge.

Our observations have shown that surface location of root system leads to a strong decrease of Scotch pine fire-resistance. Field experiments have demonstrated that root collar of a tree is the most critical part for pyrogenic damage. Within the fast moving surface forest fires the portion of dead trees with surface location of root system was estimated around 42% and up to 91% of mortality achieved after a steady surface forest fire. The next factor that had influence on tree mortality is other individual morphometric factors: big-butt, slope, and curvature of a tree stem. Our observation have shown that the visible post-fire stem damages were deadly significant for *Pinus sylvestris* mature trees if fire scars achieved more than 2/3 of circumference (for damage of cambium layer). After such extent damages mortality of Scots pine trees could achieve up to 89%. Even if a tree survives after fire it will probably be destroyed by next fire due to increased pitch flow, which decreases fire-resistance of the tree. These results confirm that for mature pine stands surface forest fires are practically as dangerous as crown fires.

*The work was supported financially by project of RFBR # 15-45-04423, and grant of president of RF for young scientists MK-1691.2014.5.*

## Использование наземной лазерной съемки для оценки влияния различных факторов на огнестойкость сосны обыкновенной в Центральной Сибири

**Брюханов А.В., Панов А.В., Сиденко Н.В.**

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

E-mail: [institute\\_forest@ksc.krasn.ru](mailto:institute_forest@ksc.krasn.ru)

Web: <http://forest.akadem.ru>

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время употребляется несколько терминов, которые характеризуют способность растений реагировать на воздействие пожаров. Понятия огнестойкость и пожароустойчивость используются преимущественно для древесных пород. Первый термин обозначает способность отдельного дерева сопротивляться высоким температурам и задымлению, второй характеризует устойчивость древесных пород на уровне насаждений (Санников, 1973; Шешуков, Пешков, 1984; Цветков, 2006 и др.).

Изучению пожароустойчивости и огнестойкости различных видов хвойных пород в бореальных лесах РФ посвящено больше количество работ отечественных исследователей. Для условий Сибири подобные исследования выполнялись многими авторами: Софронов, 1967; Евдокименко, 1989; Фуряев, 1996; Буряк, 1999; Буряк и др., 2003; Фуряев, Заблоцкий, Черных, 2005; Цветков, 2006, 2007, 2011; Валлендик, Сухинин, Косов, 2006 и др.

Такое разовое событие как пожар, которое в зависимости от его вида и интенсивности горения может либо принести пользу (при слабой интенсивности горения) взрослому древостою, либо ущерб или даже вызвать гибель деревьев. Например, высокоинтенсивный пожар приводит к значительным изменениям гидрологического режима, свойств верхнего горизонта почвы и даже изменение микроландшафта, что неминуемо скажется на состоянии деревьев. Горение на участке со слабой интенсивностью позволяет снизить запасы горючих материалов и избежать в дальнейшем высокоинтенсивного пожара, обогатить почву зольными веществами, ускорить процесс разложения мертвого органического вещества (опад, лесная подстилка, валеж, порубочные остатки).

### РАЙОН И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Наблюдения за влиянием различных факторов на огнестойкость сосны обыкновенной с использованием высокоточной наземной лазерной съемки для оценки проводились на территории Центральной Сибири в Красноярском крае (Сымско-Дубческая возвышенность в Туруханском лесничестве).

Сбор данных осуществлялся на постоянных пробных площадях, заложенных преимущественно в хвойных древостоях. На каждой пробе располагалось не менее 100 деревьев. Было заложено 5 пробных площадей в основном в сосновых типах лесах. Лиственные и темнохвойные насаждения представляли меньший интерес, так как даже низкоинтенсивные низовые пожары на их территории ведут практически к полной гибели древостоя. В данной работе мы рассматриваем, результаты исследований на пробных площадях, расположенных в насаждениях с доминированием сосны обыкновенной.

Подбор, закладка и описание пробных площадей проводились согласно методическим указаниям (Сукачев, Зонн, 1961; Мелехов, 1975). Для определения количественных и качественных характеристик насаждений и оценки крупномерных древесных остатков, на нескольких пробных площадях использовалась стандартная методика сплошного перечета с помощью наземной высокоточной лазерной съемки, применяемая при государственной инвентаризации лесного фонда (ГИЛ) предприятиями ФГУП «Рослесинфорг» (согласно Приказу Рослесхоза №472 от 10.11.2011 «Об утверждении методических рекомендаций по проведению государственной инвентаризации лесов»). Данные исследования включали в себя оценку жизненного состояния древесных растений выше 1,3 м. по 10-ти балльной шкале, наличия имеющихся видимых послепожарных повреждений, а также указание индивидуальных особенностей каждого дерева. В дальнейшем для удобства работы 10-ти балльная шкала, применяемая при ГИЛ, была адаптирована к более распространенной лесоводственной методике (Алексеев, 1989; Руководство по проведению санитарно-оздоровительных мероприятий, 2007).

Для оценки запасов остальных растительных горючих материалов (опад, лесная подстилка, живой напочвенный покров и т.д.) использовалась методика, разработанная Н.П. Курбатским (Курбатский,

1970; Баранов, Евдокименко, Курбатский, 1974). Данная методика предполагает закладку небольших учетных площадок (50x50 и 20x25 см) на запас лесных горючих материалов (ЛГМ), где количество площадок четко регулируется в зависимости от размеров общей площади исследуемого участка.

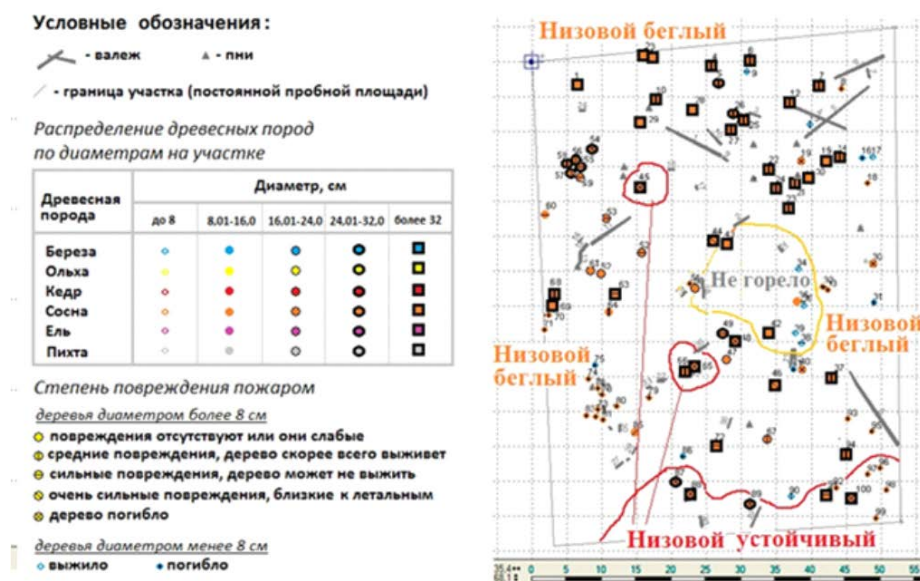
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЯ

Анализируя полученные результаты, мы выявили, что наиболее чувствительным факторами, влияющими на послепожарную гибель деревьев сосны обыкновенной являлось поверхностное расположение корневой системы, наличие значительных механических повреждений и диаметр ствола.

Влияние величины диаметра ствола на способность деревьев пережить пожар рассматривалось во многих работах как отечественных так и зарубежных исследователей. Наши наблюдения подтвердили, что, несмотря на то, что диаметр ствола очень важен, тем не менее, его всегда нужно рассматривать только при прочих равных условиях. Индивидуальные особенности каждого дерева (ослабленность различными факторами, характеристики ствола, повреждения и т.д.), физическое месторасположения к горючим материалам, которые могут либо увеличить интенсивность горения, либо ее снизить, обычно приводят к тому, что взрослые древесные растения, располагающиеся рядом друг с другом, валежом или хвойным подростом могут погибнуть даже при диаметре более 32 см. В тоже время сосны со значительно меньшими диаметрами (16-24 см) в состоянии успешно пережить пожар, если они располагались на открытом месте, где сила горения падала с сильного (характерна для низового устойчивого пожара) до среднего и слабого (характерна для низового беглого пожара) (Рис. 1).

В ходе сопряженного анализа пространственной структуры основного полога древостоя на данных площадях, выявлено, что индивидуальные особенности дерева и его месторасположения (характер повреждений, наличие вокруг дерева основных проводников горения) играют не менее важную роль в его способности пережить высокоинтенсивный низовой пожар ( $R = 0,81$ ), чем порода ( $R = 0,74$ ) и диаметр в нижней части ствола ( $R = 0,86$ ) (Брюханов, Панов, Калякин и др., 2014).

При обработке результатов натурных исследований нами были получены пространственные комплексные характеристики пробных площадей после устойчивых низовых пожаров в основных типах леса, как в виде визуального плана, так и в виде числовых данных. Объединение планов с другими данными позволили подготовить подробные карты пространственной структуры основного полога древостоя с учетом всех показателей (таксационные, жизненное состояние, повреждения), подроста и подлеска, и расположения сухостоя и крупномерных древесных остатков (Рис. 1).



**Рис. 1.** Пример моделирования распространения пожара на основе пространственного картирования пробной площади с помощью наземной лазерной съемки и по комплексной оценке послепожарных факторов.

По нашим наблюдениям поверхностное расположение корневой системы (корневые лапы, выступающие над поверхностью земли) ведет к сильному снижению огнестойкости не только сосны, но и всех других деревьев произрастающих в условиях Сибири. Данные, полученные нами с пробных площадей, показывают, что шейка корня деревьев является самой критичной частью ствола и видимой части корневой системы дерева к пирогенным повреждениям. При беглых низовых пожарах доля погибших деревьев с крупными горизонтальными скелетными корнями, не прикрытых почвой, составляла на пробах в среднем 42% при беглых низовых пожарах и 91% при более сильных низовых устойчивых. Далее по степени влияния на ослабление и отпад шли другие индивидуальные особенности строения нижней части ствола деревьев: закомелистость, наклон и искривление. Наиболее опасна для деревьев в пожарном отношении ребристая закомелистость характерная наличием “роек” (углубления в стволе),

придающие комлю в сечении звездообразную форму. Именно в углублениях в стволах зачастую скапливается большое количество проводников горения, повышающий интенсивность горения, когда пламя подходит к дереву.

Видимые механические повреждения ствола (после пожара) оказывали на выживаемость деревьев, как правило, минимальное значение. Наибольший отпад (в среднем до 89% для устойчивых низовых пожаров) характеризовался для сосен, имеющих значительные механические повреждения ствола (крупные старые пожарные подсушины, карры от подсочки), занимающие более 2/3 окружности ствола.

Проведенные исследования показали, что наиболее опасны с пожарной точки зрения для древесных растений повреждения нижней части ствола (при одинаковых размерных характеристиках). Повреждение более 2/3 окружности камбиального слоя, что как правило, приводит к летальным последствиям для растения уже в первый год. Особенно опасны они для хвойных пород, так как в полученной ране скапливается значительное количество смолы являющейся легкогорючим веществом, значительно повышающим интенсивность горения на поверхности ствола. Такие повреждения обычно связаны с механическим воздействием из-за погодных условий (удары молний, ветровал, резкие перепады температур), а также при ударах от падения других деревьев. При подобных факторах воздействия обычно образуются глубокие трещины, длина которых, иногда измеряется метрами. Поверхностное повреждение ствола несет угрозу в значительно меньшей степени для жизни дерева по сравнению с воздействием на корни и крону и степень ослабления деревьев после пожара зависит, от площади повреждения.

## ВЫВОДЫ

На основе проведенных наблюдений можно констатировать, что наибольшее влияние на огнестойкость сосны обыкновенной, оказывает диаметр ствола дерева и характеристики залегания верхних горизонтальных корней. В меньшей степени выявлено влияние особенностей строения корневой шейки и имеющихся механических повреждений ствола. Наименьшее влияние на снижение огнестойкости деревьев сосны обыкновенной оказывали искривление или наклон ствола. Первичный анализ пространственного расположения сосны показал, что данный аспект по своей важности не менее важен, чем диаметр или глубина залегания корневой системы. Расположение среди скопления валежа или куртин хвойного подроста, может значительно снизить шансы на выживаемость взрослых деревьев *Pinus sylvestris* даже в условиях низового пожара. В связи с этим для взрослых деревьев гораздо более критичным является приуроченность к стволу куртин подроста и подлеска или близкое расположение других взрослых деревьев, а также скопления валежа, большого запаса опада и лесной подстилки.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-45-04423, и Гранта Президента Российской Федерации для Государственной поддержки молодых российских ученых МК-1691.2014.5.*

### Литература:

1. Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // *Лесоведение*. – 1989. – № 4. – С.51-57.
2. Баранов Н.М., Евдокименко М.Д., Курбатский Н.П. О методике определения запасов лесных горючих материалов. // *Вопросы лесной пирологии*. – Красноярск: ИЛЦ СО АН СССР, 1974. – С. 149-166.
3. Брюханов А.В., Панов А.В., Калякин С.В., Сиденко Н.В., Гузий В.М. Применение методов наземной высокоточной лазерной съемки для оценки послепожарных последствий на свежих гарях и горельниках в Центральной Сибири. *Материалы международной конференции ENVIROMIS-2014, 28 июня-05 июля 2014 года, Томск, Россия – Томск: SCERT, 2014. – С. 197-200.*
4. Буряк Л.В. Роль низовых пожаров в формировании светлохвойных насаждений юга Средней Сибири. Диссертация на соискании ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук по специальности ВАК 06.03.03. “Лесоведение и лесоводство; лесные пожары и борьба с ними”. – Красноярск, 1999, – 309 с.
5. Буряк Л.В., Лузганов А.Г., Матвеев П.М., Каленская О.П. Влияние низовых пожаров на формирование светлохвойных насаждений юга Средней Сибири. – Красноярск: СибГТУ, 2003. – 196 с.
6. Валендик Э.Н., Сухинин А.И., Косов И.В. Влияние низовых пожаров на устойчивость хвойных пород. – Красноярск: Изд. СО РАН, 2006, – 96 с.
7. Евдокименко М.Д. Роль пирогенного фактора в продуктивности древостоев. // *Факторы продуктивности леса*, – Новосибирск, 1989, – С. 53-90.
8. Курбатский Н.П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов. // *Вопросы лесной пирологии*. – Красноярск: ИЛЦ СО АН СССР, 1970. С. 5-58.
9. Мелехов И.С. Влияние пожаров на лес. – М. – Л.: Гослестехиздат, 1948. – 126 с.
10. Мелехов И.С. Биология, экология и география возобновления леса. // *Возобновление леса*. – М.: Колос, 1975. – С. 4-21.

11. Приказ Рослесхоза от 10 ноября 2011 года №472 «Об утверждении Методических рекомендаций по проведению государственной инвентаризации лесов» (с изменениями от 05.04.2012) <http://www.rosleshoz.gov.ru/docs/leshoz/199>
12. Приказ Рослесхоза от 29.12.2007 №523 "Об утверждении методических документов" (вместе с "Руководством по проектированию, организации и ведению лесопатологического мониторинга", "Руководством по проведению санитарно-оздоровительных мероприятий", "Руководством по локализации, организации и ведению лесопатологических обследований", "Руководством по локализации и ликвидации очагов вредных организмов") [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_129394/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129394/)
13. Санников С.Н. Лесные пожары как эволюционно-экологический фактор возобновления популяций сосны в Зауралье // Горение и пожары в лесу: Матер. Первого всесоюз. науч.-техн. совещ. – Красноярск: ИЛД СО АН СССР, 1973. – С. 236-277.
14. Софронов М.А. Лесные пожары в горах Южной Сибири. 1967, – М.: Наука. – 152 с.
15. Сукачев В. Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 143 с.
16. Фуряев В.В. Роль пожаров в процессе лесообразования. – Новосибирск: Изд-во "Наука", 1996, – 225 с.
17. Фуряев В.В., Заблоцкий В.И., Черных В.А. Пожароустойчивость сосновых лесов. – Новосибирск: Наука, 2005. – 160 с.
18. Цветков П.А. Устойчивость лиственницы Гмелина к пожарам в северной тайге Средней Сибири. – Красноярск: СибГТУ, ИЛ СО РАН, 2007, – 252 с.
19. Цветков П.А. Нагар как диагностический признак. // Хвойные бореальной зоны. – 2006, – №1, – С. 132-137
20. Цветков П.А. Пирогенные свойства древесных пород. // Лесоведение, – 2011, – № 2, – С. 25-31.
21. Шешуков М.А., Пешков В.В. О соотношении понятий «огнестойкость», «пожароустойчивость» и «пиропитность» // Лесоведение. – 1984. – №5. – С. 60-63.

## Monitoring of climatic conditions in forest and swamp ecosystems of the middle taiga in Central Siberia

<sup>1</sup>Sidenko N.V., <sup>2</sup>Kolle O., <sup>1</sup>Panov A.V., <sup>2</sup>Heimann M.

<sup>1</sup>V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>Max-Planck-Institute for Biogeochemistry, Germany

E-mail: [martin.heimann@bgc-jena.mpg.de](mailto:martin.heimann@bgc-jena.mpg.de)

In this study we present the analysis of climatic data obtained from 4 yrs (2009 - 2012) of continuous meteorological measurements from a net of climatic observations at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO; [www.zottoproject.org](http://www.zottoproject.org)) - scientific platform for long-term monitoring of atmospheric composition and climatic changes in Central Siberia (near 60°N, 90°E). The aim of the study was to evaluate main meteorological parameters of the middle taiga in Central Siberia. The research is based on the potential of the micrometeorological towers to measure gas exchange of CO<sub>2</sub> / CH<sub>4</sub> «Eddy Covariance». The method of meteorological observations was used. Instrumental meteorological data for this study characterize atmospheric conditions in study area. Climatic parameters reflect continental conditions as typical for the region. Averaged meteorological values indicate continental conditions in the region. The calculated wind rose demonstrated the relationships with the influence of western wind drift, transport of Polar air masses and the influence of Asian pressure maximum in winter time.

Due to the relatively high homogeneity of the landscape of study area the analyzed data set of meteorological variables is valid for the tall tower footprint area (~1000 km<sup>2</sup>) and can be used for further study of GHG's behavior over Central Siberian forest ecosystems. This study reflects variability of climatic parameters of the site and can be used for identifying of the general patterns and trends in specific climatic conditions.

The work was supported financially by RSF project # 14-24-00113, Max Planck Society (Germany), project of RFBR # 15-45-04423, and grant of president of RF for young scientists MK-1691.2014.5.

# Мониторинг климатических условий в лесо-болотных комплексах подзоны средней тайги Приенисейской Сибири

<sup>1</sup>Сиденко Н.В., <sup>2</sup>Олаф Колле, <sup>1</sup>Панов А.В., <sup>2</sup>Мартин Хайманн

<sup>1</sup> Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Институт биогеохимии им. М. Планка, Германия

E-mail: martin.heimann@bgc-jena.mpg.de

В данной работе рассмотрены значения метеорологических показателей, полученные в ходе инструментального мониторинга для двух измерительных комплексов расположенных на участках верхового болота и сосняка лишайникового, в районе исследований обсерватории «ZOTTO» ([www.zottoproject.org](http://www.zottoproject.org)). В течение 3 лет (2012-2014 гг.) на базе обсерватории непрерывно регистрировался стандартный набор метеорологических параметров, необходимый для изучения закономерностей и особенностей климатической обстановки в районе исследований. Качественные показатели полученных значений в полной мере отражают состояние атмосферы и процессы, происходящие в ней. Результаты анализа климатической обстановки в районе высокоточных исследований регионального атмосферно-экосистемного обмена в дальнейшем будут использованы в моделях углеродного баланса в качестве метеорологической компоненты.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

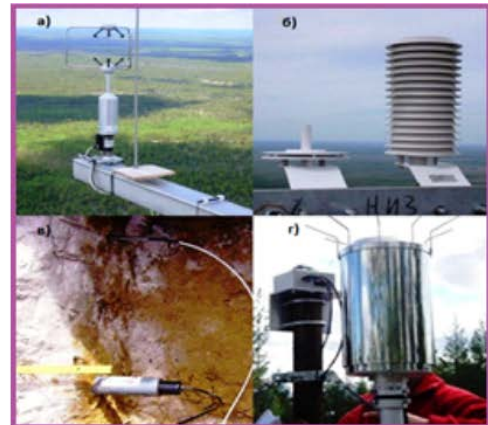
Исследования базируется на потенциале микрометеорологических мачт для измерения газообмена  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  методом турбулентных пульсаций «Eddy Covariance», установленных в Туруханском районе Красноярского края, и оснащенных комплексом современного газоаналитического и метеорологического оборудования. В проведенном исследовании представлен обобщенный анализ основных физических величин таких метеорологических элементов как: температура воздуха, атмосферное давление, влажность воздуха, скорость и направление ветра, количество и распределение осадков. Измерения производились на двух наземных площадках – сосняк лишайниковый (Рис. 1) и верховое болото (Рис. 2). Участки расположены на небольшом удалении друг от друга – 2000 м. Для сравнения некоторых метеорологических параметров, в данном случае, большую важность имеет высота над уровнем моря. Так для сосняка лишайникового высота составляет 110 м. над уровнем моря, а для верхового болота 70 метров над уровнем моря. Массив климатических данных, представляет собой набор 144 оперативных суточных измерений для всего периода наблюдений (2012-2014 гг.). Инструментальные регистраторы (Рис. 3) установленные на измерительных мачтах осуществляют сбор данных температуры воздуха, относительной влажности воздуха и атмосферного давления воздуха скорости и направления ветра, наземные регистраторы - сбор данных температуры и влажности почвы, количества осадков. В соответствии со стандартами Всемирной Метеорологической Организации, для анализа представленных величин метеорологических параметров был использован метод метеорологических наблюдений.



**Рис. 1.** Измерительный комплекс на участке верхового болота.



**Рис. 2.** Измерительный комплекс в сосняке лишайникового.



**Рис 3.** Метеорологическое оборудование:  
а) ультразвуковой 3-D анемометр;  
б) датчик температуры и влажности (справа) и датчик атмосферного давления (слева);  
в) датчики температуры и влажности почвы;  
г) измеритель осадков.



## РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные инструментальные данные характеризуют состояние атмосферы в районе исследований. Таким образом, установлено, что среднегодовая температура воздуха составляет  $-2,35^{\circ}\text{C}$  (Табл. №1). Самым теплым месяцем является июль  $+19^{\circ}\text{C}$   $+20^{\circ}\text{C}$ , а самым холодным - январь  $-23^{\circ}\text{C}$   $-24^{\circ}\text{C}$ . Амплитуда между показателями летних и зимних температур составляет  $44^{\circ}\text{C}$ .

**Таблица 1.** Микроклиматические показатели температуры воздуха.

Микроклиматические показатели	Верховое болото	Сосняк лишайниковый
Среднегодовая температура	$-2,6^{\circ}\text{C}$	$-2,1$
Сумма температур за весь период наблюдений	67211 сут. знач. / $+772752^{\circ}\text{C}$ 66478сут. знач. / $-1019881^{\circ}\text{C}$	67089сут. знач. / $+792423^{\circ}\text{C}$ 6587 сут. знач. / $-949919^{\circ}\text{C}$
Температурные максимумы	Max: $+33,2(18.07.13 - 17:10)^{\circ}\text{C}$ Min: $-43,8(31.01.14 - 09:40)^{\circ}\text{C}$	Max: $+33,2(18.07.13 - 17:10)^{\circ}\text{C}$ Min: $-43,8(31.01.14 - 09:40)^{\circ}\text{C}$
Средняя температура для июля и января	Июль $+19,3^{\circ}\text{C}$ ; Январь $-24,7^{\circ}\text{C}$	Июль $+20,3^{\circ}\text{C}$ ; Январь $-23,3^{\circ}\text{C}$

Атмосферное давление воздуха (Табл. 2), максимальных значений, достигает в зимние месяцы  $1006,5\text{ hPa}$ . Минимальные значения атмосферное давление достигает летом  $993,5\text{ hPa}$ . Среднегодовой показатель атмосферного давления воздуха составляет  $1001\text{ hPa}$ .

**Таблица 2.** Микроклиматические показатели атмосферного давления воздуха.

Микроклиматические показатели	Верховое болото	Сосняк лишайниковый
Среднегодовые значения А.Д.В.	$1005,8\text{ hPa}$	$996,2\text{ hPa}$
Максимальные показатели А.Д.В.	Max: $1042,5\text{ hPa}$ (21.12.2012 – 00:20) Min: $967,7\text{ hPa}$ (30.01.2014 – 04:00)	Max: $1031, \text{ hPa}$ (21.12.2012 – 00:20) Min: $964,3\text{ hPa}$ (21.10.2014 – 14:50)
Средние значения А.Д.В. для июля и января	Июль: $998,3\text{ hPa}$ Январь: $1011, 4\text{ hPa}$	Июль: $989,4\text{ hPa}$ Январь: $1001,5\text{ hPa}$

Показатели относительной влажности воздуха (Табл. 3) в районе исследований достаточно высоки, что определенно связано температурным режимом и увлажненностью подстилающей поверхности. Среднегодовой показатель достигает  $75,3\%$ , с максимумом, отмеченным в осенне-зимний период ( $89,2\%$ ).

**Таблица 3.** Микроклиматические показатели относительной влажности воздуха.

Микроклиматические показатели	Верховое болото	Сосняк лишайниковый
Средние значения О.В.В.	$75,1\%$	$75,4\%$
Максимальные показатели О.В.В.	Max: $102,8\%$ (25.04.2013 – 07:10) Min: $18, 2\%$ (18.04.2013 – 18:30)	Max: $103\%$ (02.11.20143 – 13:10) Min: $17,1\%$ (23.06.2014 – 18:00)
Средняя величина О.В.В. для июля и января	Июль: $63,8\%$ Январь: $78,1\%$	Июль: $58,8\%$ Январь: $81,2\%$

Количество атмосферных осадков (Табл. 4) в среднем составляет  $441,8\text{ мм}$ , с неравномерным сезонным распределением. Так максимум осадков приходится на летне-осенний период, со значениями, достигающими  $354,1\text{ мм}$ , тогда как в зимне-весенний период их количество не превышает  $87,7\text{ мм}$ . Фазы агрегатного состояния распределены так же неравномерно – Жидкие осадки –  $67\%$ , Твердые осадки –  $33\%$ .

**Таблица 4.** Микроклиматические показатели распределения атмосферных осадков.

Микроклиматические показатели	Верховое болото	Сосняк лишайниковый
Количество осадков для каждой измерительной площади	$454,5\text{ мм/год}$	$429,2\text{ мм/год}$
Распределение агрегатных фаз осадков	Жидкие осадки $306,6 - 67,6\%$ Твердые осадки $147,4 - 32,4\%$	Жидкие осадки $285,3 - 66,5\%$ Твердые осадки $143,9 - 33,5\%$

Преобладающее направление ветра (Табл. 5) юго-восточное и северо-западное, что обусловлено, противостоянием Арктических воздушных масс и Азиатского максимума над данной территорией в зимний период и спецификой расположения исследуемых ландшафтов. Скорость ветра составляет  $2,6\text{ м/с}$ .

Таблица 5. Микроклиматические показатели скорости и направления ветра

Микроклиматические показатели	Верховое болото	Сосняк лишайниковый
Преобладающее направление ветра	ЮЮВ, ССЗ	ВСВ, ЮЮВ, З
Скорость ветра	1-3 м/с	2-4 м/с

Для подтверждения достоверности, полученных в ходе исследования значений, был приведен стандартный регрессионный анализ (Рис. 4) некоторых метеорологических величин, посредством сравнения данных для систем «Eddy Covariance» и представленных в предыдущих исследованиях данных обсерватории «ZOTTO».

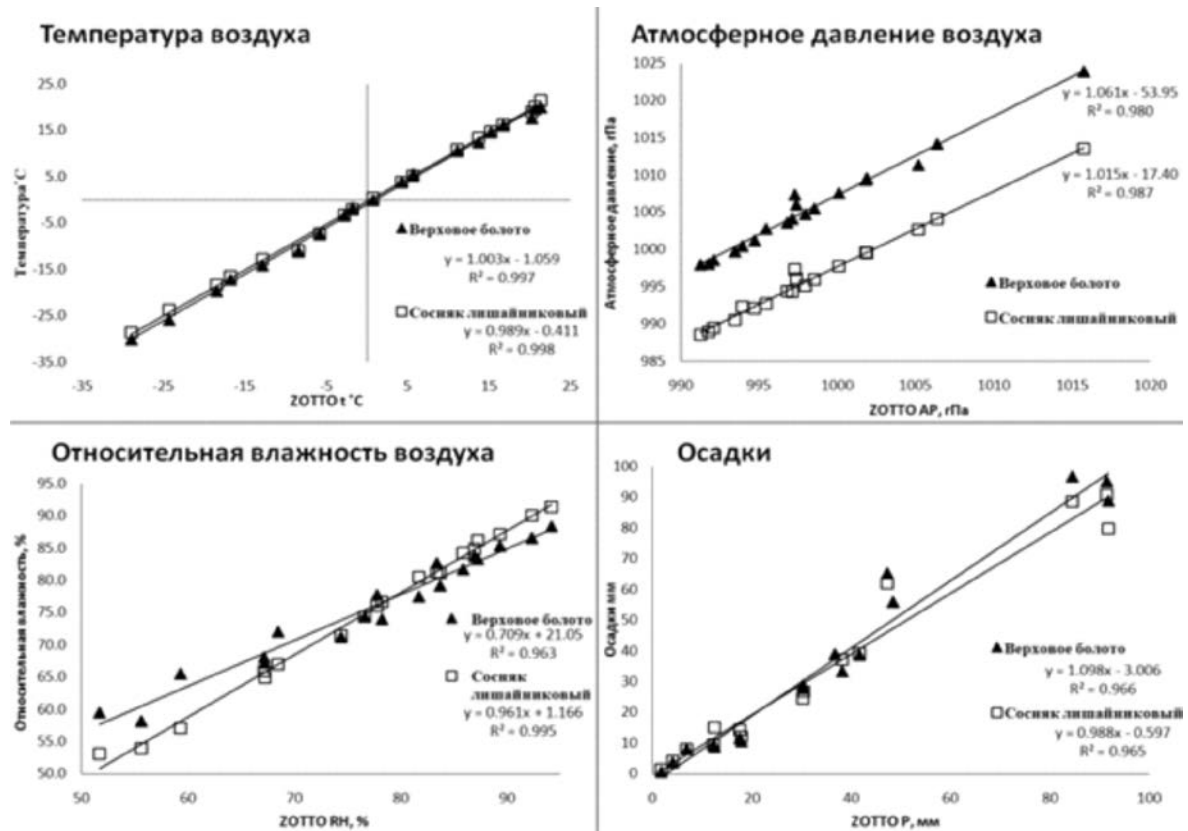


Рис. 4. Линейный регрессионный анализ для трех наборов данных метеорологических параметров: Системы «EDDY Covariance» и обсерватория «ZOTTO». Приведены линейные тренды и коэффициенты детерминации.

## ВЫВОДЫ

Результаты проведенной работы позволили оценить общие и локальные особенности и закономерности климатических условий в районе исследований. Высокая точность и периодичность регистрации инструментальных данных позволит использовать получаемые результаты в ходе комплексного анализа процессов газообмена в лесных экосистемах среднетаежной подзоны Сибири.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского Научного Фонда # 14-24-00113, Общества Макса Планка (Германия), РФФИ в рамках научного проекта № 15-45-04423, и Гранта Президента Российской Федерации для Государственной поддержки молодых российских ученых МК-1691.2014.5.

# Architecture of the Web mapping application for working with NetCDF datasets

Titov A.G., Gordov E.P., Okladnikov I.G.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia  
Tomsk Branch of Institute of Computational Technologies SB RAS, Tomsk, Russia  
Tomsk State University, Tomsk, Russia  
E-Mail: [titov@scert.ru](mailto:titov@scert.ru), [gordov@scert.ru](mailto:gordov@scert.ru), [oig@scert.ru](mailto:oig@scert.ru)

According to general INSPIRE requirements to data visualization geoportals have to provide such standard functionality as data overview, image navigation, scrolling, scaling and graphical overlay, displaying map legends and corresponding metadata information. It should be noted that modern web mapping systems as integrated geoportal applications might be considered as complexes of interconnected software tools for working with geospatial data including import/export, cataloging, processing and visualization and so on. In the report a web mapping application (GIS web client) architecture for working with geospatial NetCDF dataset archive is presented.

**There are three basic tiers of the web mapping application being considered:**

- Tier of NetCDF metadata represented in JSON format
  - Tier of JavaScript objects implementing methods handling the following:
    - NetCDF metadata
    - XML object for configuring user calculations, input and output (task XML object)
    - WMS/WFS cartographical services
  - Graphical user interface (GUI) tier representing JavaScript objects realizing web application business logic
- Metadata tier consists of a number of JSON objects containing technical information describing geospatial NetCDF datasets (such as spatio-temporal resolution, meteorological parameters, valid processing methods, etc). The metadata originally resides in MySQL relational database providing multilingual support. JSON object structure complies with two criteria:
1. Convenience of process of filling in the GUI interactive forms
  2. Optimization of the editing process of task XML object properties describing user calculations

It should be noted that due to the approach chosen the processes of retrieval of required dataset parameter values resulting from user-application interaction are optimized.

The middleware tier of JavaScript objects implementing methods for handling NetCDF metadata, XML object for configuring user calculations, and WMS/WFS cartographical services interconnects metadata and GUI tiers. The methods includes such procedures as JSON metadata downloading and update using AJAX techniques, launching and tracking of the calculation task running on the remote server as well as working with WMS/WFS cartographical services, including: obtaining the list of available layers, representing layers on the map and exporting layers in various formats according to user preferences.

Graphical user interface tier is based on the bundle of JavaScript libraries (OpenLayers, GeoExt and ExtJS) and represents a set of software components that might be either independent (information panels, buttons, layer lists, etc) or implementing web mapping application business logic (including complex menus, toolbars, wizards, mouse and keyboard event handlers, etc.). GUI provides two basic capabilities for the end user: functionality of editing of the task XML object as well as presenting of cartographical information.

Web mapping application developed according to the architecture described has shown its effectiveness in the process of solving real application problems and disseminating investigation results in cartographical form.

*The work is partially supported by SB RAS Program VIII.80.2.1 and RFBR grants #13-05-12034 and #14-05-00502.*

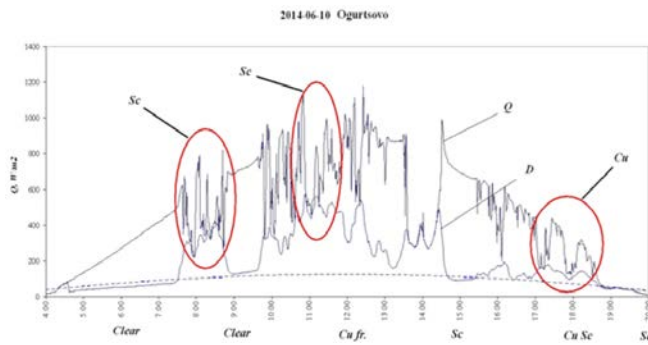
## Using of actinometric data to parameterize cloud forms and types

Zuev S.V., Krasnenko N.P., Kartashova E.S.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia  
E-mail: [zuev@imces.ru](mailto:zuev@imces.ru)

Each form and type of clouds can be described as a specific influence on the value of the intensity of direct  $S$  and diffuse  $D$  radiation and can be parameterized using of feature "transparent - semitransparent - not transparent clouds" [1].

For example, Fig. 1 shows the diurnal variation of the total  $Q$  and diffuse  $D$  radiation, where can be reliably separated the moments of influence of Stratocumulus  $Sc$  and Cumulus  $Cu$  clouds.



**Fig. 1.** Example of diurnal variations of the total  $Q$  and diffuse  $D$  radiation

To analyze used characteristics such as the transmission coefficient of direct radiation  $C_s = \frac{S}{S_0}$  and the coefficient of variation of diffuse radiation  $C_D = \frac{D}{D_0}$ , where  $S$  and  $D$  is measured values, and  $S_0$  and  $D_0$  is values of direct and diffuse radiation under clear sky, respectively. Using these coefficients, it is possible to parameterize cloudiness not only in form, but also the types and varieties.

#### References:

1. *Cloud Atlas / Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Rosgidromet), Voeikov main geophysical observatory; [D Bespalov, etc. ; ed by L. Surigin]. – S-Pb : D'Art, 2011. – 248 p.*

## Использование актинометрической информации для параметризации форм и видов облачности

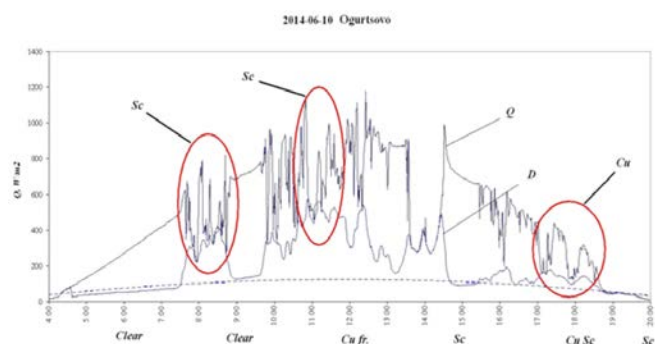
Зуев С.В., Красненко Н.П., Карташова Е.С.

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

Особое внимание при изучении климата территорий требуется уделять механизмам взаимодействия полей облачности и солнечной радиации, поскольку климат имеет сильную чувствительность к ним [1]. Наряду с прямыми задачами атмосферной оптики, позволяющими рассчитывать величины радиационного баланса по заданным параметрам атмосферы и подстилающей поверхности, большое значение имеет решение обратных задач атмосферной оптики, позволяющих определять параметры атмосферы по результатам инструментальных измерений радиационных характеристик.

Облака напрямую влияют на радиационный баланс земной поверхности, являясь естественным его регулятором. Разные формы и виды облачности оказывают неодинаковое влияние на величину поступающей прямой и рассеянной радиации в зависимости от ее количества и распределения по небосводу, высоты верхней и нижней границ, вертикальной и горизонтальной протяженности и других характеристик.

Используя такую характеристику, как оптическая толщина, различные формы и виды облачности можно параметризовать по признаку "просвечивающие – полупросвечивающие – непросвечивающие облака" [2], т.е. по их способности уменьшать прямую и увеличивать рассеянную радиацию. При этом каждый вид облачности можно описать специфическим, характерным только для нее, влиянием на величину интенсивности прямой и рассеянной радиации. Для примера, на рис. 1 показан суточный ход интенсивности суммарной  $Q$  и рассеянной  $D$  радиации, на котором можно уверенно выделить моменты влияния высококучевых  $Sc$  и кучевых  $Cu$  облаков.



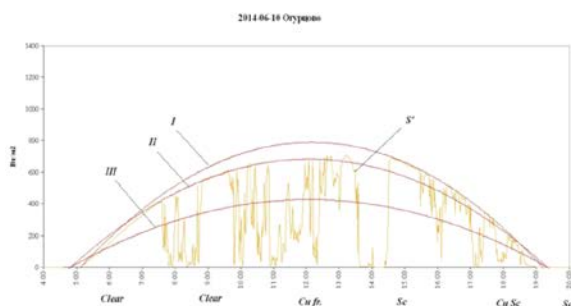
**Рис. 1.** Пример суточного хода интенсивности суммарной  $Q$  и рассеянной  $D$  радиации

**Таблица 1.** Степень влияния различных форм облачности на прямую  $S$  и рассеянную  $D$  радиацию

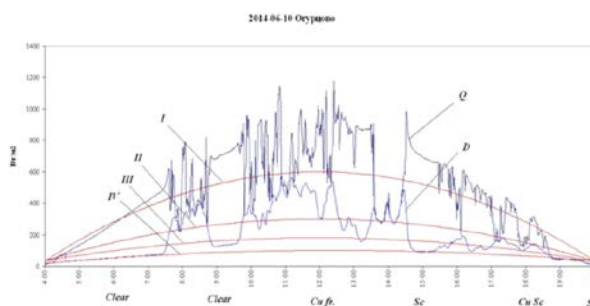
Форма облаков	Уменьшение $S$			Увеличение $D$			
	Слабое	Значительное	Сильное	Слабое	Значительное	Сильное	Не влияет или уменьшает
Ci	X			X			
Cc	X			X			
Cs	X			X			
Ac		X			X		
As			X		X	X	
Ns			X				X
Sc			X		X		
St		X	X		X	X	
Cu			X		X	X	
Cb			X	X			X

В таблице 1 приведена степень влияния различных форм облачности на величину интенсивности прямой  $S'$  и рассеянной  $D$  солнечной радиации. Используя такой подход, весь диапазон суточного хода прямой и рассеянной радиации можно разбить на амплитудные зоны влияния, в пределах которых различные формы облачности могут влиять на величину интенсивности прямой и рассеянной радиации (рис. 2 и 3 соответственно).

Такое графическое представление зон влияния является наглядным, однако для аналитических расчетов более удобно использовать такие характеристики облачного слоя, как коэффициент пропускания прямой радиации  $C_s = \frac{S}{S_0}$  и коэффициент изменения рассеянной



**Рис. 2.** Зоны влияния различных форм облачности на величину прямой радиации  $S'$  (III – зона сильного влияния, II–III – зона значительного влияния, I–II – зона слабого влияния).



**Рис. 3.** Зоны влияния различных форм облачности на величину рассеянной радиации  $D$  (I–II – зона сильного влияния, II–III – зона значительного влияния, III–IV – зона слабого влияния).

радиации  $C_D = \frac{D}{D_0}$ , где  $S$  и  $D$  – измеренные значения, а  $S_0$  и  $D_0$  – значения прямой и рассеянной радиации при безоблачном небе при том же угле стояния Солнца. В таблице 2 приведены примерные значения данных коэффициентов, используя которые становится возможным параметризовать облачность не только по форме, но и по видам и разновидностям.

**Таблица 2.** Примерные значения коэффициентов  $C_s$  и  $C_D$ 

№ п/п	Формы, виды и разновидность облачности	Коэффициент пропускания $C_s$	Коэффициент изменения $C_D$
1.	Ci fib. Cc und.	0,8 – 0,9	1,0 – 1,2
2.	Ci sp. Cc cuf. Cs fib. Cs neb.	0,7 – 0,8	1,0 – 1,5
3.	Ac und. Ac trans. Ac cuf. Ac floc.	0 – 0,6	2,5 – 5,0
4.	Ac op. Ac lent. Ac inh. Ac cast. As und. trans. Sc vesp.	0 – 0,5	1,2 – 2,5
5.	Ac cug. Ac vir. As neb. trans. Sc trans. Sc cuf. Sc diur. Cu med. Cu cong. Cb calv. Cb cap. Cb cap. inc. Cb cap. hum. Cb cap. mam.	0 – 0,3	1,5 – 2,5

№ п/п	Формы, виды и разновидность облачности	Коэффициент пропускания $C_s$	Коэффициент изменения $C_D$
6.	As neb. As neb. op. As neb. pr. As und. Sc lent. Sc cast. Sc mam.	0 – 0,3	1,0 – 1,5
7.	As und. op. As und. pr. Sc und. St neb. St und. St fr. Cu cong. pil.	0 – 0,3	1,0 – 1,2
8.	Sc op. Cu hum. Cu fr.	0 – 0,3	2,5 – 5,0
9.	St frnb. Ns Cb calv. arc. Cb cap. arc.	0 – 0,3	0,5 – 1,0

Стоит заметить, что кроме амплитудных признаков, каждая форма и вид облачности формирует свои собственные только им временные признаки, зависящие от степени неоднородности облачного поля, наличия просветов или отдельных облаков, волокнистости строения и др., используя которые облачность можно дополнительно описать такими характеристиками, как время нахождения солнечного диска в открытом, полузакрытом или закрытом состоянии и частота смены таких состояний за некоторый промежуток времени для прямой радиации, или частота изменения величины интенсивности для рассеянной радиации, что позволит более точно параметризовать отдельные виды и разновидности облаков.

#### Литература:

1. Зуев В.Е., Титов Г.А. Оптика атмосферы и климат. Томск: Изд-во "Спектр" ИОА СО РАН, 1996. 272 с.
2. Атлас облаков / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), ГГО им. А.И. Воейкова ; [Д. П. Беспалов и др. ; ред.: Л. К. Сурыгина]. – С-Пб : Д'АРТ, 2011. – 248 с.

## Factor analysis of data from meso-oligotrophic peatland

<sup>1</sup>Lapina L.E., <sup>2</sup>Mychaylov O.A., <sup>1</sup>Uspensky I.M.

<sup>1</sup> Department of Mathematics KSC UB RAS, Syktyvkar, Russia

<sup>2</sup> Institute of Biology KSC UB RAS, Syktyvkar, Russia

E-mail: lapina@dm.komisc.ru

Measurements are taken by the staff of Institute of biology since May, 2012 on the meso-oligotrophic bog located in a taiga in the European Northeast of Russia 40 km from Syktyvkar. Measurements of all parameters were carried out by method of microvortex pulsations with use of a gas analyzer of Li-7500A and the ultrasonic CSAT 3D anemometer at height 3,93 m. Frequency of measurements is-10 Hz. Measurements included also meteorological characteristics.

In this work mutual influence of the measured characteristics is studied. The analysis included 54 parameters, such as concentration of methane, carbon dioxide, water vapor, the air temperature, wind speed components, atmospheric pressure, average values of fluctuations of squares a component of speed of a wind, work of fluctuations horizontal a speed component with vertical, vertical streams of heat, methane, carbon dioxide and water vapor, kinetic energy of turbulence, dynamic speed, estimates of local derivatives on time of average values of temperature, a component of speed, atmospheric pressure, methane, carbon oxide and water vapor, and also average on 30-minute intervals of time of values of atmospheric pressure, density of air, relative humidity, streams of carbon dioxide and methane without adjustments, albedo, all types of radiation, soil temperature at two depths and photosynthetic radiation. The average constantly these were used. For characteristics concerning which there was only average on 30-minute to intervals information, interpolation was carried out by square polynoms.

For the analysis of data the factor analysis with use of procedure of rotation of VERIMAX is used. Data of August, 2012 when activity of biological processes is high are analyzed. 13 factors are allocated, the first two of which define about 50 percent of information, and in total allocated factors explain 90 percent of total dispersion of characteristics. Dynamics of the allocated factors has the expressed daily character.

# Факторный анализ данных с мезоолиготрофного болота Мэдла-Пэв-Нюр

<sup>1</sup>Лапина Л.Э., <sup>2</sup>Михайлов О.А., <sup>1</sup>Успенский И.М.

<sup>1</sup> Отдел математики Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

<sup>2</sup> Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

E-mail: lapina@dm.komisc.ru

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили сотрудники Института биологии Коми НЦ УрО РАН с 1 по 31 августа 2012 г. на мезоолиготрофном болоте Медла-Пэв-Нюр, расположенном в подзоне средней тайги на Европейском Северо-Востоке России, в 40 км на северо-запад от г. Сыктывкара (Республика Коми, 61° 56' с.ш. 56° 13' в.д.). На участке болота, где проводили измерения, преобладают растительные сообщества: 1) *Carex rostrata* Stokes – *Oxycoccus palustris* Pers. – *Carex limoza* L. – *Sphagnum* sp.; 2) *Andromeda polyfolia* L. – *Oxycoccus palustris* – *Scheuchzeria palustris* L. – *Sphagnum* sp. Незначительную площадь (до 5%) занимают олиготрофные сообщества *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench – *Oxycoccus palustris* – *Andromeda polyfolia* – *Sphagnum* sp.

Измерительная система включала ультразвуковой анемометр (CSAT3, Campbell Scientific Inc, USA) и инфракрасный газоанализатор открытого типа (Li-7500A, Li-Cor Inc., USA). Отбор проб воздуха проводили на высоте 3.93 м. Регистрация данных производилась с частотой 10 Hz. Параметры микроклимата (температуру воздуха и почвы, интенсивность ФАР, падающей и отраженной солнечной радиации и др.) и глубину снежного покрова регистрировали автоматической метеостанцией с помощью регистратора CR3000 (Campbell Scientific Inc., США). Температура и объемная влажность почвы измеряются на глубинах 25 см (глубина 1) и 15 см (глубина 2).

## МЕТОД АНАЛИЗА

Факторный анализ относится к методам многомерного статистического анализа и широко используется для снижения размерности анализируемого пространства признаков, отбора наиболее информативных показателей и классификации объектов. Факторный анализ является той ветвью многомерного анализа, которая исследует внутреннюю структуру ковариационных и корреляционных матриц. В работе используется разновидность анализа, которая называется метод главных компонент, который представляется наиболее удобным. О самом методе достаточно подробно описано в работах (Лоули, 1967, Ким, 1989). Применение в гидробиологии показано в отличной книге (Шутиков и др., 2005). По данным на данном болоте за 1 августа 2012 года рассматривается 4 варианта факторного анализа, которые отличаются набором изучаемых признаков и опубликованы в (Лапина и др., 2014). Данный метод выбран с целью выявить наиболее информативные показатели.

В статье проводится факторный анализ посуточно данных за август 2012 года. Для анализа используется 54 переменных: концентрация метана (ммоль/куб.м.), концентрация углекислого газа (ммоль/куб.м.), концентрация водяного пара (ммоль/куб.м.), температура воздуха (°C), компоненты вектора скорости  $U_x, U_y, U_z$  (м/с), атмосферное давление, квадраты пульсаций компонент скорости, потоки пульсационных потоков тепла, метана, углекислого газа, водяного пара, компоненты скорости трения на плоскости, производные концентраций метана, углекислого газа, водяного пара, температуры, компонент вектора скорости, атмосферного давления, а также некоторые взаимодействия в виде произведений: концентраций метана и углекислого газа, концентраций метана и водяного пара, концентраций метана и температуры, концентраций и соответствующих компонент вектора скорости, концентрации метана и атмосферного давления, концентрации водяного пара и температуры, концентрации углекислого газа и температуры, концентрации углекислого газа и водяного пара, атмосферное давление, осредненное по 30 минутным интервалам, плотность воздуха, поток углекислого газа, поток скрытого тепла, относительная влажность, суммарная радиация, альbedo, коротковолновая радиация падающая и отраженная, длинноволновая радиация падающая и отраженная, температура и влажность почвы на глубинах 1(25 см) и 2(15 см), фар, кинетическая энергия турбулентности, температура на поверхности почвы, рассчитанной по длинноволновой радиации, скорость трения  $U^*$ .

Корреляционная матрица строилась из попарных коэффициентов корреляции между соответствующими признаками. Между разными парами переменных могло быть разное число наблюдений, так как некорректные значения исключались из дальнейшего рассмотрения. Из вариантов факторного анализа использовался метод главных компонент с вращением VERYMAX.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Рис.1 представляет собой типичное распределение собственных чисел корреляционных матриц за каждый день августа 2012 г. Из этого рисунка видно, что по принципу Кэттела выделяется 6 факторов, а по принципу «собственные числа, большие 1» - 13 факторов, причем 13 факторов объясняют примерно 90 процентов дисперсии признаков, а 6 факторов объясняют примерно 70 процентов общей дисперсии, а два фактора – около половины. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать структуру первых шести признаков в течение месяца.

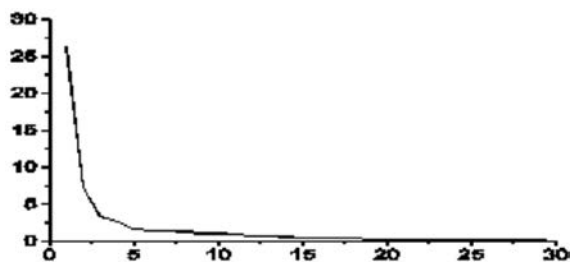


Рис.1 Собственные числа корреляционной матрицы по данным за 8 августа 2012 г.

Обозначения: T – температура воздуха, R – суммарная радиация, Ts\_1, Ts\_2 – температура почвы на глубинах 1 и 2, Hs\_1, Hs\_2 – объемная влажность почвы на этих же глубинах соответственно, Far – фотосинтетически активная радиация, KET – кинетическая энергия турбулентности, которая считалась как сумма кинетических энергий осредненных соответствующих компонент вектора скорости (не пульсаций), U\* – скорость трения.

В табл.1 представлены факторные нагрузки некоторых переменных в отдельные дни августа, в таблице 2 - частота попадания показателей в первые шесть факторов. Данные за 4 августа и 16 августа ввиду плохого качества не анализировались.

Таблица 1. Факторные нагрузки некоторых переменных за отдельные дни августа 2012 г.

Дата / Переменная	03.08.	09.08.	12.08	21.08	26.08	31.08
альbedo	0,71 (F1)	-0,61 (F2)	0,36 (F1) -0,376 (F10)	-0,69 (F7)	0,47 (F1) 0,38(F2)	0,56(F4)
T	0,90 (F1)	0,91 (F1)	0,93 (F1)	-0,71 (F7)	0,96(F1)	-0,94(F6)
R	-0,68 (F11)	-0,66 (F3)	0,69 (F1)	0,79 (F1)	0,71(F1)	-0,96(F3)
Ts_1	0,89 (F2)	-0,92 (F5)	-0,83 (F3)	0,82 (F3)	0,80 (F8)	-0,71(F3) -0,59(F4)
Ts_2	0,84 (F2)	-0,69 (F5) -0,65 (F1)	-0,88 (F3)	0,64 (F3)	0,90(F9)	-0,83(F4)
Hs_1	-0,81 (F2)	0,91 (F5)	0,79 (F3)	-0,80 (F3)	-0,78(F8)	0,72(F4)
Hs_2	-0,84 (F2)	-0,69 (F5) -0,65 (F1)	0,88 (F3)	0,79 (F3)	-0,90(F9)	0,83(F4)
Far	-0,68 (F11)	-0,66 (F3)	0,71 (F1)	0,79 (F1)	0,75 (F1)	-0,96(F3)
KET	-0,73 (F3)	-0,86 (F3)	-0,91 (F2)	0,81 (F1)	0,87(F2)	-0,75(F2)
U*	-0,82 (F3)	-0,79 (F3)	-0,62 (F2)	0,87 (F1)	-0,85 (F2)	-0,88(F2)

Таблица 2. Частота попаданий некоторых показателей в основные шесть факторов.

Переменная	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Атмосферное давление	9	9	4	3	0	0
CH <sub>4</sub> (ммоль/куб.м.)	5	3	7	3	5	1
скорость трения U*	7	10	3	0	3	1
FAR	20	3	4	0	0	0
H <sub>2</sub> O (ммоль/куб.м.)	6	7	8	3	0	4
H <sub>2</sub> O T	13	6	3	3	0	2
Относительная влажность	19	5	1	1	0	0
Hs_1	4	8	5	3	1	1
Hs_2	1	10	9	3	1	1
KET	8	8	3	2	3	1
<w'CO <sub>2</sub> '>	14	1	0	0	1	1



Переменная	F1	F2	F3	F4	F5	F6
<math>\langle w^{\wedge}H_2O^{\wedge} \rangle</math>	13	2	2	0	2	1
Падающая длинноволновая радиация	22	4	0	0	0	1
T	21	5	0	0	0	1
Ts_1	3	10	5	2	2	1
Ts_2	2	11	8	3	1	1
Ux	4	1	4	5	6	2
Uy	7	7	4	2	2	2
Uz	3	5	4	5	6	2

## ВЫВОД

**К основным переменным, влияющим на болотные экосистемы, относятся:**

- Температура воздуха
- Относительная влажность
- Суммарная радиация
- Температура и влажность почвы на разных глубинах
- Фар
- Кинетическая энергия турбулентности
- Атмосферное давление
- Динамическая скорость или скорость трения
- Произведение концентрации водяного пара и температуры

Поэтому регрессионные модели, в которых учитываются только одна или нескольких этих переменная типа температуры воздуха являются неполными, так как в них пренебрегаются другими факторами. Возможно, у авторов работ просто не хватало данных наблюдений. Пример такой работы [Головацкая, 2008].

### Литература:

1. Лапина Л.Э., Успенский И.М., Михайлов О.А. Факторный анализ концентраций парниковых газов и других параметров с мезоолиготрофного болота Медла-Пэв-Нюр //Труды Коми научного центра УрО РАН, , 2014,N187, с.94-108
2. Лоули Д., Максвелл А. Факторный анализ как статистический метод М., мир, 1967 (перевод с книги D.N.Lawley, A.E.Maxwell Factor analysis as a statistical method, London, Butterworth, 1963)
3. Дж.О.Ким, Ч.У.Мьюллер Факторный анализ: статистические методы и практические вопросы (перевод с –Jae-On Kim, Charles W.Mueller Factor analysis^Statistical Methods and Practical Issues (Eleventh Printing, 1986)// Факторный, дискриминантный и кластерный анализ, М., Финансы и статистика, 1989, с.5-77
4. Шустиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. М., наука, 2005, т.2.
5. Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Ипполитов И.И., Кабанов М.В. Влияние ландшафтных и гидрометеорологических условий на эмиссию CO2 в торфоболотных экосистемах //Доклады академии наук. 2008. т.418. N4. С.539-542.

## Assessment of streams of greenhouse gases on a mesooligotrophic peatland in August, 2012

Lapina L.E., Uspensky I.M.

Department of Mathematics KSC UB RAS, Syktyvkar, Russia

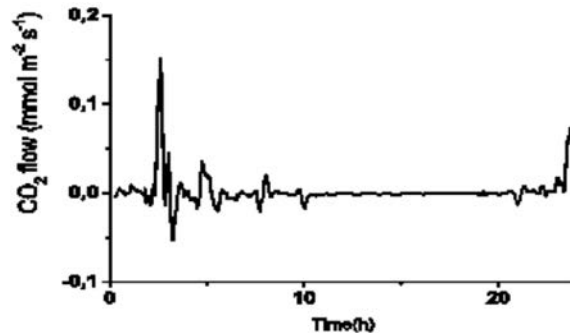
E-mail: lapina@dm.komisc.ru

Measurements are taken by the staff of Institute of biology since May, 2012 on the meso-oligotrophic bog located in a taiga in the European Northeast of Russia 40 km from Syktyvkar. Measurements of all parameters were carried out by method of microvortex pulsations with use of a gas analyzer of Li-7500A and the ultrasonic CSAT 3D anemometer at height 3,93 m. Frequency of measurements is -10 Hz. Measurements included also meteorological characteristics.

The work purpose - to analyse justice of the statement about equality to zero vertical speed of a wind, to find out a question how to influence the averaging period daily values of concentration of greenhouse gases and their streams.

Streams calculate by a full formula and simplified for methane, carbon dioxide and water vapor and 4 options of the period of averaging - 1 minute, 10 minutes, 30 minutes and days are chosen. The received values of streams are compared among themselves. It is shown that use of the simplified formula leads to underestimation of a stream. The averaging period also seriously influences calculation of a stream.

On the example of concentration of carbon dioxide procedure of moving averages which allows to increase number of average values, average on 30minut to intervals that conducts to reduction of value of confidential intervals for an assessment of averages is offered and allows to give more exact estimates of streams. It is important for studying of turbulent streams.



**Fig. 1.** Turbulent stream of carbon dioxide by data for 1 August 2012, average on 30-minute to intervals with sliding use.

## Оценки потоков парниковых газов на мезоолиготрофном болоте Мэдла-Пэв-Нюр в августе 2012 года

Лапина Л.Э., Успенский И.М.

Отдел математики Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия  
E-mail: lapina@dm.komisc.ru

Метод eddy covariance достаточно широко используется для расчетов потоков, например, в работах (Zamolodchikov et al, 2003). Некоторые теоретические вопросы данного метода рассматриваются в работе (Moncrieff et al., 2004).

Поток любого скаляра определяется формулой:

$$F_c = \overline{w\rho_c}, \quad (1)$$

где  $w$  – вертикальная скорость ветра,  $\rho_c$  – плотность скаляра. Часто вместо плотности используется концентрация вещества в различных единицах измерения. Операция осреднения предполагает не только осреднение по времени, но и осреднение по пространству, но ввиду отсутствия необходимых для этого измерений ограничиваются осреднением по времени. Мгновенные значения скаляра можно представить в виде суммы двух величин, широко известных как представление Рейнольдса:

$$w = \bar{w} + w', \rho_c = (\bar{\rho}_c) + \rho_c' \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), учитывая определение осреднения и свойства интегралов, получаем, что  $F_c = \bar{w} \bar{\rho}_c + \overline{w'\rho_c'}$  (3). В работе (Moncrieff et al, 1997) утверждается, что среднее значение вертикальной скорости ветра равно нулю. Такое же утверждение можно встретить и в работе (Moncrieff et al., 2004). Аргументируется тем, что в условиях горизонтальной однородного потока вертикальная скорость ветра, осредненная по периоду, стремится к нулю. Этот аргумент вызывает сомнения. В работе (Moncrieff et al, 1997) предлагается формула для расчетов потока в следующем виде:

$$F_c = \overline{w'\rho_c'} + correction \quad (4)$$

Один из вариантов формулы (4) в случае отсутствия корректировки имеет вид:

$$F_c = \overline{w'\rho_c'} \quad (5)$$

Один из вариантов корректировки приводится в работе (Burba et al, 2012), а также в работе (Webb et al, 1980). Формула (5) используется, например, в работе (Чебакова и др., 2013) для изучения энерго и массобмена в различных экосистемах вдоль Енисейского меридиана, включая лесные.

Цель данной работы – проанализировать справедливость утверждения о равенстве нулю вертикальной скорости ветра, выявить вопрос о том, как влияет период осреднения на суточные значения характеристик и их потоки. Потоки считаются по формулам (3) и (5) для метана, углекислого газа и водяного пара. Заметим, что в учебниках по микрометеорологии (например, Burba, 2013) на эти вопросы не уделено должного внимания.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Исследования проводили с 1 по 31 августа 2012 г. на мезоолиготрофном болоте Медла-Пэв-Нюр, расположенном в подзоне средней тайги на Европейском Северо-Востоке России, в 40 км на северо-запад от г. Сыктывкара (Республика Коми, 61° 56' с.ш. 56° 13' в.д.). На участке болота, где проводили измерения, преобладают растительные сообщества: 1) *Carex rostrata* Stokes – *Oxycoccus palustris* Pers. – *Carex limosa* L. – *Sphagnum* sp.; 2) *Andromeda polyfolia* L. – *Oxycoccus palustris* – *Scheuchzeria palustris* L. – *Sphagnum* sp. Незначительную площадь (до 5%) занимают олиготрофные сообщества *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench – *Oxycoccus palustris* – *Andromeda polyfolia* – *Sphagnum* sp. Площадь болота 2790га, средняя мощность торфа -1,4м, максимальная -3,4м. Болото располагается на второй надпойменной террасе, его водоприемниками служат р.Пожег и р.Пычим (Торфяные,200)

Измерительная система включала ультразвуковой анемометр (CSAT3, Campbell Scientific Inc, USA) и инфракрасный газоанализатор открытого типа (Li-7500A, Li-Cor Inc., USA). Отбор проб воздуха проводили на высоте 3.93 м. Регистрация данных производилась с частотой 10 Hz. Параметры микроклимата (температуру воздуха и почвы, интенсивность ФАР, падающей и отраженной солнечной радиации и др.) и глубину снежного покрова регистрировали автоматической метеостанцией с помощью регистратора CR3000 (Campbell Scientific Inc., США).

## РАСЧЕТЫ ПОТОКОВ

На рис. 1 показаны среднесуточные значения вертикальной скорости ветра за исследуемый период. Как мы видим, говорить о равенстве нулю не приходится.

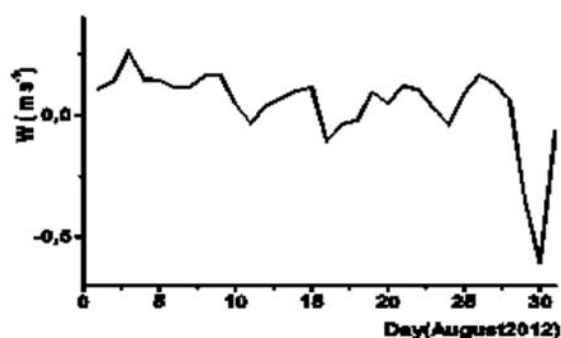


Рис. 1. Среднесуточные значения вертикальной скорости ветра в августе 2012 г.

Для оценки потоков использовались 4 периода осреднения: 1 мин, 10 минут, 30 минут и 1 сутки. Результаты получились разные. Для расчетов потоков использовались формулы (3) и (5). Разница в оценках достигает сотен, а иногда и тысяч раз. Для примера, приведем таблицу данных о потоках углекислого газа и водяного пара с доверительными интервалами оценки среднесуточных значений.

Использованный период осреднения – 30 минут. Все потоки в работе вычисляются в  $\text{mmol m}^{-2} \text{c}^{-1}$ .

Обратим внимание на оценку потока углекислого газа и доверительный интервал, например, за 1 августа. Внутри этого доверительного интервала оказался ноль. Таким образом, мы не можем утверждать о том, что 1 августа происходило поглощение углерода с 95 процентной надежностью. Применение процедуры сглаживания позволяет нам сузить границы доверительных интервалов для оценки среднесуточного потока. Более того, сравнивая значения потоков, полученных по разным формулам, видим, что разницы составляет порядки величин. В заключении приведем графики потоков метана и водяного пара, полученных по суточному периоду сравнения.

Таблица 1. Потоки углекислого газа и водяного пара, вычисленные по формуле (3) и по формуле (5).

Дата	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
1 августа	1.552±0.307	-0.0010±0.0044	91.177±19.926	1.194±0.411
2 августа	1.995±0.715	0.0017±0.0037	100.924±36.211	1.041±0.313
3 августа	3.746±0.345	-0.0013±0.0015	154.028±14.765	1.247±0.396
4 августа	2.108±0.199	-0.0023±0.0011	95.320±8.562	1.103±0.300
5 августа	2.037±0.207	-0.0019±0.0011	108.134±12.122	1.199±0.300
6 августа	0.000±0.001	-0.0007±0.0015	85.197±9.435	0.541±0.192
7 августа	1.737±0.278	-0.0013±0.0075	111.833±25.045	1.711±1.750
8 августа	2.371±0.374	-0.0010±0.0009	127.809±23.599	1.012±0.262
9 августа	2.376±0.394	-0.0024±0.0015	105.724±14.822	1.328±0.406
10 августа	0.648±0.212	-0.0023±0.0013	29.457±9.716	0.484±0.193
11 августа	-0.471±0.283	-0.0023±0.0015	-17.379±11.483	0.912±0.307
12 августа	0.703±0.219	-0.0004±0.0047	64.050±23.683	1.333±0.540
13 августа	1.022±0.194	-0.0021±0.0051	38.940±7.558	1.124±0.412

Дата	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
14 августа	1.466±0.127	-0.0038±0.0028	55.167±5.418	0.753±0.251
15 августа	1.752±0.349	-0.0023±0.0018	130.990±40.573	0.919±0.524
16 августа	-1.518±0.399	-0.0031±0.0016	-57.938±26.364	0.975±0.436
17 августа	-0.439±0.382	-0.0056±0.0064	42.795±41.819	0.360±1.693
18 августа	-0.122±0.346	-0.0015±0.0040	50.738±29.674	0.985±0.661
19 августа	1.748±0.244	-0.0009±0.0039	171.063±52.047	0.347±0.974
20 августа	0.642±0.295	-0.0055±0.0058	27.768±17.234	0.689±0.575
21 августа	1.944±0.242	-0.0021±0.0024	171.235±62.239	0.370±0.776
22 августа	1.767±0.182	0.0001±0.0000	159.251±67.794	0.836±0.524
23 августа	0.352±0.256	-0.0009±0.0060	-1.548±31.982	1.387±0.983
24 августа	-0.581±0.218	-0.0012±0.0018	-24.829±8.791	0.915±0.374
25 августа	1.313±0.274	-0.0012±0.0029	55.994±12.892	0.645±0.494
26 августа	2.449±0.219	-0.0010±0.0015	89.189±8.789	0.504±0.324
27 августа	1.942±0.151	-0.0018±0.0009	104.041±35.204	0.749±0.278
28 августа	1.619±0.332	-0.0008±0.0034	30.843±7.157	1.042±0.339
29 августа	-5.585±2.707	0.0139±0.0291	-112.611±89.505	0.509±2.463
30 августа	-9.185±5.198	-0.0086±0.0235	-294.858±161.147	0.907±4.159
31 августа	-1.066±1.601	-0.0094±0.0276	-7.531±22.660	2.526±4.131

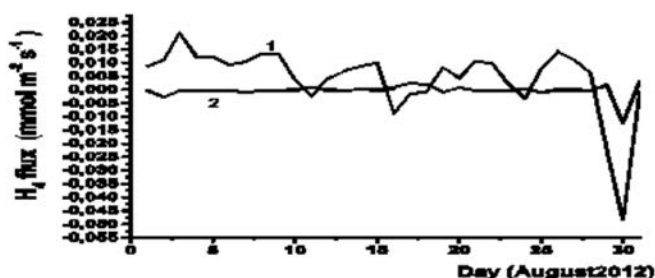


Рис. 2. Поток метана, рассчитанный по формуле (3) (график 1) и по формуле (5) (график 2), построенный для периода осреднения сутки.

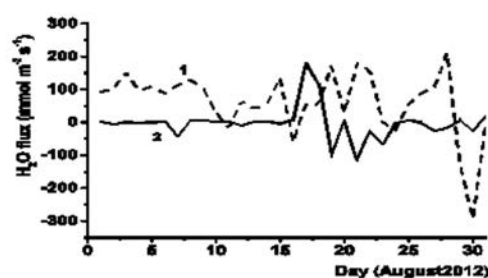


Рис. 3. Поток водяного пара. График 1 – поток, полученный по формуле (3), график 2 – поток, полученный по формуле (5).

Авторы выражают благодарность к.б.н. Михайлову О.А. за предоставленные данные и полезные обсуждения.

#### Литература:

1. Лапина Л.Э., Успенский И.М., Михайлов О.А., 2014 Факторный анализ концентраций парниковых газов и других параметров с мезоолиготрофного болота Медла-Пэв-Нюр //Труды Коми научного центра, 2014, N187, С.94-108
2. Торфяные ресурсы Республики Коми, 2000. – Сыктывкар. 2000. -613с.
3. Чебакова Н.М., Выгодская Н.Н., Арнет А., Белелли Маркезини Л., Колле О., Курбатова Ю.А., Парфенова У.И., Валентини Р., Ваганов Е.А., Шульце Е.Д., 2013 Энерго- и массообмен и продуктивность основных экосистем Сибири (по результатам измерений методом турбулентных пульсаций). I. Структура теплового баланса за период вегетации//Известия РАН. Серия биологическая, 2013, N6, с. 728-737.
4. Burba G., Schmidt A., Scott R.L., Nakai T., et al, 2012 Calculating CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O eddy covariance fluxes from an enclosed gas analyzer using an instantaneous mixing ratio //Global Change Biology, 2012, 18, 385-399, doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02536.x
5. Burba G., 2013 Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications; A Field Book on Measuring EcoSystem Gas Exchange and Arial Emission Rates, Li-Cor BioSciences, Lincoln, NE, 2013, USA, 331p.
6. Moncrieff J.B., Massheder J.M., deBruin H., Elbers J., T.Friborg, Heusinkveld B., Kabat P., Scott S., Soegaard H., Verhoef A., 1997 A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide //J.of Hydrology, 1997, 589-611
7. Moncrieff J., Clement R., Finnigan J., Meyers T., 2004. Averaging, Detrending, and filtering of eddy covariance time series // Handbook of Micrometeorology, chapter 2, pp 7-31

8. Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Ivaschenko A.I., Oechel W.C. Hastings S.J. , 2003 CO<sub>2</sub> flux measurements in Russian Far East tundra using eddy covariance and closed chamber techniques//Tellus, 2003, 55B, 879-892
9. Webb E.K., Pearman G.I., Leuning R., 1980 Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer //Quart.J.Met.Soc., 1980, 106, pp 85-100

## Three-layer informational-computational system for presentation of predicted values of urban air pollution by sources of anthropogenic and biogenic emission

<sup>1</sup>Bart A.A., <sup>1</sup>Starchenko A.V., <sup>1,2</sup>Fazliev A.Z., <sup>3</sup>Tsar'kov D.V.

<sup>1</sup> Tomsk State University, Russia

<sup>2</sup> Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>3</sup> School of Computer Science, University of Manchester, UK

E-mail: bart@math.tsu.ru, starch@math.tsu.ru, faz@iao.ru, tsarkov@cs.man.ac.uk

Impurities in the surface layer of the atmosphere appear due to both biogenic and anthropogenic pollution. Information about the pollution sources, their type, location, and modes of operation and understanding of the processes occurring in the atmosphere are necessary to control the air quality. In addition, the air quality in cities is influenced by meteorological conditions that determine the formation of air pollution.

At present, the prediction distribution of the parameters of the atmospheric processes contributes by new high-performance hardware and original methods of computation. Traditionally important are computational problems that characterize the state of the atmosphere. Additionally the information tasks related to the presentation and integration of information resources on a regional scale are beginning to play an important role. In this paper we consider both computational and informational aspects of building informational-computational system (ICS) «UniQuE» using three-layer architecture

In the Semantic Web approach the interpretation of the terms «data», «linked data» and «ontology» is associated with the semantics of formal languages (XML, RDF and OWL). Moreover, this interpretation leads to the use of the terms «data and applications layer», «information layer» and «layer of knowledge», introduced by e-Science [2] to describe the infrastructure of information resources and information systems.

ICS «UniQuE» is designed to calculate the concentrations of impurities contaminating the air in the atmospheric boundary layer, and to present properties of the results of the calculation in the form of data, information and knowledge both for researchers and software agents.

Data and applications layers of the system consist of the mathematical model described in [1] and corresponding data (global meteorological forecast and emission sources description) respectively.

A novel feature of the ICS «UniQuE» is an ontological representation of the results predicted by the numerical model of impurity transport with consideration of chemical reactions. In this paper ontology is a logical theory that describes the levels of the atmospheric boundary layer above the city.

The main purpose of the knowledge layer of the ICS «UniQuE» is to classify properties of the solutions of the short-term air quality forecast problem. In particular that allows the user to perform semantic search of reliable air quality forecasts with a high degree of credibility. The system performs the classification of levels of the boundary layer and parts largest concentrations of impurities and the degree of coincidence of the measured and predicted data is performed using OWL 2 DL reasoner FaCT++ [3]. In order to be able to reason about the data comparison, FaCT++ was extended with additional reasoning facilities.

*This work was performed by order of the Ministry for education and science of the Russian Federation No. 5.628.2014/K.*

### References:

1. Bart A.A., Starchenko A.V. Modelling of urban air pollution by anthropogenic and biogenic source emissions //Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 929248 (November 25, 2014); doi:10.1117/12.2075132
2. Roure D., Jennings N., Shadbolt N. A Future e-Science Infrastructure // Report commissioned for EPSRC/DTI Core e-Science Programme. 2001. 78 p.
3. Tsarkov D., Horrocks I. FaCT++ Description Logic Reasoner: System Description // Int. Joint Conf. on Automated Reasoning (IJCAR 2006). 2006. V. 4130. P. 292-297.

# Информационно-вычислительная система трехслойной архитектуры для представления прогнозируемых значений загрязнения городского воздуха источниками антропогенной и биогенной эмиссии

<sup>1</sup>Барт А.А., <sup>1</sup>Старченко А.В., <sup>1,2</sup>Фазлиев А.З., <sup>3</sup>Царьков Д.В.

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

<sup>3</sup> School of Computer Science, University of Manchester, UK

E-mail: bart@math.tsu.ru, starch@math.tsu.ru, faz@iao.ru, tsarkov@cs.man.ac.uk

## ВВЕДЕНИЕ

Появление примесей в приземном слое атмосферы обусловлено как естественными причинами, так и антропогенным загрязнением. Антропогенное загрязнение атмосферы пытаются регулировать посредством межгосударственных договоров, а эмиссия биогенных примесей на урбанизированных территориях контролируется в меньшей мере. Для контроля необходимо явное понимание процессов, протекающих в атмосфере, и информация об источниках загрязнения: их типе, расположении и режимах работы. Движение воздушных масс обуславливает перемещение компонент примеси в пространстве, температура окружающего воздуха влияет на скорость протекания химических реакций, влажность воздуха обуславливает осаждение примеси на подстилающую поверхность. Известно, что на качество атмосферного воздуха в городах сильно влияют метеорологические условия, определяющие формирование уровня загрязнения воздуха.

В настоящее время прогнозированию распределения параметров атмосферных процессов способствуют новые технические средства и оригинальные методы вычислений. Во-первых, существенно увеличивается вычислительная мощность серверов и компьютерных кластеров, что делает эффективным применение методов параллельного программирования. Во-вторых, развиваются новые численные методы. В-третьих, увеличивается объем данных измерений о состоянии атмосферы. Это создало предпосылки для осуществления численных региональных прогнозов качества воздуха.

Наряду с вычислительными задачами, характеризующими состояние атмосферы, начинают играть все более важную роль информационные задачи относящиеся к представлению и интеграции информационных ресурсов информационных систем регионального масштаба. В данной работе рассмотрены как вычислительные, так и информационные аспекты анализа качества воздуха над урбанизированной территорией.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ

Для моделирования качества воздуха используется система дифференциальных уравнений в частных производных для концентрации компонент примеси, учитывающая химические трансформации. Эта система уравнений представляет собой Эйлерову модель турбулентной диффузии [1]:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial UC_i}{\partial x} + \frac{\partial VC_i}{\partial y} + \frac{\partial WC_i}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial x} \langle c_i u \rangle - \frac{\partial}{\partial y} \langle c_i v \rangle - \frac{\partial}{\partial z} \langle c_i w \rangle - \sigma_i C_i + S_i + R_i, i = 1, \dots, n_s.$$

Здесь  $C_i$ ,  $c_i$  – осредненная и пульсационная составляющие концентрации  $i$ -ой компоненты примеси;  $U$ ,  $V$ ,  $u$ ,  $v$  – осредненные и пульсационные составляющие вектора горизонтальной скорости ветра;  $W$ ,  $w$  – осредненная и пульсационная составляющие вертикальной компоненты скорости примеси;  $\langle \rangle$  – обозначает осреднение по Рейнольдсу;  $S_i$  – источниковый член, представляющий выбросы компонентов примеси в атмосферу;  $R_i$  описывает образование и трансформацию вещества за счет химических и фотохимических реакций с участием компонентов примеси;  $\sigma_i$  – скорость влажного осаждения примеси за счет осадков;  $n_s$  – количество химических компонентов примеси, концентрации которых необходимо определить;  $x$ ,  $y$  – горизонтальные координаты, ось  $O_x$  направлена на восток,  $O_y$  – на север;  $z$  – вертикальная координата;  $t$  – время,  $T$  – период моделирования. Расчетная область представляет параллелепипед,  $L_x$ ,  $L_y$  – горизонтальные размеры области,  $h$  – высота,  $-L_x/2 \leq x \leq L_x/2$ ,  $-L_y/2 \leq y \leq L_y/2$ ,  $0 \leq z \leq h$ ,  $0 \leq t \leq T$ .

Для задания метеорологических условий, необходимых для моделирования переноса примеси, используются результаты прогноза по глобальной модели ПЛАВ [2]. Для адаптации прогноза к сетке модели переноса примесей и вычисления коэффициентов турбулентной диффузии используется модель однородного атмосферного пограничного слоя (АПС) [1]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \langle uw \rangle + f \cdot (V - V_g) + \frac{U_s - U}{\tau_s}; \quad \frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \langle vw \rangle - f \cdot (U - U_g) + \frac{V_s - V}{\tau_s};$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \langle \theta w \rangle + \frac{\Theta_s - \Theta}{\tau_s}; \quad \frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \langle q w \rangle + \frac{Q_s - Q}{\tau_s}.$$

Здесь  $\Theta$ ,  $\theta$  – средняя и пульсационная составляющие потенциальной температуры воздуха,  $Q$ ,  $q$  – средняя и пульсационная составляющие абсолютной влажности воздуха,  $(U_g, V_g)$  – компоненты скорости геострофического ветра,  $f$  – параметр Кориолиса. Слагаемые вида  $\frac{\phi_s - \phi}{\tau_s}$  в уравнениях используются для корректировки рассчитанных профилей  $\phi = U, V, \Theta, Q$ . Вводимый дополнительный член пропорционален разности между рассчитанным значением метеорологической переменной и значением, полученным по данным измерений или глобальному метеорологическому прогнозу. Индексом « $S$ » обозначены метеорологические поля синоптического масштаба, получаемые в результате численного прогноза по глобальной модели атмосферы, или результатов наблюдений вертикальной структуры АПС;  $\tau_s$  – период времени (частота) обновления результатов численного прогноза или наблюдений.

Для замыкания системы уравнений применяется трехпараметрическая модель турбулентности, включающая уравнения переноса для кинетической энергии турбулентности  $k$ , интегрального масштаба турбулентности  $l$  и дисперсии турбулентных пульсаций потенциальной температуры  $\langle \theta^2 \rangle$ , предложенная в работе [1]:

Для задания интенсивности эмиссии примеси в атмосферу используются данные об источниках антропогенного и биогенного характера. Для моделирования эмиссии изопрена от лесных массивов (биогенный источник) используется механизм, предложенный в модели MEGAN, эмиссия изопрена рассчитывается на основе глобальных данных о скорости эмиссии изопрена и индекса листового покрова с учетом метеорологических условий.

Моделирование химических и фотохимических реакций проводится на основе полуэмпирической кинетической схемы образования приземного озона [4]. В кинетической схеме учитываются 19 химических реакций между следующими компонентами:  $NO_2$  (диоксид азота),  $NO$  (монооксид азота),  $O(^1D)$  (возбужденное состояние атомарного кислорода),  $O(^3P)$  (основное состояние атомарного кислорода),  $O_3$  (озон),  $HO$  (гидроксильный радикал),  $H_2O_2$  (перекись водорода),  $HO_2$  (гидропероксидный радикал),  $CO$  (оксид углерода),  $SO_2$  (диоксид серы),  $HC$  (углеводороды),  $HCHO$  (формальдегид),  $RO_2$  (пероксидные радикалы),  $O_2$  (молекулярный кислород),  $N_2$  (молекулярный азот),  $H_2O$  (водяной пар).

## ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА «UNIQUE» ТРЕХСЛОЙНОЙ АРХИТЕКТУРЫ

В рамках подхода Semantic Web (SW) информационные ресурсы включают в себя данные, информацию и знания. Эти термины в литературе трактуются достаточно широко. Следование складывающейся терминологии подхода SW приводит к использованию терминов «данные», «связанные данные» и «онтологии». В подходе SW интерпретация терминов «данные», «связанные данные» и «онтологии» ассоциируется с семантикой формальных языков (XML, RDF и OWL). Более того, такой интерпретацией обусловлено использование терминов «слой данных и приложений», «информационный слой» и «слой знаний», введенных в e-Science [5] для описания инфраструктуры информационных ресурсов и информационных систем.

Информационно-вычислительная система «UnIQe» предназначена для вычисления концентраций примесей, загрязняющих воздух в атмосферном пограничном слое города, и представления свойств результатов вычисления в форме данных, информации и знаний для исследователей и программных агентов.

Расчет переноса примесей является ресурсоемкой задачей, решение которой можно найти выполнением расчетов на суперкомпьютере с использованием технологий параллельного программирования. Алгоритм решения сеточных уравнений модели переноса примесей адаптирован к проведению расчетов на многопроцессорной вычислительной технике с распределенной памятью. В алгоритме реализован принцип двумерной декомпозиции по данным, обеспечивающий высокую эффективность параллельных вычислений за счет возможности задействовать большее количество процессорных элементов, чем при использовании одномерной декомпозиции.

Особенностью ИВС «UnIQe» является онтологическое представление результатов расчетов по численной модели переноса примеси с учетом химических реакций. В данной работе онтология представляет логическую теорию, описывающую уровни атмосферного пограничного слоя над городом. Схема ИВС «UnIQe» в трехслойной архитектуре показаны на рис. 1. Логическая теория содержит как фактологическую, так и понятийную части.

Фактологическая часть онтологии представляет собой численное описание уровней пограничного слоя. В ИВС автоматически вычисляются значения свойств, характеризующих предсказанные данные о состоянии пограничного слоя. Эти свойства описываются на языке OWL 2 DL в рамках семантического

подхода. Областью применения этих свойств являются уровни пограничного слоя. Вычисленные решения задачи переноса представляют собой наборы данных, обеспеченные метаданными. В число структурных метаданных входят время, на которое вычислено решение, номер уровня в атмосферном пограничном слое, химическая модель в рамках которой проводились вычисления и т.д. Значимым для анализа прогноза (предсказания) является уровень пограничного слоя атмосферы. В математической модели для обоих механизмов химических трансформаций веществ рассмотрено 28 уровней. Изучение динамики изменений концентраций примесей осуществляется с периодом в один час. Фактологическая часть является основной компонентой информационного слоя системы UniQuE.

Понятийная часть онтологии содержит таксономию классов. В ИВС значимые для анализа ситуаций уровни пограничного слоя отнесены к определенным классам. Примером такого отнесения является ситуация проверки достоверности прогностических концентраций 5 разных примесей с измеренными концентрациями. В зависимости от того попадают ли результаты прогноза в допустимый интервал погрешности измеряемой концентрации.

Основным назначением слоя знаний в ИВС «UniQuE» является систематизация свойств решений задачи краткосрочного прогноза качества воздуха, в частности, предоставление пользователю возможности семантического поиска достоверного прогноза качества воздуха с высокой степенью доверия к нему.

Машинная систематизация уровней пограничного слоя и их частей по величине концентраций примесей и по степени совпадения измеренных и предсказанных данных проводится с помощью расширенной версии машины вывода (inference engine) FaCT++ [6].

В качестве примера автоматического отнесения рассмотрено формирование классов, содержащих уровни с недостоверными значениями концентраций примесей. Критерием достоверности расчета является выполнение условия:

$$\{A_{\text{pred}}^S : A_{\text{meas}}^S - D^S < A_{\text{pred}}^S\} \cap \{A_{\text{pred}}^S : A_{\text{pred}}^S < A_{\text{meas}}^S + D^S\}$$

в котором  $A_{\text{meas}}^S$  и  $A_{\text{pred}}^S$  значения измеренной и предсказанной концентраций вещества S, а  $D^S$  погрешность измерения концентрации вещества S.

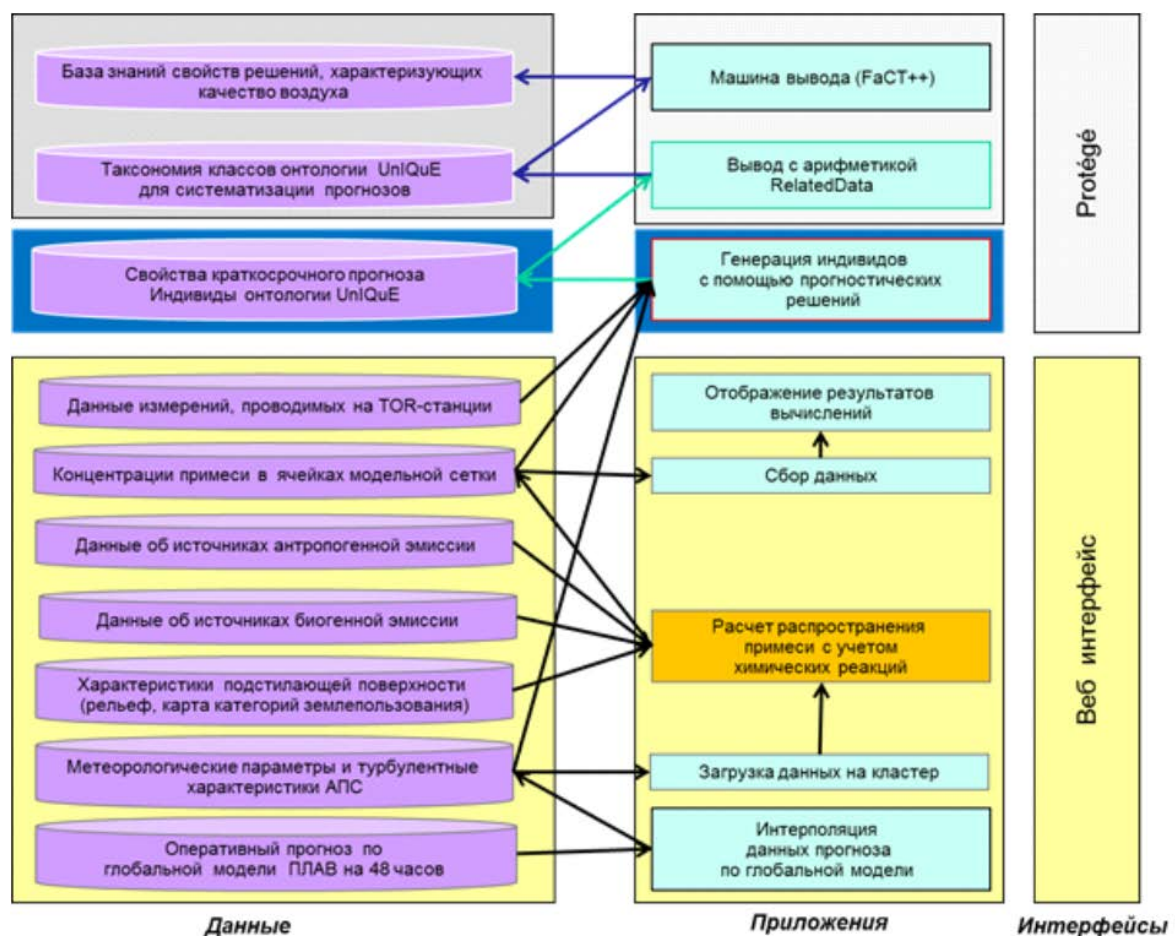


Рис. 1. Трехслойная архитектура ИВС «UniQuE».

Работа выполнена по Государственному заданию министерства образования и науки РФ, № 5.628.2014/К.



**Литература:**

1. Беликов Д. А., Старченко А. В. Численная модель турбулентного переноса примеси в пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т.20. №8. С. 667-673.
2. Толстых М. А., Богословский Н. Н., Шляева А. В., Юрова А. Ю. Полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ // *Гидрометцентр России 80 лет. М: Триада*. 2010. С. 193-216.
3. Guenther A., Karl T., Harley P., Wiedinmyer C., Palmer P. I., Geron C. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (model of emissions of gases and aerosols from nature) // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2006. № 6. P. 3181-3210.
4. Stockwell W. R., Gollif W. S. Comment on «Simulation of a reacting pollutant puff using an adaptive grid algorithm» by R. K. Srivastava et al. // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 4643-4650.
5. De Roue D., Jennings N., Shadbolt N. *A Future e-Science Infrastructure / Report commissioned for EPSRC/DTI Core e-Science Programme*. 2001. 78 p.
6. Tsarkov D., Horrocks I. FaCT++ Description Logic Reasoner: System Description // *Int. Joint Conf. on Automated Reasoning (IJCAR 2006)*. 2006. V. 4130. P. 292-297.

## Using satellite-derived atmospheric motion vectors (AMV) observations in the data assimilation system based on LETKF algorithm

<sup>1</sup>Mizyak V.G., <sup>2</sup>Shlyueva A.V., <sup>1,3</sup>Tolstykh M.A.

<sup>1</sup> Hydrometeorological Research Centre of Russia, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Data Assimilation and Satellite Meteorological Research, Environment Canada, Montreal, Canada

<sup>3</sup> Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: vmizyak@mecom.ru, shlyueva@gmail.com, tolstykh@m.inm.ras.ru

Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) is one of widely used data assimilation algorithms. The data assimilation system based on LETKF is being developed at the Hydrometcentre of Russia. This system prepares initial data (so called objective analysis) for the global semi-Lagrangian atmospheric model SLAV.

An overview of experience of using satellite-derived atmospheric motion vectors (AMV) observations in this system is given. We consider the difficulties encountered and the ways to overcome these difficulties.

Height assignment is the most crucial source of AMVs error. To reduce its impact, the AMVs height reassignment method based on the consistency coefficient between the observed and the background winds is implemented.

The other way to improve the analysis quality is a more accurate specification of the AMV observation errors. This necessitates the use of the non-diagonal observation-error covariance matrix R in the data assimilation scheme.

The results of experiments show improvements in analysis and forecast accuracy.

## Использование данных спутниковых наблюдений AMV в системе усвоения на основе LETKF

<sup>1</sup>Мизьяк В.Г., <sup>2</sup>Шляева А.В., <sup>1,3</sup>Толстых М.А.

<sup>1</sup> Гидрометцентр России, Москва, Россия

<sup>2</sup> Канадский метеорологический центр, Монреаль, Канада

<sup>3</sup> Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

E-mail: vmizyak@mecom.ru, shlyueva@gmail.com, tolstykh@m.inm.ras.ru

Современные системы численного прогноза погоды представляют собой сложные программно-вычислительные комплексы, содержащие помимо численной модели блок подготовки начальных данных. Начальные данные, необходимые для старта прогностической модели, получают путём некоторой оценки состояния атмосферы, выполненной на основе модельного краткосрочного прогноза (первого приближения), смешанного с данными доступных наблюдений. Такая оценка называется анализом, а процесс по его получению называется усвоением данных.

**В усвоении данных возникают следующие трудности:**

- данные метеонаблюдений разнородны и нерегулярны, зачастую измеряют не те переменные, которые входят в уравнения модели;
- как модельные данные, так и данные наблюдений содержат априори неизвестные ошибки, свойства и значения которых могут существенно влиять на получаемый анализ;
- для решения задачи необходимы существенные вычислительные затраты, т.к. порядок размерностей сеток в современных глобальных моделях атмосферы составляет примерно 105 – 106 узлов по горизонтали (при разрешении 0,2° – 1°) и 102 вертикальных уровней, а количество доступных на сегодняшний день наблюдений может иметь порядок от 105 (без использования спутниковых наблюдений) до 107 (при использовании данных наблюдений со спутников).

Данная работа посвящена описанию использования спутниковых наблюдений ветра AMV (Atmospheric Motion Vector) в системе усвоения на основе локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля [1]. Упомянутая система разработана в лаборатории перспективных численных методов Гидрометцентра России [2] и в настоящее время совершенствуется, чтобы достичь уровня оперативной системы усвоения данных. В качестве прогностической модели для получения полей первого приближения используется глобальная оперативная модель атмосферы ПЛАВ [3]. Планируется, что полученные с помощью разрабатываемой системы поля анализов будут использоваться в качестве стартовых полей для ансамблевого среднесрочного прогноза в Гидрометцентре России. В настоящее время в усвоении участвуют следующие виды наблюдений: радиозонды TEMP, наземные и корабельные наблюдения SYNOP, -SHIP, самолетные наблюдения AIREP, спутниковые наблюдения SATOB, AMV.

### ЛОКАЛЬНЫЙ АНСАМБЛЕВЫЙ ФИЛЬТР КАЛМАНА С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ АНСАМБЛЯ (LETKF)

LETKF [1] является одним из алгоритмов решения задачи усвоения данных, которые используются в прогностических центрах. Его отличительной особенностью является переход от задачи порядка размерности модельных полей ( $\sim 10^8$ ) к задаче размерности порядка  $10^2$ . Этот переход становится возможным благодаря тому, что вместо одного набора модельных прогнозов, используется так называемый ансамбль, состоящий из нескольких десятков прогнозов, отличных друг от друга. Размерность ансамбля обычно варьируется от 40 до 80 участников.

Алгоритм фильтра Калмана применяется для оценки неизвестного состояния системы, истинное значение которого вводится в качестве вектора размерности  $n$   $x^t = (x_{t1}, \dots, x_{tm})^T$ . Вектор первого приближения (априорная информация, краткосрочный модельный прогноз) обозначается как  $x^b = (x_{b1}, \dots, x_{bn})^T$  и имеет ту же размерность  $n$ . Также мы имеем вектор наблюдений размерности  $m$ . Наблюдения могут находиться в точках, отличных от точек, в которых находятся интересующие нас величины, и не совпадать с ними физически. Для того, чтобы иметь возможность сопоставления вектора состояния вектору наблюдений вводится оператор наблюдений  $H$ , который проецирует вектор состояния в пространство наблюдений. Нас интересует оценка истинного состояния, которую обозначают  $x^a = (x_{a1}, \dots, x_{an})^T$  размерности  $n$  и ищут в виде:

$$x^a = x^b + \mathbf{K} [y^o - \mathbf{H} x^b],$$

где  $\mathbf{H}$  – линеаризация оператора  $H$ , представляет собой матрицу  $m \times n$ ,  $\mathbf{K}$  – весовая матрица размерности  $n \times m$ , компоненты которой в этом случае и подлежат определению. Для определения этой матрицы вводятся следующие обозначения для ошибок:

$$\varepsilon^a = x^a - x^t - \text{ошибка анализа};$$

$$\varepsilon^o = y^o - H(x^t) - \text{ошибка наблюдений};$$

$$\varepsilon^b = x^b - x^t - \text{ошибка первого приближения}.$$

Важными являются следующие ограничения, накладываемые на описанные выше ошибки:

1. Все ошибки несмещённые и имеют Гауссову плотность распределения, т.е.

$$E[\varepsilon^a] = E[\varepsilon^o] = E[\varepsilon^b] = 0.$$

2. Ошибки первого приближения и ошибки наблюдений некоррелированы, т.е.

$$\text{cov}(\varepsilon^b, \varepsilon^o) = E[\varepsilon^b(\varepsilon^o)^T] = E[\varepsilon^o(\varepsilon^b)^T] = 0.$$

Таким образом, ошибки наблюдений и ошибки первого приближения при сделанных допущениях могут быть полностью описаны своими ковариационными матрицами:

$$\mathbf{P}^b = \langle \varepsilon^o(\varepsilon^o)^T \rangle - \text{матрица ковариаций ошибок наблюдений};$$

$$\mathbf{P}^a = \langle \varepsilon^b(\varepsilon^b)^T \rangle - \text{матрица ковариаций ошибок первого приближения}.$$

Тогда оптимальной в смысле метода наименьших квадратов оценкой вектора состояния будет вектор анализа  $x^a$ , в котором

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}^b \mathbf{H}^T (\mathbf{R} + \mathbf{H} \mathbf{P}^b \mathbf{H}^T)^{-1}.$$

Предполагается, что входящие в это выражение матрицы  $\mathbf{R}$  и  $\mathbf{H}$  мы задаём. Сложность представляет матрица  $\mathbf{P}^b$ , которая в случае применения данного алгоритма в чистом виде состоит из  $10^8 \times 10^8$  элементов. Алгоритм локального ансамблевого фильтра с преобразованием ансамбля LETKF позволяет вместо прямого использования этой матрицы применять её оценку, полученную на основе информации о разбросе ансамбля прогнозов вокруг своего среднего состояния. Более подробно ознакомиться с описанием алгоритма LETKF можно в статье [1].

Ключевыми преимуществами данного алгоритма (помимо отсутствия необходимости в прямом использовании полной матрицы  $\mathbf{P}^b$ ) являются локализация наблюдений (в усвоении участвуют только те наблюдения, которые попадают в некоторый наперёд заданный радиус локализации) и возможность эффективного распараллеливания по данным [4] из-за того, что анализ формируется независимо в каждой точке модельной сетки.

## УСВОЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ВЕТРА (AMV)

Наблюдения AMV получают, отслеживая передвижения облаков или скоплений водяного пара по сериям спутниковых изображений, сделанных в различных диапазонах частот (видимый, инфракрасный, водяной пар). По положению одинаковых структур на изображениях, сделанных спутниками через равные промежутки времени, делают вывод о скорости и направлении ветра в точке наблюдения.

Большим преимуществом этого вида наблюдений, обуславливающим необходимость его использования в системах усвоения данных, является глобальное покрытие земного шара данными AMV. Зачастую наблюдения AMV являются единственным источником данных о ветре в тропосфере над некоторыми акваториями океанов и в верхних широтах [5], в т.ч. арктических. Кроме того, этому виду наблюдений свойственно высокое пространственное и временное разрешение, а характеристики измерений легко приводятся к модельным переменным, что существенно упрощает применяемый при их усвоении оператор  $\mathbf{H}$ .

Основным источником ошибки при получении данных наблюдений AMV является определение высоты, т.е. определение давления, на котором наблюдается ветер (чаще всего в давление преобразовывается температура, определённая по насыщенности цвета отслеживаемых структур, с использованием прогностических профилей температуры). Исследования ошибок в наблюдениях AMV показывают, что ошибка присвоенной наблюдению высоты может достигать 150-160 гПа в зависимости от применяемого метода определения, спутника и канала [6].

Естественным решением данной проблемы является переопределение высоты наблюдения AMV, в случае, если присвоенная высота используемого в усвоении наблюдения не удовлетворяет некоторым установленным критериям. В наших экспериментах для переопределения высоты использовались результаты, опубликованные в работе [7].

Для определения новой высоты или принятия решения об использовании того значения, которое было определено производителем наблюдения используется следующий алгоритм, в котором наблюдаемые значения ветра AMV сравниваются с модельными прогнозами ветра.

Для каждого  $i$ -го наблюдения вектора скорости  $V_i$  вычисляется коэффициент согласованности с  $m$ -м соседним вектором скорости  $V_m$ :

$$\rho_{im} = D_{im} L_{im},$$

где  $L_{im} = 1 - \frac{|V_i| - |V_m|}{\max(|V_i|, |V_m|)}$  – коэффициент согласованности скорости,  $D_{im} = \cos \theta_{im}$  – коэффициент согласованности направления,  $\theta_{im}$  – разность векторов.

Общая согласованность ветра AMV в  $i$ -ой точке с окружающим полем ветра внутри заданного радиуса  $R$  (в нашем случае  $R = 200$  км) на заданной в наблюдении высоте вычисляется по формуле:

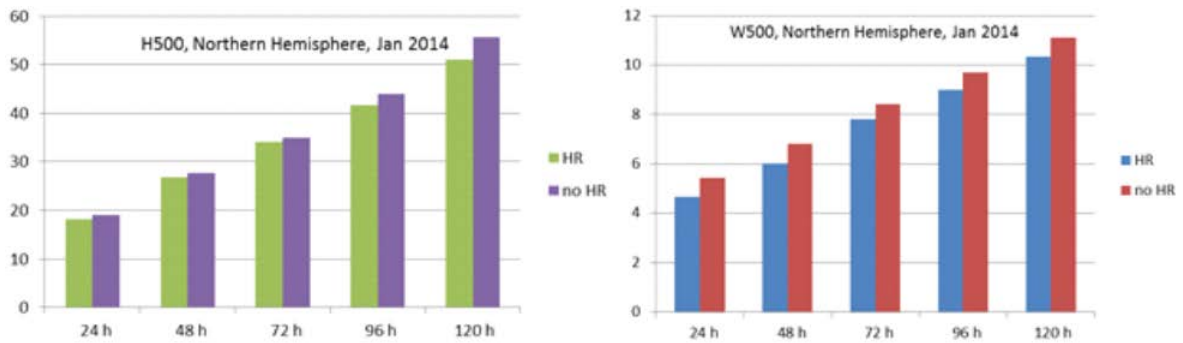
$$\bar{\rho}_i = \frac{\sum_m \rho_{im} \cdot G_{im}}{\sum_m G_{im}}, \quad G_{im} = e^{\left(1 - \frac{2r_{im}}{R}\right)}, \quad r_{im} \leq R; \\ G_{im} = 0, \quad r_{im} > R,$$

где весовая функция  $G_{im}$  зависит от расстояния  $r_{im}$  между точкой  $i$ -го наблюдения и  $m$ -й точкой модельной сетки.

В зависимости от значения  $\bar{\rho}_i$  принимается решение о необходимости переопределения высоты. Если значение  $\bar{\rho}_i$  превышает некоторое наперёд заданное критическое значение  $\rho_0$  (в нашем случае 0,7), то значение высоты остаётся прежним. В случае если этого не происходит, берутся несколько модельных вертикальных уровней в пределах, зависящих от первоначальной высоты наблюдения (максимум  $\pm 250$  гПа), и процедура повторяется для всех попадающих в этот промежуток уровней. Новая высота соответствует модельному уровню, на котором коэффициент согласованности  $\bar{\rho}_i$  максимален. Если на всех использованных для переопределения высоты уровнях  $\bar{\rho}_i < \rho_0$ , наблюдение отбрасывается из числа подлежащих усвоению.

Для оценки эффективности данной схемы переопределения высоты наблюдений AMV использовались рассчитанные по стандартам CBS/WMO оценки ошибок прогнозов глобальной модели атмосферы

ПЛАВ [3], стартовавшей с полей анализов, полученных с помощью описываемой в данной работе системы усвоения. Разрешение модели составляло  $0,9 \times 0,72$  градуса по долготе и широте соответственно, 28 уровней по вертикали. Сравнение проводилось с полями оперативного анализа Гидрометцентра РФ. На рисунке 1 представлены результаты.



**Рис. 1.** Сравнение прогнозов, стартовавших с анализов, для которых усваивались наблюдения AMV без использования переопределения высоты (noHR) и с переопределением высоты (HR). Представлены осреднённые за январь 2014 года среднеквадратичные ошибки H500 (слева) и среднеквадратичные ошибки вектора скорости ветра W500 (справа) в северном полушарии.

Другим направлением улучшения качества получаемых анализов является учёт корреляций между ошибками в матрице ковариаций ошибок наблюдений  $R$ . С учетом ограниченных вычислительных ресурсов, чаще всего полагают, что ошибки наблюдений не зависят друг от друга и в этом случае матрица ковариаций ошибок наблюдений принимает диагональный вид, где на диагонали располагаются значения дисперсий ошибок каждого используемого в усвоении наблюдения. При таком подходе нет необходимости в вычислении обратной матрицы  $R^{-1}$ .

Это отчасти справедливо для контактных наблюдений, таких как наблюдения с радиозондов, приземных и корабельных метеостанций. В случае использования инструментов, расположенных на спутниках, предположение о независимости ошибок наблюдений нарушается ([8], [9] и др.), что негативно сказывается на качестве анализа, при производстве которого используются данные спутниковых наблюдений в предположении о некоррелированности их ошибок между собой.

Для того чтобы обойти этот недостаток, до недавнего времени было принято существенно прореживать наблюдения, что позволяло избавиться от корреляций ошибок в ближайших наблюдениях и пренебречь малыми корреляциями в далёких [10]. Кроме того, для придания меньшего веса спутниковым данным в ходе усвоения было принято заведомо увеличивать дисперсии ошибок наблюдений. В условиях дефицита вычислительных ресурсов эти шаги позволяли не отказываться от более эффективного с точки зрения вычислений использования диагональной матрицы  $R$ .

В то же время отбрасывание наблюдений и отказ от учёта корреляции в их ошибках лишает нас части информации, которая могла бы быть использована более эффективно. Кроме того, алгоритм LETKF предполагает параллельное усвоение в каждой точке модельной сетки только тех наблюдений, которые попадают в некоторый радиус локализации, поэтому при всё более растущих вычислительных возможностях кажется разумным применение имеющей недиагональный вид матрицы  $R$ , которая более полно соответствует действительности. В настоящее время ведётся работа по использованию в усвоении матрицы такого вида. Информация о наличии корреляций в ошибках наблюдений AMV, об их структуре и величине нами была взята из статьи [11]. Результаты планируется представить на конференции CITES-2015.

Кроме того, ведутся исследования в области усвоения спутниковых наблюдений ASCAT. Предполагается использование разрабатываемой системы усвоения данных для генерации начальных данных системы ансамблевого среднесрочного прогнозирования.

*Исследование выполнено в Гидрометцентре России за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-37-00053)*

#### Литература:

1. B. R. Hunt, E. J. Kostelich, and I. Szunyogh. Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 230(1-2):112–126, June 2007.
2. A. V. Shlyayeva, M. A. Tolstykh, V. G. Mityak, V. S. Rogutov. Local ensemble transform Kalman filter data assimilation system for the global semi-Lagrangian atmospheric model. *Russ. J. Num. An. & Math. Mod.* 2013 V 28 N 4 P 419-441.
3. М.А. Толстых, Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. М, Обнинск: ОАО ФОП, 111 стр.

4. Мизяк В.Г., Шляева А.В., Толстых М.А. Параллельная реализация локального ансамблевого фильтра Калмана для усвоения атмосферных данных. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/hidden/1102.html>
5. Forsythe, M., Saunders, R., 2008a. AMV errors: a new approach in NWP. *Proceedings of the 9th International Wind Workshop, Annapolis, Maryland, USA, 14-18 April 2008 EUMETSAT P.51.*
6. Salonen, K., Bormann, N., 2011. Accounting for the characteristics of AMV observation errors in data assimilation. *Proceedings of the 2011 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Oslo, Norway, 5-9 September 2011 EUMETSAT P.59.*
7. ang Chengyin, Lu Qifeng, and Zhang Peng, 2012: A study on height reassignment for the AMV products of the FY-2C satellite. *Acta Meteor. Sinica*, 26(5), 614–628, doi: 10.1007/s13351-012-0506-4.
8. N. Bormann, A. Collard, P. Bauer. – Estimates of spatial and inter-channel observation error characteristics for current sounder radiances for NWP. – 2009. ECMWF Technical Memorandum 600.
9. P. P. Weston, W. Bell and J. R. Eyre. Accounting for correlated error in the assimilation of high-resolution sounder data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. Volume 140, Issue 685, pages 2420–2429, October 2014 Part B.*
10. G. Desroziers. – Observation error specification. – 2012, Presentation at International Summer School on Data Assimilation, Les Houches, France.
11. N. Bormann, S. Saarinen, G. Kelly, J.-N. Thepaut. – The spatial structure of observation errors in Atmospheric Motion Vectors from geostationary satellite data. – 2003, *QJRMS*, 131, pp. 706–718.

## The use of ASCAT ocean surface wind satellite observations in the data assimilation system based on the Local Ensemble Kalman Filter

<sup>1</sup>Rogutov V.S., <sup>2</sup>Tolstykh M.A., <sup>3</sup>Shlyueva A.V.

<sup>1</sup> Hydrometeorological Research Centre of Russia, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Data Assimilation and Satellite Meteorological Research, Environment Canada, Montreal, Canada

E-mail: [rogutovv@mail.ru](mailto:rogutovv@mail.ru), [tolstykh@inm.ras.ru](mailto:tolstykh@inm.ras.ru), [shlyueva@gmail.com](mailto:shlyueva@gmail.com)

The atmospheric data assimilation system based on the Local Ensemble Transform Kalman Filter (LET-KF) is being developed at the Hydrometcentre of Russia. Current implementation of this system operates with surface stations, ships, radiosondes, AIREP aircrafts observations and SATOB satellite observations of wind speed and direction.

Satellite observations are especially important for data assimilation in ocean areas, where there is a lack of conventional observations. The impact of ASCAT observations in LETKF assimilation system is discussed in this report. ASCAT (Advanced SCATerometer) data contain ocean surface wind observations at 12.5 and 25 km scale and have global coverage.

ASCAT data were used in assimilation cycle together with operational global semi-Lagrangian atmospheric model SL-AV with 0.9x0.72 degrees lon-lat horizontal resolution and 28 vertical sigma-levels. Experiments proved positive impact of ASCAT ocean surface wind observations on the numerical weather prediction accuracy.

# Использование спутниковых данных наблюдений ветра на уровне моря ASCAT в системе усвоения на основе локального ансамблевого фильтра Калмана

<sup>1</sup>Рогутов В.С., <sup>2</sup>Толстых М.А., <sup>3</sup>Шляева А.В.

<sup>1</sup> Гидрометцентр России, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Канадский метеорологический центр, Монреаль, Канада

E-mail: rogutovv@mail.ru, tolstykh@inm.ras.ru, shlyeva@gmail.com

## ВВЕДЕНИЕ

Для расчетов численных прогнозов погоды требуются начальные данные. Оценку состояния атмосферы на модельной сетке в заданный момент времени получают с помощью системы усвоения данных наблюдений, и точность прогноза во многом определяется точностью этой оценки. Система усвоения для получения оценки текущего состояния атмосферы (объективного анализа) использует 6 часовой прогноз (первое приближение), полученный с использованием предыдущего анализа, и данные наблюдений.

Прямые (или контактные) наблюдения в основном сосредоточены над сушей. Спутниковые наблюдения имеют глобальное покрытие, поэтому усвоение спутниковых данных играет особенно большую роль для определения текущего состояния атмосферы над океанами, где количество прямых наблюдений невелико.

В Гидрометцентре России разрабатывается система усвоения данных [7] на основе локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля (Local Ensemble Transform Kalman Filter - LETKF) [5]. В данной работе приведены предварительные результаты использования в LETKF данных приводного ветра, полученных с помощью скаттерометров ASCAT.

В локальном ансамблевом фильтре Калмана используется ансамбль первых приближений для вычисления ансамбля анализов. Эти ансамбли позволяют аппроксимировать матрицы ковариаций ошибок прогнозов и наблюдений, кроме того, вычисления в пространстве ансамбля первых приближений позволяют существенно сократить объемы вычислений. Уравнения фильтра можно записать в следующем виде

$$\bar{x}^a = \bar{x}^b + X^b \tilde{P}^a (HX^b)^T R^{-1} (y - H\bar{x}^b)$$

$$X^a = X^b [(k-1)\tilde{P}^a]^{1/2}$$

$$\tilde{P}^a = [(k-1)I + (HX^b)^T R^{-1} (HX^b)]^{-1}$$

Здесь  $\bar{x}^a$  и  $\bar{x}^b$  – средние по ансамблям анализ и первое приближение,  $X_a$  и  $X_b$  – ансамбли отклонений анализов и первых приближений от среднего,  $k$  – размер ансамблей (обычно, несколько десятков),  $H$  – оператор наблюдений,  $y$  – вектор наблюдений,  $R$  – матрица ковариации ошибок наблюдений,  $\tilde{P}^a$  – матрица ковариации ошибок анализа в пространстве ансамбля первых приближений размерности  $k \times k$ .

К достоинствам LETKF можно отнести возможность оценивать матрицы ковариаций в ходе усвоения. В процессе работы LETKF генерируется ансамбль начальных состояний, востребованный для ансамблевых прогнозов погоды.

В текущей версии LETKF реализовано усвоение следующих данных наблюдений:

1) Наблюдения на наземных станциях и судовые наблюдения приземного давления, приземной влажности, температуры на уровне 2 метра, компонентов скорости ветра на уровне 10 метров (около 10000 наблюдений в 00, 06, 12 и 18 часов).

2) Наблюдения радиозондов на 16 стандартных уровнях температуры, влажности и компоненты скорости ветра (около 600 – 700 радиозондов в 00 и 12 часов, около 70 - 90 радиозондов в 06 и 18 часов).

3) Самолетные наблюдения температуры и компонент скорости ветра (около 4000 – 11000 наблюдений).

4) Спутниковые наблюдения компонент скорости ветра (SATOВ) (более 20000 наблюдений).

Также идут работы по использованию в системе усвоения спутниковых данных AMV (Atmospheric Motion Vector) скорости ветра в атмосфере [Мизяк, труды этой конф.] и данных скаттерометров ASCAT (Advanced SCATterometer) скорости ветра над поверхностью моря (приводного ветра).

## ДААННЫЕ ASCAT И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В СИСТЕМЕ УСВОЕНИЯ.

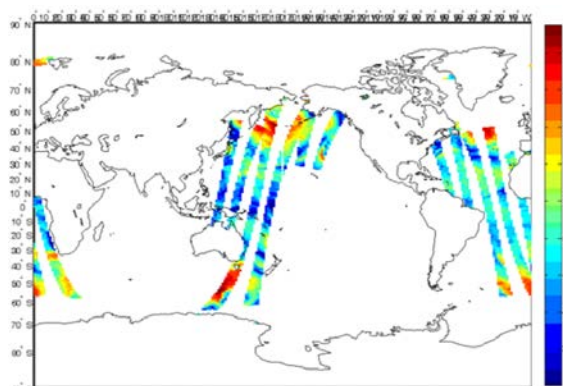
Скаттерометр – это активный зонд, размещенный на спутнике и работающий в микроволновой области (обычно в Ku-диапазоне или в C-диапазоне). Скаттерометры излучают электромагнитную волну и принимают отраженный от поверхности сигнал. Интенсивность отраженного от поверхности моря сигнала зависит от формы поверхности, которая в свою очередь зависит от скорости ветра на поверхности

сти. Экспериментально было найдено, что скорость и направление ветра хорошо описывают изменение интенсивности отраженного от поверхности океана сигнала при небольших углах падения [6]. Таким образом, интенсивность отраженного сигнала позволяет определить скорость и направление ветра на поверхности моря. Кроме того, данные скаттерометров также позволяют оценить покрытие поверхности моря льдом и влажность почвы на поверхности суши.

Первые скаттерометр был размещен на спутнике Seasat, запущенном в 1978 г. Он проработал 3 месяца. Следующими стали ERS1 и ERS2, запущенные в 1991 и 1995 г, NSCAT в 1996, QuickSCAT в 1999, SeaWind в 2002 и др.

Скаттерометры ASCAT размещены на спутниках METOP-A и METOP-B Европейского космического агентства (ESA), запущенных в 2006 и 2012г. Спутники METOP - это полярно-орбитальные спутники, что обеспечивает глобальное покрытие данными. Скаттерометры ASCAT работают на частоте 5.255 ГГц и измеряют скорость приводного ветра в двух полосах шириной 500 км на расстоянии 600 км друг от друга. Для усвоения доступны данные с разрешением 12.5 и 25 км.

На рис. 1 приведено покрытие данными ASCAT в 6 часовом окне усвоения.



**Рис. 1.** Скорость приводного ветра по данным АСКАТ в 6 часовом окне усвоения с 22 часов 9 ноября до 3 часов 10 ноября 2014 г.

В [3] было показано, что данные приводного ветра Seasat оказывают значительное влияние на анализ поверхностных полей. Авторы работы [4] использовали данные скаттерометров ERS1 в оперативной системе усвоения Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), основанной на схеме оптимальной интерполяции. Им не удалось получить улучшения качества прогноза. Однако, позднее в экспериментах метеослужбы Великобритании (Met Office) удалось получить повышение качества анализов при использовании тех же данных [2]. Использование данных скаттерометров приводило к значительному уменьшению ошибок прогнозов.

Данные ASCAT особенно важны при усвоении данных над океанами, где количество прямых наблюдений невелико. Хотя наличие льда на поверхности не позволяет скаттерометрам определить скорость ветра, с потеплением климата и сокращением площади полярных льдов эти данные со временем, возможно, будут играть все большую роль при усвоении данных в арктическом регионе.

Было реализовано усвоение данных ASCAT в системе усвоения на основе LETKF [9]. Были проведены эксперименты по циклическому усвоению данных ASCAT совместно с оперативной версией глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ [1] с разрешением  $0.9 \times 0.72$  градуса по долготе и широте соответственно, 28 сигма-уровней по вертикали. По полученным в результате циклического усвоения ансамблям анализов вычислялись средние анализы, средние анализы использовались для запуска прогнозов погоды на 120 часов. Данные ASCAT с высоким пространственным разрешением (12.5 км) обладают значительными погрешностями, и кроме того, ошибки соседних наблюдений могут быть скоррелированы. При этом пространственное разрешение используемой версии модели ПЛАВ не позволяет воспроизводить атмосферные процессы на таких масштабах. Поэтому при усвоении эти данные были сгруппированы в супернаблюдения с пространственным разрешением, сравнимым с шагом модели.

Проведено два эксперимента, с использованием данных ASCAT и без их использования. На рис.2 приведены разности среднего анализа и первого приближения (фон), а также разности наблюдения и первого приближения в точках супернаблюдений 10 ноября 2014 года в 0 часов. В таб. 1 приведены оценки погрешностей полученных прогнозов в южном полушарии (южнее  $20^\circ$  ю.ш.) по сравнению с данными реанализов NCEP. Усреднение погрешностей проводилось в сроки 0 и 12 часов.

Проведено два эксперимента, с использованием данных ASCAT и без их использования. На рис.2 приведены разности среднего анализа и первого приближения (фон), а также разности наблюдения и первого приближения в точках супернаблюдений 10 ноября 2014 года в 0 часов. В таб. 1 приведены оценки погрешностей полученных прогнозов в южном полушарии (южнее  $20^\circ$  ю.ш.) по сравнению с данными реанализов NCEP. Усреднение погрешностей проводилось в сроки 0 и 12 часов.

**Таблица 1.** Средняя и среднеквадратическая погрешности прогнозов в южном полушарии некоторых величин (скорости ветра (W) на p-уровнях 1000, 850 и 500 гПа и высота геопотенциала H850, H500) в 24 и 120 часовых прогнозах.

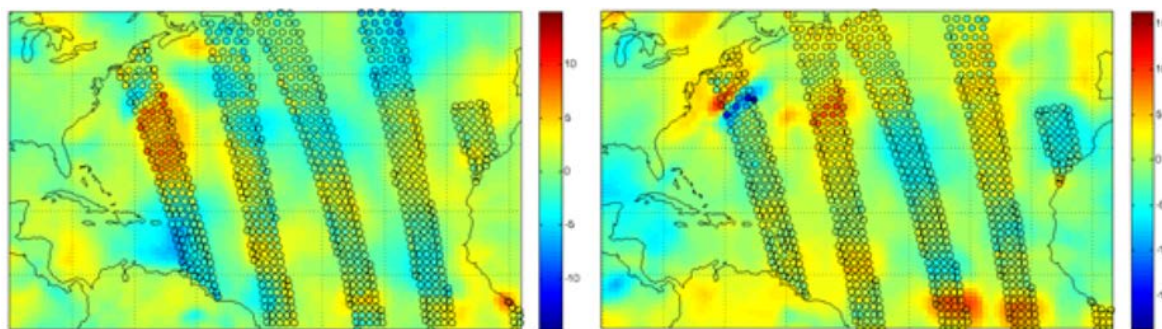
Величина и p-уровень	Средняя ошибка, без ASCAT	Средняя ошибка, с ASCAT	RMSE, без ASCAT	RMSE, с ASCAT	Заблаговременность прогноза, ч.
W1000, м/с	-0,297	-0,352	4,298	4,264	24
W1000, м.с	-0,623	-0,541	8,44	8,307	120
H850, м	-0,991	0,646	28,356	28,834	24

Величина и р-уровень	Средняя ошибка, без ASCAT	Средняя ошибка, с ASCAT	RMSE, без ASCAT	RMSE, с ASCAT	Заблаговременность прогноза, ч.
H850, м	4,69	5,826	65,323	63,852	120
W850, м/с	-0,858	-0,966	5,087	5,1	24
W850, м/с	-1,304	-1,223	10,085	9,925	120
H500, м	-1,6	-0,233	30,331	31,432	24
H500, м	6,711	7,965	87,13	84,328	120
W500, м/с	0,032	-0,94	6,808	6,898	24
W500, м/с	0,097	-1,232	14,505	14,286	120

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение результатов численных экспериментов показывает, что использование спутниковых данных ASCAT в системе усвоения данных наблюдений позволяет уменьшить ошибки 120 часовых прогнозов. Ошибки уменьшаются в том числе и на больших высотах (H500). Положительный эффект от использования данных ASCAT более заметен в 120 часовых прогнозах. Таким образом, использование данных ASCAT позволяет лучше воспроизводить динамику атмосферы с помощью глобальной модели. Наиболее заметный эффект получается в Южном полушарии, где количество контактных наблюдений относительно невелико.

*Исследование выполнено в Гидрометцентре России за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-37-00053)*



**Рис. 2.** Разность среднего анализа и первого приближения (фон) и разности наблюдения и первого приближения в точках супернаблюдений (обведены черными кругами) для супернаблюдений 10 ноября 2014 года в 0 часов [м/с]. Слева – зональная компонента скорости ветра, справа – меридиональная компонента.

### Литература:

1. Толстых М. А. Полулагранжева модель атмосферы с высоким разрешением для численного прогноза погоды. - *Метеорология и гидрология*, 2001, №4, С. 4 – 16.
2. Andrews P. L. and Bell R. S. Optimizing the United Kingdom Meteorological Office data assimilation for ERS-1 scatterometer winds. *Mon. Weather Rev.*, 1998, Vol.126, pp.736–746.
3. Baker, W.E., Atlas R., Kalnay E., et al. Large-scale analysis and forecast experiments with wind data from the Seasat-A scatterometer. *J. Geophys. Res.*, 1984, Vol. 89, pp. 4927– 4936.
4. Hoffman, R. N. A preliminary study of the impact of the ERS 1 C band scatterometer wind data on the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts global data assimilation system. - *J. Geophys. Res.*, 1993, Vol.98, pp.10233–10244.
5. Hunt B. R., Kostelich E. J. and Szunyogh I. Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter - *Physica D: Nonlinear Phenomena.*, 2007, Vol.230, pp. 112–126.
6. Isaksen L., Jannsen P. Impact of ERS scatterometer winds in ECMWF's assimilation system. - *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2004, Vol.130, pp. 1793–1814.
7. Shlyaeva A., Tolstykh M., Mzyak V., Rogutov V. Local ensemble transform Kalman filter data assimilation system for the global semi-Lagrangian atmospheric model. - *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2013 №28, p. 419–442.



# Influence of climatic changes on a prevalence of cardio-vascular diseases in Tomsk: first results

<sup>1</sup>Gordov E.P., <sup>1</sup>Genina E.Yu., <sup>2</sup>Garganeeva A.A., <sup>2</sup>Okrugin S.A., <sup>2</sup>Borel K.N., <sup>3</sup>Chudinov I.L.

<sup>1</sup> Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> Research Institute for Cardiology Tomsk, Russia

<sup>3</sup> Tomsk Polytechnic University, Russia

E-mail: [gordov@scert.ru](mailto:gordov@scert.ru)

Influence of weather forming factors and climate changes on human beings is of a great interest now. However, only few regional studies have been carried out and they concerned mostly Moscow, Northern part of European territory of Russia and Yakutiya [1]. Only case studies were done in West Siberia. Thus, in Tomsk two researches were carried out in 1980s on investigation of influence of heliometeorological factors on raise of acute myocardial infarction. These researches have shown that the days with abrupt weather changes are the most unfavorable [2] for such a disease as well as days with magnetic storms. The most frequently acute myocardial infarction has been registered in those days when magnetic storm coincided with abrupt weather change.

Recently in West Siberia, and also in Tomsk, a number of extreme weather events increased [3], that can have adverse effect on population health, resulting in increase of cardio-vascular diseases including acute myocardial infarction.

In this work we analyzed correlation between number of heart attacks and changes of meteorological parameters. For analysis we used database on acute myocardial infarction acquired in accordance with World Meteorological Organization program using standard data acquisition technique, as well as 8-hour daily observations of Tomsk weather station included into Global network for climate monitoring. Data on acute myocardial infarction have been taken from information-analytical database created in collaboration with National Research Tomsk Polytechnic University. First results are presented.

## References:

1. *Second evaluation report of ROSGIDROMET on climate changes and their consequences on Russian territory. Chapter 6. Influence of climate changes on economic entities and population health and adaptation measures. Moscow: ROSGIDROMET, 2014.*
2. *Okrugin S.A., Zyryanova T.M., Stroiteleva G.P., Rusanov V.I., Plotnikova N.D. Influence of meteorological factors on raise of acute myocardial infarction // Cardiology.– 1990.– V. 12.– P.*
3. *Evgeny Gordov, Tamara Shulgina. On-Going Temperature Extremes in Siberia // Abs. of Reports at AGU Fall Meeting. – San Francisco, 15-19 December 2014, GC31B-0454*

## Влияние климатических изменений на частоту возникновения сердечно-сосудистых заболеваний в г. Томске: первые результаты

<sup>1</sup>Гордов Е.П., <sup>1</sup>Генина Е.Ю., <sup>2</sup>Гарганеева А.А., <sup>2</sup>Округин С.А., <sup>2</sup>Борель К.Н., <sup>3</sup>Чудинов И.Л.

<sup>1</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup> НИИ Кардиологии, Томск, Россия

<sup>3</sup> Томский политехнический университет, Россия

E-mail: [gordov@scert.ru](mailto:gordov@scert.ru)

Проблема влияния погодообразующих элементов и климата в целом на жизнедеятельность человека, и в том числе, на частоту возникновения и течение патологических процессов, вызывает большой интерес в научном и практическом плане. Однако, проводимые исследования пока имеют региональный характер, и, в основном, касаются Москвы, Севера европейской части России и Якутии [1]. В Западной Сибири подобные исследования имели единичный характер. Так, в Томске в 80-х годах прошлого века и начале нынешнего были проведены два исследования по изучению влияния гелиометеорологических факторов на возникновение острого инфаркта миокарда (ОИМ), которые показали, что наиболее неблагоприятными в этом плане являются дни с контрастной сменой погоды [2]. Было также показано, что в дни магнитных бурь среднесуточное число случаев заболевания ОИМ было выше, чем в предшествующий день, в последующие за магнитной бурей дни число случаев заболевания снижалось, но достоверно значимым это снижение становилось только на третий день. Наиболее часто

случаи ОИМ фиксировались в день с сочетанием магнитной бури и контрастной сменой погоды. Также было показано, что на частоту развития ОИМ влияют и колебания параметров озоносферы, особенно в теплый период года [3].

В Западной Сибири, в частности, в Томске в последнее время возросло количество экстремальных погодных явлений [4], что может оказывать неблагоприятное влияние на здоровье населения, в частности, на рост числа сердечно-сосудистых заболеваний, включая ОИМ.

В данной работе предпринята попытка выявить корреляционные связи между количеством сердечных приступов и метеопараметрами. Для анализа были использованы данные изучения эпидемиологии ОИМ по программе ВОЗ «Регистр острого инфаркта миокарда» с использованием стандартной методики сбора материала и унифицированного подхода к диагностике, и результаты восьмисрочных наблюдений за основными метеорологическими параметрами станции Томск, включенной в Глобальную сеть наблюдений за климатом. Непосредственно сведения о частоте возникновения ОИМ были взяты из информационно-аналитической базы данных Регистра, созданной совместно с Национальным исследовательским Томским политехническим университетом. В докладе приведены первые результаты исследований.

#### **Литература:**

1. *Второй оценочный доклад РОСГИДРОМЕТА об Изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Раздел 6. Воздействия изменения климата на хозяйственные объекты и здоровье населения и меры адаптации к этим воздействиям.* Москва: Росгидромет, 2014.
2. *Округин С.А., Зырянова Т.М., Строителева Г.П., Русанов В.И., Плотникова Н.Д. Влияние метеорологических факторов на развитие инфаркта миокарда. Кардиология 1990; 12: 71-73.*
3. *Зуев В.В., Зуева Н.Е., Зяблов Ю.И., Округин С.А. Связь колебаний озоносферы, модулирующих уровень УФ-В солнечной радиации, и циклов острых инфарктов миокарда. Оптика атмосферы и океана 2005; 7: 627-632.*
4. *Evgeny Gordov, Tamara Shulgina. On-Going Temperature Extremes in Siberia // Abs. of Reports at AGU Fall Meeting. – San Francisco, 15-19 December 2014, GC31B-0454*

**SESSION**  
Complex study  
of the state  
and climate  
variability  
of the East  
Siberian sector  
of Arctic

**СЕКЦИЯ**  
Комплексное  
исследование  
состояния  
и климатической  
изменчивости  
Восточно-  
Сибирского сектора  
Арктики

Совместная  
гидродинамическая  
система дельты реки Лена  
и шельфовой зоны моря  
Лаптевых: численные  
эксперименты  
и предварительные  
результаты

Платов Г.А., Шлычков В.А., Климова Е.Г.,  
Крылова А.И.

Институт вычислительной математики и  
математической геофизики СО РАН, Новосибирск,  
Россия  
E-mail: [platov.g@gmail.com](mailto:platov.g@gmail.com)

В работе представляется развитая система численных гидродинамических моделей, включающая дельту реки Лена и шельфовую зону моря Лаптевых. Демонстрируются и обсуждаются результаты предварительных экспериментов. При определенной настройке параметров модели и в результате включения описания дополнительных физических механизмов были выявлены возможные причины расхождения данных наблюдений и результатов численного эксперимента. Намечены пути дальнейшего совершенствования системы моделей и определен ряд задач, которые могут быть решены с помощью разрабатываемого комплекса.

В работе также отмечается, что дальнейшее совершенствование невозможно без привлечения данных наблюдений и предлагается процедура их усвоения, основанная на использовании ансамблевого фильтра Калмана. В качестве теста для предлагаемой процедуры рассматривается восстановление поля солёности контрольного эксперимента в случае, когда сток реки Лена не учитывается. Сравнение двух экспериментов с усвоением и без усвоения с результатами контрольного эксперимента показывает, что предлагаемая процедура усвоения способна удовлетворительно восстанавливать поле солёности даже в такой «экстремальной» ситуации. Тем не менее, отмечается, что описание системы циркуляции вод в районе дельты становится даже хуже, чем в эксперименте без усвоения. Этот факт свидетельствует о необходимости вовлечения в процесс усвоения данных измерений других прогностических переменных: температуры, возвышения уровня поверхности, сплоченности льда.

# The coupled hydrodynamic system of Lena River delta and the Laptev Sea shelf zone: numerical tests and preliminary results

Platov G., V. Shlychkov, E. Klimova, and A. Krylova

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

## INTRODUCTION, METHODS AND APPROACHES

The heat flow of the Lena River is one of the leading climate forcing of the Laptev Sea. The river drains most of northeastern Siberia, and its water accumulates heat of southern latitudes and transports it into the sea. The river water passes through the system of distributary network where the main water flow is split into a set of smaller ones with decreasing of runoff velocities. Kinematic structure of watercourses thus varies, so the heat flux carried by the river current to the sea, is transformed. At relatively low flow rates typical for the summer-autumn period, the surface heat flux becomes important. It can affect the water temperature especially in shallow parts with a slow flow, causing a variation of the total heat flux related to flows of land waters to sea. Since river water significantly affects the ice thermal processes in the Laptev Sea, the spatial distribution of heat flow at the mouth is of considerable interest for the analysis and interpretation of offshore temperature anomalies.

The aim of our work is to study dynamics of river water and heat flow in the delta of the Lena river to assess their impact on the thermohaline regime of the Laptev Sea by numerical simulation. The problem is solved by the successive application of two basic components of the simulation system: hydrodynamic model of the Lena River delta and model of water circulation in the Laptev Sea. The interaction of these two components is carried out along the boundary line of river channels and marine area.

Interaction scheme adopted so far implies the unilateral influence of delta water on the sea currents, ie river is the primary component in the considered system. Theoretical study of delta water regime is traditionally related to issues about the distribution of flow between the channels. Hydrodynamic description of complex fluvial systems is based on the solution of the fluid mechanics equations, closed by means of some assumptions and empirical relationships. A series of works [1, 2] gave a constructive basis for numerical solutions of Saint-Venant equations for complex river systems and river mouth areas. Method is based on one-dimensional mathematical description of the processes for each segment of the river network and formulation of the coupling conditions for flows at branch points. In solving the problem in case of a "tree"-type graph a specially designed factorization method is used for the branched channels systems, while in case of the loopings a guaranteed convergent iteration method is applied.

Theoretical problems of the interaction between riverine and marine waters at the mouths of the northern rivers are currently not well understood. Early mathematical models of estuarine areas were formulated on the basis of one-dimensional equations describing the processes of longitudinal movement of river water into the sea and vice versa under the influence of the surge effects [3]. The nature of estuarine process largely depends on the morphometric characteristics of the channel and in each channel behaves in different ways. Most of the theoretical studies of Siberian rivers, performed earlier, was devoted to river mouths of estuarine type (Ob, Yenisey). Currently there are few papers on modeling complex system of Lena delta coupled with shelf waters of the Laptev Sea.

Another issue of our interest is to incorporate available measurements in order to improve model results as much as possible, provided a hydrodynamically balanced system of the Laptev Sea shelf. Until recently, oceanographic observations were sporadic. Currently there is a large number of regular satellite observations (sea surface temperature, sea surface elevation), as well as data being obtained in real time by autonomous Argo systems. Unfortunately, these observations are more complicated in case of the Arctic region. For example, satellite data are useful only if they are received in the summer in the ice-free area. Winter recorded values characterize the surface of ice and snow, but not the ocean. Besides, the satellite trajectories around the Earth, as a rule, are not favorable to obtain reliable data for such high latitudes. Application of floating buoys is also limited as to make the data transmission to the satellite it is necessary to make regular ascent to the surface, but under the ice cover it is technically impossible. Nevertheless, the number of regular information is continuously growing, which allows us to consider the problem of estimating the ocean state with the help of a mathematical model describing the dynamics of the shelf seas of the Arctic Ocean taking into account the observational data, i.e. the problem of data assimilation. It is commonly understood that the data assimilation is a joint account of observations and results of numerical realization of the mathematical model to obtain the most accurate assessment of spatial and temporal distribution of the quantities.

Data assimilation algorithms are currently widely used for modeling processes in the ocean. There are many techniques of data assimilation, but in terms of the mathematical formulation of the problem, they all use

one of two approaches: variational (3DVAR, 4DVAR) or stochastic (Kalman filter). Currently operational ocean data assimilation systems are using both 4DVAR [4] and Kalman filter [5, 6] methods, and, moreover, some variants of multi-element optimum interpolation are also in use (see, for example, [7]).

Kalman filter algorithm is currently one of the most popular approaches to solve the problem of the data assimilation. To obtain the optimal estimate of the state vector according to observations and predictive model, which is nonlinear in general, the solution of the equation for the conditional mean is required [8]. In general form this problem cannot be solved, therefore there are various simplified variants of the problem, which allow us to reduce it to the equations for the conditional mean and covariance. These simplifications are based on the linearization relative to the reference state or on the expansion in a power series of the estimation error (truncated second order filters). Moreover, there may be used an additional assumption that the considered random fields are Gaussian [8].

The most commonly used area of research on the application of the Kalman filter is the ensemble approach, first proposed in [9]. It was further developed in the papers [10],[11],[12],[13]. In the ensemble approach, the covariance matrices of estimation errors are computed for nonlinear prognostic models. Ensemble Kalman filter is a variant of the extended Kalman filter, in which the covariances of the forecast errors are estimated using the ensemble of forecasts. Along with these approximate description, it was proposed to use suboptimal algorithms [14] in which the probability averaging is replaced by time-averaging, assuming random fields having temporal ergodicity. This article suggests an algorithm based on this approach to solve the problem of data assimilation of ocean observations. Development of algorithms for data assimilation for modeling processes in the ocean was based on our experience of data assimilation systems for atmospheric pollution model [15].

Evaluation of the developed algorithm was carried out by means of numerical experiments with model-simulated data (the so-called "identical twin" experiments). It means that numerical experiments were carried out on assimilation of data with the "real" space-time distribution. They were based upon AARI data of International Polar Year, 2007-2008, and the Pathfinder NOAA/AVHRR archive of satellite observations for the same period.

## RESULTS, PROBLEMS AND DISCUSSION

After series of numerical tests, we achieved a more acceptable agreement between calculated temperature field distribution and the observed one as a result of some configuration of the model parameters and more accurate account of sea ice distribution, as well as by taking into account the vertical distribution of solar flux. This raises a number of issues that require further discussion.

The most common is the question of theoretical interest in solving such problems, given that the practical value of sea-river system modeling is beyond a doubt. However, in theory, presented experiments are hardly of any new information for understanding the physical processes in the system. In fact, we only have a practical application of existing knowledge. Nevertheless, we can offer a number of tasks which will be interesting both in practical and theoretical terms and our coupled model will be an essential tool for solving them.

One of the first tasks is associated with the functioning of the Arctic climate system as a whole. It is known that the atmospheric and oceanic circulation can be classified using the regional indices. The most important for the Arctic region are indices of the North Atlantic Oscillation (NAO), Arctic Oscillation (AO) and the Pacific Decadal Oscillation (PDO). Different values of climatic factors in the study area of the Arctic correspond to specific values of these indices. Analysis of the observations in [16] showed, for example, the relationship between changes in the average drain of the Siberian rivers and the NAO index in winter periods from 1936 to 1999, more precisely the fact that rivers respond to changes in large-scale circulation of the northern hemisphere. With the help of this model we can investigate the characteristics of water circulation in the region, the functioning of Arctic bio-ecological systems, biological primary production in Arctic waters etc., when implementing a particular set of climate scenarios. In this regard, development of models of such level is a prerequisite for success.

Another problem is related to environmental monitoring and restoring of real distributions of physical, chemical and biological fields. In this case, as shown by the experiments, we need to involve as much as possible the existing observations, using modern methods of data assimilation. For example, the best available modern ice models are hardly able to reproduce regional ice fields with sufficient accuracy. At the same time, we can regularly get them from satellite data.

In terms of development of this approach it is an important question of whether we need to take into account the bilateral interaction between the components of the system: the shelf zone of the ocean and the river delta. The shelf dynamics largely determines the sea level, leading to large variations both in time and space, for example, in a situation with local surges or tidal waves. Movement of river water along certain channels can thus be significantly slowed down or reversed or even accelerated. Still remains unclear how important it is to consider this interaction.

The importance of integrating the vertical distribution of solar flux found during experiments, can also be considered only as a preliminary result. Transparency of the water for different wavelengths depends on many factors and is not obliged to obey a limited set of distributions corresponding to Jerlov water type.

Results of experiments relate solely to the temperature distribution. However, in regions such as the vicinity of the river delta, salinity characteristics are much more important. The reason why we did not compare the distribution of salinity, is that we can not use satellite distribution of ice to correct the flux of fresh water into the ocean as effectively as in the case with the heat flux. In the case of heat flux, the fact of whether the water surface is covered with ice or not, is determining, while to produce a fresh water flux it is also important to know the rate of ice freezing or melting. Such information has not yet been recorded by satellites. It remains the only option, some assimilation of data of ice compactness within the ice model.

To test the proposed assimilation procedure, we use as an assimilated value the most important (in the region) hydrodynamic characteristics of water - salinity, since its effect on the density is greatest. As the data we used the results of the reference test. In order to emulate the real observations, these results were used only where data of satellite or ground-based measurements are available. As a disturbing factor we considered the vanishing of the Lena River flow. As a result, the freshwater plume, formed in adjacent bays on the east, gradually disappears, and the fresh river waters are replaced by salty sea waters. In general, the procedure for data assimilation leads to the recovery of the unperturbed results on the sea surface. But, at greater depths, where the observations are small, the picture is less satisfactory. For these depths some additional assumptions are required to help obtain some appropriate extrapolation of the surface values.

In the Arctic, one of the determining factors is also the ice field pattern. It should be noted that the propagation pattern of the Arctic ice, taken from the results of the model used, is far from perfect. For example, in September 2008, according to satellite images, the Laptev Sea ice edge moves north to latitude 78N. At the same time, the simulation results show at 77N latitude ice thickness about 1 m with compactness of 85%. This fact indicates that in order to achieve satisfactory results of modeling the dynamics of the Laptev Sea, one should directly use the observed pattern of the ice field.

We almost did not compare the proposed scheme of data assimilation with a classic version of assimilation using an ensemble Kalman filter. The advantage of the proposed scheme is obvious, as it involves getting a set of the ensemble in one model run. However, payment for this will be associated with a possible loss of quality. This requires further study in subsequent work.

Another important area in terms of improving the procedure for data assimilation is to use multielement approach. In this example, we used the salinity field, and in the future are going to use temperature. However, as part of the assimilation procedure, a joint analysis of salinity and temperature is possible, including also some data on the rise of sea level and ice concentration. It is possible not only to get a better assessment of these characteristics, but taking into account the cross-covariances, any other characteristics of a regional ocean model.

#### References:

1. Shugrin S. M., 1969. Numerical calculation of unsteady water flow in fluvial systems and channels // *Izv. SO AN USSR. Tech. Sci. Vol. 1. No. 3. P. 25-31. (in Russian)*
2. Atavin A. A., Vasiliev O. F., Voevodin A. F., Shugrin S. M., 1983. Numerical methods for solving one-dimensional hydraulic problems // *Water resources. Vol. 10, No. 4. P. 47--53. (in Russian)*
3. Ivanov V. V., Svyatskiy A. Z., 1987. Numerical modeling of sea water intrusion into river mouths at seasonal scales // *Water Resources. No. 5. P. 46-51. (in Russian)*
4. Weaver, A. T., C. Deltel, E. Machu, S. Ricci, and N. Daget, 2005. A multivariate balance operator for variational ocean data assimilation // *Q. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 131, No. 613. P. 3605-3625. doi: 10.1256/qj.05.119.*
5. Yin, Y., O. Alves, P. R. Oke, 2011. An ensemble ocean data assimilation system for seasonal prediction // *Mon. Wea. Rev., Vol. 139. P. 786-808. doi: 10.1175/2010MWR3419.1.*
6. Nadiga, B. T., W. R. Casper, and P. W. Jones, 2013. Ensemble-based global ocean data assimilation // *Ocean Modelling, Vol. 72, P. 210-230. doi: 10.1016/j.ocemod.2013.09.002*
7. Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax, 2007. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature // *J. Climate, Vol. 20, P. 5473-5496. doi: 10.1175/2007JCLI1824.1*
8. Jazwinski, A. H., 1970. *Stochastic processes and filtering theory* // Academic Press: New York, 377 pp.
9. Evensen G., 1994. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics // *J. Geophys. Res., Vol. 99(C5), p. 10143--10162.*
10. Evensen G., 2009. *Data assimilation. The ensemble Kalman filter* // Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, 307 pp.
11. Houtekamer, P. L., H. L. Mitchell, G. Pellerin, M. Buehner, M. Charron, L. Spacek, B. Hansen, 2005. *Atmospheric Data Assimilation with an Ensemble Kalman Filter: Results with Real Observations* // *Mon. Wea. Rev., Vol. 133, p. 604-620.*
12. Klimova, E. G., 2008. Data assimilation technique based on the ensemble  $\pi$ -algorithm // *Russian Meteorology and Hydrology, Vol. 33, No. 9, p. 570-576. doi: 10.3103/S1068373908090045.*
13. Klimova E. G., 2012. A suboptimal data assimilation algorithm based on the ensemble Kalman filter // *Q. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 138. P. 2079--2085. doi: 10.1002/qj.1941*

14. *Handbook on automatic control theory // Edited by A.A. Krasovsky. Moscow. Nauka. 711 pp., 1987. (in Russian)*
15. Klimova E. G., Kilanova N. V., 2006. Numerical experiments on estimation of methane emission based on the data assimilation system for passive impurity in the atmosphere of the Northern hemisphere. // *Atmospheric and oceanic optics, Vol. 19, No. 11, p. 863-866.*
16. Peterson, B. J., R. M. Holmes, J. M. McClelland, C. J. Vörösmarty, R. B. Lammers, A. I. Shiklomanov, I. A. Shiklomanov, S. Rahmstorf, 2002. Increasing River Discharge to the Arctic Ocean // *Science, Vol. 298, No. 5601, p. 2171-2173, doi: 10.1126/science.1077445.*

## Sediment delivery towards the Lena River delta: quantification and environmental implications

<sup>1,2</sup>Tananaev N.I.

<sup>1</sup> P.I. Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia

<sup>2</sup> Institute National Polytechnique de Toulouse (INPT), Toulouse, France

E-mail: tananaevs@mail.ru

### INTRODUCTION

In terms of annual sediment flux, the Lena River is ranked first among the Eurasian rivers draining into the Arctic Ocean. This results from weak hydropower industry development in the basin area, and intensive fluvial processes acting within the river channel (Tananaev, 2014). Most of the sediment approaching the Lena delta are retained within the floodplain and the minor deltaic channels, fostering its vertical accretion (Rachold et al., 1996). Quantification of the sediment delivery to the Lena Delta system is essential for understanding the evolution of the accumulative environment of the largest Eurasian delta. Once the quantity of the sediments delivered is known, various aspects related to both quality

### SUSPENDED LOAD

Suspended sediment flux is well quantified thanks to availability of observational data from the nearby gauging station (GS) Kyusyur, operated by the Russian Hydrometeorology Agency. Consistent value of the suspended sediment delivery to the Lena Delta is  $20.7 \pm 0.3$  Mt (Tananaev, 2014, and references therein), of which only 10 to 17% actually reach the Laptev sea margin (Rachold et al., 1996).

### BEDLOAD

Quantification of the bedload is constrained by the deficiency of field observations and estimative techniques. Tananaev and Anisimova (2013) modified the N.I. Alekseevskiy (2004) technique for the bedload flux assessment to obtain a best-guess annual estimate of 14.9 Mt (GS Kyusyur). Hence of the total sediment flux (35.6 Mt), about one half is transported by traction, forming vast side bars in the deltaic channels.

### ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS OF THE SEDIMENT DATA

Quantity of the sediment being assessed, the next research question arising is about the quality of the incoming particulate matter (PM). Particulate organic matter (POM) is largely underestimated part of the global carbon cycle; the existing proxies are scarce and insufficient (Madej, 2005). Assuming POM content to fluctuate around 25% of the total sediment flux, estimates of the mineral fraction of the should be subsequently reduced, affecting the conclusions on the rates of geomorphic activity in the delta region. POM decomposition in the deltaic medium (floodplains and channels) should affect the organic carbon delivery to the adjacent marine areas, and the climate-relevant gases emission. Geochemistry of the particulate matter entering the Lena Delta is mostly understudied. Besides its relation to the sediment origin, chemical composition may raise several important environmental implications, e.g. involvement of the PM in global mercury (Hg) cycle (Amos et al., 2014). In relation to these aspects, the Lena Delta region remains a highly unstudied area, yet an important potential hotspot for the integrated environmental studies.

#### References:

1. Alekseevskiy, N.I., 2004, *Movement of bed forms and sediment yield of rivers. IAHS Publ. 288, pp. 395-403.*

2. Amos, H.M., Jacob, D.J., Kocman, D., Horowitz, H.M., Zhang, Y., Dutkiewicz, S., Horvat, M., Corbitt, E.S., Krabbenhoft, D.P., Sunderland, E.M., 2014, *Global biogeochemical implications of mercury discharges from rivers and sediment burial*. *Environ. Sci. Technol.* 48(16), pp. 9514-9522.
3. Madej, M.A., 2005, *The role of organic matter in sediment budgets in forested terrain*. *Sediment Budgets 2, IAHS Publ.* 292, p. 9-15.
4. Rachold, V., Alabyan, A., Hubberten, H.-W., Korotaev, V.N. and Zaitsev A.A., 1996, *Sediment transport to the Laptev Sea – hydrology and geochemistry of the Lena River*. *Polar Research* 15(2), pp. 183-196.
5. Tananaev, N.I., 2014, *Estimation of the annual discharge of suspended matter by the rivers of North Siberia and the Far East*. *Oceanology* 54(5), pp. 650-659.
6. Tananaev, N.I. and Anisimova, L.A., 2013, *Evaluating the annual runoff of traction load on the rivers in the north of Siberia and the Far East*. *Geography and Natural Resources* 34(1), pp. 79-87.

## Modeling recent climate variability of the sea water over the East Siberian Arctic Shelf

Golubeva E.N., Malakhova V.V., Krayneva M.B.

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

East Siberian sector of the Arctic shelf (ESAS), including the Laptev Sea and the East - Siberian Sea, is the region where climatic changes of recent decades are the most pronounced. Recently it was reported about increasing coastal erosion rates and extensive methane venting in the eastern Siberian shelf. Climatology of bottom hydrography demonstrates warming that extends offshore from the 30–50 m depth contour. The 1920–2009 time series of summer mean bottom layer temperature analyzed for the inner shelf and coastal zone of the Laptev and East Siberian seas demonstrate a large warming from 1984 to 2009.

This study discusses the ESAS variability obtained from the numerical results based on the Arctic Ocean model developed in ICMMG SB RAS, forced by 1948-2013 atmospheric reanalysis. The ESAS is controlled by regional atmospheric circulation, Siberian river discharge, ice formation/melting, and water exchange with the Arctic Ocean. Based on the numerical simulation we tried to explore possible reasons for the increase in bottom layer temperature known from observations. Among them were considered: a) atmosphere warming; b) Laptev sea on-shelf inflow of warm and saline waters of Atlantic Layer of the Arctic Ocean c) the redistribution of water masses over shelf zone caused by the change in atmospheric circulation regimes and leading to a weakening of density stratification; d) temperature anomalies caused by thermal river flux. We analyze the effect of raising the bottom layer temperature of coastal region on the enhancement of the underwater permafrost degradation

## Исследование изменчивости состояния вод Восточно-Сибирского сектора Арктического шельфа на основе численного моделирования

Голубева Е.Н., Малахова В.В., Крайнева М.В.

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

### ВВЕДЕНИЕ

Восточно-Сибирский сектор Арктического шельфа, включающий море Лаптевых и Восточно-Сибирское море, является регионом, где наиболее заметны климатические изменения последних десятилетий. Ярким свидетельством этого являются интенсивное разрушение берегов в связи с происходящим потеплением и разрушением вечной мерзлоты [1], и регистрируемые выбросы метана [2]. Состояние шельфа Восточной Сибири контролируется множеством климатических процессов, среди которых: изменчивость атмосферной динамики, определяющей процессы образования и таяния морского льда, его дрейф и циркуляцию вод в поверхностном слое Северного Ледовитого океана, взаимодействие с сосед-



ними регионами, а также сток сибирских рек. Данные гидрологических наблюдений, проводимых на континентальном склоне моря Лаптевых, содержат информацию о межгодовой изменчивости состояния вод внешней зоны шельфа, граничащей с материковым склоном. Анализ данных выделяет два относительно теплых периода придонных вод шельфовой зоны моря: 1930-1950 и 1990-2000-е и холодный период 1960-1980 [3]. Выявленная изменчивость коррелирует с изменчивостью температуры в ядре атлантических вод, поступающих в Северный Ледовитый океан через пролив Фрама и Баренцево море и распространяющихся в циклоническом направлении вдоль материкового склона Евразии [4]. Данные наблюдений для 1920-2009 гг. в мелководной части шельфа и прибрежной зоне моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря отражают значительное повышение придонной температуры (до 2.1°), начавшееся с середины 1980-х годов [5].

В представляемой работе обсуждаются результаты численного моделирования процессов, происходящих в регионе, и причины повышения температуры придонных вод шельфа, известного из данных наблюдений. Анализируется возможные последствия появления теплового сигнала в придонном слое воды, их влияние на термический режим донных отложений в районе речной дельты.

## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения численных экспериментов используется трехмерная региональная численная модель СЛО и Северной и экваториальной Атлантики ИВМиМГ СО РАН [6]. Граничные условия для задания потоков на поверхности океана и морского льда определяются на основе использования данных атмосферного реанализа CORE2 [7]. В ходе численного эксперимента моделируются изменения, происходящие в состоянии вод и морского льда, определяемые изменчивостью атмосферной циркуляции в период с 1948 по 2013 гг.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Модельные расчеты воспроизводят климатическую и сезонную изменчивость состояния вод СЛО и Восточно-Сибирского шельфа (ВСШ). Циркуляция вод ВСШ в значительной степени определяется динамикой атмосферы. В соответствии с установившейся циркуляцией вод в модельном эксперименте происходит формирование термохалинной структуры вод и появление аномалий температуры и солёности, регистрируемых в данных наблюдений. Появление более теплой воды в придонном слое на внешней части шельфа, граничащей с материковым склоном (глубины 50-150 м), вызвано контактом с теплыми и солёными водами атлантического слоя. В частности, в модельном эксперименте в отдельные периоды явно выражен апвеллинг на материковом склоне моря Лаптевых. Для зоны среднего шельфа (глубины 30-50 м) проникновение вод атлантического слоя затруднено, однако повышение придонной температуры может быть обусловлено процессами, происходящими в поверхностном слое. Циклонический режим циркуляции атмосферы региона с преобладанием северо-западных ветров в летний период (2007 г.) способствует усилению Сибирского вдольберегового течения [8] и распространению пресных речных вод в восточном направлении. В этот период для поверхностного слоя шельфа моря Лаптевых в модельных расчетах наблюдается поток, переносящий более солёную воду с северных районов океана, что приводит к ослаблению устойчивости стратификации средней зоны шельфа. Процесс перемешивания, вызванный штормовым ветром или осенним охлаждением, может приводить к появлению аномалий температуры в придонном слое океана.

В период установления в регионе ВСШ антициклонической атмосферной циркуляции существенно меняется картина циркуляции вод. В модельных расчетах отсутствует направленное на восток Сибирское вдольбереговое течение. Факт исчезновения этого течения и смена направления движения вод в Восточно-Сибирском море на западное обсуждается в работе [9] на основе анализа данных наблюдений. В море Лаптевых южный и юго-восточный ветер (2008 г.) формирует направленный на север перенос в поверхностном слое шельфа. Распространение пресных вод реки Лены в северном направлении способствует повышению устойчивости стратификации в области среднего шельфа, что препятствует перемешиванию и распространению тепла в придонный слой.

Возможным механизмом формирования аномалий температуры придонного слоя мелководной прибрежной части ВСШ (до 20 м) является тепловой сток рек. По результатам численных расчетов тепло, поступающее с речными водами, приводит к повышению температуры в море Лаптевых на 1-2 градуса и распространяется на расстояние до 200 км во время летнего периода. По результатам расчетов эти аномалии имеют локальный характер, характерны для мелководной части шельфа и исчезают в осенне-зимний период.

Анализ придонной температуры вод Восточно-Сибирского шельфа представляется важным, поскольку сезонная и межгодовая динамика температуры придонного слоя обеспечивают современное состояние подводной мерзлоты и влияет на интенсивность процессов ее деградации. Для оценки влияния теплового стока реки Лены на скорость протаивания субаквальной мерзлоты был проведен тестовый расчет на основе модели теплопереноса в грунте в условиях подводной криолитозоны [10]. На

верхней границе расчетной области задавалось изменение температуры придонной воды на шельфе моря Лаптевых, полученной в результате работы океанической модели. Результаты численного моделирования показали возможность протаивания мерзлых пород в областях шельфа, где придонная температура воды принимает положительные значения. На основе значений температуры воды, полученной в эксперименте, не учитывая тепловую сток реки, получено, что, в период с 1990 по 2012 годы в районе стока Лены протаивает слой мерзлых пород мощностью до 11 м. Повышение придонной температуры воды в районе дельты Лены на 2 °С в августе и сентябре для того же 23-летнего периода увеличивает слой протаивания до 15 м. Таким образом, средняя скорость протаивания толщи мерзлых пород со средней температурой -1-2° С увеличилась от 50 до 67 см/год за счет учета кратковременного повышения температуры в летний период. В результате сезонного протаивания образуется талик, который начинает заглабливаться за счет диффузии тепла даже при дальнейшем понижении температуры верхнего слоя грунта, и разрушает реликтовую мерзлоту.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе на основе численного моделирования исследуются возможные причины известного из данных наблюдений повышения температуры вод придонного слоя Восточно-Сибирского сектора Арктического шельфа. Результаты численных экспериментов, проведенных на основе трехмерной численной модели океана и морского льда с использованием данных атмосферного реанализа, восстанавливают изменчивость состояния и циркуляции вод Северного Ледовитого океана и его шельфовой зоны. Среди возможных причин появления аномалий придонной температуры в области ВСШ в настоящей работе рассматриваются: а) возможность затока в шельфовую зону теплых вод атлантического слоя СЛО, траектория которых проходит по границе шельфовой зоны, б) перераспределение водных масс шельфовой зоны, вызванное сменой режимов циркуляции атмосферы; в) формирование аномалий температуры, обусловленных тепловым стоком рек. Анализируется влияние повышения температуры вод придонного слоя в области мелководного шельфа на усиление процесса деградации подводной мерзлоты региона.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (14-05-00730 А, 15-05-02457 А).*

### Литература:

1. Григорьев М.Н., Разумов С.О., Куницкий В.В., Спектор В.Б. Динамика берегов восточных Арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции // *Криосфера Земли*, 2006, т. X, № 4, С. 74–94.
2. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson O. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf // *Science*. 2010. V.327. Issue 5970. P. 1246-1250.
3. Dmitrenko, I. A., S. A. Kirillov, L. B. Tremblay, D. Bauch, J. A. Hölemann, T. Krumpfen, H. Kassens, C. Wegner, G. Heinemann, and D. Schröder (2010), Impact of the Arctic Ocean Atlantic water layer on Siberian shelf hydrography, *J. Geophys. Res.*, 115, C08010, doi:10.1029/2009JC006020.
4. Rudels B., U. Schauer, G. Björk, M. Korhonen, S. Pisarev, B. Rabe, and A. Wisotzki: Observations of water masses and circulation with focus on the Eurasian Basin of the Arctic Ocean from the 1990s to the late 2000s // *Ocean Sci.* 9. P.147–169. doi:10.5194/os-9-147-2013
5. Dmitrenko, I. A., S. A. Kirillov, L. B. Tremblay, H. Kassens, O. A. Anisimov, S. A. Lavrov, S. O. Razumov, and M. N. Grigoriev (2011), Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability, *J. Geophys. Res.*, 116, C10027, doi:10.1029/2011JC007218.
6. Golubeva E. N., Platov G. A. Numerical Modeling of the Arctic Ocean Ice System Response to Variations in the Atmospheric Circulation from 1948 to 2007 – *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2009, – Vol. 45, No. 1, pp. 137–151.
7. Yeager, S. G., and W. G. Large. 2008. CORE.2 Global Air-Sea Flux Dataset. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <http://dx.doi.org/10.5065/D6WH2N0S>.
8. Кулаков М.Ю. Циркуляция вод и перенос взвесей в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском // *Проблемы Арктики и Антарктики*. – 2008. №3(80) - С.86-97.
9. Münchow, A., T. J. Weingartner, and L. W. Cooper, The summer hydrography and surface circulation of the East Siberian shelf sea, *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 2167-2182, 1999.
10. Malakhova V.V. Mathematical modeling of the submarine permafrost long-term dynamics and gas hydrate stability zone in the Siberian Arctic shelf // *Bulletin of the NCC. Series: Numerical Modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment Studies*. 2014. Issue: 14. P.41-54.

# Development of a high-resolution coupled ocean – sea ice model of the Arctic region

<sup>1,2</sup>Ushakov K.V., <sup>1,2</sup>Kalmykov V.V., <sup>3,2</sup>Ibraev R.A.

<sup>1</sup>P.P Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Hydrometeorological Centre of Russia, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: ushakovkv@mail.ru

A coupled ocean – sea ice model with high spatial resolution (2 - 5 km) and bipolar grid over the Arctic region is designed. The model shows high computational characteristics (localization of data and calculations, self-consistency of the numerical schemes). It provides a scalable solution for massively parallel computational systems, which is required for study of physical processes and forecasting terrestrial systems on current day level of climatological science. The model is run under governance of the Coupling Framework for Parallel Models (CFPM) which was developed as a unified module for further planned building of a coupled model of the Arctic system including atmosphere and cryosphere components.

Characteristics of the system are described in terms of computational algorithms, software architecture and implementation on supercomputers. We present results of the CFPM interpolation module tests on the MVS supercomputers. The first verification of the high resolution ocean – sea ice model has been carried out in the numerical experiment aimed at simulation of annual variability of the ocean circulation under the CORE-I protocol.

## Разработка высокоразрешающей совместной модели океана и морского льда Арктического региона

<sup>1,2</sup>Ушаков К.В., <sup>1,2</sup>Калмыков В.В., <sup>3,2</sup>Ибраев Р.А.

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Гидрометцентр России, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

E-mail: ushakovkv@mail.ru

### ВВЕДЕНИЕ

Решение задач комплексного освоения арктического региона требует понимания и умения прогнозировать сложные, до сих пор остающиеся слабо исследованными физические, биохимические, экологические и другие процессы, происходящие в различных средах (атмосфера, лёд, океан, почва), что, в свою очередь, невозможно без применения современных технологий математического моделирования. Сложность описываемых процессов и большой объём данных ставят задачу моделирования изменений климата в ряд самых вычислительноёмких в науке. Как отмечалось на Всемирной встрече по моделированию и прогнозам климата [1], существует согласие о том, что гораздо более высокое, по сравнению с существующим, разрешение моделей основных компонентов является главной предпосылкой для реалистичного представления климатической системы. В данной работе описываются проблемы, возникающие при создании совместной модели океана и морского льда высокого разрешения, представляющей собой первый этап в разработке современной российской высокоразрешающей модели Арктического региона.

### МАСШТАБ ЗАДАЧИ

Каждый компонент совместной модели представляет собой отдельную модель с сеткой высокого разрешения, на которой в параллельном режиме вычисляются двумерные и трёхмерные сеточные операторы, задействуя 102–104 вычислительных ядер. Расчёт производится на период от нескольких дней до сотен лет. Предполагается, что перспективная модель Арктической системы должна иметь горизонтальный шаг сетки 1–5 км для модели океана и 0.5–1.5 км для морского льда. Для взаимодействия моделей в единой системе необходимо примерно каждый модельный час (каждые 10–20 временных шагов) передавать около 10–15 двумерных полей. Объединяющее модели программное обеспечение должно обеспечивать сбор полей, их интерполяцию на сетку получающей стороны и распределение результата компоненту-получателю. Только для двух компонентов (океана и льда) это означает пересылку и вычи-

сления над порядка 108 элементами массивов. В общем случае таких взаимодействий в системе столько же, сколько потоков на границах сред: океан – атмосфера, атмосфера – океан, океан – лёд, лёд – океан, атмосфера – лёд и т. д. Необходимо отметить, что при работе с большими объемами информации узким местом может стать файловая система, алгоритмы работы с которой чрезвычайно редко удаётся масштабировать. Процесс ввода-вывода может остановить тысячи вычислительных ядер на время выполнения медленной операции – периодической записи 10–100 двумерных и трёхмерных функций решения и диагностики объёмом 1–10 Гб. В результате, разрабатываемый программный комплекс должен уметь поддерживать и синхронизировать работу параллельных моделей высокого разрешения и обеспечивать эффективность вычислений на суперкомпьютерах, включающую как интерполяцию данных между моделями, так и возможность сохранения полученного решения.

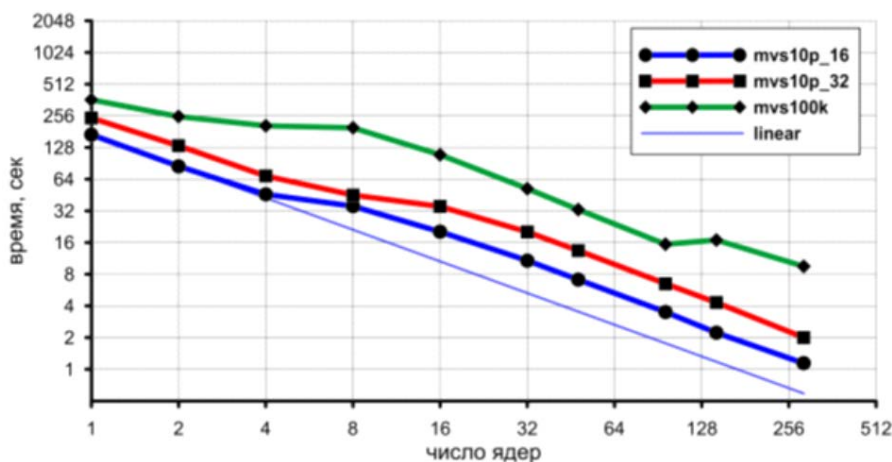
## МОДЕЛЬ ОКЕАНА

Функцию океанского компонента совместной модели выполняет модель Мирового океана ИВМ–ИО. Она представляет собой программный комплекс, предназначенный для исследования циркуляции морских вод в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Полная система уравнений трёхмерной динамики океана в приближениях Буссинеска и гидростатики аппроксимирована методом конечных объёмов на сетке типа В. На вертикальной оси используются z-координаты. Описание баротропной динамики выполняется с помощью двумерной системы уравнений мелкой воды. Потоки тепла, соли, импульса и воды на границе с атмосферой вычисляются моделью пограничного слоя NCAR [2]. Для вертикального перемешивания используется параметризация Манка-Андерсона. Поверхность раздела воздух-вода – свободная, с явным описанием потоков воды, тепла, соли и импульса. За исключением вертикального турбулентного перемешивания, все процессы описаны с помощью явных численных методов. Благодаря этому стало возможным естественное распараллеливание модели с применением метода двумерной декомпозиции области. На данном этапе разработки ледовый компонент реализован с помощью термодинамической модели снежно-ледового покрова [3], которая в дальнейшем будет заменена на современную динамическую модель с учётом механического перераспределения градаций льда. В работе [4] приведены результаты численного тестирования модели и её верификации в режиме грубого разрешения по протоколу интеркалибрационного эксперимента CORE-I.

Достигнутая эффективность параллельной реализации модели океана позволила создать высоко-разрешающую версию модели с биполярной сеткой над Арктикой, горизонтальные шаги которой лежат в пределах 2–5 км. Её особенностью является отсутствие операторов трения второго порядка в описании горизонтальной бароклинной термогидродинамики, что обеспечивает высокий уровень вихреобразования в модельном решении. Для описания горизонтального перемешивания импульса применяется бигармоническая параметризация Смагоринского [5], для диффузии тепла и соли – бигармонический оператор с коэффициентом, пропорциональным третьей степени шага сетки. Тестовые расчёты показали устойчивость работы модели в квазиadiaбатическом режиме, т.е. без использования параметризаций горизонтальной диффузии.

## СИСТЕМА СОВМЕСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для объединения компонентов в совместную модель был разработан специализированный Программный комплекс совместного моделирования (ПКСМ) [6]. Он поддерживает все этапы жизни модели и состоит из *довычислительного* (подготовка сеток с использованием пакетов SCRIP/CDO), *расчётного* (выполняющихся в процессе счёта пересылок данных с переинтерполяцией между сетками компонентов совместной модели) и *поствычислительного* (визуализация и обработка с использованием графической библиотеки PyNGL) блоков.



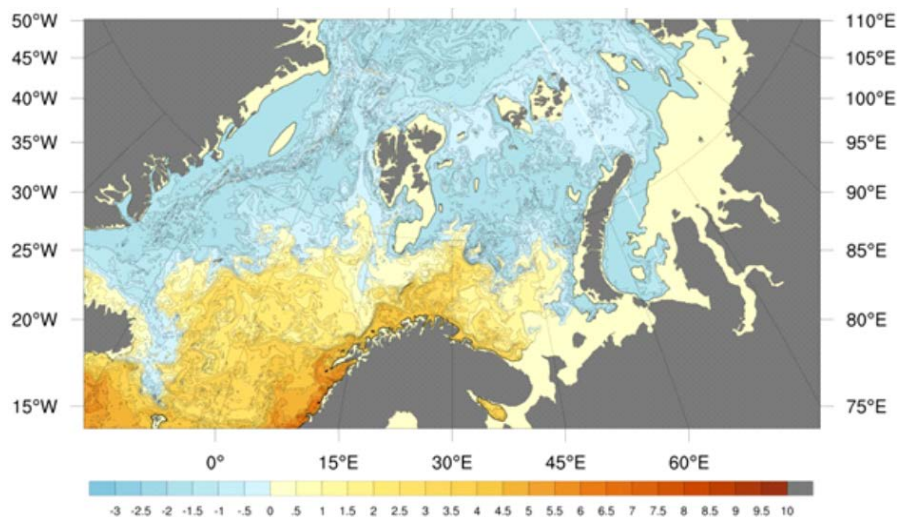
**Рис. 1.** Время работы процедуры интерполяции в секундах в зависимости от размера коммуникатора ПКСМ на суперкомпьютерах семейства «МВС»: «МВС-100к», «МВС-10П» с 16 логическими ядрами на узел, «МВС-10П» с 32 логическими ядрами на узел.

Для реализации численных алгоритмов связывания моделей в ПКСМ используется наиболее перспективная на сегодня схема с центральным параллельным каплером (coupler – модуль синхронизации работы моделей, интерполяции данных между сетками компонентов и работы с файловой системой). Более того, схема расширена за счёт его полной абстракции – архитектура системы написана для произвольного числа компонентов, что отличает её, например, от известной системы CESM, где знания об используемых моделях заложены в код системы. Оптимизация алгоритмов интерполяции за счёт упаковки данных, отложенных операций и перекрытия вычислений и обменов позволили получить производительность лучше, чем в известных аналогах (CESM, OASIS, ESMF). Результаты тестирования масштабируемости блока интерполяции для суперкомпьютеров семейства «МВС» (МСЦ РАН) представлены на рис. 1, для суперкомпьютера «Ломоносов» (МГУ) – в работе [6]. Дополнительным свойством архитектуры с выделенным компонентом совмещения моделей является асинхронность медленных операций записи и чтения файловой системы: кластер с десятком тысяч ядер не простаивает из-за ожидания взаимодействия с дисками, т.к. пока модель производит вычисления, ПКСМ взаимодействует с файловой системой.

## ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С СОВМЕСТНОЙ МОДЕЛЬЮ

Пробная геофизическая задача воспроизведения состояния океана и морского льда при помощи созданной высокоразрешающей совместной модели Арктики была поставлена следующим образом: арктический регион, начиная от 57° северной широты, покрыт сеткой с полюсами на суше, вертикальная дискретизация модели океана включает в себя 49 горизонтов. Размер распределённых массивов трёхмерных прогностических полей составил 3600×450×49, что соответствует горизонтальному разрешению 2-5 километров. В качестве начальных условий для океана на 1 января взяты среднегодовые климатологические поля температуры и солёности базы данных World Ocean Atlas 2009, морской лёд на старте эксперимента отсутствует. Внешний атмосферный форсинг, взятый из базы данных CORE-I, представляет собой цикличное повторение среднеклиматического внутригодового хода параметров воздуха и солнечной радиации. На рис. 2 приведена температура на горизонте 105 м после 6.5 лет интегрирования. Совместная модель показывает реалистичную интенсивность вихреобразования и границы распространения тёплой атлантической воды.

**Рис. 2.** Поле температуры (°C) на глубине 105 м после 6.5 лет интегрирования совместной модели.



Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 14-37-00053) в ФГБУ «Гидрометцентр России» (разделы 1-3, 5) и при частичной поддержке гранта РФФИ № 13-05-01141 (раздел 4).

### Литература:

1. *World Modelling Summit for Climate Prediction. 2008. Workshop report. UK. WCRP-131, WMO/TD-1468.*
2. *Large W., Yeager S. 2004. Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: the data sets and flux climatologies. NCAR Technical Note: NCAR/TN-460+STR. CGD Division of the National Center for Atmospheric Research. 105 pp.*
3. *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.*
4. *Ушаков К.В., Ибраев Р.А. 2015. Воспроизведение климата Мирового океана с помощью численной модели ИВМ-ИО. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 51. № 4.*
5. *Griffies S.M., Hallberg R.W. 2000. Biharmonic Friction with a Smagorinsky-Like Viscosity for Use in Large-Scale Eddy-Permitting Ocean Models. Mon. Wea. Rev., 128, 2935-2946.*

6. Калмыков В.В., Ибраев Р.А. 2013. Программный комплекс совместного моделирования системы океан–лед–атмосфера–почва на массивно-параллельных компьютерах. *Выч. мет. и прогр.* 14. 88–95.

## Mobilization, mineralization and turnover of dissolved organic matter in the Lena Delta and coastal Laptev Sea

<sup>1</sup>Ivan V. Dubinenkov, <sup>2</sup>Anne Morgenstern, <sup>1,3</sup>Ruth Flerus, <sup>4,5</sup>Philippe Schmitt-Kopplin, <sup>5</sup>Gerhard Kattner, <sup>1,6</sup>Boris P. Koch

<sup>1</sup>Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar und Meeresforschung, Bremerhaven, Germany

<sup>2</sup>Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar und Meeresforschung, Potsdam, Germany

<sup>3</sup>GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research, Biological Oceanography, Kiel, Germany.

<sup>4</sup>Helmholtz Zentrum München, German Research Center for Environmental Health, Research Unit Analytical BioGeoChemistry, Neuherberg, Germany

<sup>5</sup>Technische Universität München, Germany

<sup>6</sup>University of Applied Sciences, Bremerhaven, Germany

A substantial amount of terrestrial dissolved organic matter (DOM) is transported along the fluvial continuum from soils to the coastal seas and ocean. Climate change causes the release and mobilization of the vast amounts of soil organic carbon from permafrost in the permafrost-dominated watersheds of the arctic rivers. Permafrost is widely distributed in the northern hemisphere and occupies ~24% of the exposed land surface area and ~34% of the world's coastlines are permafrost affected arctic coasts. Permafrost represents one of the largest pools of belowground organic carbon storage, its estimated size is pool is ~1700 Pg. Generated organic matter is a subject of mineralization and transformation processes with its further transport to the river and coastal Arctic Ocean.

In this study we quantified dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON) in various natural waters of the Lena Delta and Coastal Laptev Sea. Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry (FT-ICR MS) together with statistical methods was applied for molecular characterization of DOM, its turnover and transformation over biogeochemical processing.

Molecular composition for different sources of DOM in the Lena Delta including river and its channels, lakes, permafrost creeks and ice complex outflows allowed clear discrimination of these natural waters. FT-ICR MS and statistical tools demonstrated that the origin of DOM in the Lena Delta was systematically reflected in its molecular composition. Source-dominant indicator molecular markers were detected and characterized.

Further, we characterized DOM reactivity during the Lena River- Laptev Sea transition. We employed peak magnitude-salinity correlation as a measure of the reactivity of DOM. 27% of DOM components exhibited a strong conservative behavior, 32% were moderately affected by estuarine processes, and 41% were actively involved. Terrestrially-derived molecular components were mainly represented by the polycyclic aromatics and vascular plant-derived polyphenols. Marine-derived DOM components were mainly represented by the highly unsaturated and phenolic compounds and aliphatic compounds.

Studied bacterial mineralization of permafrost-derived DOM showed mineralization rates ~40% DOC over 18 days of incubation. DOM molecular composition controlled microbial metabolism. Microbial alteration explained, at least in part, initial changes of DOM throughout its evolution and transport from terrestrial to aquatic environments. Extreme bioavailability of permafrost organic carbon and rapid transformation of DOM suggests that ancient permafrost organic carbon is highly reactive upon fluvial release and therefore highly important for regional organic carbon cycling.

# From fresh – to marine waters: the fate of dissolved organic matter in the Lena delta region, Siberia

<sup>1</sup>Rafael Gonçalves-Araujo, <sup>2</sup>Colin Stedmon, <sup>1</sup>Birgit Heim, <sup>1</sup>Ivan Dubinenkov,  
<sup>1</sup>Alexandra Kraberg, <sup>3</sup>Denis Moiseev, <sup>1</sup>Astrid Bracher

<sup>1</sup> Alfred Wegener Institute, Bremerhaven, Germany

<sup>2</sup> Technical University of Denmark, Denmark

<sup>3</sup> Murmansk Marine Biological Institute, Murmansk, Russia

E-mail: rafael.goncalves.araujo@awi.de

The connectivity between the terrestrial and marine environment in the Arctic is changing as a result of climate change. This is influencing both freshwater budgets and the supply of carbon to sea. This study characterizes the composition of dissolved organic matter (DOM) within the Lena Delta region across the fresh water-marine gradient. Six fluorescent components (four humic-like; one marine humic-like; one protein-like) were identified by Parallel Factor Analysis, with a clear dominance of humic-like signals in fresh waters. At higher salinities there was an increased autochthonous contribution. Colored DOM (CDOM) and dissolved organic carbon (DOC) were highly correlated and, as a response to the hydrographical forcing, the region displayed a pseudo-conservative behavior of DOM in relation to salinity at marine-influenced sites; and a non-conservative behavior with evidence of considerable removal of DOM (up to 54%), likely driven by photodegradation and sorption/flocculation, at sites influenced by the Lena River plume. The latter mixing curve was split into three mixing regimes with regard to different amount and reactivity degree of DOM and to the factors driving DOM variability: 1) the low salinity regime (salinity > 10) with high concentrations of DOM, dominated by highly reactive terrigenous contribution and characterized by rapid removal; 2) the intermediate regime (10 < salinity < 25) exhibiting lower concentrations of DOM and a decreased contribution and reactivity of terrigenous compounds; and 3) the high salinity regime (salinity > 25) showing the lowest DOM and an increased contribution of less reactive compounds, displaying a pseudo-conservative behavior, with relatively low removal/addition processes controlling the dilution of DOM.

## Mathematical modeling of the submarine permafrost dynamics and gas hydrate stability zone in the East Siberian Arctic Shelf

Malakhova V.V.

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

E-mail: malax@sscc.ru

The extensive Arctic Shelf can play an important role in methane cycling because of a huge storage of organic matter buried in permafrost, which can be involved in the modern biogeochemical cycles subject to warming. The East Siberian Arctic Shelf (ESAS), consisting of the Laptev and East Siberian seas, represents the shallowest and broadest shelf region of the entire World Ocean. The ESAS is underlain by the relic off-shore submarine permafrost in an environment that is favorable for the stability of gas hydrates. During the last glacial maximum, the global sea levels fell by over a hundred meters, with a result that the shallow seas of the shelves became a dry land, which allowed the permafrost to develop there. Both models and geophysical data support the existence of the subsea permafrost in large areas of the Arctic shelves down to a water depth of about 100 m. The recent and the future warming in the Arctic may have a potential to cause rapid changes in the Earth's system. The global warming could lead to destabilization of the subsea permafrost and cause a release of methane into the water column. The state of permafrost in the Arctic is the key to understanding whether the methane, stored in the permafrost-related gas hydrate, can escape to the atmosphere.

We have numerically simulated the subsea permafrost evolution in the East Siberia Arctic shelf for the last glacial cycle, namely, 120 kyr. In order to assess a possible status and stability of the submarine permafrost we have carried out a numerical run based on the joint ocean-ice and subsea permafrost model. The numerical results show that the offshore permafrost exists within the vast East Siberia shelf. This permafrost has a continuous character, its thickness varying across the Arctic shelf. The thickness of the permafrost within most of the East Siberia shelf is estimated as 220-450 m at 60 mW/m<sup>2</sup> heat flux.

The GHSZ is defined as the part of a sediment column, where hydrostatic pressures are higher than the temperature dependent dissociation pressure of gas hydrates. The simulated thickness of the gas hydrate zone varied between ~250 m to 580 m at the present time. Temporal changes in the depth of the lower boundary of hydrate stability occur in the same way as temporal variations in the depth of the lower boundary of the subsea permafrost. In the period of the sea transgression, the GHSZ is controlled not only by an increase in temperature, but also by changes in the excess pressure due to changes in the sea level. The results of calculations illustrate, that the upper boundary of the GHSZ over the East Siberian shelf regions lies within the permafrost at a depth 140-220 m below the seafloor. The permafrost depth modeling shows deepening down to 22 m below the seafloor for 2012. This depth of the unfrozen permafrost is still less than that of the GHSZ upper boundary.

## Математическое моделирование динамики подводной мерзлоты и зоны стабильности газовых гидратов на Восточно-Сибирском шельфе

Малахова В.В.

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

Особенностью арктических акваторий является наличие подводной мерзлоты в пределах мелководных шельфов. Географическое положение арктических шельфов, регрессии и трансгрессии Мирового океана в плейстоцене – голоцене обуславливают формирование и строение шельфовой криолитозоны [1]. Термодинамический режим Арктического бассейна соответствует условиям для формирования субаквальных газогидратов метана под дном, начиная с морских глубин 250 м. На мелководном арктическом шельфе с глубинами до 120 м зона стабильности газовых гидратов связана с наличием подводной мерзлоты. Шельфовые скопления гидратов характерны только для арктических акваторий. Огромное количество органического углерода может содержаться в зоне стабильности газогидратов (ЗСГ), залегающей в пределах и ниже яруса мерзлых пород. Находясь в стабильном состоянии, мерзлота играет роль надежной крышки, препятствуя выходу метана. Разрушение подводной мерзлоты и последующая дестабилизация газовых гидратов арктического шельфа может привести к быстрому вовлечению огромных количеств метана в современный цикл углерода [2, 3].

Стабильность подводной криолитозоны в условиях изменения климата напрямую зависит от величины изменения температуры и солености воды, температуры воздуха, толщины морского льда. Протаивание подводных мерзлых толщ происходит преимущественно снизу под влиянием геотермического потока тепла, так как со стороны морского дна существуют в основном отрицательные температуры придонного слоя воды. Данные наблюдений в летний период с 1984 по 2009 год демонстрируют рост температуры придонных вод в морях восточной Арктики до устойчиво положительных значений [4]. Поэтому значимую роль для современного состояния субаквальной мерзлоты может играть температура придонного слоя воды. Расчеты [5] показывают, что при заданных сценарных потеплениях и увеличении температуры придонной воды до положительных значений происходит более быстрая деградация верхней части криолитозоны и образование несквозных таликов глубиной до 60 м.

В условиях отсутствия систематических данных наблюдений метод математического моделирования является необходимым инструментом, позволяющим просчитать возможные сценарии развития событий. В настоящей работе проведено математическое моделирование динамики толщи субаквальных мерзлых пород на Восточно-Сибирском шельфе (ВСШ) с помощью математической модели, которая описывает перераспределение тепла в системе атмосфера - океан - осадочный слой морского дна. В основе исследования лежит климатический сценарий, объединяющий палеореконструкцию климата за последние 120 тысяч лет и современное состояние с 1948 по 2012 год.

Проведенные сценарные расчеты показали возможность существования субаквальных мерзлых пород в донных отложениях по всей области ВСШ. Мощность мерзлого слоя под дном зависит от глубины моря и может составить порядка 220-450 м при заданном тепловом потоке 60 мВт/м<sup>2</sup> (рис. 1А). Расчет с учетом климатических изменений на протяжении 1948-2012 гг. показал, что температура придонной воды имеет существенное значение в темпах деградации верхнего слоя мерзлых пород на шельфе и в настоящее время может быть доминирующим фактором (рис. 1Б). Однако большая глубина протаивания мерзлых донных отложений обусловлена их засолением вследствие миграции солей в поровое пространство после затопления шельфа соленой морской водой. Субаквальная мерзлота в верхнем слое деградирует и при отрицательных температурах донных отложений под воздействием солей в поровых водах. Учет солености имеет существенное значение в темпах деградации верхнего слоя мерзлых пород на шельфе.



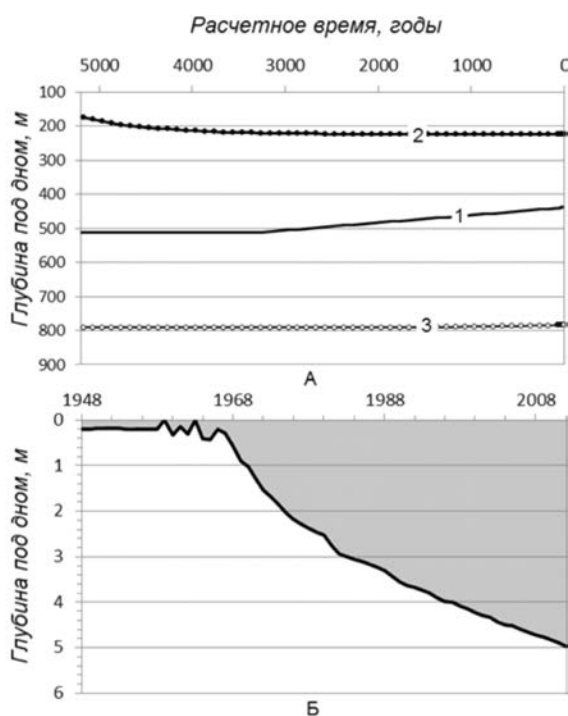
Одновременно с моделированием мощности шельфовой криолитозоны проводился расчет ЗСГ метана на основе анализа термобарических условий дна и донных отложений. На этапах затопления шельфа давление увеличивалось за счет дополнительного влияния водного столба, а в ходе регрессий оно рассчитывалось как гидростатическое с учетом толщины донных отложений. В условиях подводной мерзлоты и низких температур грунта ЗСГ метана мощностью 250-580 м существует по всей области мелководного шельфа. Нижняя граница ЗСГ расположена ниже толщ мерзлых пород, а верхняя находится на глубине порядка 140-220 м под поверхностью дна, внутри шельфовой криолитозоны (рис. 1А). В целом, изменение мощности ЗСГ по времени на протяжении всего ледникового цикла повторяет динамику криолитозоны. Лишь при повышении уровня моря в периоды трансгрессий происходит увеличение толщины ЗСГ за счет дополнительного давления водного столба, тогда как мощность мерзлых пород начинает уменьшаться.

Смещение верхней границы ЗСГ за период с 1948 до 2012 год составило не более одного метра за счет изменения температуры в толще донных пород. Дестабилизация газогидратов может приводить к накоплению свободного метана под слоем мерзлых пород. Однако эмиссия газа в вышележащие слои будет контролироваться состоянием мерзлого слоя. Можно сделать вывод, что ЗСГ не так быстро реагирует на изменения температуры придонной воды, как криолитозона. Это объясняется более слабыми изменениями в температурном профиле на глубинах, где выполнены условия существования газогидратов (рис. 1А).

Заключение. Периоды трансгрессии и регрессии океана, температура воздуха, температура придонных морских вод, геотермический поток тепла являются важными факторами, влияющими на состояние и динамику субаквальной мерзлоты при ее моделировании.

Проведенные модельные расчеты показали, что современного потепления недостаточно для полной дестабилизации подводной мерзлоты на шельфе морей восточной Арктики. Опускание верхней границы (кровли) мерзлых осадков к 2012 году составило порядка 0-22 м в зависимости от области шельфа. В связи с неравномерностью засоления шельфа кровля мерзлоты понижается в направлении от берега. Скорость деградации мерзлого слоя 0-7 см в год согласуется с имеющимися фактическими данными измерений для данного региона. Увеличение глубины протаивания может приводить к усилению процессов метаногенеза в осадочном слое и вовлечению в современный биогеохимический цикл древней органики из талого слоя мерзлоты.

Расчетная мощность ЗСГ метана на шельфе составила порядка 250- 580 м. При этом она остается изолированной от поверхности морского дна слоем мерзлого грунта, так как верхняя граница ЗСГ находится на глубине 140-220 м ниже дна. Наличие мерзлых пород и ЗСГ в донных отложениях препятствуют движению природных газов, накопление которых может происходить в подмерзлотных горизонтах.



**Рис. 1.** Изменения по времени: (А) - для периода последней трансгрессии положения нижней границы мерзлого слоя (1), верхней границы ЗСГ метана (2) и нижней границы ЗСГ метана (2); (Б) - в период с 1948 по 2012 год положения верхней границы мерзлого слоя.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ (№ 14-05-00730 А, № 15-05-02457 А) и Минобрнауки России ПНИЭР RFMEFI61014X0006.

#### Литература:

1. Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 1993. 336 с.
2. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Rekart P., Salyuk A., Kosmach D. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf // *J. Geo-phys. Res.* 2010. V.115. C08007, doi:10.1029/2009JC005602.
3. Малахова В.В., Голубева Е.Н. О возможной эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики // *Оптика атмосферы и океана.* 2013. Т. 26, № 06. С. 452-458.
4. Dmitrenko I., Kirillov S., Tremblay L., Kasens H., Anisimov O., Lavrov S., Razumov S., Grigoriev M. Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability // *J. Geophys. Res.* 2011. V.116. C10027, doi:10.1029/2011JC007218.

5. Malakhova V.V., Golubeva E.N. Modeling of the dynamics subsea permafrost in the East Siberian Arctic Shelf under the past and the future climate changes // *Proceedings of SPIE. 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 929246. (November 25, 2014) doi: 10.1117/12.2075137.*

## Numerical simulation of the Lena River estuary dynamics using SELFE

<sup>1</sup>Fofonova Vera, <sup>2</sup>Kraineva Marina, <sup>1</sup>Tomety Serge, <sup>2</sup>Golubeva Elena, <sup>1</sup>Wiltshire Karen Helen

<sup>1</sup> Alfred Wegener Institute, Bremerhaven, Germany

<sup>2</sup> Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: Vera.Fofonova@awi.de

The Lena River is one of the largest rivers in the Arctic and has the largest delta. The mean annual runoff volume of the Lena River from 1935 to 2014 was about 539 km<sup>3</sup>. Water mass characteristics at the Lena River basin outlet are particularly important for dynamics of the Laptev Sea and the Arctic Ocean as a whole (e.g. Dmitrenko et al., 2008; Morison et al., 2012; Yang et al., 2005). Observational data available for the Lena River suggest an on-going change in climate and biological factors over the last 50 years (e.g. Kraberg et al., 2013; McClelland et al., 2006; Yang et al., 2002). Given the large territory of the Lena Delta, the direct measurements are by far insufficient, calling for a modeling approach. However, mostly all models, which include the Laptev Sea shelf zone, do not resolve the Lena Delta and as a consequence lose information about Lena river stream changes using input data with insufficient quality.

In the current work we present the hydrodynamics model for the Lena Delta region based on SELFE (A Circulation Model for Oceans and Estuaries, Zhang and Baptista, 2008). SELFE is an open-source community-supported code. It is based on unstructured triangular grids, and designed for an effective simulation of 3D baroclinic circulation. In frame of the current work available hydrological information for the Lena River lower reaches was collected, analyzed and used for the model verification. The developed hydrodynamics model provides the first necessary step for the further modeling efforts in the area. It also gives an input for the larger scale models resolving hydrodynamics of more than twenty main Lena River freshwater channels with a turning on wetting/drying option.

### References:

1. Dmitrenko, I. A., Kirillov, S. A. and Tremblay, L. B. 2008. The long-term and interannual variability of summer fresh water storage over the eastern Siberian shelf: Implication for climatic change. *J. Geophys. Res.* 113, C03007.
2. Morison J., Kwok, R., Peralta, F. C., Alkire, M., Rigor, I., Andersen, R., and Steele, M., 2012. Changing Arctic Ocean freshwater pathways. *Nature.* 481, 66–70.
3. Yang, D., Kane, D.L., Hinzman, L., Zhang, X., Zhang, T., Ye, H., 2002. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change. *J. Geophys. Res.* 107(D23), 4694.
4. ang, D., Liu, B., Ye, B., 2005. Stream temperature changes over Lena River Basin in Siberia. *Geophys. Res. Lett.* 32, L05401.
5. McClelland, J. W., Déry, S. J., Peterson, B. J., Holmes, R. M., and Wood, E. F., 2006. A pan-arctic evaluation of changes in river discharge during the latter half of the 20th century. *Geophysical Research Letters* 33, L06715.
6. Kraberg, A., Druzhkova, E., Heim, B., Loeder, M.J. and Wiltshire K.H., 2013. Phytoplankton community structure in the Lena Delta (Siberia, Russia) in relation to hydrography. *Biogeosciences Discuss.* 10, 2305-2344.
7. Zhang, Y.-L. and Baptista, A.M. (2008) SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modelling*, 21(3-4), 71-96

# Hydrodynamic modeling of hydrophysical processes in the Lena River delta

Krylova A.I., Shlychkov V.A.

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia  
E-mail: [alla@climate.sccc.ru](mailto:alla@climate.sccc.ru)

The hydrological regime of the complex system of waterflows in the Lena River Delta is simulated with a one-dimensional model based on the Saint Venant equations. The results of model simulations are used to estimate the heat transfer by the Lena River Delta flows to the sea and to assess the temperature regime in the main Delta channels [1]. A digital model of the Delta terrain is built in the equations of motion. The results of a numerical experiment of the temperature regime in the main channels with actual data of 2008 are presented.

## References:

1. V.A.Shlychkov, G.A.Platov, A.I.Krylova *A coupled hydrodynamic system of the Lena River delta and the Laptev Sea shelf zone: the model tuning and preliminary results of numerical simulation // Bull. Nov. Comp. Center, Num. Model. in Atmosph., - 2014. - V.14. - P. 81-103.*

# Гидродинамическое моделирование гидрофизических полей в дельте р. Лена

Шлычков В.А., Крылова А.И.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия  
E-mail: [alla@climate.sccc.ru](mailto:alla@climate.sccc.ru)

## ВВЕДЕНИЕ

Сток сибирских рек является одним из климатообразующих факторов арктических морей.

Воды северных рек в значительной степени воздействуют на процессы водообмена и ледообразования в Северном Ледовитом океане, которые, в свою очередь, регулируют тепловой баланс всего арктического региона и оказывают влияние на структуру глобальной циркуляции. Так, воды р.Лена ощутимо влияют на ледотермические процессы в море Лаптевых, поэтому пространственное распределение потоков речного тепла на устьевом взморье представляет значительный интерес для анализа и интерпретации температурных аномалий шельфовых вод.

Увеличение объемов стока сибирских рек, обусловленное повышением глобальной температуры, может привести к распреснению морской воды и изменить сложившийся гидролого-климатический цикл региона.

Гидродинамические методы описания сложных русловых систем основаны на решении системы уравнений механики жидкости, замыкаемых с помощью тех или иных допущений и эмпирических зависимостей. Цикл работ [Шугрин, 1969; Атавин и др., 1995] дал конструктивную основу численного решения уравнений Сен-Венана для много рукавных речных систем и устьевых областей рек. Методика решения базировалась на использовании одномерного математического описания процессов в каждом звене речной сети и формулировании условий сопряжения потоков в точках ветвления.

Характер устьевых процессов в значительной степени зависит от морфометрических особенностей русла и протекает в каждом рукаве по-разному. В настоящее время отсутствуют работы, посвященные моделированию крайне сложной системы водотоков дельты Лены.

В данной работе обсуждаются вопросы построения математической модели сложноразветвленной речной системы на примере дельты р.Лена. Численная модель основана на использовании системы одномерных уравнений неустановившихся течений жидкости и предназначена для расчета трансформации потоков вещества и тепла при транзите речных вод через систему рукавов дельты к морю.

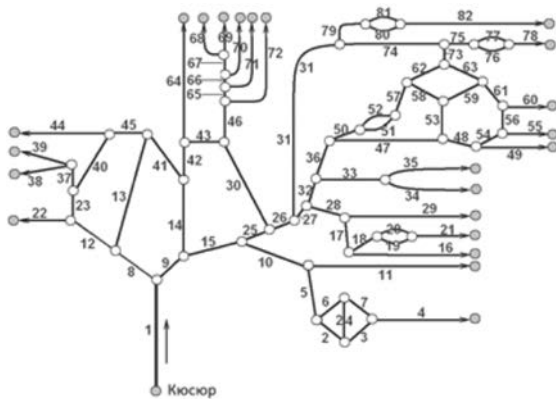
## ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ СЛОЖНОРАЗВЕТВЛЕННОГО УСТЬЯ Р.ЛЕНА

Математическая модель дельты описывает водный режим реки от с.Кюсюр в нижнем течении Лены, который условно может считаться вершиной дельты и где проводятся регулярные гидрологические наблюдения, до впадения речных вод в морскую акваторию.

Построение цифровой модели рельефа (ЦМР) дельты, необходимой для учета в уравнениях движения, включало геометрическую схематизацию русловой сети с выделением основных протоков, имеющих выраженную гидравлическую и пространственную обособленность, и второстепенных протоков, играющих подчиненную роль. Исходным материалом для воспроизведения плановой конфигурации дельты служили географические карты и спутниковые фотографии земной поверхности из онлайн-системы "Google Earth", в совокупности позволяющие оценить параметры и значимость каждого руслового элемента.

Проводились векторизация береговых линий крупных и широких протоков (в т.ч. главного русла Лены) и трассировка небольших водотоков. Степень пространственной дискретизации зависела от геометрии водотока, наличия островов, характера меандрирования и составляла в среднем 300-500 м.

При построении топологической схемы дельты каждый рукав (или речной участок от точки ветвления) с присущими ему индивидуальными гидрологическими характеристиками ассоциировался с направленным отрезком на плоскости, а совокупность таких отрезков образовывала связный граф. Узлы ветвления русел соответствуют вершинам графа, а речные участки – ребрам. В целом геометрическая модель дельты содержит систему связанных между собой 82 русловых участков и 70 узлов сочленения. Рис.1 иллюстрирует итоговую структуру графа.



**Рис. 1.** Схематизация русловой сети дельты Лены в виде одномерного графа. Сплошные линии – речные участки, кружки – узлы деления потока и внешние границы. Цифры у ребер – нумерация участков русла.

Описание расходно-уровневого режима системы русел проводится на основе гидродинамической модели с использованием уравнений Сен-Венана в одномерном приближении. Для отдельного речного участка с номером  $k$  ( $k = 1, \dots, 82$ ) уравнения движения и неразрывности имеют вид [Васильев и др., 1963]

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_k}{\partial t} + \frac{\partial u_k q_k}{\partial s_k} &= -g \omega_k \frac{\partial \zeta_k}{\partial s_k} - \frac{g}{C_s^2 h_k} |u_k| q_k + \frac{b_k \tau_k}{\rho} \\ \frac{\partial \omega_k}{\partial t} + \frac{\partial q_k}{\partial s_k} &= 0, \quad (1) \end{aligned}$$

где  $s$  – продольная координата вдоль русла,  $q = u\omega$  – расход воды,  $u$  – средняя по сечению скорость,  $h$  – глубина потока, определяемая как отношение площади живого сечения  $\omega$  к ширине свободной поверхности  $b = \frac{\partial \omega}{\partial \zeta} |_{\zeta = \text{const}}$ ,  $\tau$  – ветровое напряжение,  $\rho$  – плотность воды,  $C_s$  – коэффициент Шези, характеризующий гидравлическое сопротивление русла. Все переменные отнесены к участку  $k$ .

Граничные условия. На входной границе считается известным расход воды, поступающей с верховьев

$$q_1 = \bar{q}_1(t), \quad (2)$$

где  $\bar{q}_1(t)$  – динамика расходов в Кюсюре по данным наблюдений. На устьевом взморье предполагается совпадение уровней речных рукавов с уровнем моря  $\xi_0^{(k)}$

$$\zeta_k = \xi_0^{(k)}. \quad (3)$$

На внутренних узлах дельты решения "сшиваются" – в качестве условий сопряжения ставятся требования баланса расходов и связь уровней смежных участков. Все узлы деления потока на рис.1 представляют собой "тройники", т.е. три потока, сходящихся в точке ребра. Обозначим  $k_1, k_2, k_3$  – номера этих ребер. Тогда условия сопряжения могут быть записаны в виде

$$q_{k_1} = q_{k_2} + q_{k_3}, \quad \zeta_{k_1} = \zeta_{k_2} = \zeta_{k_3}. \quad (4)$$

Суммарное количество внешних (2), (3) и внутренних (4) граничных условий соответствует совокупному порядку системы (1), что является необходимым условием разрешимости краевой задачи.

Задача по переносу тепла формулируется на основе гидродинамического решения, полученного путем интегрирования уравнений Сен-Венана.

Уравнение притока тепла в пределах элементарного участка  $k$  имеет вид [Атавин и др., 1995]

$$\frac{\partial \omega_k T_k}{\partial t} + \frac{\partial q_k T_k}{\partial s_k} = \frac{\partial}{\partial s_k} \omega_k E_k \frac{\partial T_k}{\partial s_k} + \frac{b_k \Phi_k}{\rho c_p}, \quad (5)$$

где  $T$  – искомое поле температуры,  $E$  – коэффициент дисперсии,  $\Phi$  – поток тепла на свободной поверхности. При отсутствии ледового покрова поток тепла на единицу площади вычисляется как сумма

$$\Phi = \Phi_s - \Phi_b - \Phi_h - \Phi_e,$$

где  $\Phi_s$  – поглощенная солнечная радиация,  $\Phi_b$  – баланс длинноволновой радиации на поверхности,  $\Phi_h$  – турбулентный поток тепла в атмосферу,  $\Phi_e$  – затраты тепла на испарение. Для расчета составляющих  $\Phi_h$ ,  $\Phi_e$  использовалась модель квазистационарного приводного слоя [Шлычков, 2006], основанная на универсальных функциях Бусинжера [Businger et al., 1971].

Краевые условия для уравнений (5) имеют вид: на входной границе ход температуры задается из данных наблюдений

$$T_1 = \bar{T}_1(t). \quad (6)$$

На выходных створах полагается

$$\frac{\partial T_k}{\partial s_k} = 0. \quad (7)$$

В узлах ветвления формулируются внутренние условия баланса потоков тепла и непрерывности температуры

$$P_{k_1} = P_{k_2} + P_{k_3}, \quad T_{k_1} = T_{k_2} = T_{k_3} \quad (8)$$

$$\text{где } P = qT - \omega E \frac{\partial T}{\partial s}.$$

Численное решение уравнений (1) получено методом контрольного объема на основе применения неявной схемы с сохранением интеграла Бернулли [Шлычков, 2012]. На отдельном временном шаге с помощью совокупности параметрических прогонок разрешающий алгоритм сводится к обращению плотно заполненной матрицы с размерностью, отвечающей количеству вершин графа. После определения узловых граничных элементов задача на каждом русловом участке решается обычным методом факторизации. Аналогичным образом интегрируются уравнения (5) с условиями (6)-(8).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Численный эксперимент по переносу тепла и оценки температурного режима в рукавах дельты проводился на основе постановки (1)-(8) с использованием фактической информации за 2008 г. [V.A.Shlychkov et al, 2014]. Расчет выполнен для сезона открытой воды, начиная с 1 мая на срок 150 суток. Для моделирования обменных процессов в приводном слое и расчета компонентов теплового баланса в (5) привлекались данные реанализа NCEP/NCAR о ветре, влажности, температуре, осадках, облачности, интерполированные на сетки речных участков. В качестве начальных условий принималось стационарное решение задачи при фиксированных внешних и граничных параметрах.

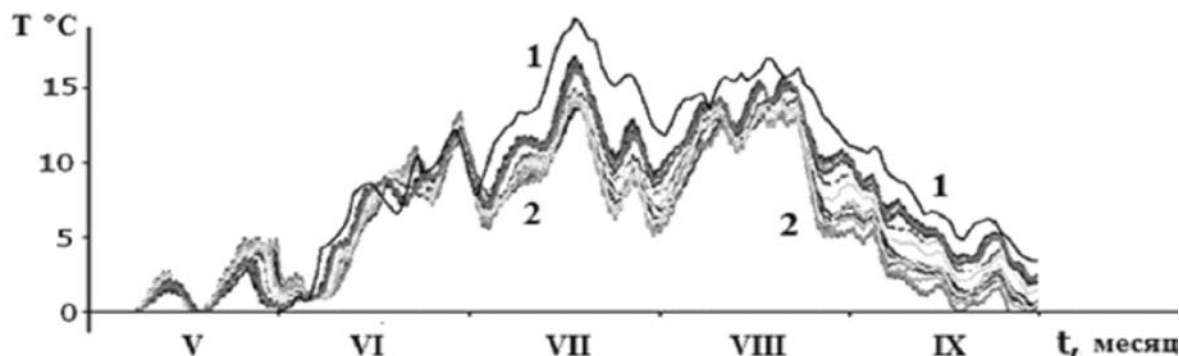


Рис.3. Изменение со временем температуры воды ( $^{\circ}\text{C}$ ) в створе с. Кюсюр (кривая 1) и в рукавах дельты (кривые 2).

Кривая 1 на рис.2, построенная по данным наблюдений, показывает ход температуры воды на входном створе (Кюсюр) в течение исследуемого периода. Кривая 2 отражает среднесуточную температуру воздуха на водосборе дельты.

### Литература:

1. Шугрин С.М. Численный расчет неустановившегося движения воды в системах речных русел или каналов. Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1969. Вып. 1. № 3. С. 25-31.
2. Атавин А.А., Жданов Е.П., Копылов Ю.Н. Одномерная продольная модель переноса тепла и взвешенных речных наносов в водохранилище. Метеорология и гидрология. 1995. № 2. С. 93-101.
3. Васильев О. Ф., Годунов С. К., Притвиц Н.А., Темноева Т.А., Фрязинова И.Л., Шугрин С.М. Численный метод расчета длинных волн в открытых руслах и приложение его к задаче о паводке. ДАН. 1963. Т. 151. № 3. С. 525-527.

4. Шлычков В.А. Численная модель пограничного слоя атмосферы с детализацией конвективных процессов на основе вихререзающего подхода. В кн.: *Аэрозоли Сибири*. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2006 г. С.372-389.
5. Businger J. A., Wyngaard J. C., Izumi Y. Fluxprofile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.* 1971. № 28. P.181–189.
6. Шлычков В.А. Численная модель для уравнений мелкой воды на криволинейной сетке с сохранением интеграла Бернулли. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2012. Т.52. № 7. С.1317- 1324.
7. V.A.Shlychkov, G.A.Platov, A.I.Krylova A coupled hydrodynamic system of the Lena River delta and the Laptev Sea shelf zone: the model tuning and preliminary results of numerical simulation // *Bull. Nov. Comp. Center, Num. Model. in Atmosph.*, - 2014. - V.14. – P. 81-103.