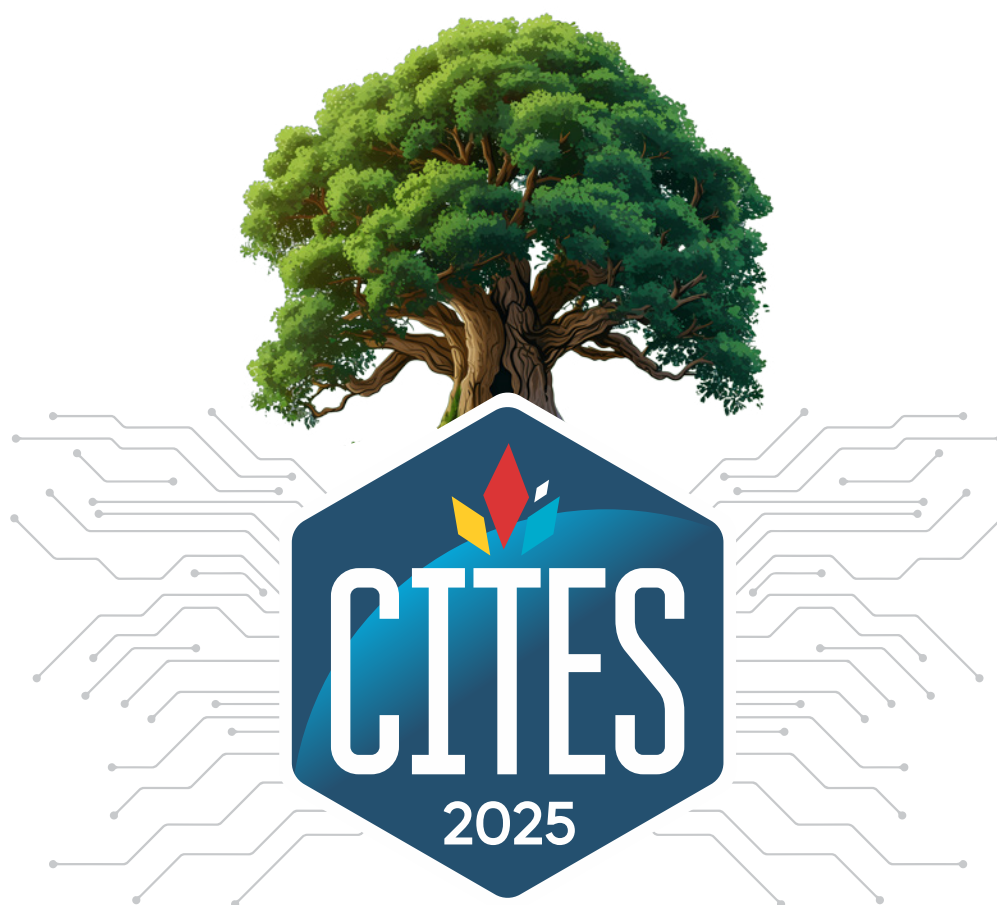


ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМЕНИ Г.И. МАРЧУКА РАН,
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР МГУ
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА,
ИНСТИТУТ МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ
СО РАН,
МОСКОВСКИЙ ЦЕНТР ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ,
ГИДРОМЕТЦЕНТР РОССИИ,
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ ИМЕНИ А.М. ОБУХОВА РАН,
ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН



ТЕЗИСЫ

ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ И ШКОЛЫ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ
ПО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-ИНФОРМАЦИОННЫМ
ТЕХНОЛОГИЯМ ДЛЯ НАУК ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ
CITES-2025

ИБМ РАН
Москва, 2025

© Институт вычислительной математики им Г.И. Марчука РАН, 2025

Тезисы Всероссийской конференции и школы молодых ученых с международным участием по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES-2025 / под ред. М.А. Толстых. – Москва: ИВМ РАН, 2025. – 221 с.

URL: <https://citesconf.ru/inc/files/2025/cites25abs.pdf> – Текст: электронный.

В сборнике представлены тезисы докладов участников Всероссийской конференции и школы молодых ученых с международным участием по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES-2025, прошедшей в Президиуме РАН, Москва, 23 -26 июня 2025 года.

Главный редактор сборника доктор физико-математических наук, профессор **Толстых М.А.** – председатель оргкомитета конференции.
Ответственный редактор сборника **Гордова Ю.Е.**

Минимальные системные требования Yandex (20.12.1) и т.п.
Скорость подключения– не менее 5 Мб/с, Foxit Reader и т.п.
Дата подписания к использованию – 10.06.2025.
Объем издания– 5 Мб.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт вычислительной математики им. Г.И.Марчука Российской академии наук,
119991, г. Москва, ул. Губкина, 8.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ II / СЕКЦИЯ III / СЕКЦИЯ IV / СЕКЦИЯ V / СЕКЦИЯ VI / СЕКЦИЯ VII / СЕКЦИЯ VIII / СЕКЦИЯ IX

CITES'2025

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ ПО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-ИНФОРМАЦИОННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ ДЛЯ НАУК ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

ПЛЕНАРНАЯ СЕКЦИЯ

О работах Г.И. Марчука по проблеме численного прогноза погоды. (К 100-летию со дня рождения) Guri Marchuk studies on numerical weather prediction problem (on 100th anniversary) Дымников В.П. / Dymnikov V.P.	18
Изменения климата Арктики: механизмы и последствия Arctic climate change: mechanisms and consequences Семенов В.А. / Semenov V.A.	19
Совершенствование параметризаций гидрологических процессов в моделях деятельного слоя суши: возможности и ограничения Enhancing the parametrization of hydrological processes in the land surface models: opportunities and constraints Гельфан А.Н. / Gelfan A.	20
Г.И. Марчук и развитие глобальной модели атмосферы ПЛАВ Guri Marchuk and development of the global SL-AV atmosphere model Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Зарипов Р.Б., Гойман Г.С., Алипова К.А., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Бирючева Е.О. / Tostykh M., Fadeev R., Shashkin V., Zaripov R., Goyman G., Alipova K., Mizyak V., Rogutov V., Biryucheva E.	21
Прогноз текущей погоды (наукастинг): инструменты, возможности и ограничения Киктев Д.Б.	22
Strongly Stable Boundary-Layer Flows over Thermally Heterogeneous Surfaces: Effect of Heterogeneity Orientation Mironov D., Sullivan P.	23
Опасные атмосферные конвективные явления в России: изменения, предсказуемость, риски Severe atmospheric convective events in Russia: changes, predictability, risks Чернокульский А.В. / Chernokulsky A.	24

СЕКЦИЯ I

ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ ПОГОДЫ И МЕТЕОРОЛОГИЯ

Динамическое ядро модели атмосферы для численного прогноза погоды и моделирования климата с высоким пространственным разрешением Atmospheric model dynamical core for numerical weather prediction and climate modeling with high spatial resolution Шашкин В.В., Гойман Г.С., Третьяк И.Д., Марханов Д.А., Хайдапов Ж.Б. / Shashkin V.V., Goyman G.S., Tretyak I.D., Markhanov D.A., Khaidapov Z.B.	25
Гидростатическое динамическое ядро для модели атмосферы нового поколения на сетке кубическая сфера Hydrostatic dynamical core for the next-generation atmosphere model on the cubed-sphere grid Гойман Г.С., Шашкин В.В., Третьяк И.Д. / Goyman G.S., Shashkin V.V., Tretyak I.D.	26
Исследование предсказуемости аномалий температуры в юго-восточной Европе и Восточном Средиземноморье в июне 2024 г. в сезонных оперативных прогнозах климатической модели ИВМ РАН Predictability of temperature anomalies in Southeast Europe and the Eastern Mediterranean in June 2024 based on seasonal forecasts of the INM RAS climate model Брагина В.В., Варгин П.Н., Володин Е.М., Тарасевич М.А. / Bragina V.V., Vargin P.N., Volodin E.M., Tarasevich M.A.	27
Комплексный прогноз (пост-процессинг) геопотенциала, температуры и ветра в тропосфере и нижней стратосфере на срок до 72 часов Complex forecasting (post-processing) of geopotential, temperature and wind in the troposphere and lower stratosphere for up to 72 hours Гордин В.А., Смирнов М.А. / Gordin V.A., Smirnov M.A.	29

Оперативный краткосрочный численный прогноз погоды Гидрометцентра России: современное состояние и план развития	
Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Чубарова Н.Е., Шатунова М.В., Алферов Д.Ю., Алферов Ю.В., Варенцов М.И., Гоморев И.А., Гордин В.А., Горлач И.А., Егорова В.А., Кирсанов А.А., Копейкин В.В., Коспанов А.А., Никитин М.А., Перов В.Л., Полюхов А.А., Пономарева Т.Я., Ревокатова А.П., Самсонов Т.Е., Тарасова М.А., Татаринович Е.В., Шишов А.Е., Шувалова Ю.О.	30
Автоматическое распознавание сигнатур интенсивных конвективных процессов на европейской территории России	
Automatic recognition of signatures of intense convective processes in the European territory of Russia	
Калмыкова О.В., Спрыгин А.А., Козлов С.В., Вязилов А.Е., Ингель Л.Х., Кулижникова Л.К. / Kalmykova O.V., Sprygin A.A., Kozlov S.V., Vyazilov A.E., Ingel L.K., Kulizhnikova L.K.	31
Анализ и сверхкраткосрочный численный прогноз погоды в конвективно-разрешающей версии COSMO-Ru	
The data assimilation and rapid update cycle in the system COSMO-Ru	
Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Смирнов А.В., Ривин Г.С. / Blinov D.V., Bundel A.Yu., Kirsanov A.A., Smirnov A.V., Rivin G.S.	32
Влияние мегаполиса Санкт-Петербург на особенности выпадения атмосферных осадков	
St. Petersburg megapolis influence on the atmospheric precipitation patterns	
Колomeец Л.И., Тюриков И.А. / Kolomeets L.I., Tyurikov I.A.	34
Оценка чувствительности модели ICON-Ru к изменениям в поле морского льда и ТПО при прогнозе образования и развития полярных мезоциклонов	
Evaluation of the ICON-Ru model sensitivity to the changes in the sea ice field and SST in forecast of the formation and development of polar lows	
Ревокатова А.П., Никитин М.А., Ломакин И.Р. / Revokatova A.P., Nikitin M.A., Lomakin I.R.	35
Сравнительный анализ экспериментальных и модельных данных о содержании NO₂ в пограничном слое атмосферы столичного региона	
Comparative analysis of experimental and model data on the NO ₂ content in the atmospheric boundary layer of the Moscow region	
Нахаев М.И., Боровский А.Н., Постыляков О.В. / Nakhaev M.I., Borovsky A.N., Postilyakov O.V.	36
Система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды на основе модели ПЛАВ20	
Medium-range ensemble prediction system based on the SL-AV20 model	
Алипова К.А., Мизяк В.Г., Толстых М.А., Гойман Г.С. / Alipova K.A., Mizyak V.G., Tolstykh M.A., Goyman G.S.	37
Численный прогноз опасной для авиации турбулентности и калибровка ее интенсивности по данным наблюдений	
Numerical prediction of turbulence dangerous for aviation and calibration of its intensity based on observational data	
Комасько Н.И., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н., Завьялова А.А. / Komasko N.I., Ivanova A.R., Skriptunova E.N., Zavialova A.A.	38
Коррекция и усвоение данных наблюдений температуры на сети гидрологических постов России	
Correction and data assimilation of temperature observations at hydrological posts in Russia	
Рогутов В.С. / Rogutov V.S.	39
Оценка качества ретроспективных прогнозов на один год моделей Земной системы ИВМ РАН	
Evaluation of the annual hindcasts quality of the INM RAS Earth system models	
Тарасевич М.А., Брагина В.В., Володин Е.М. / Tarasevich M.A., Bragina V.V., Volodin E.M.	40
Новые методы верификации прогнозов погоды высокого разрешения в ФГБУ «Гидрометцентр России»	
Novel Verification Methods for High-Resolution Weather Forecasts in the Hydrometcentre of Russia	
Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В. / Bundel A., Kirsanov A., Astakhova E., Blinov D.	41
Анализ эффективности применения метода пространственного ансамбля для прогноза порывов ветра в рамках системы краткосрочного численного моделирования COSMO-Ru2By Гидрометцентра России	
Application of Spatial ensemble method for the wind gust forecast based on numerical weather modeling system COSMO-Ru2By of the Hydrometcenter of Russia	
Гоморев И.А., Розинкина И.А., Пономарева Т.Я. / Gomorev I.A., Rozinkina I.A., Ponomareva T.Ya.	42
Апробация параметризации городского полога TERRA-URB в модели ICON на примере г. Новосибирск	
Evaluation of the urban canopy scheme TERRA-URB in the ICON model: A case study of Novosibirsk	
Гочаков А.В., Варенцов М.И. / Gochakov A.V., Varentsov M.I.	44

Влияние острова тепла на концентрации примесей в модели COSMO-ART The impact of the urban heat island on pollutant concentrations in COSMO-ART model Кирсанов А.А., Варенцов М.И., Бакланов А.А. / Kirsanov A., Varentsov M., Baklanov A.	45
Наукастинг зон сильной конвекции по данным COSMO и КА Арктика-М Naucastring of strong convection zones based on COSMO and Arktika-M data Колкер А.Б., Гочаков А.В. / Kolker A.B. Gochakov A.V.	46
Конечно-разностная дискретизация негидростатических уравнений динамики атмосферы на сетке кубическая сфера, сохраняющая энергию An energy consistent finite difference discretization for the non-hydrostatic atmospheric dynamics equations on the cubed-sphere grid Марханов Д.А., Шашкин В.В., Гойман Г.С. / Markhanov D.A., Shashkin V.V., Goyman G.S.	47
Отклик полярных мезоциклонов на изменение характеристик подстилающей поверхности в численных экспериментах модели ICON Polar lows response on varying characteristics of surface in numerical experiments with ICON model Никитин М.А., Ревокатова А.П., Ломакин И.Р. / Nikitin M.A., Revokatova A.P., Lomakin I.R.	48
Облачные алгоритмы радиационной модели ECRAD: сравнительный анализ и оценка эффективности Cloud solvers in the ECRAD radiation model: comparative analysis and efficiency assessment Петров Н.А., Чубарова Н.Е. / Petrov N.A., Chubarova N.E.	49
Роль температурного профиля и облачности в формировании положительного длинноволнового баланса в зимний период по результатам экспериментов с моделью ICON The role of the temperature profile and cloudiness in the formation of a positive net longwave radiation in winter according to the results of experiments with the ICON model Пискунова Д.А., Чубарова Н.Е., Шатунова М.В., Шувалова Ю.О. / Piskunova D.A., Chubarova N.Ye., Shatunova M.V., Shuvalova J.O.	50
Аппроксимация уравнений динамики атмосферы на сетках с локальным повышением разрешения Approximation of atmosphere dynamic equations on locally refined meshes Третьяк И.Д., Гойман Г.С., Шашкин В.В. / Tretyak I.D., Goyman G.S., Shashkin V.V.	51
Спектры атмосферных неоднородностей, характерные для циклонического характера погоды на территории Уральского Прикамья Spectra of atmospheric heterogeneities typical for cyclones in the Urals region Федурин Е.Ю. / Fedurin E.Yu.	52
Оценка влияния городской застройки мегаполиса на метеорологические величины и химический состав атмосферы по результатам моделирования WRF-Chem (на примере Санкт-Петербурга) Assessment of the influence of urban development on meteorological variable and chemical composition of the atmosphere based on the WRF-Chem modeling results (on the example of St. Petersburg) Черкашин Д.М., Неробелов Г.М., Анискина О.Г. / Cherkashin D.M., Nerobelov G.M., Aniskina O.G.	53
Моделирование града с использованием мезомасштабной модели WRF-ARW Modeling of hail using the WRF-ARW mesoscale model Шишкина Т.Р., Анискина О.Г. / Shishkina T.R., Aniskina O.G.	54

СЕКЦИЯ II

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

Численное исследование отклика Северного Ледовитого океана на изменения индекса Атлантической мультideкадной осцилляции Numerical study of the Arctic Ocean response to changes in the Atlantic Multidecadal Oscillation index Платов Г.А. / Platov G.A.	56
Воспроизведение климата последнего тысячелетия различными версиями модели ИВМ РАН Last millennium climate simulation by different versions of the climate model INM-CM Морозова П.А., Володин Е.М. / Morozova P.A., Volodin E.M.	57

Связь морского волнения с циклонической активностью в атмосфере Северного полушария по данным реанализа ERA5	
Акперов М.Г., Гиппиус Ф.Н., Мохов И.И., Семенов В.А.	58
Изменения температуры и осадков западной части российской Арктики в 1940–2099 годы по метеостанциям, реанализам и моделям CMIP6	
Temperature and precipitation changes in the western Russian Arctic in 1940–2099 based on weather stations, reanalyses, and CMIP6 models	
Серых И.В., Толстиков А.В. / Serykh I.V., Tolstikov A.V.	59
Возможный механизм формирования сильных отрицательных аномалий площади льда в Арктике в летний период	
Possible mechanism of formation of strong negative anomalies of the Arctic ice area during the warm period	
Романенко В.А., Семенов В.А. / Romanenko V.A., Semenov V.A.	60
Теплобалансовое моделирование таяния низко-расположенных ледников архипелага Шпицберген	
Energy-balance modeling of ablation a low elevated Svalbard glaciers	
Прохорова У.В., Терехов А.В., Иванов Б.В. / Prokhorova U., Terekhov A., Ivanov B.	61
Усовершенствование региональной климатической модели ГГО с новой параметризацией процессов на поверхности суши	
Improvement of the MGO Regional Climate Model with a New Land Surface Parameterization	
Козлов А.В., Школьник И.М., Павлова Т.В. / Kozlov A.V., Shkolnik I.M., Pavlova T.V.	62
Оценка трансграничного переноса чёрного углерода в атмосфере на территории России и сопредельных стран	
Assessment of black carbon transboundary atmospheric transport in Russia and neighbouring countries	
Ильин И.С., Гинзбург В.А., Гусев А.В., Кострыкин С.В., Черненко А.Ю. / Ilyin I.S., Ginzburg V.A., Gusev A.V., Kostyrykin S.V., Chernenkov A.Yu.	63
О планетарном потоке энергии и производстве энтропии на верхней границе атмосферы и земной поверхности	
On the Planetary Energy Flow and Entropy Production at the Top of Atmosphere and the Earth's Surface	
Крупчатников В., Градов В., Боровко И., Володин Е., Гочаков А. / Krupchatnikov V., Gradov V., Borovko I., Volodin E., Gochakov A.	64
Воспроизведение явления Эль-Ниньо в модели климата ИВМ РАН	
Simulation of El-Nino phenomenon in climate model of INM RAS	
Володин Е.М. / Volodin E.M.	65
Климатические особенности и условия формирования градовых событий в России	
Бугримов А.В., Чернокульский А.В.	66
Моделирование Ивановской вспышки смерчей с помощью модели WRF-ARW: анализ особенностей формирования и развития, оценка чувствительности к граничным условиям	
Modelling of the Ivanovo tornado outbreak using the WRF-ARW model: analysis of formation and development features, sensitivity to boundary conditions	
Гостев К.С., Вазаева Н.В., Чернокульский А.В., Степаненко В.М. / Gostev K.S., Vazaeva N.V., Chernokulsky A.V., Stepanenko V.M.	67
Сравнение результатов моделирования температурного и ветрового режима зимнего периода в центре ЕТР с помощью моделей COSMO и WRF	
Comparison of the temperature and wind fields simulations in the center of the ER in winter using COSMO and WRF models	
Докукин С.А., Тихоненко Н.Д., Гинзбург А.С. / Dokukin S.A., Tikhonenko N.D., Ginzburg A.S.	68
Оценка ветроэнергетического потенциала в высоких широтах Северного полушария на основе моделей CMIP6	
Assessment of wind energy potential in the high latitudes of the Northern Hemisphere based on CMIP6 models	
Леонова Д.С., Акперов М. / Leonova D., Akperov M.	69
Циркуляционные паттерны Северной Атлантики в изменениях тепловлагообеспеченности аридной зоны юга Сибири в 2000–2023 гг.	
North Atlantic circulation patterns in heat and moisture supply changes of southern Siberia arid zone in 2000–2023	
Мамасуева С.П., Чередыко Н.Н. / Mamasueva S.P., Cheredko N.N.	70
Эффекты городского острова тепла на основе данных измерений высокого разрешения в Томске и прилегающих районах	
Urban heat island effects based on high temporal resolution measurement data in Tomsk and surrounding areas	
Мамасуева С.П., Чередыко Н.Н., Тельминов А.Е. / Mamasueva S.P., Cheredko N.N., Tel'minov A.E.	71

Облачно-радиационный эффект в Арктике: сравнительный анализ глобальных моделей CMIP6 и спутниковых данных CERES	
Cloud radiation effect in the Arctic: a comparative analysis of global CMIP6 models and CERES satellite data	
Нарижная А.И., Чернокульский А.В. / Narizhnaya A.I., Chernokulsky A.V.	72
Глобальные и региональные особенности воспроизведения площади снежного покрова в осенний период в конце XX – начале XXI вв. по спутниковым данным и реанализу	
Global and regional characteristics of snow cover extent representation during the autumn season in the late 20th – early 21st centuries based on satellite data and reanalysis	
Парфенова М.Р., Тимажев А.В., Аржанов М.М., Мурышев К.Е. / Parfenova M.R., Timazhev A.V., Arzhanov M.M., Muryshev K.E.	73
Микроструктура приземных температурных полей в полярных городах России	
Семёнова А.А., Константинов П.И., Леонов И.И.	74
Анализ изменений высоты внетропической тропопauзы Южного полушария по данным аэрoлогического зондирования в 2015–2024 гг.	
Analysis of changes in the extratropical tropopause height in the Southern Hemisphere based on upper-air sounding data for 2015–2024	
Соколова У.О., Иванова А.Р. / Sokolova U.O., Ivanova A.R.	75
Оценка качества воспроизведения снежного покрова на ледниках на примере высокогорных районов Камчатки и Кавказа	
Evaluation of reproduction quality of snow cover on glaciers on the example of the high-mountain areas of Kamchatka and Caucasus	
Сушинцев И.М., Дроздов Е.Д., Торопов П.А., Михаленко В.Н., Воробьев М.А., Хайрединова А.Г. / Sushintsev I.M., Drozdov E.D., Toropov P.A., Mikhalkenko V.N., Vorobiev M.A., Hayredinova A.G.	76
Чувствительность среднего многолетнего состояния атмосферы к изменению площади горного оледенения	
Sensitivity of long-term average atmosphere state to changes in mountain glacier area	
Сушинцев И.М., Торопов П.А., Черненко А.Ю., Володин Е.М., Корнева И.А. / Sushintsev I.M., Toropov P.A., Chernenkov A.Yu., Volodin E.M., Korneva I.A.	77
 СЕКЦИЯ III	
ПРОЦЕССЫ В ДЕЯТЕЛЬНОМ СЛОЕ СУШИ: МОДЕЛИ, НАБЛЮДЕНИЯ И УСВОЕНИЕ ДАННЫХ	
Ветровалы, вызванные шквалами и смерчами в лесной зоне России и условия их возникновения по данным реанализа ERA5	
Squall- and tornado-induced windthrow events in the forest zone of Russia and the environments of their formation based on the ERA5 reanalysis data	
Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Ярынич Ю.И. / Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Yarynich Yu.I.	78
Может ли нежилой город создавать свой «остров тепла»?	
Эти и другие результаты экспериментальных исследований городского приземного слоя в холодный период	
Константинов П.И., Коспанов А.А., Тимажев А.В., Долгих А.В., Мухартова Ю.В., Семенова А.А., Маратканова В.С.	80
Моделирование деградации многолетнемерзлых пород арктического шельфа при сценарии изменения климата по данным CMIP6	
Modeling of permafrost degradation on the Arctic Shelf under climate change scenarios based on CMIP6 data	
Малахова В.В. / Malakhova V.V.	81
Оценки потоков парниковых газов из проектируемых водохранилищ с помощью модели LAKE 3.2	
Estimations of greenhouse gas fluxes from planned reservoirs using LAKE 3.2 model	
Ломов В.А., Степаненко В.М., Романенко В.А. / Lomov V., Stepanenko V., Romanenko V.	82
Численное моделирование и интегральные оценки потока метана с поверхности болотных экосистем южной части Западной Сибири	
Numerical modeling and integral estimates of methane flux from the surface of bog ecosystems in the southern part of Western Siberia	
Богомоллов В.Ю., Рязанова А.А., Дюкарев Е.А. / Bogomolov V., Ryazanova A.A., Dyukarev E.	84

Отклик потоков диоксида углерода на аномальные температуры и осадки в экосистемах арктической тундры и лесотундры

Daily carbon dioxide fluxes in Arctic tundra and forest-tundra ecosystems in response to temperature and precipitation extremes

Горбаренко Е.М., Гущина Д.Ю., Тарасова М.А., Железнова И.В., Емельянова Е.Р., Гибадуллин Р.Р.,
Осипов А.М., Ольчев А.В. /
Gorbarenko E., Gushchina D., Tarasova M., Zheleznova I., Emelianova E., Gibadullin R.,
Osipov A., Olchev A. 85

Потоки диоксида углерода и метана на береговом участке карбонового полигона «Геленджик» в Краснодарском крае

Carbon dioxide and methane fluxes at the coastal section of the Gelendzhik carbon polygon in Krasnodar Krai

Кочкина М.В., Карпунина Д.А., Леонова Д.С., Пушкин В.В., Ольчев А.В., Кременецкий В.В., Гулев С.К. /
Kochkina M.V., Karpunina D.A., Leonova D.S., Pushkin V.V., Olchev A.V., Kremenetsky V.V., Gulev S.K. 86

Численная гидродинамическая модель р. Амур и ее приложения

Numerical hydrodynamics model of Amur river and its applications

Беликов В.В., Борисова Н.М., Васильева Е.С., Глотко А.В., Федорова Т.А. /
Belikov V.V., Borisova N.M., Vasilieva E.S., Glotko A.V., Fedorova T. A. 87

Модельные оценки изменений условий формирования и масштаба наводнений на реках России в XXI веке

Model assessments of changes in the conditions of formation and scale of floods on Russian rivers in the 21st century

Крыленко И.Н. /
Krylenko I.N. 89

Воспроизведение половодий на реках европейской части России в модели деятельного слоя суши TerM

Simulation of spring river floods at European part of Russia with TerM land surface model

Медведев А.И., Степаненко В.М., Гельфан А.Н., Богомолов В.Ю. /
Medvedev A., Stepanenko V., Gelfan A., Bogomolv V. 90

Возможности валидации модели формирования стока в бассейне высокогорной реки Центрального Кавказа

Possibilities for validation of the runoff formation model in the high-mountain river basin of the Central Caucasus

Павлюкевич Е.Д., Елагина Н.Э., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Гафуров А., Мотовилов Ю.Г. /
Pavlyukevich E.D., Elagina N.E., Krylenko I.N., Rets E.P., Gafurov A., Motovilov Yu.G. 91

Калибровка гидрологических моделей по данным группы станций на основе многомерного коэффициента Нэша-Сатклифа

Calibration of hydrological models using data from a group of stations based on the multivariate Nash-Sutcliffe coefficient

Гарцман Б.И., Соломатин Д.П., Губарева Т.С. /
Gartsman B.I., Solomatine D.P., Gubareva T.S. 92

Моделирование гетеротрофного дыхания болот бореального пояса

Modeling heterotrophic respiration of boreal peatlands

Аббазов А.И., Богомолов В.Ю., Дюкарев Е.А. /
Abbazov A.I., Bogomolov V.Yu., Dyukarev E.A. 93

Оценка воспроизведения аномалий увлажнения почвы на основе выходных массивов модели ПЛАВ для сельскохозяйственных районов России

Assessment of the reproduction of the soil moisture anomalies based on the SLAV model dataset for agricultural regions of Russia

Кланг П.С., Тарасова Л.Л., Хан В.М. / Klang P.S., Tarasova L.L., Khan V.M. 94

Моделирование развития песчаных массивов с использованием цепей Маркова

Modeling the development of sand massifs using Markov chains

Кулик К.Д., Широкова В.А. / Kulik K.D., Shirokova V.A. 95

Численное моделирование вертикальной термической структуры меромиктических водоемов в районе Кандалакшского залива Белого моря

Меркулова Т.С., Осадчиев А.А. 96

Оценка пространственной изменчивости потоков диоксида углерода над неоднородной поверхностью по результатам модельных экспериментов

Estimation of the spatial variability of carbon dioxide fluxes over an inhomogeneous surface from the results of modeling experiments

Нариманидзе А.А., Мухартова Ю.В., Загирова С.В., Ольчев А.В. /
Narimanidze A.A., Mukhartova Yu.V., Zagirova S.V., Olchev A.V. 97

Инверсионное моделирование приземных потоков парниковых газов над неоднородной подстилающей поверхностью по результатам дистанционных измерений

Inversion modeling of surface greenhouse gas fluxes over a non-uniform underlying surface using remote sensing data

Обаев Е.С., Мухартова Ю.В., Гибадуллин Р.Р., Ильясов Д.В., Дюкарев Е.А., Ольчев А.В. /
Obaev E.S., Mukhartova I.V., Gibadullin R.R., Il'yasov D.V., Dyukarev E.A., Olchev A.V. 98

Внедрение модели растительного полога в модель деятельного слоя суши TerM ИВМ РАН-МГУ Implementation of the model of the plant canopy in the Terrestrial model TerM INM RAS-MSU Павинский С.В., Степаненко В.М. / Pavinsky S.V., Stepanenko V.M.	99
Оптимизация углеродного цикла модели деятельного слоя суши TerM Optimization of the Carbon Cycle in the TerM Land Surface Model Покровская А.И., Степаненко В.М. / Pokrovskaya A., Stepanenko V.	100
Оценка характеристик максимального стока реки Томи в XXI веке Assessment of the maximum flow characteristics for the Tom River in the XXI century Разаренова А.Д., Крыленко И.Н. / Razarenova A.D., Krylenko I.N.	101
Сравнение моделей углеродного цикла почвы RothC, SOCS, INMC в рамках конструктора моделей биогеохимических циклов Comparison of soil carbon cycle models RothC, SOCS, INMC within the framework of the biogeochemical cycle model constructor Файкин Г.М., Степаненко В.М., Рыжова И.М., Романенков В.А., Медведев А.И., Шангареева С.К. / Faykin G.M., Stepanenko V.M., Ryzhova I.M., Romanenkov V.A., Medvedev A.I., Shangareeva S.K.	102
Применение вариационных методов усвоения данных к моделям углеродного цикла Application of Variational Data Assimilation Methods to Carbon Cycle Models Шангареева С.К., Степаненко В.М., Файкин Г.М., Медведев А.И. / Shangareeva S.K., Stepanenko V.M., Faykin G.M., Medvedev A.I.	103
Совместное влияние осадков и скорости ветра на возникновение ветровалов в лесной зоне России Combined effect of precipitation and wind speed on the windthrow events occurrence in the Russian forest zone Шихов А.Н., Чернокульский А.В. / Shikhov A.N., Chernokulsky A.V.	104
Генерализация шестиугольных дискретных сеточных моделей направлений стока Generalization of hexagonal discrete grid models of flow directions Шурыгина А.А., Самсонов Т.Е. / Shurygina A.A., Samsonov T.E.	105

СЕКЦИЯ IV

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЁВ

Численное моделирование сезонного ледового режима Рыбинского водохранилища Numerical modeling of seasonal ice regime of Rybinsk reservoir Ахтамьянов Р.А., Гладских Д.С., Мортиков Е.В., Ломов В.А. / Ahtamyaynov R.A., Gladskikh D.S., Mortikov E.V., Lomov V.A.	106
Тензор турбулентного обмена в пограничном слое атмосферы. Решение обратной задачи The tensor of turbulent exchange in the boundary layer of the atmosphere. The inverse problem solution Гордин В.А., Ефременко Д.С. / Gordin V.A., Efremenko D.	108
Об определении распределения источников двуокиси азота в тропосфере по измерениям КА серии Ресурс-П On the determination of the distribution of nitrogen dioxide sources in the troposphere based on measurements by the Resurs-P series spacecraft Христова А.С., Постыляков О.В., Чуличков А.И., Боровский А.Н., Мухартова Ю.В. / Khristova A.S., Postylyakov O.V., Chulichkov A.I., Borovsky A.N., Mukhartova Yu.V.	109
Особенности временных вариаций среднемесячных значений температуры по данным обсерватории Хознпайсенберг Features of temporal variations of monthly average temperature values according to the Hohenpeissenberg Observatory data Рябова С.А. / Riabova S.A.	110
Аномалии геомагнитного поля в Московском регионе перед холодным атмосферным фронтом циклона с центром над Балтийским морем 21 ноября 2024 года Geomagnetic field anomalies in the Moscow region ahead of a cold atmospheric cyclone front centered over the Baltic Sea on November 21, 2024 Рябова С.А. / Riabova S.A.	111

Сравнение данных вихререшающего моделирования с измерениями пульсаций метеопараметров внутри и над городской застройкой Comparison of the data from large eddy simulation with measurements of the meteorological parameters pulsation inside and above the urban canopy Пашкин А.Д., Мортиков Е.В., Репина И.А., Богомолов В.Ю., Тельминов А.Е., Смирнов С.В. / Pashkin A.D., Mortikov E.V., Repina I.A., Bogomolov V.Yu., Telminov A.E., Smirnov S.V.	112
Применение нейронной сети для расчёта турбулентных потоков в приземном слое атмосферы Application of neural networks for calculating turbulent fluxes in the atmospheric surface layer Шишков Е. Н., Мортиков Е.В., Дебольский А.В., Бычкова В.И. / Shishkov E.N., Mortikov E.V., Debolskiy A.V., Bychkova V.I.	113
Параметризации процессов энерго- и газообмена для водоемов суши Parameterization of energy and gas exchange processes for land water bodies Репина И.А. / Repina I.	114
Исследование температурного режима и горизонтальной неоднородности в Рыбинском водохранилище в период открытой воды с использованием трехмерного математического моделирования Study of temperature regime and horizontal heterogeneity in the Rybinsk reservoir during the open water period using three-dimensional mathematical modeling Гладских Д.С., Ломов В.А., Ахтамьянов Р.А., Мортиков Е.В., Законнова А.В., Лазарева В.И. / Gladskikh D.S., Lomov V.A., Ahtamyanov R.A., Mortikov E.V., Zakonnovs A.V., Lazareva V.I.	115
Учет влияния неоднородности поверхностных волн при расчетах климатической модели Accounting the influence of surface wave heterogeneity in climate model calculations Кузнецова А.М., Суязова В.И., Мортиков Е.В. / Kuznetsova A., Suyazova V., Mortikov E.	117
Исследование влияния начальных данных моделирования скорости ветра в приземном слое атмосферы на прогноз ветрового волнения в Балтийском море Марчук Е.А.	118
Моделирование мезомасштабных циркуляций над океаном внутри морских холодных вторжений Modelling mesoscale circulations over the ocean in marine cold-air outbreaks Чечин Д.Г., Шестакова А.А., Люпкес К. / Chechin D.G., Shestakova A.A., Lüpkes C.	119
Субмезомасштабные структуры, регистрируемые в устойчивом атмосферном пограничном слое при помощи многоточечных содарных измерений Submesoscale structures observed in the stable atmospheric boundary layer with the help of multipoint sodar measurements Зайцева Д.В., Люлюкин В.С., Кузнецов Д.Д., Каллистратова М.А. / Zaitseva D.V., Lyulyukin V.S., Kuznetsov D.D., Kallistratova M.A.	120
Многолетняя динамика температурных градиентов в пограничном слое атмосферы по данным метеоконтекста «Останкино» и профиломеров МТП-5 в Москве Long-term dynamics of temperature gradients in the atmospheric boundary layer according to data from the Ostankino meteorological complex and MTP-5 profilers in Moscow Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А., Акопян С.С., Лябина В.А. / Shalygina I.Y., Lezina E.A., Akopian S.S., Lyabina V.A.	121
Вычислительные технологии многомасштабного численного моделирования атмосферного пограничного слоя Мортиков Е.В., Дебольский А.В., Глазунов А.В.	122
Численное моделирование переноса аэрозоля в различных типах городской застройки на основе классификации локальных климатических зон Numerical simulation of aerosol transport in various types of urban geometry on the local climate zones basis Варенцов А.И., Мортиков Е.В., Глазунов А.В., Степаненко В.М. / Varentsov A.I., Mortikov E.V., Glazunov A.V., Stepanenko V.M.	123
Исследование температурного режима и горизонтальной неоднородности в Рыбинском водохранилище в период открытой воды с использованием трехмерного математического моделирования Дебольский А.В., Полюхов А.А., Мортиков Е.В.	124
Изменение характеристик приземного слоя при наличии переноса взвешенных снежных частиц в модели Земной системы INMCM и модели деятельного слоя суши TerM Суязова В.И., Дебольский А.В., Мортиков Е.В., Медведев А.И.	125

СЕКЦИЯ V**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НАУК О ЗЕМЛЕ****Возможности системы RANGES для оценки климатических областей распространения явлений**

Possibilities of the RANGES system for assessing the climatic region of distribution of natural phenomena

Богданович А.Ю. / Bogdanovich A.Yu. 126

О влиянии волн тепла на состояние посевов зерновых культур

On the effect of heat waves on the condition of grain crops

Павлова А.В., Шакина Н.П. /

Pavlova A.V., Shakina N.P. 127

Применение информационной модели для прогноза русловых деформаций на р. Селенга

Application of an information model for forecasting channel deformations on the Selenga River

Ревазов Д.Е., Пилипенко Т.В., Ефграфова А.В. /

Revazov D.Ye., Pilipenko T.V., Efgrafova A.V. 129

Прогнозирование переноса углеводородного загрязнения на основе результатов работы прогностической системы Черного моря

Forecasting of hydrocarbon pollution transfer based on the results of the Black Sea marine forecast system

Пузина О.С., Мизюк А.И., Холод А.Л., Коротаев Г.К., Кубряков А.А. /

Puzina O.S., Misyuk A.I., Kholod A.L., Korotaev G.K., Kubryakov A.A. 130

Алгоритмы усвоения данных на основе ансамблей решений сопряжённых уравнений для систем оценки и прогноза качества воздуха

Adjoint ensemble data assimilation algorithms for air quality assessment and forecasting systems

Пененко А.В., Гочаков А.В., Антохин П.Н., Пененко В.В. /

Penenko A., Gochakov A., Antokhin P., Penenko V. 131

Многокомпонентные модели природных временных рядов с адаптивными составляющими и нейросетевой компонентой: применение в задачах космической погоды (на примере интерактивной системы Aurora)

Multicomponent models of natural time series with adaptive components and a neural network component: application to space weather problems (using the interactive Aurora system as an example)

Мандрикова О.В. / Mandrikova O.V. 132

Технология бесшовного гидрологического прогноза притока воды в оз. Байкал на основе модели формирования речного стока

Морейдо В.М., Калугин А.С. 134

Технологии верификации, интерполяции и ассимиляции данных в задачах мониторинга состояния морских акваторий

Technologies of Data Verification, Interpolation, and Assimilation in Marine Environment Monitoring

Захарова Н.Б., Пармузин Е.И., Агошков В.И., Шелопут Т.О., Никулин И.Д. /

Zakharova N.B., Parmuzin E.I., Agoshkov V.I., Sheloput T.O., Nikulin I.D. 135

Принципы информационно-технологического обеспечения национальной гидрологической моделирующей системы и создания баз сеточных данных реанализа гидрологических характеристик

Information technologies of the national system of hydrological modeling and databases for reanalysis of hydrological characteristics

Гончуков Л.В., Бугаец А.Н., Гельфан А.Н., Соколов О.В., Морейдо В.М. /

Gonchukov L.V., Bugaets A.N., Gelfan A.N., Sokolov O.V., Moreido V.M. 136

Решатель Римана для уравнений мелкой воды на разрывном дне с приложениями в гидрологии и речной гидродинамике

Shallow water Riemann solver with discontinuous bottom for the hydrological and river hydrodynamics tasks

Беликов В.В., Борисова Н.М., Васильева Е.С., Глотко А.В., Федорова Т.А. /

Belikov V.V., Borisova N.M., Vasilieva E.S., Glotko A.V., Fedorova T. A. 138

О развитии гидрометеорологического обеспечения на основе архитектуры «Сетка данных» и ЕСИМО

On the development of hydrometeorological support based on the «Data Mesh» architecture and ESIMO

Вязилов Е.Д., Мельников Д.А. /

Viazilov E.D., Melnikov D.A. 139

Применение сегментации Mask R-CNN и регрессионных моделей для оценки характеристик сосновых древостоев по данным БПЛА

Application of Mask R-CNN segmentation and regression models for estimating characteristics of pine forests from UAV data

Никитина А.Д. / Nikitina A.D. 141

Технологии и методы построения сервиса обработки геопространственных данных с КА с МСА и ГСА

Technologies and methods for creating a geospatial data processing service with spacecraft with multispectral and hyperspectral data

Трофимова А.В., Трофимов И.С. / Trofimova A.V., Trofimov I.S. 142

СЕКЦИЯ VI**28-Я СЕССИЯ СЕВЕРО-ЕВРАЗИЙСКОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО ФОРУМА****Развитие Северо-Евразийского Климатического Центра ВМО: Результаты и Стратегии**

Development of the North Eurasian Climate Centre of WMO: Results and Strategies

Хан В.М., Емелина С.В., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Набокова Е.В., Субботин А.В., Сумерова К.А.,
Тищенко В.А. /Khan V.M., Emelina S.V., Kruglova E.N., Kulikova I.A., Nabokova E.V., Subbotin A.V., Sumerova K.A.,
Tishchenko V.A. 144**Climate Services for Disaster Resilience: Opportunities for Action**

Srivastava S. 145

Latest Advances in Machine Learning-based Sub-seasonal to Seasonal Prediction by the China Meteorological Administration

Chenguang Zhou, Bo Lu, Jie Wu 146

Водные ресурсы Таджикистана. Критическая тенденция абляции ледника Зарафшан

Давлятов Р.Р. 147

Экстремальные метеорологические явления: долгопериодная изменчивость и предсказуемость

Extreme weather events: long-term variability and predictability

Куликова И.А. / Kulikova I.A. 149

Основные особенности климатических условий зимнего сезона 2024–25 гг.

The main features of climatic conditions of the winter season 2024–25

Сумерова К.А., Варгин П.Н., Тищенко В.А. /

Sumerova K.A., Vargin P.N., Tishchenko V.A. 150

Бюллетень сезонных метеопрогнозов. Лето 2025

Seasonal outlook for summer 2025

Сумерова К.А., Куликова И.А. / Sumerova K.A., Kulikova I.A. 151

Консенсусный прогноз аномалий приземной температуры воздуха и осадков на летний сезон 2025 г.

Consensus forecast of surface air temperature and precipitation anomalies for summer 2025

Тищенко В.А., Хан В.М. /

Tishchenko V.A., Khan V.M. 152

Анализ условий формирования температурного режима летнего сезона 2023 г. в Казахстане 153

Analysis of conditions of formation of the temperature regime of the summer season of 2023 in Kazakhstan

Исабекова Ж.К., Васюкова О.В., Иванова И.А. /

Isabekova Zh.K., Vasyukova O.V., Ivanova I.A. 156

Translating NEACOF 28 seasonal outlook to socio-economic impact forecasting

Srivastava S., Pronina E., Goodrazi L.S. 157

Гипотеза: влияет ли приближения к территории России Северного Магнитного полюса на период работы автозимников на территориях Якутии, Красноярского края и Иркутской области

Hypothesis: does the approach of the North Magnetic Pole to the territory of Russia affect the period of operation of winter roads in the territories of Yakutia, the Krasnoyarsk Territory and the Irkutsk region

Филиппова Н.А., Холопцев А.В., Шубкин Р.Г. /

Filippova N.A., Kholoptsev A.V., Shubkin R.G. 158

Изменения социо-климатических индексов за 1990–2024 гг.

Changes in socio-climatic indices in 1990–2024

Ревина А.Д., Емелина С.В., Смоляницкий В.М., Хан В.М. /

Revina A., Emelina S., Smolyanitsky V., Khan V. 160

Оценка засушливых условий на территории Северной Евразии в интересах сельского хозяйства на базе сверхдолгосрочных прогнозов модели Земной системы ИВМ РАН

Assessment of arid conditions in the territory of Northern Eurasia in a complex ecological economy based on decadal forecasts of the Earth system model of INM RAS

Емелина С.В., Тищенко В.А., Хан В.М. /

Emelina S.V., Tishchenko V.A., Khan V.M. 161

Динамика условий термического комфорта летнего сезона на территории Северной Евразии к концу XXI в.

The dynamic of summer thermal comfort conditions in Northern Eurasia by the end of the 21st century

Маратканова В.С., Константинов П.И. / Maratkanova V.S., Konstantinov P.I. 162

Ожидаемые изменения климата на территории Казахстана в XXI веке по данным моделей CMIP6

Projected climate changes in Kazakhstan in the 21st century based on CMIP6 model data

Гвоздева А.В., Аубакирова С.Г., Гущина Д.Ю. /

Gvozdeva A.V., Aubakirova S., Gushchina D.Yu. 163

СЕКЦИЯ VII**СЕМИНАР ПО РАЗВИТИЮ НАЦИОНАЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ****Развитие блока пограничного слоя океана в рамках климатической модели ИВМ РАН**

Development of the ocean boundary layer block within the framework of the INM RAS climate model

Ахтамьянов Р.А., Гладских Д.С., Мортиков Е.В. /

Ahtamyaynov R.A., Gladskih D.S., Mortikov E.V. 164

Модификация крупномасштабных мод атмосферной циркуляции умеренных широт к концу XXI века: прогнозы модели Земной системы INM-CM6-M

Modification of large-scale atmospheric circulation modes in mid-latitudes by the end of the 21st century: projections from the INM-CM6-M Earth System Model

Гвоздева А.В., Гущина Д.Ю., Володин Е.М. /

Gvozdeva A.V., Gushchina D.Yu., Volodin E.M. 166

Среда для разработки океанической модели INMOcean (SINMOD)

The Suite for the INM Ocean model Development (SINMOD)

Ежкова А.А., Оноприенко В.А., Благодатских Д.В., Яковлев Н.Г. /

Ezhkova A.A., Onoprienko V.A., Blagodatskikh D.V., Yakovlev N.G. 167

Новый модуль расчета скоростей фотолиза в Модели Земной Системы на основе Cloud-J v.8.0

New module for calculating photolysis rates Cloud-J v.8.0 in the Earth System Model

Иманова А.С., Смышляев С.П. / Imanova A.S., Smyshlyaev S.P. 168

Оптимизация описания тропосферной химии в Модели Земной Системы:**выбор и обоснование химического механизма**

Optimization of Tropospheric Chemistry Description in an Earth System Model: selection and justification of a chemical mechanism

Окуличева А.А., Ткаченко М.А., Смышляев С.П. /

Okulichева A.A., Tkachenko M.A., Smyshlyaev S.P. 169

Применение рекуррентных нейронных сетей к анализу режимов динамики атмосферы средних широт

Application of recurrent neural networks to the analysis of mid-latitude atmospheric dynamics regimes

Сафонов С.Е., Гаврилов А.С., Мухин Д.Н., Самойлов Р.С. /

Safonov S.E., Gavrilov A.S., Mukhin D.N., Samoilov R.S. 170

Новый модуль приземного слоя для модели Земной системы INMCM

Суязова В.И., Дебольский А.В., Мортиков Е.В., Шестакова А.А. 171

Оптимизация описания тропосферной химии в Модели Земной Системы:**численные эксперименты и оценка механизмов тропосферной химии**

Optimization of tropospheric chemistry description in the Model of the Earth System: numerical experiments and evaluation of tropospheric chemistry mechanisms

Ткаченко М.А., Окуличева А.А., Смышляев С.П. /

Tkachenko M.A., Okulichева A.A., Smyshlyaev S.P. 172

Оценка качества сезонных прогнозов Колебаний Маддена-Джулиана в модели Института вычислительной математики (ИВМ) РАН

Evaluation of the quality of seasonal forecasts of Moden-Julian oscillations in the model of the Institute of Computational Mathematics (ICM) RAS

Умеренков И.А., Железнова И.В., Гущина Д.Ю. /

Umerenkov I.A., Zheleznova I.V., Gushchina D.Yu. 173

Усвоение данных в модели ионосферы INM-IM: нейросетевой и вариационный подходы

Data assimilation in INM-IM ionosphere model: neural network and variational approaches

Хамикова М.А., Останин П.А. / Khamikova M.A., Ostanin P.A. 174

Настройка климатической модели ИВМ РАН для участия в CMIP7

Tuning of INM RAS climate model for participation in CMIP7

Володин Е.М., Брагина В.В., Черненко А.Ю., Тарасевич М.А. /

Volodin E.M., Bragina V.V., Chernenkov A.Yu., Tarasevich M.A. 175

Вычислительные технологии многомасштабного численного моделирования атмосферного пограничного слоя

Дебольский А.В., Мортиков Е.В., Шестакова А.А. 176

Развитие блока наземного углеродного цикла для Модели Земной системы ИВМ РАН

Development of terrestrial carbon cycle module for INM-CM

Черненко А.Ю., Володин Е.М. / Chernenkov A.Yu., Volodin E.M. 177

Результаты создания и внедрения в модель Земной системы INMCM модуля расчета характеристик природных пожаров

Суязова В.И., Степаненко В.М., Черненко А.Ю. 178

Параметризация процессов подсеточного масштаба в атмосфере, океане и на арктическом шельфе Parameterization of subgrid-scale processes in the atmosphere, ocean and Arctic shelf Платов Г.А., Крупчатников В.Н., Малахова В.В. / Platov G.A., Krupchatnikov V.N., Malakhova V.V.	179
Применение схемы КАБАРЕ в климатической модели океана с сигма системой координат Implementation of CABARET scheme in a climate ocean model with sigma vertical coordinate system Благодатских Д.В., Яковлев Н.Г., Ежкова А.А., Оноприенко В.А. / Blagodatskih D., Iakovlev N., Ezkova A., Onoprienko V.	180
Сравнительный анализ численных схем переноса характеристик морского льда в модели Земной системы ИВМ РАН Comparative Analysis of Numerical Schemes for Transporting Sea Ice Characteristics in the Earth System Model INM RAS Ежкова А.А., Оноприенко В.А., Благодатских Д.В., Яковлев Н.Г. / Ezhkova A.A., Onoprienko V.A., Blagodatskih D.V., Yakovlev N.G.	181
Исследование динамики экваториальных волн в климатической модели ИВМ РАН на основе тестовой постановки бароклинной волны Мацуно Investigation of Equatorial Wave Dynamics in the INM RAS Climate Model based on the Matsuno Baroclinic Wave Test Case Оноприенко В.А., Гойман Г.С., Яковлев Н.Г. / Onoprienko V.A., Goyman G.S., Iakovlev N.G.	183
Обратные связи между химическими, радиационными и динамическими процессами в Модели Земной Системы с блоком химии Feedbacks between chemical, radiative and dynamical processes in the Earth System Model with a chemistry module Смышляев С.П., Яковлев А.Р., Ткаченко М.А., Ромашенко Д.Д., Иманова А.С., Окуличева А.А. / Smyshlyayev S.P., Jakovlev A.R., Tkachenko M.A., Romaschenko D.D., Imanova A.S., Okulichева A.A.	184
Трёхмерная модель ионосферы Земли INM-IM с системой вариационного усвоения данных наблюдений INM-IM: three-dimensional model of the Earth's ionosphere with a variational data assimilation Кулямин Д.В., Останин П.А., Дымников В.П. / Kulyamin D.V., Ostanin P.A., Dymnikov V.P.	185
Модуль расчета атмосферных электрических параметров в национальной климатической модели Module for Calculating Atmospheric Electrical Parameters in the National Climate Model Сарафанов Ф.Г., Ильин Н.В., Слюняев Н.Н., Евтушенко А.А., Мареев Е.А. / Sarafanov F.G., Ilin N.V., Slyunyaev N.N., Evtushenko A.A., Mareev E.A.	186
Параметризация глобальной молниевой активности для крупномасштабного моделирования погоды и климата Parameterization of global lightning activity for large-scale weather and climate modeling Ильин Н.В., Сарафанов Ф.Г., Слюняев Н.Н. / Ilin N.V., Sarafanov F.G., Slyunyaev N.N.	187
Оценки качества исторических и оперативных сезонных прогнозов основных метеорологических полей по моделям земной системы ИВМ РАН INMCM5 и INMCM6M Quality assessment of historical and operational seasonal forecasts of the main meteorological fields using the INMCM5 and INMCM6M earth system models of the Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences Тищенко В.А., Хан В.М., Субботин А.В. / Tishchenko V.A., Khan V.M., Subbotin A.V.	188
Исследование динамики колебания Эль-Ниньо в меняющемся климате на основе байесовских стохастических моделей Studying ENSO dynamics in a changing climate using Bayesian stochastic models Селезнев А.Ф., Мухин Д.Н. / Seleznev A., Mukhin D.	189
Развитие подхода к идентификации и анализу режимов циркуляции атмосферы на основе скрытых марковских моделей Development of an approach to identification and analysis of atmospheric circulation regimes based on hidden Markov models Мухин Д.Н., Самойлов Р.С., Сафонов С.Е. / Mukhin D.N., Samoilov R.S., Safonov S.E.	190
Режимы крупномасштабной атмосферной циркуляции в эксперименте INM-CM6-L с холодной Северной Атлантикой Atmospheric circulation regimes in an INM-CM6-L experiment with cold North Atlantic Ocean Бабанов Б.А., Семенов В.А. / Babanov B.A., Semenov V.A.	191
Оценка качества воспроизведения трехмерной структуры зональной и региональной циркуляции ветра в модели INM-CM6M Assessing the reproduction of the 3D structure of zonal and regional wind circulation in the INM-CM6M model Железнова И.В., Новикова А.А., Сорокин А.Д., Гущина Д.Ю. / Zheleznova I.V., Novikova A.A., Sorokin A.D., Gushchina D.Yu.	192

СЕКЦИЯ VIII**МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ В ЗАДАЧАХ НАУК О ЗЕМЛЕ****Влияния метеорологических условий на прогноз концентрации приземного аэрозоля зимой в мегаполисе**

The influence of meteorological conditions on the forecast of ground-level aerosol concentration at winter period in a metropolis

Александров Г.Г., Виноградова А.А., Гинзбург А.С., Губанова Д.П. /
Alexandrov G.G., Vinogradova A.A., Ginzburg A.S., Gubanova D.P. 194

Машинное обучение для диагностики статистик пространственного распределения осадков в Московском регионе

Machine learning for diagnostics of precipitation spatial distribution statistics in the Moscow region

Ярынич Ю.И., Варенцов М.И., Криницкий М.А., Степаненко В.М. /
Yarinich Y., Varentsov M., Krinitskiy M., Stepanenko V. 196

Моделирование турбулентного переноса примесей в планетарном пограничном слое с применением методов крупных вихрей и методов машинного обучения

Modeling of turbulent pollutants transport in planetary boundary layer exploiting large eddy simulation and machine learning

Герасимов И.А., Криницкий М.А., Мортиков Е.В. /
Gerasimov I.A., Krinitskiy M.A., Mortikov E.V. 197

Обнаружение градоопасных состояний атмосферы с помощью глубокого обучения на полях метеовеличин

Detection of hail-favored atmospheric condition using deep learning on meteorological fields

Блинов П.Д., Чернокульский А.В., Криницкий М.А., Бугримов А.В. /
Blinov P.D., Chernokulsky A.V., Krinitskiy M.A., Bugrimov A.V. 199

Исследование характеристик возвратной миграции нерки на основе интеграции океанических данных и глубокого обучения

Investigating Return Migration Characteristics of Salmon Based on Ocean Data Integration and Deep Learning

Борисов М.А., Криницкий М.А. /
Borisov M.A., Krinitskiy M.A. 200

Использование алгоритмов random forest в задаче картографирования заброшенных сельскохозяйственных земель и оценке запаса углерода в древостое на них по мультимасштабным данным дистанционного зондирования земли

Application of random forest algorithms for mapping abandoned agricultural lands and estimating carbon stock in tree stands using multi-scale remote sensing data

Тихонов Д.Н., Белова Е.И., Ершов Д.В. /
Tikhonov D.N., Belova E.I., Ershov D.V. 201

Моделирование нетто-обмена CO₂ в экосистемах острова Хоккайдо с использованием методов машинного обучения: оценка пространственно-временной динамики углеродного баланса

Modeling CO₂ Net Ecosystem Exchange in Hokkaido island Using Machine Learning Methods: Assessing Spatiotemporal Dynamics of Carbon Balance

Горбаренко А.В., Горбаренко Е.М. / Gorbarenko A., Gorbarenko E. 202

Методы оптимизации обработки больших данных в задаче классификации сельскохозяйственных культур по спутниковым снимкам

Optimization methods of processing big data in crop classification approach using satellite images

Богдан Е.В., Филь П.П., Цымбарович П.Р., Фомин Д.С. /
Bogdan E.V., Phil P.P., Tsymbarovich P.R., Fomin D.S. 203

Гибридный алгоритм идентификации источников выбросов на основе глубокого обучения и оператора чувствительности

Hybrid Deep Learning and Sensitivity Operator-Based Algorithm for Emission Sources Identification

Пененко А.В., Емельянов М.К., Русин Е.В. /
Penenko A., Emelyanov M., Rusin E. 204

Восстановление приповерхностной влажности атмосферы над океаном по данным сопутствующих метеорологических измерений с применением методов машинного обучения

Reconstruction of atmospheric surface humidity over the ocean from relevant meteorological measurements using machine learning methods

Вострикова С.А., Криницкий М.А. /
Vostrikova S.A., Krinitskiy M.A. 205

Метод и алгоритмы обнаружения спорадических вариаций космических лучей на основе когнитивных правил выбора решений и нейронных сетей

Method and algorithms for detecting sporadic variations of cosmic rays based on cognitive decision rules and neural networks

Мандрикова Б.С., Мандрикова О.В. /
Mandrikova B.S., Mandrikova O.V. 207

Восстановление вертикальных распределений NO₂ и аэрозоля в нижней тропосфере по измерениям MAX-DOAS с использованием ИНС	
Retrieval of vertical profiles of NO ₂ and aerosol in the lower troposphere from MAX-DOAS measurements using ANN	
Постыляков О.В., Шамсутдинов Д.Р., Боровский А.Н. / Postlyakov O.V., Shamsutdinov D.R., Borovsky A.N.	208
Применение алгоритмов машинного обучения для моделирования эвапотранспирации в агроэкосистемах	
Application of machine learning algorithms for modeling evapotranspiration in agroecosystems	
Доброхотов А.В., Козырева Л.В., Мухина Д.П. / Dobrokhotov A.V., Kozyreva L.V., Mukhina D.P.	209
Параметризация вихревых процессов в численных моделях океана с использованием методов машинного обучения	
Eddy Parameterization in Ocean Models Using Machine Learning Approaches	
Якшина Д.Ф., Платов Г.А., Демьяненко Д.В. / Iakshina D.F., Platov G.A., Demyanenko D.V.	210
Восстановление высот зданий на основе базы пространственных данных Overture maps и цифровой модели поверхности ArcticDEM с использованием машинного обучения	
Building height estimation from Overture maps spatial database and ArcticDEM digital surface model using machine learning	
Окунева В.В., Самсонов Т.Е. / Okuneva V.V., Samsonov T.E.	211
Моделирование городского острова тепла методами машинного обучения с использованием концепции «мезомасштабного футпринта»	
ML-based urban heat island modeling using a «mesoscale footprint» concept	
Варенцов М.И., Согочев А.Ф., Криницкий М.А., Степаненко В.М. / Varentsov M., Sogachev A., Krinitskiy M., Stepanenko V.	212
Оценка динамики атмосферы по результатам нейросетевого масштабирования полей приповерхностного ветра над Баренцевым и Карским морями	
Estimation of atmospheric dynamics based on the results of ANN downscaling of surface wind over the Barents and Kara Seas	
Резвов В.Ю., Криницкий М.А. / Rezov V.Yu., Krinitskiy M.A.	213
Использование искусственной нейронной сети для масштабирования метеорологических величин в городской застройке с высоким пространственным разрешением	
Using an artificial neural network for a downscaling of meteorological parameters in an urban area with high resolution	
Коспанов А.А., Криницкий М.А., Варенцов М.И., Степаненко В.М. / Kospanov A.A., Krinitskiy M.A., Varentsov M.I., Stepanenko V.M.	214

СЕКЦИЯ IX

FUTURE EARTH PROGRAM AND NORTHERN EURASIA FUTURE INITIATIVE

Состояние исследований по научной программе «Будущее Северной Евразии»

Present status of Scientific Program «North Eurasian Future Initiative»

Гройсман П.Я. / Groisman P.Ya..... 215

Влияние водохранилищ на сток крупных рек России в средние по водности, экстремально маловодные и многоводные годы

The influence of water reservoirs on the flow of large rivers in Russia in years with average flow, extremely low-water and high-water years

Георгиади А.Г., Милукова И.П., Гройсман П.Я., Барабанова Е.А. /

Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Groisman P.Ya., Barabanova E.A..... 216

Сток рек России в условиях глобального потепления

Russian river water flow in the conditions of global warming

Георгиади А.Г., Милукова И.П., Бородин О.О., Барабанова Е.А. /

Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Borodin O.O., Barabanova E.A..... 217

Мониторинг потоков углерода в болотных экосистемах Западной Сибири с помощью прототипа веб-ГИС

Monitoring West Siberia wetlands carbon fluxes using web-GIS prototype

Гордов Е.П., Турчановский И.Ю., Ахлестин А.Ю., Богомолов В.Ю., Генина Е.Ю., Гордова Ю.Е.,

Рязанова А.А., Титов А.Г. /

Gordov E.P., Turchanovskii I.Yu., Akhlestin A.Yu., Bogomolov V.Yu., Genina E.Yu., Gordova Yu.E.,

Riazanova A.A., Titov A.G..... 218

Эмиссионные и обменные потоки CO₂ в подчиненном ярусе нарушенных таежных экосистем

Центральной Сибири

Emission and exchange fluxes of CO₂ in the subordinate forest layer of disturbed taiga ecosystems of Central Siberia

Махныкина А.В., Кукавская Е.А., Панов А.В., Прокушкин А.С. /

Makhnykina A.V., Kukavskaya E.A., Panov A.V., Prokushkin A.S..... 219

Природно-климатические решения как инструмент смягчения последствий современных климатических изменений

Natural climate solutions as a strategy to mitigate the effects of modern climate change

Ольчев А.В. / Olchev A. 220

Выбросы прекратились, проблемы остались – медно-никелевый комбинат (Кольский полуостров)

Sokolov A.V., Gashkina N.A., Moiseenko T.I..... 221

ПЛЕНАРНАЯ СЕКЦИЯ

О работах Г.И. Марчука по проблеме численного прогноза погоды. (К 100-летию со дня рождения)

Дымников В.П.

Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН
119333 Москва, ул. Губкина, 8
E-mail : dymnikov.valentin@yandex.ru

Guri Marchuk studies on numerical weather prediction problem (on 100th anniversary)

Dymnikov V.P.

Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, 119333 Moscow, 8 Goubkina str., Russia

Проводится анализ вклада академика РАН Г.И. Марчука в решение проблемы численного прогноза погоды. Показано, что идеи и методы, предложенные Г.И. Марчуком на ранних этапах решения этой проблемы, являются активно востребованными до настоящего времени.

Изменения климата Арктики: механизмы и последствия

Семенов В.А.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017 Москва, Пыжевский пер. 3, с.1

Рассмотрены особенности современных изменений климата Арктики, их возможные механизмы. Представлены результаты исследований влияния быстрых изменений климата Арктики на экстремальные погодные явления, атмосферную циркуляцию в средних широтах Северного полушария, последствий изменений климата для некоторых отраслей экономики.

Arctic climate change: mechanisms and consequences

Semenov V.A.

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 119017 Moscow, Pyzhevskiy per. 3, s.1

Modern Arctic climate change and possible mechanisms are reviewed. Results of studies on the impact of rapid climate changes in the Arctic on atmospheric circulation in the northern midlatitudes and extreme events are presented. Some consequences of the Arctic climate change on economics are discussed.

Совершенствование параметризаций гидрологических процессов в моделях деятельного слоя суши: возможности и ограничения

Гельфан А.Н.

МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, ул. Колмогорова, 1, 119991 Москва, Россия
Институт водных проблем РАН, ул. Губкина, 3, 119333 Москва, Россия

Enhancing the parametrization of hydrological processes in the land surface models: opportunities and constraints

Gelfan A.

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1 Kolmogorova, 119991 Moscow, Russia
Water Problems Institute of RAS, 3 Gubkina, 119333, Moscow, Russia

Совершенствование параметризаций гидрологических процессов в моделях деятельного слоя суши – составляющих моделей Земной системы, повышает диагностические и прогностические возможности последних, надежность полученных на их основе оценок и прогнозов. В последние годы достигнут значительный прогресс в описании гидрологического цикла суши на глобальном масштабе. При этом, как отмечается, в том числе, в докладах IPCC, на региональном масштабе современные модели деятельного слоя суши воспроизводят гидрологические характеристики, включая интегральный показатель водного режима территорий – речной сток, со значительными погрешностями. Есть основания полагать, что возможности совершенствования моделей деятельного слоя суши связаны с усвоением развитых в гидрологии речных бассейнов подходов к региональному моделированию гидрологических процессов.

В докладе на примере многолетнего опыта разработки системы физико-математических моделей гидрологического цикла, накопленного в ИВП РАН, будут перечислены и кратко рассмотрены некоторые из таких возможностей, включая:

- (1) развитие параметризаций отдельных гидрологических процессов: инфильтрации воды в мерзлую почву с учетом влияния льда и переохлажденной влаги, задержания атмосферных осадков растительностью и бессточными углублениями рельефа, процессов формирования снежного покрова и снеготаяния в лесу;
- (2) развитие методов описания подсеточной изменчивости гидрологических процессов (на примере процессов снеготаяния и инфильтрации воды в почву)
- (3) предложения по использованию природоподобных расчетных сеток, традиционно используемых в гидрологических моделях;
- (4) развитие методов оценки робастности и верификации моделей для описания гидрологических процессов в изменяющихся климатических условиях.

Обсуждаются ограничения, связанные с различием задач, решаемых гидрологическими моделями и моделями деятельного слоя суши, требованиями к детальности описания отдельных процессов, к исходной информации и ее пространственно-временному разрешению, подходам к заданию параметров и др.

- Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №24-17-00152)

Г.И. Марчук и развитие глобальной модели атмосферы ПЛАВ

^{1,2,3} Толстых М.А., ^{1,2,3} Фадеев Р.Ю., ^{1,2,3} Шашкин В.В., ² Зарипов Р.Б., ^{1,3} Гойман Г.С.,
^{2,1} Алипова К.А., ² Мизяк В.Г., ² Рогутов В.С., ² Бирючева Е.О.

¹ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, 11991 Москва ул. Губкина 8

² Гидрометцентр России, 123376 Москва, Большой Предтеченский переулок, д.13, строение 1

³ Московский физико-технический институт, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Guri Marchuk and development of the global SL-AV atmosphere model

^{1,2,3} Tostykh M., ^{1,2,3} Fadeev R., ^{1,2,3} Shashkin V., ² Zaripov R., ^{1,3} Goyman G., ^{2,1} Alipova K.,
² Mizyak V., ² Rogutov V., ² Biryucheva E.

¹ Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, 8 Gubkina st. Moscow 119991 Russia

² Hydrometcentre of Russia, 13, building 1, Bolshoy Predtechensky lane, Moscow, 123376, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Рассказывается о влиянии академика Гурия Ивановича Марчука, чье столетие отмечается в 2025 году, на развитие глобального моделирования атмосферы в СССР и России в 1980–2000-х годах, в том числе, на разработку и развитие глобальной модели атмосферы ПЛАВ. Многомасштабная (бесшовная) глобальная модель атмосферы ПЛАВ, разработанная в ИВМ РАН и Гидрометцентре России, применяется для оперативных детерминистских и ансамблевых среднесрочных, ансамблевых долгосрочных прогнозов погоды. Представлены результаты, полученные моделью ПЛАВ для этих приложений. Показано, что результаты во многом достигнуты благодаря кропотливой работе по настройке соответствия модельного «климата» реальному.

Модель ПЛАВ постоянно совершенствуется. Обсуждаются текущая деятельность и планы дальнейшего развития модели.

- Исследования в области совершенствования долгосрочного прогноза выполнены в Гидрометцентре России за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00314, <https://rscf.ru/project/25-17-00314/>.

Прогноз текущей погоды (наукастинг): инструменты, возможности и ограничения

Киктев Д.Б.

Гидрометцентр России

Обсуждаются специфика задачи наукастинга как прогноза текущей погоды, потребности наукастинга в наблюдениях и основные подходы к решению задачи прогноза текущей погоды. Рассматриваются некоторые особенности наукастинга осадков и скорости порывов ветра – параметров, представляющих особый интерес для большинства потребителей. Отмечаются сложность верификации результатов наукастинга, крайне ограниченная детерминистская предсказуемость на конвективных пространственно-временных масштабах и важность использования вероятностного подхода. Приводятся иллюстрации из отечественных разработок в области наукастинга.

Strongly Stable Boundary-Layer Flows over Thermally Heterogeneous Surfaces: Effect of Heterogeneity Orientation

¹ Mironov D., ² Sullivan P.

¹ German Weather Service, Offenbach am Main, Germany

² National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA

Results from direct numerical simulations (DNS) of stably stratified plane Couette flows over thermally heterogeneous surfaces are presented. A plane Couette flow configuration at bulk Reynolds number of 104 is used as a proxy for real-world stably stratified boundary layers. The focus of the present study is on the effect of the surface heterogeneity orientation on the boundary-layer mean and turbulence structure and the efficiency of heat and momentum transfer. In our Couette flow configuration, the temperature of the upper and lower walls is either homogeneous or varies sinusoidally, where the temperature-wave crests are either normal or parallel to the mean flow (HETx and HETy cases, respectively). The horizontal-mean surface temperature is the same in both homogeneous and heterogeneous simulations. The stratification at bulk Richardson number of $R_i = 0.25$ is strong enough to quench turbulence over a homogeneous surface, but turbulence survives over heterogeneous surfaces. In all HET cases, both molecular diffusion and turbulence transfer momentum down the gradient of mean velocity. The total (turbulent plus diffusive) heat flux is down-gradient, but quasi-organized boundary-layer scale eddy motions generated by the surface thermal heterogeneity induce heat transfer up the gradient of the mean temperature. This suggests an analogy to convective boundary layers driven by the surface buoyancy flux, where counter-gradient heat transport is often encountered. It is attributed to quasi-organized structures (convective plumes and rolls) whose spatial scales are larger than the spatial scales of chaotic, nearly isotropic turbulence. Examination of HETx and HETy cases shows that the configuration with the spanwise heterogeneity is more efficient in transporting momentum and heat vertically than its counterpart with the streamwise heterogeneity. Vertical profiles of mean fields and turbulence moments are considerably different in the HETx and HETy cases. The streamwise heat flux differs not only in magnitude but also in sign. Analysis of the second-order turbulence moments, the vertical-velocity skewness, the temperature skewness, and the flow eddy structure suggests a physically plausible explanation of the observed differences between the HETx and HETy cases. The implications of our DNS results for modelling turbulence within the Reynolds-Averaged Navier-Stokes framework are discussed. A physically sound turbulence closure model (parameterization scheme) that accounts for the effect of the surface thermal heterogeneity, including the orientation of the heterogeneity patterns, is still to be developed. Results from the present study emphasize several important aspects that should be considered to accomplish this objective.

References:

1. Mironov, D. V., and P. P. Sullivan, 2016: Second-moment budgets and mixing intensity in the stably stratified atmospheric boundary layer over thermally heterogeneous surfaces. *J. Atmos. Sci.*, 73, 449-464. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0075.1>
2. Mironov, D. V., and P. P. Sullivan, 2023: Turbulence structure and mixing in strongly stable boundary-layer flows over thermally heterogeneous surfaces. *Boundary-Layer Meteorol.*, 187, 371-393. <https://doi.org/10.1007/s10546-022-00766-x>
3. Mironov, D. V., and P. P. Sullivan, 2024: Turbulence structure and mixing in strongly stable Couette flows over thermally heterogeneous surfaces: effect of heterogeneity orientation. *Flow Turbul. Combust.*, doi: <https://doi.org/10.1007/s10494-024-00593-9>

Опасные атмосферные конвективные явления в России: изменения, предсказуемость, риски

Чернокульский А.В.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Россия, Москва, Пыжевский пер., д. 3, стр.1

E-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru

Severe atmospheric convective events in Russia: changes, predictability, risks

Chernokulsky A.

Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Russian Federation, Moscow, Pzhevsky 3, 1

Представлены результаты многолетней работы об исследовании конвективных опасных явлений погоды (КОЯП), в том числе сильных ливнях, смерчах, шквалах, крупном граде. Создан ряд уникальных баз данных непосредственно о событиях, а также об условиях их формирования, в том числе базы данных о мезомасштабных конвективных системах и об индексах конвективной неустойчивости. Проанализированы условия формирования КОЯП, исследована предсказуемость формирования КОЯП с помощью мезомасштабного моделирования. Проведена диагностика пространственно-временной изменчивости повторяемости и интенсивности различных КОЯП в регионах России в теплый период года на основе различных независимых источников информации. Результаты анализа указывают на общую интенсификацию КОЯП в большинстве регионов России за исключением ряда регионов на юге европейской территории России. Повторяемость умеренных конвективных явлений имеет тенденцию к уменьшению, а наиболее сильных – к росту. Полученные результаты целесообразно принимать во внимание при оценке рисков, связанных с КОЯП и разработке планов адаптации российских регионов и отраслей к изменению климата.

- Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №24-17-00357).

ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ ПОГОДЫ И МЕТЕОРОЛОГИЯ

Динамическое ядро модели атмосферы для численного прогноза погоды и моделирования климата с высоким пространственным разрешением

^{1,2,3} Шашкин В.В., ^{1,2,3} Гойман Г.С., ^{3,1,2} Третьяк И.Д., ^{1,2} Марханов Д.А., ³ Хайдапов Ж.Б.

¹ Институт Вычислительной Математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва, ул. Губкина, д. 8

² Гидрометцентр России, г. Москва, Бол. Предтеченский пер., д. 11-13

³ Московский физико-технический институт, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

E-mail: v.shashkin@inm.ras.ru

Atmospheric model dynamical core for numerical weather prediction and climate modeling with high spatial resolution

^{1,2,3} Shashkin V.V., ^{1,2,3} Goyman G.S., ^{3,1,2} Tretyak I.D., ^{1,2} Markhanov D.A., ³ Khaidapov Z.B.

¹ G.I. Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Gubkina st., 8

² Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Bol. Predtechenskiy sst., 11-13

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow Region, Dolgoprudniy, Institutskiy str., 9

Важной частью любой математической модели атмосферы является динамическое ядро— алгоритм численного решения уравнений гидротермодинамики на пространственных масштабах, разрешаемых на сетке. Динамические ядра, применяемые в глобальных моделях высокого разрешения, должны соответствовать ряду требований, обусловленных практической выполнимостью расчетов. Наиболее значимые требования: формулировка на квазиравномерной сферической сетке, использование негидростатических уравнений динамики, а также высокая параллельная эффективность, в том числе на графических ускорителях.

Динамические ядра, отвечающие большинству этих требований, разработаны относительно недавно (например, Германия, США и Канада) или разрабатываются в настоящее время (Великобритания). В России аналогичная разработка ведётся в ИВМ РАН совместно с Гидрометцентром России. Особенностью нового динамического ядра является возможность гибко комбинировать численные методы решения отдельных подзадач, что позволяет построить алгоритм, оптимизированный для решения конкретной проблемы моделирования динамики атмосферы. На текущий момент реализованы негидростатический и гидростатический варианты динамического ядра на сетке кубическая сфера с возможностью локального повышения разрешения, используемая пространственная аппроксимация сохраняет полную энергию.

В докладе будет рассмотрена математическая формулировка динамического ядра, а также текущее состояние разработки, результаты верификации на идеализированных численных экспериментах. Планируется обсуждения задач, которые еще предстоит решить.

Гидростатическое динамическое ядро для модели атмосферы нового поколения на сетке кубическая сфера

^{1,2,3} Гойман Г.С., ^{1,3,2} Шашкин В.В., ^{2,1,3} Третьяк И.Д.

¹ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, ул. Губкина 8, г. Москва, 119333, Россия

² Московский физико-технический институт (государственный университет), Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

³ Гидрометцентр России, 123242, г. Москва, Бол. Предтеченский пер. д. 11-13

E-mail: gordeygoyman@gmail.com

Hydrostatic dynamical core for the next-generation atmosphere model on the cubed-sphere grid

^{1,2,3} Goyman G.S., ^{1,3,2} Shashkin V.V., ^{2,1,3} Tretyak I.D.

¹ Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Gubkin str., 8, Moscow, 119333, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow region, Dolgoprudny, Institutskiy sst., 9

³ Hydrometcenter of Russia, 123242, Moscow, Bol. Predtechenskiy sst., 11-13

Область глобального численного моделирования атмосферы охватывает широкий спектр задач, включая прогнозирование погоды и ее аномалий на различных временных масштабах, исследование климата и моделирование верхней атмосферы. Требования к моделям существенно различаются в зависимости от целевого приложения, что отражается в выборе решаемых уравнений, используемых приближений, численных методов, систем координат и других аспектов.

Важным фактором, влияющим на требования к вычислительным ресурсам, является выбор между гидростатической и негидростатической системами уравнений гидротермодинамики атмосферы. Современные системы оперативного прогноза погоды достигли характерного пространственного разрешения, при котором учет негидростатических эффектов становится существенно важным. В то же время для климатических моделей с гораздо более грубым разрешением гидростатическое приближение сохраняет достаточную точность и остается предпочтительным решением с точки зрения вычислительных затрат.

В ИВМ РАН совместно с Гидрометцентром России ведется разработка модели атмосферы нового поколения [1], основанной на применении сетки с квазиравномерным разрешением на сфере. Ключевая особенность архитектуры модели заключается в модульном принципе построения динамического ядра, что позволяет гибко адаптировать используемые численные методы под конкретные прикладные задачи. Предполагается, что разрабатываемая модель будет применяться как для задачи прогноза погоды с высоким пространственным разрешением, так и для климатических расчетов, что делает целесообразным развивать гидростатическую и негидростатическую версию динамического ядра.

В докладе будут представлены результаты разработки гидростатического динамического блока в рамках нового программного комплекса. Подробно рассматриваются математическая формулировка динамического ядра, особенности его параллельной реализации и текущее состояние разработки. Приводятся результаты верификации на идеализированных тестах и оценки производительности модели.

Литература:

1. Shashkin, V.V., Goyman, G.S. and Tretyak, I.D. Development of the Next-generation Atmosphere Dynamics Model in Russia: Current State and Prospects. Lobachevskii J Math 45, 3159–3172 (2024)

Исследование предсказуемости аномалий температуры в юго-восточной Европе и Восточном Средиземноморье в июне 2024 г. в сезонных оперативных прогнозах климатической модели ИВМ РАН

^{1,2} Брагина В.В., ^{2,3,4} Варгин П.Н., ¹ Володин Е.М., ^{1,2,5} Тарасевич М.А.

¹ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, ул. Губкина д. 8, Москва, 119991

² Гидрометцентр России, Большой Предтеченский пер. д.13, стр. 1, г. Москва, 123376

³ Центральная аэрологическая обсерватория, ул. Первомайская д. 3, г. Долгопрудный, Московская область 141700

⁴ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. д. 3, Москва, 119017

⁵ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., 9, г. Долгопрудный, Московская область, 141701

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

Predictability of temperature anomalies in Southeast Europe and the Eastern Mediterranean in June 2024 based on seasonal forecasts of the INM RAS climate model

^{1,2} Bragina V.V., ^{2,3,4} Vargin P.N., ¹ Volodin E.M., ^{1,2,5} Tarasevich M.A.

¹ Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Gubkin str., 8, Moscow, 119333, Russia

² Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Bolshoy Predtechensky per., 13, building 1, Moscow, 123376, Russia

³ Central Aerological Observatory, Pervomaiskaya st., 3, Dolgoprudny, 141700, Russia

⁴ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Pyzhevskii per., 3, Moscow, 119017, Russia

⁵ Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, 141701, Russia

Определение причин формирования, поддержания и усиления, а также совершенствование прогнозирования волн тепла, приводящих к значительным негативным последствиям для населения и экономики, находятся среди наиболее актуальных задач в метеорологии. По оценкам каждый градус глобального потепления будет приводить к увеличению площади территории в Европе, подверженной влиянию волн тепла. Предполагается, что такая тенденция из-за изменения климата продолжится в ближайшие десятилетия, в том числе и для Восточного Средиземноморья [9].

В июне 2024 г. в странах Юго-Восточной Европы, на Кипре, в Турции и части Ближнего Востока наблюдалась аномально жаркая погода, с максимумом температурной аномалии 11–14 июня, достигавшей на уровнях давления 850 гПа значений порядка 6–7 °С. В Греции июнь 2024 г. стал самым жарким с 1960 г. с максимальными значениями приземной температуры до 44–45 °С и среднемесячными аномалиями до 4.8 °С относительно среднего с 2010 г. по 2019 г. [1]. Проведенный анализ данных реанализа NCEP [3] свидетельствует, что усиленный меридиональный перенос воздушных масс из области волны тепла в Восточном Средиземноморье на север в июне 2024 г. внес вклад в формирование областей с положительными аномалиями температуры на юге Поволжья и на северо-востоке Европейской территории России.

На основе ансамблевых сезонных прогнозов двух версий климатической модели ИВМ РАН (INMCM6M [2] и INMCM5 [8]), используемых в настоящий момент в оперативной практике ФГБУ «Гидрометцентр России» для ежемесячного расчета глобальных сезонных прогнозов, анализируется возможность воспроизведения волны тепла в восточном Средиземноморье в июне 2024 г. и исследуются факторы, способствовавшие ее формированию. Результаты сезонных прогнозов температуры на изобарическом уровне 850 гПа для территории Европы (30° с.ш.–70° с.ш., 10° з.д.–55° в.д.) сравнивались с данными реанализа NCEP.

В сезонных прогнозах климатической модели ИВМ РАН со стартовыми датами 22 мая и 22 апреля положительные аномалии температуры в Средиземноморье и Южной Европе в июне 2024 г. присутствуют, однако, как это часто бывает в модельных прогнозах [7], максимальная величина аномалии несколько занижена.

Ранее было показано, что наиболее значимым фактором, повлиявшим на возникновение и усиление волн тепла летом 2003г. в Европе [4, 5] и летом 2010г. на Европейской территории России [6], стало исключительно низкое содержание влаги в почве в месяцы, предшествующие возникновению волны тепла, что привело к уменьшению потока скрытого тепла и тем самым усилило аномалии поверхностной температуры. Полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют о том, что и для волны тепла на востоке Средиземноморья в июне 2024 г. ключевым механизмом возникновения является заниженное накопление влаги в почве в предшествующие зимние и весенние месяцы и связанное с этим меньшее выхолаживание нижней тропосферы за счет меньшего испарения с почвы.

При проведении модельных расчетов использованы вычислительные мощности вычислительного комплекса ФГБУ «ГВЦ Росгидромета» Cray XC-40 и Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН (ИВМ РАН).

- Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант РНФ № 25-17-00203.

Литература:

1. Dafis S., Faranda D. 2024. The June 2024 Eastern Mediterranean heatwave likely exacerbated by human-driven climate change and natural variability. *ClimaMeter*, Institut Pierre Simon Laplace, CNRS <https://doi.org/10.5281/zenodo.14103941>
2. Gritsun, A.S., Volodin, E.M., Bragina, V.V., Tarasevich, M.A., 2024. Simulation of modern and future climate by INM-CM6M. *Russ. J. Num. Anal. Math. Modelling* 39 (6), 329--341. <https://doi.org/10.1515/rnam-2024-0028>.
3. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. – *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1996, vol. 77, pp. 437– 470.
4. Ferranti L., Viterbo P. The European summer of 2003: sensitivity to soil water initial conditions – *J. Clim.*, 2006, vol. 19, no. 15, pp. 3659– 3680.
5. Fischer E.M., Seneviratne S.I., Vidale P.L., Lüthi D. and Schär C. Soil Moisture-Atmosphere Interactions during the European Summer Heat Wave. – *J. Climate*, 2007, vol. 20(20), pp. 5081– 5099.
6. Hauser M., Orth R. and Seneviratne S.I. Role of soil moisture versus recent climate change for the 2010 heat wave in western Russia. – *Geophys. Res. Lett.*, 2016, vol. 43(6), pp. 2819– 2826.
7. Scaife A.A., Smith D. A signal-to-noise paradox in climate science. – *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2018, vol. 1, 28.
8. Volodin, E.M., Mortikov, E.V., Kostykin, S.V., et al., 2017. Simulation of modern climate with the new version of the INM RAS climate model. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 53, 142-155. <https://doi.org/10.1134/S0001433817020128>.
9. Wedler M., Pinto J.G., Hochman A. More frequent, persistent, and deadly heat waves in the 21st century over the Eastern Mediterranean. – *Science of the Total Environment*, 2023, vol. 870(161), 883.

Комплексный прогноз (пост-процессинг) геопотенциала, температуры и ветра в тропосфере и нижней стратосфере на срок до 72 часов

Гордин В.А., Смирнов М.А.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Покровский бульвар 11
Федеральное государственное бюджетное учреждение Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, 123376, Россия, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.13, строение 1
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», 125993, Россия, Москва, улица Тверская, дом 11
E-mail: vagordin@mail.ru, masmirnov-4@yandex.ru

Complex forecasting (post-processing) of geopotential, temperature and wind in the troposphere and lower stratosphere for up to 72 hours

Gordin V.A., Smirnov M.A.

National Research University «Higher School of Economics», Pokrovsky Bulvar, Moscow, 109028, Russia
Hydrometeorological Research Center of Russian Federation (Hydrometcenter of Russia), 13, building 1, Bolshoy Predtechensky lane, Moscow, 123376, Russia
Moscow Aviation Institute (National Research University), 11, Tverskaya Street, Moscow, 125993, Russia

Разработанный комплексный прогноз принимает на входе поля метеозадающих элементов, полученные по нескольким лучшим прогностическим моделям, и выдает собственные поля на тех же 11 барических уровнях и для тех же заблаговременностей с точностью, превышающей точность наилучшей из исходных моделей. Прогноз дается и в точках аэрологических станций, и в узлах регулярной сетки. Изучены статистические характеристики (в частности, корреляционные функции) погрешностей исходных моделей.

- Работа выполнена в рамках темы 125032004255-7 по заданию Росгидромета

Литература:

В.А.Гордин, М.А.Смирнов. Краткосрочный комплексный прогноз геопотенциала и температуры. Постпроцессинг гидродинамических моделей. Метеорология и гидрология. №8, 2024 СС.49-59.

Оперативный краткосрочный численный прогноз погоды Гидрометцентра России: современное состояние и план развития

^{1,2} Ривин Г.С., ¹ Розинкина И.А., ¹ Астахова Е.Д., ¹ Блинов Д.В., ¹ Бундель А.Ю.,
^{1,2} Чубарова Н.Е., ¹ Шатунова М.В., ¹ Алферов Д.Ю., ¹ Алферов Ю.В., ^{1,2} Варенцов М.И.,
¹ Гоморев И.А., ¹ Гордин В.А., ¹ Горлач И.А., ¹ Егорова В.А., ¹ Кирсанов А.А., ¹ Копейкин В.В.,
^{1,2} Коспанов А.А., ¹ Никитин М.А., ¹ Перов В.Л., ^{1,2} Полюхов А.А., ¹ Пономарева Т.Я.,
¹ Ревокатова А.П., ^{1,2} Самсонов Т.Е., ¹ Тарасова М.А., ¹ Татаринович Е.В., ¹ Шишов А.Е.,
¹ Шувалова Ю.О.

¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, 123376, Россия, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.13,

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д.1,
E-mail: gdaly.rivin@mail.ru

В ноябре 2024 г. Центральная методическая комиссия Росгидромета по гидрометеорологическим прогнозам рекомендовала использовать для краткосрочных прогнозов погоды в оперативной практике учреждений Росгидромета глобальную конфигурацию ICON-Ru13/6N29 модели ICON, имеющую 120 уровней по вертикали в тропосфере, стратосфере и мезосфере (высота верхнего уровня примерно 75 км), шаг горизонтальной сетки 6,5 км на нижних 74 уровнях (высота верхнего уровня вложенной сетки примерно 23 км) для территории, расположенной севернее параллели 29,50 с. ш., и шаг сетки 13 км вне вложенной сетки (вложение с двухсторонним взаимодействием).

В докладе будет рассмотрено современное состояние и план дальнейшего развития компонент оперативной системы COSMO-Ru краткосрочного численного прогноза погоды (ЧПП) Гидрометцентра России, особенно глобальной и региональных российских конфигураций ICON-Ru негидростатической модели ICON. Модель ICON с января 2024 г. имеет открытый исходный код, обновляемый 2 раза в год (<https://www.icon-model.org/>). Она является бесшовной моделью, уже используемой в климатических исследованиях, для субсезонных и сезонных прогнозов, в оперативных краткосрочных ЧПП в примерно 10 гидрометеорологических службах мира и в численных экспериментах по исследованию свойств вихрей масштаба нескольких десятков метров.

- Работа выполняется в рамках темы 1.1 Росгидромета, имеющей Регистрационный номер 125032004255-7.

Автоматическое распознавание сигнатур интенсивных конвективных процессов на европейской территории России

Калмыкова О.В., Спрыгин А.А., Козлов С.В., Вязилов А.Е., Ингель Л.Х., Кулижникова Л.К.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун», Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы 4Е

E-mail: kov@feerc.ru

Automatic recognition of signatures of intense convective processes in the European territory of Russia

Kalmykova O.V., Sprygin A.A., Kozlov S.V., Vyazilov A.E., Ingel L.K., Kulizhnikova L.K.

Federal State Budgetary Institution «Research and Production Association «Typhoon», Kaluga region, Obninsk, Pobedy st., 4

Интенсивные конвективные процессы порождают системы глубокой конвекции, с которыми в свою очередь часто связаны случаи формирования опасных явлений различных типов, таких как град, шквалы, смерчи, сильные осадки, интенсивные грозы. Эти процессы имеют ряд особенностей, вследствие которых они могут быть диагностированы по данным дистанционных наблюдений (радиолокационных, спутниковых, грозопеленгационных). Диагноз производится посредством выявления в структуре этих данных типовых шаблонов, так же именуемых сигнатурами. Возможности идентификации сигнатур в большой степени определяются качеством исходных данных.

Для Европейской территории России впервые в практике Росгидромета было проведено исследование по автоматическому распознаванию сигнатур интенсивной конвекции. Были рассмотрены такие сигнатуры как Overshooting Tops (OT) – выступающие вершины облаков, пробивающие тропопаузу, Anvil Thermal Couplet (ATC) – U/V/кольцеобразные области в поле радиояркостной температуры, Lightning Jump (LJ) – резкие скачки числа грозовых разрядов. Первые две выявляются по данным спутниковых наблюдений, в данном случае использовались данные со спутника Электро-Л №3, третья – по данным сети грозопелентаторов, анализировались объединенные результаты сетей Алвес (ФГБУ «ГТО»), ФГБУ «НИЦ «Планета» и ФГБУ «ВГИ». Были разработаны программы для диагностики соответствующих сигнатур.

Анализировались результаты работы программ в течение конвективного сезона 2024 г. (июнь – сентябрь). Установлено, что в большинстве случаев сигнатуры OT и LJ распознавались за 30-40 мин до регистрации опасных конвективных явлений, для сигнатуры ATC результаты оказались значительно хуже – малая частота ее выявления, что очевидно, может быть связано с недостаточно высоким разрешением используемых спутниковых данных.

Анализ и сверхкраткосрочный численный прогноз погоды в конвективно-разрешающей версии COSMO-Ru

¹ Блинов Д.В., ¹ Бундель А.Ю., ¹ Кирсанов А.А., ¹ Смирнов А.В., ^{1,2} Ривин Г.С.

¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, 123367, Россия, г. Москва, Большой Предтеченский пер., д. 13-1

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, 119991, Россия, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы

The data assimilation and rapid update cycle in the system COSMO-Ru

¹ Blinov D.V., ¹ Bundel A.Yu., ¹ Kirsanov A.A., ¹ Smirnov A.V., ^{1,2} Rivin G.S.

¹ Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, 123367, Russia, Moscow, Bol'shoj Predtechenskij lane, 13-1

² Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russia

Региональное гидродинамическое моделирование применяется для уточнения результатов глобального моделирования. Для системы численного прогноза погоды по ограниченной территории COSMO-Ru получено, что при использовании начальных данных из глобального анализа («холодный старт») в начале прогноза наблюдаются эффекты приспособления (spin-up) продолжительностью 1-3 часа модельного времени.

По аналогии с зарубежными системами детализированного анализа и численного прогноза погоды, такими как HRRR (High Resolution Rapid Refresh) в Национальном центре прогнозов окружающей среды США (NCEP) [1] и RUC (Rapid Update Cycle) в Немецкой службе погоды (DWD), в Гидрометцентре России для конвективно-разрешающей версии COSMO-Ru2By с горизонтальным шагом сетки 2,2 км создана региональная система усвоения данных (СУД) и настроен учащенный выпуск сверхкраткосрочных прогнозов (0-12 часов) [2]. В региональной СУД ассимилируются данные станционных наблюдений и дистанционного зондирования [3], часть из которых отсутствует в международном обмене.

Выявлено, что использование начальных данных из региональной СУД («теплый старт») повышает успешность воспроизведения осадков в первый час прогноза приблизительно на 65% (Рис.1). При этом 60% данного улучшения связано с устранением эффектов приспособления, которые в этом случае происходят на стадии предварительного расчета. Оставшиеся 40% повышения точности вызваны усвоением радиолокационных данных, положительный эффект от которого сохраняется на протяжении примерно 6 часов прогноза.

Установлено, что поля регионального анализа, полученные с усвоением интенсивности осадков по радиолокационным данным, воспроизводят явления погоды, сопутствующие сильным конвективным осадкам – локальные возмущения температуры, влажности, давления, а также угрозы сильных порывов ветра, гроз, града, суперячеек и смерчеопасных ситуаций.

■ Исследование выполнено в рамках научно-исследовательских работ Росгидромета на 2025-2030 гг. (регистрационный номер 125032004255-7), а также AAAA-A20-120021490079-3 (2020-2024 гг.).

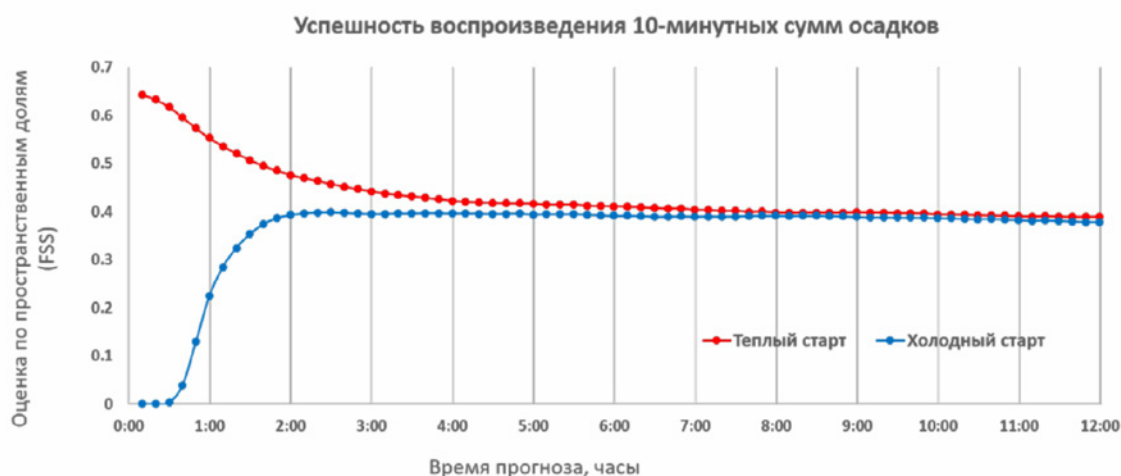


Рис. 1. Результаты верификации прогнозов 10-минутных осадков 0.02 мм и более по радиолокационным данным в окрестности 27 км. Приведены расчеты COSMO-Ru2By в июле 2022 г. для экспериментов с начальным данным из СУД («теплый старт») и от данных глобального моделирования («холодный старт»).

Литература:

1. Dowell D., Alexander C., James E., Weygandt S., Benjamin S. et al. The High-Resolution Rapid Refresh (HRRR): An hourly updating convection-allowing forecast model. Part I: Motivation and system description // Weather and Forecasting. – 2022. – Т. 37. – №. 8. – С. 1371–1395.
2. Розинкина И.А., Ривин Г.С., Багров А.Н., Блинов Д.В., Быков Ф.Л., Васькова Д.В., Захарченко Д.И., Бундель А.Ю., Воробьева Е.В., Кирсанов А.А., Полухов А.А., Шатунова М.В., Шувалова Ю.О., Елисеев Г.В. Конфигурация COSMO-Ru2Vu модели COSMO: успешность и методология оценки численных прогнозов β и γ -мезомасштабных атмосферных процессов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы, 2023. № 2 (388), с. 6–34. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-2-6-34>
3. Блинов Д.В., Ревокатова А.П., Ривин Г.С. Усвоение данных наблюдений в системе краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-Ru Гидрометцентра России. // Метеорология и гидрология. 2024. № 7. С. 68–80. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2024-7-68-80>

Влияние мегаполиса Санкт-Петербург на особенности выпадения атмосферных осадков

^{1,2,3} Коломеец Л.И., ^{1,3} Тюриков И.А.

¹ ООО «Институт радарной метеорологии», Санкт-Петербург (188685 Ленинградская область, Всеволожский район, поселок Воейково, д. 15

² Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9

³ Государственный гидрометеорологический университет, 192007, Россия, Санкт-Петербург, Воронежская улица, д. 79

St. Petersburg megapolis influence on the atmospheric precipitation patterns

^{1,2,3} Kolomeets L.I., ^{1,2} Tyurikov I.A.

¹ LLC «Institute of Radar Meteorology», Saint-Petersburg

² Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg

³ Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Мегаполис влияет на осадки разнонаправленно. Как правило, ослабление отмечается над городом осадков малой и средней интенсивности, а усиление – наиболее интенсивных. К основным механизмам влияния города на осадки можно относиться: эффект городского острова тепла (усиленные восходящие потоки, приводящие к увеличению образования облаков и осадков), специфический городской ландшафт, высокая концентрация аэрозолей. Помимо этого, на мегаполис Санкт-Петербург особое влияние оказывают близость Ладожского озера и Финского залива.

Высокая относительная влажность атмосферного воздуха способствует повышенной конвективной неустойчивости и загрязненности воздушных масс над городом, что благоприятствует образованию облачности. В процессе преобразования облаков из кучевых в мощные кучевые и кучево-дождевые происходит их смещение под влиянием преобладающего переноса воздушных масс. Осадки выпадают преимущественно в подветренных районах города и за его пределами.

Если влажность воздуха недостаточна для образования облаков, мощные конвективные потоки, образующиеся над центром города, являются препятствием для горизонтальных воздушных потоков, поступающих в наветренную часть города. Приходящие массы воздуха испытывают дополнительный вынужденный подъем, вследствие чего образуется облачность и выпадают осадки.

Последнее время остро стоит задача прогноза случаев выпадения осадков над городом, когда зона осадков «разрывается» над городом и когда, наоборот, «резко усиливается». Например, один из таких «особых» случаев наблюдался 31 июля 2024 года. Над городом наблюдались достаточно сильные восходящие потоки, но при этом облачность разрушалась, а не усиливалась.

Создан архив случаев выпадения атипичных осадков, проведен синоптический анализ ситуаций, численные эксперименты по моделированию выбранных случаев и подготовлены карты радиолокационных характеристик для понимания триггерных механизмов поведения осадков над городом и в ближайших пригородах.

■ Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 23-77-30008) (<https://rscf.ru/project/23-77-30008>).

Оценка чувствительности модели ICON-Ru к изменениям в поле морского льда и ТПО при прогнозе образования и развития полярных мезоциклонов

^{1,2} Ревокатова А.П., ¹ Никитин М.А., ^{1,3} Ломакин И.Р.

¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Большой Предтеченский пер, 13 стр. 1, Москва, Россия, 123376

² Институт глобального климата и экологии им Ю.А. Израэля, ул. Глебовская, 20Б Москва, Россия, 107258

³ Московский государственный университет им М.В. Ломоносова, Географический факультет, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, Москва, Россия

Evaluation of the ICON-Ru model sensitivity to the changes in the sea ice field and SST in forecast of the formation and development of polar lows

^{1,2} Revokatova A.P., ¹ Nikitin M.A., ^{1,3} Lomakin I.R.

¹ Hydrometeorological Research Center of Russian Federation (Hydrometcenter of Russia), 13, building 1, Bolshoy Predtechensky lane, Moscow, 123376, Russia

² Yu.A. Israel Institute of Global Climate and Ecology, 20B Glebovskaya str., Moscow, 107258, Russia

Moscow State Lomonosov University, Geographical Faculty, GSP-1, Leninskie Gory, MSU, 119991

E-mail: revokatova@gmail.com, Arhin@yandex.ru, ilja.lomakin2@yandex.ru

Полярные мезоциклоны (ПМЦ) нередко являются причиной внезапной ненастной погоды (ураган-ных усилений ветра, снегопадов с низкой видимостью), штормов и обледенения судов. Короткое время их жизни, быстрое развитие, высокие скорости перемещения, небольшие размеры в совокупности с практически полным отсутствием контактных метеорологических наблюдений над арктическими морями создают трудности при прогнозировании связанных с ними погодных явлений, при этом численное моделирование высокой детализации может существенно «продвинуть» решение данной проблемы. Работа посвящена изучению чувствительности конфигурации ICON-Ru с шагом 2,0 км модели ICON (ICOsahedral Nonhydrostatic) к изменениям в структуре полей морского льда и температуры земной поверхности при прогнозировании образования и развития ПМЦ. Представлены результаты численных экспериментов для Норвежского и Баренцева морей для холодных периодов в 2022–2024 гг. на примере анализа жизненных циклов нескольких циклонов. Для оценки чувствительности ПМЦ к разным параметрам подстилающей поверхности проводилось 4 вида численных экспериментов: контрольный, с «убранным» льдом, с «убранным» льдом и повышением ТПО до 278,15 К и с «нарожденным» льдом. Наши оценки развития и свойств ПМЦ базировались на таких параметрах, как атмосферное давление, конвективная доступная потенциальная энергия, потоки явного и скрытого тепла, завихренность на разных уровнях. В работе выявлено, что присутствие искусственного льда в модели практически полностью гасит развитие ПМЦ в тех случаях, когда вихрь не имеет сильной связи со струйным течением. В целом, эксперименты с границей морского льда показали, что прогрев ТПО до 278,15 К с одновременным сдвигом границы льда к северу приводит к увеличению термической неустойчивости, росту потоков явного и скрытого тепла и повышению CAPE. Это, в свою очередь способствует усилению ПМЦ, и степень данного усиления зависит от механизмов развития самого вихря. Нужно отметить, что используемые данные прогнозов ICON-Ru на момент выхода ПМЦ на материковую поверхность (для возможности верификации по данным на метеостанциях) имели заблаговременность от полутора до двух суток, что является довольно хорошим результатом при прогнозе этого явления.

- Исследование проведено в рамках Научно-исследовательской работы Росгидромета, регистрационный номер 125032004255-7

Сравнительный анализ экспериментальных и модельных данных о содержании NO_2 в пограничном слое атмосфере столичного региона

Нахаев М.И., Боровский А.Н., Постыляков О.В.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Пыжевский пер., д.3

E-mail: nakhaev@ifaran.ru

Comparative analysis of experimental and model data on the NO_2 content in the atmospheric boundary layer of the Moscow region

Nakhaev M.I., Borovsky A.N., Postilyakov O.V.

The A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS

Двуокись азота (NO_2) является важным загрязнителем атмосферы, оказывающим негативное воздействие на здоровье человека и экосистемы. Исследование проводилось в целях оценки возможности воспроизведения химической транспортной моделью (далее ХТМ) концентраций NO_2 в пограничном слое атмосферы. Верификация расчетов ХТМ проводилась на данных, полученных на Звенигородской научной станции ИФА РАН.

В качестве натурных данных использовались результаты измерения интегрального содержания NO_2 в пограничном слое атмосферы зенитным методом дифференциальной спектроскопии (DOAS) [1]. Данные получены для центральных месяцев теплого и холодного сезонов, включают в себя различные метеорологические условия, в том числе – случаи нехарактерного переноса воздушных масс с востока на запад, когда пункт наблюдения может находиться под влиянием шлейфа загрязненного над Москвой воздуха.

Расчетный домен ХТМ составляет 50×70 узлов, горизонтальный шаг сетки 2 км. В качестве исходных метеорологических данных были использованы глобальные поля реанализа с горизонтальным шагом сетки 1×1 градусов. Расчеты ХТМ производились в онлайн режиме без влияния химического блока на радиационные характеристики метеорологической модели. Прогноз рассчитывался на 24 часа для каждого дня. В качестве начальных условий для определения концентраций загрязняющих веществ использовались результаты прогноза предыдущих суток, а в качестве граничных условий использовались климатические концентрации.

В докладе будут представлены результаты статистического анализа сопоставления наблюдаемых и расчетных данных, обсуждение причин расхождений между наблюдаемыми и расчетными данными, включая влияние метеорологических факторов, источников загрязнения и особенностей модели.

Литература:

1. A N Borovski, N F Elansky, N A Ponomarev, O V Postilyakov 2019 Comparison of measured and simulated by SILAM NO_2 integral content in atmospheric boundary layer in Moscow region
2. Proc. SPIE 11152 111520P <https://doi.org/10.1117/12.2535492>

Система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды на основе модели ПЛАВ20

^{1,2} Алипова К.А., ¹ Мизяк В.Г., ^{1,2} Толстых М.А., ^{2,1,3} Гойман Г.С.

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации», 123376, Россия, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 13, строение 1

² Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, 119333, г. Москва, ул. Губкина, 8

³ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9

Medium-range ensemble prediction system based on the SL-AV20 model

^{1,2} Alipova K.A., ¹ Miziak V.G., ^{1,2} Tolstykh M.A., ^{2,1,3} Goyman G.S.

¹ Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, 123376, Moscow, Bolshoy Predtechensky lane, 13, building 1

² Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Gubkin str., 8, Moscow, 119333, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 141701, Dolgoprudny, Institutskiy lane, 9

Представлены результаты работы новой системы ансамблевого среднесрочного прогноза погоды, развиваемой в Гидрометцентре России и в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН. Данная система состоит из глобальной модели атмосферы ПЛАВ20 [1] и ансамблевой системы усвоения данных на основе локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля (LETKF) [2].

Модель ПЛАВ20 имеет горизонтальное разрешение $0,225^\circ$ по долготе; переменное разрешение по широте – от $0,24^\circ$ во внетропической части Южного полушария до $0,16^\circ$ в средних широтах Северного полушария. По вертикали модель имеет 51 уровень, верхняя граница составляет примерно 36 км. Рассматриваемая версия системы ансамблевого прогноза в настоящий момент находится в завершающей стадии оперативных испытаний в Гидрометцентре России.

Учет неопределенностей в начальном состоянии атмосферы производится путем введения аддитивной инфляции в ансамблевой системе усвоения данных [2]. Для учета неопределенностей в блоке параметризаций процессов подсеточного масштаба в модели атмосферы ПЛАВ реализованы алгоритмы стохастического возмущения параметров и тенденций параметризаций [3]. Для учета неопределенностей в блоке решения уравнений динамики атмосферы в модели ПЛАВ реализован оригинальный вариант алгоритма стохастического возмущения полулагранжевых траекторий [4].

Литература:

1. М. А. Толстых, В. В. Шашкин, Р. Ю. Фадеев и др. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. 2017. 166 с.
2. Shlyayeva A., Tolstykh M., Miziak V., Rogutov V. Local ensemble transform Kalman filter data assimilation system for the global semi-Lagrangian atmospheric model // Rus. J. Num. Analys. Math. Model. 2013. Vol. 28. P. 419-442.
3. Kseniya A. Alipova, Gordey S. Goyman, Mikhail A. Tolstykh, Vasiliy G. Miziak, Vladimir S. Rogutov, Stochastic perturbation of tendencies and parameters of parameterizations in the global ensemble prediction system based on the SL-AV model // Russ. J. Numer. Anal. Math. Model. 2022. Vol. 37(6). P. 331-347.
4. Alipova K. A., Miziak V. G., Tolstykh M. A., Goyman G. S. Stochastic perturbations in the semi-Lagrangian advection algorithm of the SL-AV global atmosphere model // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2024. Vol. 39, no. 1. P. 1-11.

Численный прогноз опасной для авиации турбулентности и калибровка ее интенсивности по данным наблюдений

Комасько Н.И., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н., Завьялова А.А.

ФГБУ «Гидрометцентр России», Б. Предтеченский пер., д. 13, стр. 1, Москва, 123376

Numerical prediction of turbulence dangerous for aviation and calibration of its intensity based on observational data

Komasko N.I., Ivanova A.R., Skriptunova E.N., Zavialova A.A.

FSBI «Hydrometeocenter of Russia», 13, bld. 1, Bolshoi Predtechensky Pereulok, 123376, Moscow, Russia

Атмосферная турбулентность относится к явлениям, которые могут влиять на операции пилотирования воздушным судном и безопасность находящихся на его борту. Прогноз турбулентности, как правило, формируется либо на основе заложенных в модель ЧПП параметризаций определенных процессов (волнового торможения, вертикальной диффузии, переноса импульса и пр.), либо постпроцессинга (расчета индексов турбулентности) на основе выходных полей параметров атмосферы. Важной составляющей разработки корректного прогноза турбулентности является калибровка его результатов по данным реальных измерений.

Проведены исследования успешности прогноза турбулентности, влияющей на полет воздушных судов, по данным выходной продукции модели COSMO-Ru6ENA. Проверено качество прогноза скорости вихревой диссипации турбулентной энергии как меры турбулентности, генерируемой модельным блоком «Турбулентность». Рассчитаны индикаторы (критерии) атмосферной турбулентности (индекс Эллрода, интенсивность фронтогенеза и др.) по выходным полям температуры, давления, геопотенциала, скорости ветра. С использованием значений скорости вихревой диссипации по данным самолетного зондирования найдены пороговые значения критериев, определяющие границы градаций умеренной и сильной турбулентности, влияющей на полет воздушных судов.

Коррекция и усвоение данных наблюдений температуры на сети гидрологических постов России

Рогутов В.С.

Гидрометцентр России, 123376, Россия, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 13, строение 1

E-mail: rogutovv@mail.ru

Correction and data assimilation of temperature observations at hydrological posts in Russia

Rogutov V.S.

Hydrometcenter of Russia, 13, building 1, Bolshoy Predtechensky lane, Moscow, 123376, Russia

Для запуска модели атмосферы необходимо задать начальное состояние модели. В модели атмосферы ПЛАВ для инициализации начального состояния поверхности был разработан и применяется блок инициализации температуры и влажности поверхности суши и глубинных слоев почвы. Температура поверхности моря и наличие морского льда задаётся из внешних источников.

Уменьшение шага сетки модели ПЛАВ10 до 10 км привело к тому, что ряд крупных рек и небольших озер теперь в явном виде представлены на модельной сетке, температуру поверхности внутренних водных объектов тоже нужно инициализировать. Данные OSTIA и NCEP для этой цели не подходят (там нет внутренних водоемов), формальное применение алгоритма инициализации температуры поверхности над сушей к водным объектам приводит к большим ошибкам.

В качестве источника информации о температуре поверхности внутренних водных объектов (далее – T_s) могут быть использованы наблюдения температуры и состояния рек на сети гидрологических постов. Измерения на гидрологических постах выполняются раз в сутки в 8 часов местного времени. Измерения содержат уровень воды, расход воды, осадки, толщину снега и льда, ледовые явления, температуру воздуха и воды. T_s в этих данных считается дополнительным и часто необязательным измерением. Наблюдения T_s , как правило, содержат много пропусков, содержат много больших ошибок, кодирование наблюдений неоднозначно (способы кодирования могут без предупреждения меняться от поста к посту или на отдельном посту – в течении года). Неоднозначность кодирования делает необходимой предварительную коррекцию этих данных.

В докладе представлен алгоритм коррекции и усвоения гидрологических наблюдений температуры поверхности водных объектов и приведены результаты применения алгоритма.

Алгоритм коррекции и усвоения состоит в последовательном выполнении нескольких шагов.

1) Шаг коррекции наблюдений. Выполняется для каждого гидрологического поста независимо друг от друга с привлечением дополнительной информации – модельных данных T_{2m} (температуры воздуха на высоте 2м) и гидрологических наблюдений состояния льда.

2) Шаг «прогноза» – для расчета первого приближения T_s (то есть – прогноза T_s на 24 часа, стартовавшего с предыдущего анализа T_s). В качестве алгоритма «прогноза» температуры воды была выбрана релаксация температуры воды к T_{2m} , коэффициенты которой оцениваются методом линейной регрессии.

3) Шаг расчета состояния льда на постах и в узлах сетки. Входная информация – первое приближение T_s , наблюдения T_s и наблюдения состояния льда. Алгоритм определяет покрытие водоемов льдом (список постов и узлов сетки с установившимся сплошным ледовым покровом) с использованием наблюдений ледовых явлений если они есть, или с привлечением дополнительной информации при наличии пропусков в наблюдениях состояния льда.

4) Шаг анализа T_s методом оптимальной интерполяции (входная информация – первое приближение температуры поверхности воды и состояние льда, наблюдения T_s и состояния льда).

Результаты экспериментов показывают, что предложенный алгоритм может быть использован для инициализации температуры поверхности часть внутренних водных объектов в стартовых данных модели ПЛАВ10.

Оценка качества ретроспективных прогнозов на один год моделей Земной системы ИВМ РАН

^{1,2,3} Тарасевич М.А., ^{1,2} Брагина В.В., ^{1,2} Володин Е.М.

¹ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва, Россия

² ФГБУ «Гидрометцентр России», г. Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Россия
E-mail: mashatarasevich@gmail.com, vvorobyeva@yandex.ru, volodinev@gmail.com

Evaluation of the annual hindcasts quality of the INM RAS Earth system models

^{1,2,3} Tarasevich M.A., ^{1,2} Bragina V.V., ^{1,2} Volodin E.M.

¹ Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russian Federation

² Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russian Federation

³ Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russian Federation

В рамках настоящей работы оценивается качество ретроспективных прогнозов на один год версий INMCM5 [1] и INMCM6LM [2] Модели Земной системы ИВМ РАН. Для INMCM5 исследуется влияние способа задания начальных состояний океана на качество ретроспективных прогнозов на один год. При проведении экспериментов INMCM5 инициализируется следующими способами: в терминах аномалий, с использованием полных полей, а также, с использованием начальных состояний, полученных в рамках климатического расчёта с притягиванием температуры воздуха и горизонтальных компонент скорости ветра и температуры и солёности океана к данным ERA5 и SODA3.4.2 соответственно. Начальные состояния для INMCM6LM задаются в терминах аномалий. С подготовленных начальных данных выполнены серии ретроспективных прогнозов на 14 месяцев с 1 ноября 1991–2020 гг. Размер ансамбля составляет 10 членов.

Для оценки качества ретроспективных прогнозов используется пространственное распределение и глобально осреднённое значение коэффициента временной корреляции аномалий для приземной температуры воздуха и давления на уровне моря. В качестве наблюдений используются данные реанализа ERA5 [3]. Коэффициенты корреляции вычисляются по средним за январь–декабрь 1992–2021 гг значениям. Перед вычислением коэффициентов корреляции данные модели Земной системы ИВМ РАН и реанализа ERA5 интерполируются на регулярную широтно-долготную сетку $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, общепринятую для верификации долгосрочных прогнозов.

Работа выполнена в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской Академии Наук при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 25-17-68032). Расчёт ретроспективных прогнозов климатической модели ИВМ РАН выполнен на вычислительной системе Cray XC40-LC Главного вычислительного центра Гидрометцентра России.

Литература:

1. Володин Е. М., Мортиков Е. В., Кострыкин С. В., Галин В. Я., Лыкозов В. Н., Грицун А. С., Дианский Н. А., Гусев А. В., Яковлев Н. Г. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН, Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2017, Т. 53, № 2, С. 164–178.
2. Володин Е.М. Воспроизведение современного климата моделью климатической системы INMCM60, Известия РАН, Физика атмосферы и океана, 2023, Т. 59, № 1, С. 19–26.
3. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al.: The ERA5 global reanalysis, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, V. 146, N. 730, pp. 1999–2049.

Новые методы верификации прогнозов погоды высокого разрешения в ФГБУ «Гидрометцентр России»

Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В.

ФГБУ «Гидрометцентр России», 123376, Россия, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.13, строение 1

E-mail: a.bundel@gmail.com, heu3becteh@mail.ru, elena_ast_hmc@mail.ru, denisblinov@yandex.ru

Novel Verification Methods for High-Resolution Weather Forecasts
in the Hydrometcentre of Russia

Bundel A., Kirsanov A., Astakhova E., Blinov D.

Hydrometcentre of Russia

Методы верификации, учитывающие особенности численных прогнозов погоды высокого разрешения, начали развиваться в ФГБУ «Гидрометцентр России» при выполнении RDP/FDP проекта ВМО FROST-2014, основной целью которого было метеорологическое обеспечение Олимпийских игр в Сочи-2014, а также разработка новых методов краткосрочного прогноза и демонстрация их возможностей (Kiktev D. et al. 2017). Тенденция к быстрому улучшению пространственно-временного разрешения прогностических систем, наблюдающаяся в настоящее время, и невозможность адекватной оценки качества прогнозов с шагом менее 3 км с помощью традиционных методов верификации, потребовали дальнейшей разработки и активного применения новых методов. В Гидрометцентре России накоплен большой опыт применения современных методов верификации, в частности, пространственных методов (преимущественно окрестных и объектно-ориентированных) для детерминированных и ансамблевых прогнозов высокого разрешения, методов, ориентированных на оценку качества физических параметризаций. Проводятся эксперименты по учету неопределенности наблюдений. В работе обсуждаются результаты применения методов верификации прогнозов высокого пространственно-временного разрешения для системы COSMO-Ru и перспектива их внедрения в оперативную практику Гидрометцентра России. Приводятся примеры визуализации оценок верификации.

- Работа выполнена в рамках тем Росгидромета 1.1 на 2025-2030 гг. (регистрационный номер 125032004255-7), а также 1.1.3 и 1.1.4 на 2020-2024 гг.

Литература:

Kiktev, D., P. Joe, G.A. Isaac, A. Montani, I. Frogner, P. Nurmi, B. Bica, J. Milbrandt, M. Tsyrlunikov, E. Astakhova, A. Bundel, S. Bélair, M. Pyle, A. Muravyev, G. Rivin, I. Rozinkina, T. Paccagnella, Y. Wang, J. Reid, T. Nipen, and K. Ahn, 2017: FROST-2014: The Sochi Winter Olympics International Project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 98, 1908–1929, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00307.1>

Анализ эффективности применения метода пространственного ансамбля для прогноза порывов ветра в рамках системы краткосрочного численного моделирования COSMO-Ru2By Гидрометцентра России

Гоморев И.А., Розинкина И.А., Пономарева Т.Я.

ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации», Большой Предтеченский пер, 13 стр. 1, Москва, Россия,
E-mail: ivangomorev@bk.ru

Application of Spatial ensemble method for the wind gust forecast based on numerical weather modeling system COSMO-Ru2By of the Hydrometcenter of Russia

Gomorev I.A., Rozinkina I.A., Ponomareva T.Ya.

Hydrometeorological Research Center of Russian Federation (Hydrometcenter of Russia), 13, building 1, Bolshoy Predtechensky lane, Moscow, 123376, Russia

В настоящее время детерминированные численные прогнозы таких явлений, как порывы ветра на ближайшие 1-2 суток, даже при использовании современных атмосферных моделей атмосферы, имеющих сетки, разрешающие крупные конвективные движения, могут иметь существенные ошибки, в первую очередь – прогноза местоположения ожидаемого локального явления. Одним из очевидных решений задачи является применение вероятностных подходов. Вероятностные ансамблевые прогнозы могут быть получены на основе многократного интегрирования модели (моделей) атмосферы по возмущенным начальным данным, параметрам физических описаний и пр. Существенно более экономичным подходом являются так называемые пространственные ансамбли, построение которых основывается на гипотезе существования априорной неточности моделирования местоположения какого-либо явления, задаваемого грациями метеовеличин. Этот подход может быть реализован на однократном «прогоне» модели атмосферы. В соответствии с

$$ПAB = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n ДB_k,$$

для каждой точки модельной сетки (либо -сетки выдачи продукции) по двоичным полям прогнозов явления (1 /0– порог превышен / не превышен) вычисляется относительное число узлов в заданной окрестности, где порог превышен. Здесь ПАВ – пространственная ансамблевая вероятность, а ДВ – двоичная вероятность, k – узел модельной сетки, попадающий в окрестность заданного пункта, n – количество узлов этой окрестности. После сканирования по всем узлам получают вероятности явлений на всей области вычислений.

Несмотря на простоту логики и длительный опыт применения в мировой практике [2,3], применение данного метода для прогнозирования порывов ветра эффективно только при использовании моделирования на сетках, явно разрешающих условия, формирующие порывы ветра. В российской практике это стало возможным после реализации в 2021г в Гидрометцентре России системы оперативного прогноза на базе COSMO-Ru2By с шагом 2.2 км [1].

В настоящей работе выполнена оценка эффективности прогнозов порывов ветра на базе пространственного ансамбля, в сравнении с детерминированным прогнозом порывов ветра по COSMO-Ru2By. Был реализован и протестирован метод пространственного ансамбля для прогнозирования порывов ветра с заблаговременностями до 48ч. Для учета роста неопределенности при прогнозировании положения при повышении срока прогноза радиус окрестности увеличивался от 22 км до 50 км (для 48-ч прогнозов). Были рассмотрены различные значения дихотомных оценок качества прогнозов по различным сезонам для различных порогов значений порывов ветра. Выявлено, что неопределенность локализации явлений, как и эффективность метода пространственного ансамбля, повышается по мере прогнозирования более сильных ветров (т.е. априори занимающих существенно меньшие площади), при этом наибольшая эффективность применения метода пространственного ансамбля оказалась именно для граций более 20 и 25 м/с.

- Исследование проведено в рамках Научно-исследовательских работ Росгидромета 125032004255-7.

Литература:

1. Розинкина И.А., Ривин Г.С., Багров Г.С., Блинов Д.В., Быков Ф.Л., Васькова Д.В., Захарченко Д.И., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Полюхов А.А., Шатунова М.В., Шувалова Ю.О., Елисеев Г.В. Конфигурация COSMO-Ru2By модели COSMO: успешность и методология оценки численных прогнозов β - и γ -мезомасштабных атмосферных процессов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы, 2023, том 2 (388), с. 6-34 DOI
2. Schwartz, C.S., Kain J.S. et. al., 2010. Toward improved convection-allowing ensembles: model physic sensitivities and optimizing probabilistic guidance with small ensemble membership. Weather and forecasting. Vol. 25, 263-280.
3. Theis S.E., Hense A., Damrath U., 2005. Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model: a pragmatic approach. Meteorol. Appl. Vol. 12, 257-268.

Апробация параметризации городского полога TERRA-URB в модели ICON на примере г. Новосибирск

^{1,2} Гочаков А.В., ^{3,4,5} Варенцов М.И.

¹ Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт (ФГБУ «СибНИГМИ»), 630099, Россия, г. Новосибирск, Советская 30

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

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 1 стр. 4, Москва, Россия

⁴ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации Большой Предтеченский переулок, д. 13, строение 1, Москва, Россия

⁵ Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. д. 3, Москва, Россия

E-mail: gochakov@sibnigmi.ru, mikhail.varentsov@srcc.msu.ru

Evaluation of the urban canopy scheme TERRA-URB in the ICON model:
A case study of Novosibirsk

^{1,2} Gochakov A.V., ^{3,4,5} Varentsov M.I.

¹ Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute 630099, Novosibirsk, Russia,

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

³ Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, 119991, Leninskie Gory, 1, bld.4, Moscow, Russia

⁴ Hydrometeorological Research Center of Russia, 123242, B. Predtechenskiy Pereulok, 11-13; Moscow, Russia

⁵ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, 119017, 3 Pyzhevskiy Pereulok, Moscow, Russia

Пространственное разрешение современных моделей численного прогноза погоды по-прежнему не позволяет описать в явном виде ряд мелкомасштабных физических процессов, в связи с чем необходимо использовать параметризацию. Ярким примером процессов подсеточного масштаба является взаимодействие городской поверхности с атмосферой.

Параметризация городского полога TERRA_URB в моделях COSMO [1] и ICON [2] позволяет учитывать особенности городской физики путем модификации параметров модели деятельного слоя суши TERRA, определяющих режим взаимодействия земля-атмосфера. При этом остро встает вопрос задания количественных характеристик городской среды. Для модели COSMO реализована возможность считывания набора параметров, описывающих городскую поверхность, из файлов с внешними данными – в частности, площади непроницаемой поверхности (ISA) и антропогенный поток тепла (АНФ). В том числе, их можно подготовить на основе карт локальных климатических зон (ЛКЗ), классифицирующих основные типы городской застройки [3]. Для ICON параметры ISA и АНФ не включены в набор внешних данных и рассчитываются внутри модели на основе внешних данных о типах земельного покрова.

В работе изучается влияние TERRA_URB на прогноз температуры в модели ICON, в том числе при изменении внешних данных. Для этого значения фракции городской поверхности (19 класс категории землепользования) корректируется на основе рассчитанной из ЛКЗ величины ISA. Значения ISA вычисляются из данных ЛКЗ на исходной сетке с последующей агрегацией полученных величин на расчетную сетку ICON. Корректировке подвергается также и природные категории для изменяемых ячеек в случае несоответствия обновляемой и исходной величины доли городской поверхности.

- Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-11-20061, <https://rscf.ru/project/25-11-20061/> и Правительства Новосибирской области. Вычислительные эксперименты с моделью ICON были проведены в рамках выполнения темы НИР Росгидромет (№ НИОКТР 125013101208-4).

Литература:

1. Garbero, Valeria & Milelli, Massimo & Bucchignani, Edoardo & Mercogliano, Paola & Varentsov, Mikhail & Rozinkina, Inna & Rivin, Gdaliy & Blinov, D. & Wouters, Hendrik & Schulz, Jan-Peter & Schättler, Ulrich & Bassani, Francesca & Demuzere, Matthias & Repola, Francesco. (2021). Evaluating the urban canopy scheme TERRA_URB in the COSMO model for selected european cities. Atmosphere. 12. 10.3390/atmos12020237.
2. Cinquegrana, D.; Montesarchio, M.; Zollo, A.L.; Bucchignani, E. Evaluation of the Urban Canopy Scheme TERRA-URB in the ICON Model at Hectometric Scale over the Naples Metropolitan Area. Atmosphere 2024, 15, 1119. <https://doi.org/10.3390/atmos15091119>
3. Stewart, I.D., & Oke, T.R. Local climate zones for urban temperature studies– Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, vol.93, no.12, p.1879–1900.

Влияние острова тепла на концентрации примесей в модели COSMO-ART

^{1,2} Кирсанов А.А., ^{1,2,3,4} Варенцов М.И., ² Бакланов А.А.

¹ ФГБУ «Гидрометцентр России», 123376, Россия, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.13, строение 1

² Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, 195196, Россия, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, д.98

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 1 стр. 4, Москва, Россия, 119234

E-mail: heu3becteh@mail.ru, mikhail.varentsov@srcc.msu.ru, abaklanov@nbi.ku.dk

Подготовлена конфигурация модели COSMO-ART для района Санкт-Петербурга с шагом сетки 2 км и городской параметризацией TERRA_URB, позволяющая учитывать урбанизацию: изменения свойств подстилающей поверхности, антропогенный поток тепла.

Включение параметризации TERRA_URB в модель COSMO-ART позволяет воспроизводить городской остров тепла и меняет характеристики пограничного слоя атмосферы, что оказывает влияние на распределение приземных концентраций примесей.

В условиях неблагоприятных метеорологических условий (НМУ), сопровождающихся инверсией стратификации атмосферы, остров тепла ослабляет температурную инверсию, способствуя вертикальному перемешиванию и снижению концентраций примесей в приземном слое.

Эксперименты для Санкт-Петербурга (летний и зимний периоды) показали, что максимальный эффект от учета TERRA_URB наблюдается в зимний сезон, летний сценарий демонстрирует менее выраженное влияние острова тепла на примеси.

Результаты подчеркивают важность учета городской подстилающей поверхности в моделях качества воздуха для повышения точности прогноза при НМУ и разработки эффективных мер экологического регулирования.

■ Исследование проведено в рамках Научно-исследовательской работы Росгидромета 125032004255-7. Анализ влияния города на распространение примесей в модели проведен при поддержке Российского Научного фонда, проект №23-77-30008.

The impact of the urban heat island on pollutant concentrations in COSMO-ART model

^{1,2} Kirsanov A., ^{1,2,3,4} Varentsov M., ² Baklanov A.

¹ Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, 13, building 1, Bolshoy Predtechensky lane, Moscow, 123376, Russia

² Russian State Hydrometeorological University, 195196, Russia, St. Petersburg, Malookhtinsky Prospekt, 98

³ Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 119991, Leninskie Gory, 1, bld.1, Moscow, Russia

⁴ Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, 119991, Leninskie Gory, 1, bld.4, Moscow, Russia

A configuration of the COSMO-ART model has been prepared for the St. Petersburg region with a grid step of 2 km and TERRA_URB urban-canopy land-surface scheme, which allows for urbanization to be taken into account: changes in the land surface properties, anthropogenic heat flux. Implementation of TERRA_URB parameterization in COSMO-ART model allows the urban heat island to be reproduced and changes the characteristics of the atmospheric boundary layer, which has an impact on the distribution of surface concentrations of pollutants. Under meteorological conditions with temperature inversion that promote the accumulation of pollutants in surface layer, the UHI weakens the inversion, enhancing vertical mixing and reducing pollutant concentrations near the surface. Case studies for St. Petersburg (summer and winter episodes) revealed the strongest TERRA_URB impact on the pollutant concentrations during winter, the summer scenario showed a weaker effect. The results emphasize the necessity of incorporating urban surface parameterizations in air quality models to improve forecast accuracy during air pollution episodes and support environmental policy-making.

Наукастинг зон сильной конвекции по данным COSMO и КА Арктика-М

^{1,2} Колкер А.Б., ¹ Гочаков А.В.

¹ Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт (ФГБУ «СибНИГМИ»), 630099, Россия, г. Новосибирск, Советская 30

² Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса 20
E-mail: alexk@sibnigmi.ru, gochakov@sibnigmi.ru

Naucasting of strong convection zones based on COSMO and Arktika-M data

^{1,2} Kolker A.B. ¹ Gochakov A.V.

¹ Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute 630099, Russia, Novosibirsk

² Novosibirsk State Technical University, Russia, 630073, Russia, Novosibirsk

Традиционный способ оценки ВВГО заключается в использовании яркостной температуры дистанционного зондирования Земли в канале 11 мкм и сопоставлении ее с климатическими, аэрологическими данными или результатами расчетов ЧПП [1]. Зашумленность данных в канале 11 мкм не всегда обеспечивает стабильность определения границ, что недопустимо для их надежной пространственно-временной экстраполяции.

В данной работе предлагается подход к выделению зон сильной конвекции (ВВГО > 10 км) по данным ЧПП (Cosmo-Ru-Sib2.2 [1]) и канала 6.3 мкм КА Арктика М, обеспечивающий стабильность определения границ зоны явления. Данный подход дает возможность устойчивой экстраполяции смещения зоны явления с использованием алгоритмов оптического потока.

Ключевая идея подхода заключается в применении модели радиационного трансфера RTTOV [2] инициализированной при помощи полей ЧПП COSMO и сконфигурированной в режиме ясного неба (clear sky simulation). Сравнивая результаты расчета с фактически измеренными значениями яркостных температур, можно отметить, что:

- для областей, где ВВГО не достигла уровня 500 гПа, расчетная яркостная температура будет ниже или равна значениям, зарегистрированным КА;
- для областей, где конвективные процессы превысили 500 гПа, яркостная температура, зарегистрированная КА будет ниже расчетной.

Стабильность определения границ явления позволяет успешно рассчитать вектора скорости вдоль границ областей и построить их пространственно-временную экстраполяцию на период до 180 минут.

Литература:

1. Нерушев А.Ф., Крамчанинова Е.К. Метод определения характеристик атмосферных движений по данным измерений метеорологических геостационарных спутников // Исследование Земли из космоса. – 2011. – № 1. – С. 3-13. [Электронный ресурс]. – URL: <https://naukarus.com/metod-opredeleniya-harakteristik-atmosfernyh-dvizheniy-po-dannym-izmereniy-meteorologicheskikh-geostatsionarnyh-sputniko>
 2. Г. С. Ривин, И. А. Розинкина, Е. Д. Астахова [и др.] Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019. – № 4(374). – С. 37-53. – EDN NTQCSD.
- Saunders R., Hocking J, Turner E., et al. An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12) // Geoscientific Model Development. – 2018. – Vol. 11, No. 7. – P. 2717-2737. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2717-2018>

Конечно-разностная дискретизация негидростатических уравнений динамики атмосферы на сетке кубическая сфера, сохраняющая энергию

^{1,2} Марханов Д.А., ^{1,2,3} Шашкин В.В., ^{1,2,3} Гойман Г.С.

¹ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

² Гидрометцентр России

³ Московский физико-технический институт

E-mail: d.markhanov@inm.ras.ru, v.shashkin@inm.ras.ru, gordeygoyman@gmail.com

An energy consistent finite difference discretization for the non-hydrostatic atmospheric dynamics equations on the cubed-sphere grid

^{1,2} Markhanov D.A., ^{1,2,3} Shashkin V.V., ^{1,2,3} Goyman G.S.

¹ G. I. Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS

² Hydrometeorological Center of Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology

В данной работе представляется пространственная аппроксимация высокого порядка точности для негидростатических уравнений динамики атмосферы в новой разрабатываемой модели атмосферы высокого разрешения на квазиравномерной сетке кубическая сфера. Ключевой особенностью работы является применение конечно-разностного метода суммирования по частям (Summation-by-parts finite difference, SBP-FD) [1]. Метод SBP-FD позволяет построить устойчивые аппроксимации высокого порядка горизонтальных производных на сетке кубическая сфера [2]. Более того, горизонтальные градиент и дивергенция, построенные с помощью SBP-FD, удовлетворяют дискретному аналогу теоремы Остроградского-Гаусса

$$\int_{\Omega} f \nabla \cdot \vec{v} d\Omega + \int_{\Omega} \nabla f \cdot \vec{v} d\Omega = 0,$$

что позволяет построить дискретизацию, сохраняющую массу и энергию. Это особенно важно для задач моделирования климата, так как ограничения, накладываемые дискретными аналогами законов сохранения, не допускают переход модели в нереалистичное состояние, тем самым повышая достоверность полученных численных решений [3].

Построенная дискретизация была испытана на ряде общепринятых идеализированных тестовых задач, и полученные численные результаты хорошо согласуются с эталонными решениями. Особое внимание было уделено эксперименту Хелда-Суареса [4], как наиболее релевантному к моделированию климата.

Литература:

1. Fernández D. C. D. R., Hicken J. E., Zingg D. W. Review of summation-by-parts operators with simultaneous approximation terms for the numerical solution of partial differential equations //Computers & Fluids. – 2014. – Т. 95. – С. 171-196.
2. Shashkin V. V., Goyman G. S., Tolstykh M. A. Summation-by-parts finite-difference shallow water model on the cubed-sphere grid. Part I: Non-staggered grid //Journal of Computational Physics. – 2023. – Т. 474. – С. 111797.
3. Thuburn J. Conservation in Dynamical Cores: What, How and Why? //Numerical techniques for global atmospheric models. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011. – С. 345-355.
4. Held I. M., Suarez M. J. A proposal for the intercomparison of the dynamical cores of atmospheric general circulation models //Bulletin of the American Meteorological society. – 1994. – Т. 75. – №. 10. – С. 1825-1830.

Отклик полярных мезоциклонов на изменение характеристик подстилающей поверхности в численных экспериментах модели ICON

¹ Никитин М.А., ^{1,2} Ревокатова А.П., ^{1,3} Ломакин И.Р.

¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Большой Предтеченский пер, 13 стр. 1, Москва, Россия

² Институт глобального климата и экологии им Ю.А. Израэля, ул. Глебовская, 20Б Москва, Россия

³ Московский государственный университет им М.В. Ломоносова, Географический факультет, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, Москва, Россия;

E-mail: arhin@yandex.ru, revokatova@gmail.com, ilja.lomakin2@yandex.ru

Polar lows response on varying characteristics of surface in numerical experiments with ICON model

¹ Nikitin M.A., ^{1,2} Revokatova A.P., ^{1,3} Lomakin I.R.

¹ Hydrometcenter of Russia, 13, building 1, Bolshoy Predtechensky lane, Moscow, 123376, Russia

² Yu.A. Israel Institute of Global Climate and Ecology, 20B Glebovskaya str., Moscow, 107258, Russia

³ Moscow State Lomonosov University, Geographical Faculty, GSP-1, Leninskie Gory

Полярные мезоциклоны (ПМЦ) – это небольшие, но довольно интенсивные барические образования, формирующиеся над поверхностью моря к северу от арктического фронта. Несмотря на свои размеры (порядка 100-300 км) и короткое время жизни (около 1-2 суток), ПМЦ представляют существенную опасность для хозяйственной деятельности человека благодаря высоким скоростям ветра (свыше 15 м/с), быстрой скорости прохождения и сложностям, связанным с их численным моделированием.

В ходе проделанной работы на основании спутниковых снимков, данных скаттерометров и предложений норвежского проекта BarentsWatch составлен архив ПМЦ, наблюдавшихся над акваториями Гренландского, Норвежского и Баренцева морей в холодные сезоны 2022 – 2024 годов. Для четырёх наиболее интересных случаев (в ходе которых ПМЦ выходили на сушу или же проходили над островами) мы провели численные эксперименты с использованием модели ICON (ICOsahedral Nonhydrostatic), шаг сетки конфигурации ICON-Ru составлял 2,0 км. В ходе серии численных экспериментов мы меняли характеристики подстилающей поверхности: наращивали и убрали морской лёд в пределах определённой территории, а также повышали температуру поверхности океана (ТПО) до 5°C. По итогам экспериментов были проанализированы поля различных метеорологических величин: давления, температуры, скорости и порывов ветра, потоков явного и скрытого тепла, относительной завихренности, конвективной доступной потенциальной энергии. Помимо тривиальных общих закономерностей (например, затухания ПМЦ в результате наращивания льда), эксперименты выявили разный отклик ПМЦ на изменение подстилающей поверхности в зависимости от механизмов их формирования. Например, ПМЦ от 16-18 марта 2022, тесно связанный со струйным течением, прослеживается даже в эксперименте с нарощенным льдом, а ПМЦ от 18-19 января 2022 по-разному реагирует на повышение температуры воды в зависимости от стадии своего развития.

- Исследование проведено в рамках Научно-исследовательской работы Росгидромета, регистрационный номер 125032004255-7.

Облачные алгоритмы радиационной модели ECRAD: сравнительный анализ и оценка эффективности.

^{1,2} Петров Н.А., ^{1,2} Чубарова Н.Е.

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

² ФГБУ «Гидрометцентр России», 123376, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.13, строение 1

E-mail: nial.03@mail.ru, natalia.chubarova@gmail.com

Cloud solvers in the ECRAD radiation model: comparative analysis and efficiency assessment

^{1,2} Petrov N.A., ^{1,2} Chubarova N.E.

¹ Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Leninskie gory, 1

² Hydrometeorological Research Center of Russian Federation (Hydrometcenter of Russia), 123376, Moscow, Bolshoy Predtechensky lane, 13, building 1

В докладе дается сравнительный анализ различных облачных вычислительных алгоритмов, доступных в радиационной модели ECRAD [1]. Оценка качества воспроизведения данных проводится в сравнении с высокоточными измерениями радиационного комплекса RAD-MSU (BSRN) Метеорологической обсерватории МГУ (МО МГУ) [2] за теплый период с 2021 по 2023 г. Входные данные в ECRAD были сформированы и подготовлены в единую вертикальную сетку (137 уровней). Основные метеорологические данные были взяты с реанализа ERA5, аэрозольный состав атмосферы задавался по CAMS, газовые составляющие – по климатологии IFS 45 R1. По результатам сравнений расчётов в облачных условиях выявлены похожие тенденции для всех облачных алгоритмов в существенном занижении коротковолнового баланса для балла облачности 5-7 (до 50-70 Вт/м²) и его завышения в условиях облачного балла от 7 до 10 (до 20-40 Вт/м²). Показано, что наблюдаемые различия определяются неверным воспроизведением прямой коротковолновой радиации в облачных алгоритмах. Ошибка воспроизведения длинноволнового баланса составляет до 10 Вт/м² для всех градаций облачного балла и алгоритмов. Дополнительно были оценены радиационные эффекты трёхмерной структуры (3D) облачности и дополнительного облачного состояния, которые реализованы в алгоритме SPARTACUS. Проведённые исследования качества расчётов радиации в облачных условиях важны в дальнейшем для совершенствования облачных алгоритмов в оперативной модели ICON-Ru.

■ Работа выполнена в рамках темы 125032004255-7 по заданию Росгидромета.

Литература:

1. Hogan, R. J., & Bozzo, A. (2018), A flexible and efficient radiation scheme for the ECMWF model, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10.
2. Chubarova, N. E.; Rozental, V. A.; Zhdanova, E. Yu.; Poliukhov, A. A. (2022), New radiation complex at the Moscow State University Meteorological Observatory of the BSRN standard: methodological aspects and first measurement results. *Opt. Atmos. Sc.*, 35, 670–678.

Роль температурного профиля и облачности в формировании положительного длинноволнового баланса в зимний период по результатам экспериментов с моделью ICON

^{1,2} Пискунова Д.А., ^{1,2} Чубарова Н.Е., ^{1,2} Шатунова М.В., ² Шувалова Ю.О.

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские Горы, 1, Москва, 119991, Россия

² ФГБУ «Гидрометцентр России», Большой Предтеченский переулок, д.13, строение 1, Москва, 123242, Россия

The role of the temperature profile and cloudiness in the formation of a positive net longwave radiation in winter according to the results of experiments with the ICON model

^{1,2} Piskunova D.A., ^{1,2} Chubarova N.Ye., ^{1,2} Shatunova M.V., ² Shuvalova J.O.

¹ Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia

² Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Bolshoy Predtechensky lane, 13, building 1, Moscow, 123242, Russia

E-mail: piskunovada@my.msu.ru

Длинноволновая радиация играет важную роль в формировании погодных условий средних и высоких широт. По результатам наблюдений с использованием комплекса RAD-MSU (BSRN), установленного в Метеорологической обсерватории МГУ, были выявлены случаи положительного длинноволнового баланса в Москве, наблюдавшиеся при адвекции теплого воздуха на снежную поверхность. Поскольку положительный длинноволновый баланс может приводить к дополнительному нагреву поверхности и усиливать процессы снеготаяния, такие случаи важно исследовать детальнее.

С целью более глубокого понимания данного явления были проведены эксперименты с численной моделью ICON-LAM (конфигурация ICON-Ru) для некоторых случаев с положительным длинноволновым балансом. Моделью были воспроизведены положительные значения длинноволнового баланса, однако, в некоторые часы наблюдались расхождения с наблюдениями. Была оценена роль температуры приземных слоев воздуха и облачности в формировании положительного длинноволнового баланса. Выявлена статистически значимая связь между точностью воспроизведения температуры до высот 500 м и точностью расчета длинноволнового баланса. Была отмечена 30-60- минутная инерция в отклике изменения длинноволнового баланса на изменение температуры с увеличением высоты. Аналогичная инерция выявлена для балла облачности нижнего яруса. Обсуждаются физические механизмы, лежащие в основе выявленных связей.

- Эксперименты с моделью ICON проведены в рамках Научно-исследовательской работы Росгидромета № 125032004255-7.

Аппроксимация уравнений динамики атмосферы на сетках с локальным повышением разрешения

Третьяк И.Д., Гойман Г.С., Шашкин В.В.

Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, 119333 Москва, ул. Губкина, дом 8
E-mail: Tretyak01D@gmail.com, gordeygoyman@gmail.com, v.shashkin@inm.ras.ru

Approximation of atmosphere dynamic equations on locally refined meshes

Tretyak I.D., Goyman G.S., Shashkin V.V.

G.I. Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS

В задачах вычислительной метеорологии одним из путей повышения точности моделирования атмосферы является увеличение пространственного разрешения расчетной сетки. Современные глобальные модели атмосферы явно описывают α - (200-1000 км) и β - (20-200 км) мезомасштабные процессы, однако γ - (2-20 км) мезомасштабные явления, такие как конвективные ячейки и облачные кластеры, описываются параметризованно, что снижает точность прогноза и вносит неопределенность в моделирование изменений климата. Применение глобальных моделей с разрешением, достаточным для прямого моделирования γ -мезомасштабных процессов, невозможно из-за чрезмерных вычислительных затрат. Выходом из этой ситуации является использование региональных моделей, которые вычисляют решение уравнений динамики на более подробной сетке в небольшой выбранной области, используя граничные условия из глобальной модели. В данной работе предложен метод аппроксимации уравнений динамики атмосферы на сетках с локальным увеличением разрешения, что позволяет достигать высокой детализации в целевых регионах без привлечения сторонних моделей путем прямого интегрирования уравнений глобальной циркуляции на неоднородных сетках.

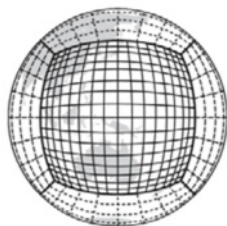


Рисунок 1.

Пример сетки кубическая сфера с локальным повышением разрешения.

Ключевой особенностью предлагаемого метода является его математическая корректность, под которой понимается наличие дискретных аналогов важных для конкретных уравнений свойств, например, свойства интегрирования по частям:

$$\int_{\Omega} f \nabla \cdot \vec{v} d\Omega + \int_{\Omega} \nabla f \cdot \vec{v} d\Omega = \int_{\partial\Omega} f g d\partial\Omega.$$

Оно позволяет получать дискретные аналоги законов сохранения массы и энергии, доказывать теорему об устойчивости линеаризованной системы. Для достижения этого мы используем класс конечно-разностных операторов высокого порядка со свойством «суммирования по частям» (Summation-By-Parts). В результате получаем возможность проводить устойчивые расчеты с большой детализацией решения в нужных регионах и наличием обратной связи.

Метод реализован в новом динамическом ядре на сетке кубическая сфера атмосферной модели, разрабатываемой в ИВМ РАН, которую в последствии планируется использовать для численного прогноза погоды в Гидрометцентре России и моделирования климата в модели Земной системы ИВМ РАН.

Спектры атмосферных неоднородностей, характерные для циклонического характера погоды на территории Уральского Прикамья

Федурин Е.Ю.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15,
E-mail: egor.fedurin@gmail.com

Spectra of atmospheric heterogeneities typical for cyclones in the Urals region

Fedurin E.Yu.

Perm State National Research University, 614068, Perm, Bukireva, 15

По данным радиозондирования атмосферы с высоким пространственно-временным разрешением проведено исследование спектров пульсаций скорости ветра при прохождении циклонов через район исследования. Спектры рассчитаны в слое от уровня земли до высот более 30 км.

На рисунке показан спектр неоднородностей скорости ветра в билогарифмических координатах. По оси абсцисс отложены частоты, по оси ординат – спектральные плотности энергии неоднородностей скорости ветра. Спектральная плотность энергии не изменяется на участке от $2 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-2}$ (пространственные масштабы от 250 м до 2500 м), затем резко уменьшается на участке от $2 \cdot 10^{-2}$ Гц до $6 \cdot 10^{-2}$ Гц (пространственные масштабы от 80 м до 250 м). На участке от $6 \cdot 10^{-2}$ до $2 \cdot 10^{-1}$ (пространственные масштабы от 25 м до 80 м) скорость уменьшения энергии снижается.

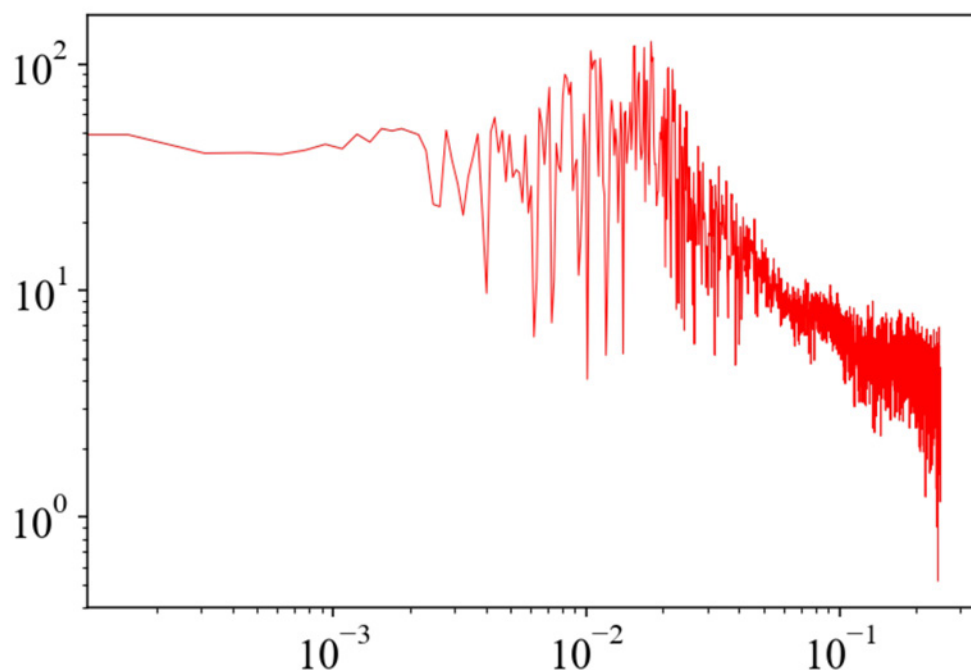


Рисунок 1. Спектр пульсаций полного вектора скорости ветра

Таким образом, наиболее ярко каскадный механизм передачи энергии наблюдается на масштабах от 25 м до 250 м, при этом наиболее интенсивно процесс передачи энергии происходит на масштабах от 80 м до 250 м.

Оценка влияния городской застройки мегаполиса на метеорологические величины и химический состав атмосферы по результатам моделирования WRF-Chem (на примере Санкт-Петербурга)

Черкашин Д.М., Неробелов Г.М., Анискина О.Г.

Российский государственный гидрометеорологический университет, 192007, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79

E-mail: denny.axov@gmail.com, akulishe95@mail.ru, olga.aniskina@mail.ru

Assessment of the influence of urban development on meteorological variable and chemical composition of the atmosphere based on the WRF-Chem modeling results (on the example of St. Petersburg)

Cherkashin D.M., Nerobelov G.M., Aniskina O.G.

Russian State Hydrometeorological University, 192007, St. Petersburg, Voronezhskaya Str., 79

В докладе дается сравнительный анализ метеорологических величин (температура воздуха, скорость ветра) и химических составляющих атмосферы (отношение смеси водяного пара, SO_2 , CO) с учетом детализированной и упрощенной городской застройки мегаполиса Санкт-Петербург по данным моделирования WRF-Chem. В первом случае использовалась усложненная классификация городской застройки, которая покрывают городскую среду 11 классами локальных климатических зон [1]. Кроме того, использовалась параметризация физики городской среды BEP (Building Effect Parametrization), которая описывает взаимодействие между нижнем слоем атмосферы и территорией города [2]. Во втором случае использовалась стандартная классификация городской застройки USGS без параметризации физики городской поверхности. Сравнительный анализ показал, что в зависимости от времени суток в пределах городской среды разность между данными численного моделирования с учетом детализированной и упрощенной застройки мегаполиса Санкт-Петербург в пределах городской среды варьируется температура воздуха варьируется в среднем на 2 °C для приземной температуры воздуха, скорость ветра 2 м/с для скорости ветра, отношения смеси водяного пара $2 \cdot 10^{-3}$ кг/кг для массовой доли водяного пара, отношения смеси SO_2 и отношения смеси CO 0.05 ppm для отношения смеси SO_2 и CO в зависимости от времени суток. Наибольшее значение разности наблюдается в ночное время, иногда и в утреннее, а наименьшее в дневное время суток. Помимо этого, с 25 м до 350 м разность между данными численного моделирования уменьшается и становится менее существенна (варьируется около 0).

- Исследование выполнено при поддержке РНФ (грант № 23-77-30008) (<https://rscf.ru/project/23-7730008>)

Литература:

1. Stewart I. D., Oke T. R. Local climate zones for urban temperature studies // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2012. – Т. 93. – №. 12. – С. 1879-1900.
2. Martilli A., Clappier A., Rotach M. W. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models // Boundary-layer meteorology. – 2002. – Т. 104. – С. 261-304

Моделирование града с использованием мезомасштабной модели WRF-ARW

Шишкина Т.Р., Анискина О.Г.

ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет, Россия, Санкт-Петербург,
Воронежская улица, дом 79

E-mail: tana-sakura@mail.ru, olga.aniskina@mail.ru

Modeling of hail using the WRF-ARW mesoscale model

Shishkina T.R., Aniskina O.G.

Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya Street, Saint Petersburg, Russia

Град является одним из наиболее опасных и трудно прогнозируемых метеорологических явлений, способным наносить значительный экономический ущерб. В условиях глобального изменения климата также изменилось и пространственно-временное распределение града. В последние десятилетия в Северо-Западном федеральном округе (СЗФО) отмечается нетипичное выпадение града весной и осенью. Также выпадение града теперь отмечается и в полярных регионах, что ранее не наблюдалось.

Наблюдаемые изменения требуют детального анализа, например, с применением современных гидродинамических моделей. В работе использовалась модель WRF-ARW с модулем WRF-HAILCAST, который описывает процессы роста градин и учитывает сложные микрофизические и динамические процессы их образования [1, 2].

Для анализа выбран случай града в Санкт-Петербурге 03 июля 2023 года. Синоптическая ситуация была обусловлена прохождением ночью холодного фронта от циклона над Финляндией с последующим затокном холодного воздуха и формированием линии неустойчивости. На метеостанциях Санкт-Петербурга град не наблюдался, однако отмечались градовые ячейки по радиолокационным данным (ДМРЛ в п. Воейково), также о граде сообщалось очевидцами и СМИ – диаметр градин составил 2-3 мм.

Модель включала в себя три сетки – d01 (материнская, с разрешением 8 км), d02 (первая вложенная с разрешением 2,6 км), d03 (вторая вложенная с разрешением 0,8 км). Использовались начальные данные анализа глобальной модели GFS на широтно-долготной сетке с шагом 0,25°. Проведено три численных эксперимента:

- 1) с параметризацией микрофизических процессов Goddard 4-ice scheme и планетарного пограничного слоя YSU;
- 2) с параметризацией микрофизических процессов Goddard 4-ice scheme, городской среды BEP и планетарного пограничного слоя (ППС) BouLac;
- 3) с параметризацией микрофизических процессов Goddard 4-ice scheme и ППС BouLac.

Первая градовая засветка по метеорологическому локатору появилась в 11:30 UTC, смещаясь с Курортного района на северо-восток, по данным СМИ град прошел во второй половине дня, предположительно, с 13:00 до 15:00 UTC на Васильевском острове, также град наблюдался в Красносельском районе.

В результате 1-го эксперимента был воспроизведен град в Курортном районе, Кронштадте и местах на севере города с началом в 08:30 UTC и окончанием в 14:30 UTC что, по большей части, совпадает с фактическими данными. Диаметр града по результатам моделирования составляет 10-15 мм, превышая фактический диаметр в 3-5 раз.

В результате 2-го эксперимента град не был воспроизведен в пределах Санкт-Петербурга, однако, наблюдались градовые зоны в Волосовском и Тосненском районах с диаметром 10 мм.

В результате 3-го эксперимента град в Санкт-Петербурге также не был воспроизведен, небольшие градовые зоны отмечены во Всеволожском районе с диаметром градин 8-10 мм.

Проанализировав вертикальные разрезы температуры воздуха и ветра в слое AT1000-AT500 можно отметить, что значительной адвекции холода не отмечалось, по результатам всех трех экспериментов температура воздуха в слое понизилась на 2-3 градуса, также не наблюдается и сдвига ветра, ветер юго-западный во всем слое с порывами в некоторые сроки.

Проанализировав неустойчивость, полученную по результатам всех трех экспериментов, получено, что только в 1-ом эксперименте параметр CAPE достиг 600-800 Дж/кг, во 2 и 3 экспериментах параметр CAPE достиг лишь 200-300 Дж/кг.

Добавление параметризации ППС BouLac ослабило неустойчивость атмосферы, в результате развития градовых процессов не состоялось. Параметризация городской среды BEP работает совместно с параметризацией ППС BouLac и привела к таким же результатам.

Воспроизведение града в модели WRF-HAILCAST зависит от выбранной параметризации физических процессов и требует подбора разных комбинаций схем параметризаций.

- Исследование выполнено при поддержке Российского Научного Фонда (грант №23-77-30008, <https://rscf.ru/project/23-77-30008/>).

Литература:

1. Adams-Selin R. D Forecasting hail using a one-dimensional hail growth model within WRF / R. D. Adams-Selin, C. L. Ziegler // Monthly Weather Review, 2016. – Т. 144 – № 12. – P. 4919-4939.
2. Maulana M. I. S. Comparison of Microphysics Schemes on WRF- HAILCAST Model to Study Hailstone in Aeronautics (Case Study: Hail Strike on AirAsia A320-200, November 16, 2018) / M. I. S Maulana, A. Kristianto // JPSE, 2023. – 8. – P. 20-35.

СЕКЦИЯ II

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

Численное исследование отклика Северного Ледовитого океана на изменения индекса Атлантической мультideкадной осцилляции

Платов Г.А.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Проспект академика Лаврентьева, 6, 630090, Новосибирск, Россия
E-mail: plat@ommfao.ssc.ru

Numerical study of the Arctic Ocean response to changes in the Atlantic Multidecadal Oscillation index

Platov G.A.

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Academician Lavrentiev Avenue, 6, Novosibirsk, 630090, Russia

В предшествующей работе [1] на основе численных экспериментов с совместной моделью океана и льда исследовалась взаимосвязь теплосодержания атлантического слоя вод в Арктике с типом циркуляции в этом регионе. Были установлена периодичность во взаимодействии этих двух характеристик, в качестве причин которой мог бы выступить некоторый фактор периодического внешнего воздействия на систему. В качестве одного из таких факторов предполагалось воздействие аномальных проявлений в северной Атлантике известных как Атлантическая мультideкадная осцилляция (АМО).

В данной работе предлагается метод анализа пространственно-временных связей, основанный на поиске статистических закономерностей в распределении гидротермодинамических полей моделируемых объектов и временных рядов, полученных с привлечением данных наблюдений. Суть метода в получении на основе EOF разложения некоторого композитного распределения и его главной компоненты, наиболее тесно связанных с изменчивостью некоторого временного ряда с учетом возможного временного лага. Метод позволяет также оценить надежность найденных закономерностей.

В качестве временного ряда рассматриваются изменения индекса АМО, полученного на основе анализа данных и численных реконструкций в работе [2]. Имеющийся на данный момент ряд данных этого анализа охватывает период с 1856 по 2023 гг.. Предполагалось, что поля интегральной функции тока и теплосодержания атлантического слоя вод в Арктике могут испытывать влияние этой осцилляции и цель была в получении статистического подтверждения этой гипотезы.

Использовались результаты численного моделирования с помощью модели SibCIOM региона Арктики и северной Атлантики при воздействии атмосферного форсинга полученного на основе реанализа NCEP/NCAR с 1948 по 2024 гг.. Результаты показывают, что композит, построенный с помощью предлагаемого метода, главная компонента которого совпадает с временным рядом индекса АМО с лагом около 18-20 лет, описывает около 14% изменчивости интегральной функции тока и около 12% изменчивости теплосодержания слоя атлантических вод в Арктике.

- Финансовая поддержка: Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМиГ СО РАН FWNM-2025-0003

Литература:

- Platov G., Kraineva M., Golubeva E. Main modes of the Arctic Ocean circulation and a relationship between their trends and the Atlantic water heat content // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 611. P. 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/611/1/012011>
1. Enfield D.B., Mestas-Nuñez A.M., Trimble P.J. The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S. Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. P. 2077–2080. <https://doi.org/10.1029/2000GL012745>

Воспроизведение климата последнего тысячелетия различными версиями модели ИВМ РАН

¹ Морозова П.А., ^{1,2} Володин Е.М.

¹ Институт географии РАН, 119017, Россия, Москва, Старомонетный переулок, 29, ,

² Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, 119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 8

E-mail: morozova_polina@mail.ru, volodinev@gmail.com

Last millennium climate simulation by different versions of the climate model INM-CM

¹ Morozova P.A., ^{1,2} Volodin E.M.

¹ Institute of Geography RAS, 119017, Staromonetny lane. 29, Moscow, Russia

² Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, 119333, Gubkin str., 8, Moscow, Russia

Рассматривается моделирование климата последнего тысячелетия с помощью двух версий климатической модели, разработанной в ИВМ РАН: INM-CM48 (принимала участие в CMIP6) и новой версии INM-CM. Основное отличие новой версии INM-CM6 от предыдущей – изменение в схеме расчета облачности и конденсации, что привело к более высокой чувствительности к увеличению углекислого газа. Помимо этого, изменения были внесены также в расчет эволюции аэрозолей, непрямого эффекта аэрозолей, расчет эволюции снежного покрова, параметризацию атмосферного пограничного слоя и некоторые другие блоки. Моделирование климата последнего тысячелетия проводилось в соответствии с протоколом CMIP6 для эксперимента *past1000* (850–1849 гг). Для эксперимента *past1000* были подготовлены следующие наборы граничных условий и внешних воздействий в соответствии с [Jungclauss et al., 2017], основанные на палеорекострукциях: значения орбитальных параметров (эксцентриситет, долгота перигелия, наклон земной оси); значения солнечной постоянной, значения солнечного излучения для различных диапазонов длин волн; содержание парниковых газов (CO₂, N₂O, CH₄), вулканический форсинг (характеристики для расчета радиационных свойств вулканического аэрозоля). Для расчета последних были использованы данные реконструкции [Toohey and Sigl, 2017] и модуль EVA [Toohey et al., 2016], позволяющий рассчитать необходимые данные для моделей, не содержащих блок интерактивного расчета вулканического аэрозоля.

Сравнение данных моделирования и палеорекострукций показывает, что новая версия модели INM-CM6 воспроизводит температурный отклик на крупные вулканические извержения гораздо более реалистично, чем предыдущая, особенно вулканические извержения в высоких широтах Северного полушария. Кроме того, форсинги, задаваемые в рамках эксперимента *past1000*, недостаточны для воспроизведения обеими версиями модели потепления средних веков и похолодания малого ледникового периода, в то время как в рамках эксперимента *historical* обе версии успешно (близко к наблюдаемым значениям) воспроизводят изменение температуры в XX в. в соответствии с заданными внешними воздействиями.

■ Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024)

Литература:

1. Jungclauss, J. H., et al.: The PMIP4 contribution to CMIP6 – Part 3: The last millennium, scientific objective, and experimental design for the PMIP4 *past1000* simulations, Geosci. Model Dev., 10, 4005–4033, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4005-2017>, 2017
2. Toohey, M. and Sigl, M.: Volcanic stratospheric sulfur injections and aerosol optical depth from 500 BCE to 1900 CE, Earth Syst. Sci. Data, 9, 809–831, <https://doi.org/10.5194/essd-9-809-2017>, 2017
3. Toohey, M., Stevens, B., Schmidt, H., and Timmreck, C.: Easy Volcanic Aerosol (EVA v1.0): an idealized forcing generator for climate simulations, Geosci. Model Dev., 9, 4049–4070, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4049-2016>, 2016

Связь морского волнения с циклонической активностью в атмосфере Северного полушария по данным реанализа ERA5

¹ Акперов М.Г., ² Гиппиус Ф.Н., ^{1,2} Мохов И.И., ¹ Семенов В.А.

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

² МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

E-mail: aseid@ifaran.ru

На основе данных реанализа ERA5 для последних десятилетий (1940-2023 гг.) получены количественные оценки сезонных и региональных особенностей для значительной высоты волн в сопоставлении с изменениями циклонической активности в атмосфере Северного полушария.

Сделаны оценки вклада внетропических циклонов в формирование соответствующих особенностей и изменений морского волнения. Максимумы повторяемости экстремального морского волнения зимой и летом соответствуют акваториям с повышенной повторяемостью циклонов, в частности, над Тихим и Атлантическим океанами. Получено, что вклад внетропических атмосферных циклонов в формирование значительных высот волн достигает 70% зимой и 50% летом. При этом наиболее сильный вклад связан с интенсивными циклонами – 90% зимой и 40% летом.

Изменения температуры и осадков западной части российской Арктики в 1940–2099 годы по метеостанциям, реанализам и моделям CMIP6

¹ Серых И.В., ² Толстиков А.В.

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Россия, Москва, Нахимовский просп., 36

² Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, 185030, Россия, Петрозаводск, просп. Александра Невского, 50

Temperature and precipitation changes in the western Russian Arctic in 1940–2099 based on weather stations, reanalyses, and CMIP6 models

¹ Serykh I.V., ² Tolstikov A.V.

¹ Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow

² Northern water problems institute, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk

Исследованы климатические изменения приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и среднесуточного количества осадков (СКО) в регионе западной части российской Арктики [1–3]. Для анализа произошедших за 1940–2023 гг. изменений использованы данные метеостанций, реанализов ERA5, MERRA-2 и PREC, а также результаты эксперимента Historical 33 моделей CMIP6. Будущие изменения до конца XXI в. рассмотрены по результатам экспериментов SSP ансамбля 33 моделей CMIP6.

Данные метеостанций, реанализов и результаты эксперимента Historical моделей CMIP6 в целом согласуются между собой. Увеличение средней ПТВ исследуемого региона с середины 1970-х по 2023 г. составило 2–4°C. Причем этот рост ПТВ заметнее всего проявился в Белом и Карском морях, а также на севере и востоке Баренцева моря. СКО исследуемого региона также увеличилось, но с более высокой пространственной и временной неоднородностью, чем ПТВ. По данным ERA5 одним из регионов наибольшего повышения СКО между 1940–1969 и 1994–2023 гг. является акватория Белого моря (+0,2 мм/сутки).

Модели CMIP6 на основе различных сценариев SSP выбросов парниковых газов дают заметно различающиеся прогнозы повышения ПТВ исследуемого региона до конца XXI в. Так, в зависимости от сценария SSP увеличение ПТВ западной части российской Арктики к концу XXI в. может составить от 2–4°C до 6–10°C с более сильным ростом ПТВ на севере исследуемого региона. Также модели CMIP6 прогнозируют дальнейшее увеличение СКО в исследуемом регионе: от +0,11 до +0,27 мм/сутки к концу XXI века. При этом на севере исследуемого региона ожидается более существенное увеличение СКО, чем на его юге. В ближайшие 30 лет по данным ансамбля моделей CMIP6 в исследуемом регионе ПТВ увеличится на 2–3 °C, а СКО на 0,02–0,12 мм/сутки в малой зависимости от сценария SSP.

Литература:

1. Серых И.В., Толстиков А.В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Ч. 1: Температура воздуха, осадки, ветер // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68, № 3. С. 258–277.
2. Серых И.В., Толстиков А.В. Климатические изменения температуры воздуха западной части российской Арктики в 1940–2099 гг. по данным ERA5 и моделям CMIP6 // Арктика: экология и экономика. 2024. Т. 14. № 3. С. 334–349.
3. Толстиков А.В., Серых И.В. Климатические изменения количества осадков в регионе Белого моря и их проекции по моделям CMIP6 до 2099 года // Арктика: экология и экономика. 2025. Т. 15. № 3. В печати.

Возможный механизм формирования сильных отрицательных аномалий площади льда в Арктике в летний период

^{1,2} Романенко В.А., ^{1,3} Семенов В.А.

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 3, стр.1

² МГУ имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, 119234, Российская Федерация, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, дом 1, стр. 4, НИВЦ МГУ

³ Институт географии РАН, 119017 Москва, Старомонетный переулок, дом 29, стр.4

E-mail: Romanenko.victor.geo@mail.ru, vasemenov@mail.ru

Possible mechanism of formation of strong negative anomalies of the Arctic ice area during the warm period

^{1,2} Romanenko V.A., ^{1,3} Semenov V.A.

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

² Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

³ Institute of Geography RAS, Moscow, Russian Federation

Изменения в площади арктического морского льда изучены по данным климатических моделей проекта CMIP6 и по данным реанализа ERA5.

Большинство моделей воспроизводит довольно резкое сокращение площади ледяного покрова к 2020г., причем в сентябре оно сильнее, чем в марте. По некоторым моделям видно, что к концу рассматриваемого периода значительная часть Арктики станет свободной ото льда.

Наибольшая площадь льда наблюдается в восточно-сибирском и североамериканском секторах, где отсутствует отепляющее влияние теплых течений, а, например, в районах Гренландии и Канадского арктического архипелага протекают ветви холодного Трансарктического течения, там ледяной покров наблюдается даже в сентябре. В Норвежском, Баренцевом и Карском морях, в результате действия теплого течения Гольфстрим и его различных ветвей, площадь льда минимальна, либо вовсе отсутствует как в сентябре, так и в марте.

В марте наблюдается повсеместное снижение площади ледяного покрова равными темпами на всей акватории Арктики. В сентябре темп снижения площади льда выше, чем в марте. Зона наиболее ускоренного таяния наблюдается в восточно-сибирской и северо-американской акваториях Арктики, где и так максимальное сосредоточение льда.

Среднеансамблевая площадь морского льда воспроизводит близкий к линейному отрицательный тренд за период 1980-2020 годов и не демонстрирует ускоренное таяние в начале 20-го века. Модели DCPP показывают значительно лучшее соответствие с данными наблюдений, включая воспроизведение ускорения таяния льда в марте в начале 20-го века. В работе также проанализирована рекордно низкая площадь морского льда в сентябре 2012 года, наряду с аналогичными минимумами в климатических моделях за тот же период. Обнаружено, что как наблюдаемые, так и моделируемые минимумы морского льда связаны с определенной атмосферной циркуляцией в предшествующем августе – диполем давления с циклоном над Северным Ледовитым океаном и антициклоном над северной частью Тихого океана. Предполагается, что такая циркуляция способствовала ускоренному таянию морского льда как динамически, так и термодинамически. В настоящей работе проанализировано влияние вклада аномалий различных метеорологических полей на величину аномалии площади льда в Арктике в отдельные годы. Согласно более ранним исследованиям, на резкое сокращение площади льда в 2012 г. также могла повлиять усиленная адвекция более теплых вод в Арктику через пролив Фрама на западе и через Берингов пролив на востоке.

Распределение периодов минимальных значений площади льда в Арктике по годам по моделям CMIP6 за 1980 – 2024 гг. показывает, что большинство моделей воспроизводит минимальную площадь льда после 2020 года. Начиная с 2030-х гг. большинство моделей демонстрирует ускоренное таяние ледяного покрова.

Теплобалансовое моделирование таяния низко-расположенных ледников архипелага Шпицберген

Прохорова У.В., Терехов А.В., Иванов Б.В.

ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», ул. Беринга, 38, Санкт-Петербург
E-mail: uvprokhorova@aari.ru

Energy-balance modeling of ablation a low elevated Svalbard glaciers

Prokhorova U., Terekhov A., Ivanov B.

Arctic and Antarctic Research Institute, Beringa St. 38, Saint-Petersburg

На протяжении последних десятилетий в районе архипелага Шпицберген наблюдается устойчивое потепление, темпы которого превышают среднемировые из-за эффекта «арктического усиления». Зимнее снегонакопление на ледниках архипелага не способно компенсировать их летнее таяние, поэтому баланс массы оледенения отрицателен. В свете этих фактов оценка влияния климата на масс-балансовые характеристики ледников архипелага является актуальной научной задачей.

Лето 2022 года было одним из наиболее примечательных для архипелага Шпицберген с климатической точки зрения из-за возникновения нескольких продолжительных волн тепла, что сделало его одним из самых теплых лет в истории региона. Это также выражено и в рекордных значениях абляции ледников архипелага.

Для исследования влияния климатического фактора на таяние ледников центральной части архипелага Шпицберген использовалась модель теплового баланса, разработанная и калиброванная авторами. В качестве исходных данных в модели используются метеорологические наблюдения на леднике Альдегонда (5,2 км²), расположенного недалеко от поселка Баренцбург. Результаты моделирования сравнивались с данными гляциологического и гидрологического мониторингов.

Годовой баланс массы за 2022 год (–2,13 м в.э.) был самым отрицательным за всю историю наблюдений для ледника Альдегонда с 2002/03 года, когда впервые был начат гляциологический мониторинг. На протяжении сезона вторыми выявлено четыре волны тепла, имевшие продолжительность от 9 до 19 дней. Примечательно, что наиболее значительные из волн тепла наблюдались в мае и в сентябре–октябре, что аномально продлило сезон таяния.

Помимо волн тепла, по результатам моделирования было выявлено несколько более коротких, продолжительностью от 1 до 3 дней, случаев экстремального таяния (до 75 мм в.э./день⁻¹). Эти события хорошо коррелировали ($r = 0,87$, $p < 0,01$) с измерениями расходов воды в реке Альдегонда, что подтверждает правильность воспроизведения моделью величины абляции ледника на суточном интервале. Наиболее вероятно, что выявленные события экстремального таяния были связаны со значительным усилением турбулентного теплообмена, вызванным увеличением скорости ветра (среднесуточное значение до 10,3 м с⁻¹).

Усовершенствование региональной климатической модели ГГО с новой параметризацией процессов на поверхности суши

Козлов А.В., Школьник И.М., Павлова Т.В.

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: kozlov.alexander.vladimirovich@gmail.com

Improvement of the MGO Regional Climate Model with a New Land Surface Parameterization

Kozlov A.V., Shkolnik I.M., Pavlova T.V.

Voeikov Main Geophysical Observatory, St. Petersburg, Russia

В работе представлены результаты валидации региональной климатической модели (РКМ) Главной геофизической обсерватории (ГГО) с новой схемой параметризации процессов тепло- и влагообмена на поверхности суши (MGOLSM). Новая схема разработана в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (распоряжение правительства РФ № 3240-р от 29 октября 2022 года). Основные характеристики MGOLSM соответствуют мировым аналогам и включают раздельное описание снежного покрова и почвы, учет динамического изменения плотности и альбедо снега, фазовых переходов почвенной влаги, а также способности снега удерживать жидкую воду [1].

Проведено сравнение результатов моделирования с данными наблюдений за период 1990–2012 гг. для 18 водосборов на территории Северной Евразии. Анализ показал, что включение новой схемы приводит к уменьшению отклонений временного хода снегозапаса, осадков и температуры поверхности от данных наблюдений. Для расчета речного стока использовалась гидродинамическая модель SaMa-Flood [2], входными данными для которой служили результаты расчетов по РКМ. Сравнение с данными наблюдений на 44 гидрологических постах показало, что РКМ с новой схемой обеспечивает лучшую согласованность результатов расчетов с наблюдаемыми значениями расходов воды в руслах рек.

Обсуждаются шаги по развитию MGOLSM, в частности, переход к более детальному описанию тепло- и влагопереноса в мерзлом грунте, переход от однослойной схемы снега к многослойной схеме и учет перехвата снега кронами деревьев.

Литература:

1. Козлов А.В., Павлова Т.В., Школьник И.М. Усовершенствованная схема тепло- и влагообмена суши с атмосферой для моделей регионального климата ГГО. Труды ГГО, 613:6-75, 2024.
2. Yamazaki D., Kanae S., Kim H. et al. A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model. Water Resources Research, 47(4), 2011.

Оценка трансграничного переноса чёрного углерода в атмосфере на территории России и сопредельных стран

¹ Ильин И.С., ¹ Гинзбург В.А., ¹ Гусев А.В., ² Кострыкин С.В., ^{2,3} Черненко А.Ю.

¹ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20Б

² Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, 119333 Москва, ул. Губкина, дом 8

³ Институт географии Российской академии наук, 119017, Москва, Старомонетный переулок, дом 29, стр. 4

Assessment of black carbon transboundary atmospheric transport in Russia and neighbouring countries

¹ Ilyin I.S., ¹ Ginzburg V.A., ¹ Gusev A.V., ² Kostrykin S.V., ^{2,3} Chernenkov A.Yu.

¹ Institute of Global Climate and Ecology, 20B Glebovskaya str., Moscow

² Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Gubkin str., 8, Moscow, 119333, Russia

³ Institute of Geography RAS, 119017, Staromonetny lane, 29, Moscow, Russia

Моделирование атмосферного переноса чёрного углерода и оценка трансграничных потоков на территории регионов России, в частности, в Арктику, было осуществлено в рамках важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ», направленного на создание единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ в части осуществления технического перевооружения, цифровизации и актуализации Национального кадастра.

Чёрный углерод обладает выраженным региональным воздействием на климатическую систему, поэтому его изучение и мониторинг особенно актуальны для решения проблем изменения климата в Арктике, являющейся одним из наиболее климатически чувствительных регионов.

В работе проанализированы данные по антропогенным выбросам чёрного углерода, представленные в открытых базах данных, а также выбросы от природных пожаров. Для сопоставления результатов расчётов с данными измерений привлекались результаты мониторинга коэффициента абсорбции света аэрозолем, измерения вертикальных профилей распределения черного углерода в атмосфере, измерения содержания черного углерода в снегу, приземные концентрации в атмосфере, полученные по данным ре-анализа, и данные об измерениях черного углерода на территории России.

Оценка концентраций, выпадений и трансграничных потоков черного углерода проведена по модели «Глобальная система мультимедийного моделирования ЕМЕП» (Global EMEP Multi-Media Modeling System – GLEMOS), исходно разработанной для расчётов атмосферного переноса и выпадений тяжёлых металлов и стойких органических соединений (<https://github.com/msc-east>) в рамках Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния. Модель была адаптирована для моделирования переноса чёрного углерода. В ходе работы было проанализировано пространственное распределение уровней загрязнения чёрным углеродом территории России, их сезонная изменчивость, вклады национальных, зарубежных источников выбросов и пожаров в уровни загрязнения в федеральных округах страны за период с 2010 по 2021 год.

О планетарном потоке энергии и производстве энтропии на верхней границе атмосферы и земной поверхности

^{1,2,3} Крупчатников В., ¹ Градов В., ¹ Боровко И., ⁴ Володин Е., ² Гочаков А.

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

² ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт», Новосибирск

³ ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

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

On the Planetary Energy Flow and Entropy Production at the Top of Atmosphere and the Earth's Surface

^{1,2,3} Krupchatnikov V., ¹ Gradov V., ¹ Borovko I., ⁴ Volodin E., ² Gochakov A.

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

² Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk

³ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow

⁴ Marchuk Institute of Computational Mathematics RAS, Moscow

В данной работе представлены некоторые оценки производства энтропии у поверхности и на верхней границе атмосферы на основе данных реанализа и моделирования модели климатической системы, обсуждаются также некоторые особенности вихревых потоков тепла в районе субтропического струйного течения.

Одной из характеристик процессов Земной системы является то, что они находятся вне термодинамического равновесия, поскольку градиенты и потоки поддерживаются внутри системы. Это неравновесие может поддерживаться в устойчивом состоянии, в котором средние свойства системы не меняются со временем, не нарушая законы термодинамики. Фактическая формулировка этих законов несколько отличается и должна учитывать обмены между системой и ее окружением через границы системы. Это не только обмены энергией, массой или другими физическими величинами, они также обмениваются энтропией.

Земная система не является изолированной системой, а находится во взаимодействии с окружающим пространством.

Традиционный подход к изучению климатической системы фокусируется на динамических механизмах и физических процессах, ответственных за преобразование энергии из одной формы в другую, но подход, основанный на анализе баланса энтропии климатической системы и особенно производства энтропии, также важен.

Производство энтропии чувствительно к поверхностному покрову, а баланс энтропии в значительной степени связан с радиацией у поверхности и на верхней границе атмосферы. Количественная оценка термодинамического баланса энтропии и производства энтропии является полезной метрикой для оценки взаимодействия системы атмосфера-поверхность.

Энтропия, связанная с общей свободной энергией системы, рассчитываемая по внешним радиационным потокам энергии, уменьшается при глобальном потеплении, а уменьшение энтропии связано с увеличением свободной энергии, что оказывает влияние на динамику погоды. Это требует дополнительного, более глубокого исследования.

В исследовании использовалась модель климатической системы INM-CM48, разработанная в ИВМ РАН и учитывающая многие факторы изменения климата (<https://citesconf.ru/2025#about>).

- Данное исследование было проведено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 23-17-00273 и государственного контракта с ИВММГ СО РАН (FWNM-2022-00030)

Воспроизведение явления Эль-Ниньо в модели климата ИВМ РАН

Володин Е.М.

Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, 119333, Москва, Губкина 8

E-mail: volodinev@gmail.com

Simulation of El-Nino phenomenon in climate model of INM RAS

Volodin E.M.

Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Russia, Gubkina 8

Анализируется воспроизведение аномалий температуры океана, скорости течений и скорости ветра в атмосфере во время Эль-Ниньо и Ла-Нинья, а также в периоды перехода от одной фазы к другой, по данным различных версий модели климата ИВМ РАН, а также по данным реанализа океана SODA и атмосферы ERA5. Делаются выводы о том, что основным недостатком модели является, по-видимому, слишком маленькая аномалия приповерхностной скорости ветра в районе Эль-Ниньо по сравнению аномалией на 850-925 гПа. Проводится настройка параметризаций облачности и мелкой конвекции в модели чтобы уменьшить этот, а также некоторые другие недостатки. Рассматривается Эль-Ниньо в новой версии модели и делается вывод о более успешном воспроизведении этого явления.

Климатические особенности и условия формирования градовых событий в России

^{1,2} Бугримов А.В., ^{1,3} Чернокульский А.В.

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

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Институт географии РАН, Москва, Россия

E-mail: alexseybug@gmail.com

Град – опасное атмосферное явление конвективного характера, с которым связан значительный социально-экономический ущерб. Изменения климата приводят к увеличению интенсивности опасных конвективных явлений в ряде российских регионов [1]. Однако статистика градовых событий остается недостаточно изученной, в том числе событий с градом разного размера [2].

В рамках настоящего исследования была создана база данных градовых событий в России, основанная на различных источниках и охватывающая период с 1906 по 2024 гг. В нее включены сведения о 12 205 случаях града, в том числе 10 612 событий с информацией о размере града. Для 770 случаев зафиксированы данные о нанесенном ущербе (636 – сельскохозяйственный, 312 – инфраструктурный), при этом точные экономические потери в рублях известны для 68 случаев. Анализ распределения града по размерам выявил экспоненциальный характер распределения, с медианным диаметром (D) 2,1 см и 95-м перцентилем в 5 см. Максимально зарегистрированный диаметр составил 21 см.

Оценено пространственно-временное распределение града: выявлены области с максимальной повторяемостью града, в том числе града с $D > 10$ см – юг и средняя полоса европейской части России, юг Западной Сибири. Проявляется зависимость плотности зарегистрированных случаев града от плотности населения (плотности наблюдателей). Пик сезона отмечается в июне, при этом на суточном интервале максимум приходится на 15–17 часов по местному времени. Среднее время продолжительности выпадения града – 16 минут.

Для оценки условий атмосферы при выпадении града исследованы термодинамические и динамические индексы, рассчитанные для выборки случаев града (теплый период года, 2010–2020 гг.) на основе данных реанализа ERA5 с часовым разрешением по времени и 25 км по пространству. Установлена статистически значимая связь значений индексов с наличием и размером града, а также определены наиболее информативные индексы, которые могут использоваться для диагностики и прогноза града различных размеров.

■ Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №24-17-00357

Литература:

1. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коршунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швец Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология, 2022, №5, С.27–41.
2. Бугримов А.В., Чернокульский А.В., Давлетшин С.Г., Спрыгин А.А., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Градовые события в России: климатология и анализ условий формирования // Всероссийская конференция «Турбулентность, динамика атмосферы и климата». 2024. Сборник тезисов докладов. С.67.

Моделирование Ивановской вспышки смерчей с помощью модели WRF-ARW: анализ особенностей формирования и развития, оценка чувствительности к граничным условиям

^{1,2} Гостев К.С., ^{1,3} Вазаева Н.В., ^{1,4} Чернокульский А.В., ^{2,5} Степаненко В.М.

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

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

³ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

⁴ Институт географии РАН, Москва, Россия

⁵ Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ, Москва, Россия E-mail: k.gostev@ifaran.ru

Modelling of the Ivanovo tornado outbreak using the WRF-ARW model:
analysis of formation and development features, sensitivity to boundary conditions

^{1,2} Gostev K.S., ^{1,3} Vazaeva N.V., ^{1,4} Chernokulsky A.V., ^{2,5} Stepananko V.M.

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

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

⁴ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁵ MSU Research Computing Center, Moscow, Russia

Ивановская вспышка смерчей 9 июня 1984 года является одной из самых разрушительных в истории СССР и России. Известно как минимум о восьми конвективных штормах в этот день, которые привели к формированию по разным данным от 8 до 13 смерчей [1], хотя это число может быть занижено.

В данной работе представлен анализ воспроизведения Ивановской вспышки смерчей с помощью негидростатической мезомасштабной модели WRF-ARW [2], адаптированной для района наблюдений и условий возникновения смерчей, в которой использовалось несколько вложенных сеток, включая области с разрешением 1 и 3 км. Успешность модельных расчетов оценивалась в сравнении с данными спутниковых и наземных наблюдений.

Отмечено, что модель с разрешением 3 км достоверно воспроизвела практически все конвективные шторма данного события, включая суперячейки. При этом, чем ближе к центру окклюзии циклона находились ячейки, тем лучше модель воспроизводила их характеристики. На основе полученных материалов было подтверждено наличие, как минимум, четырех смерчей в дополнение к определенным ранее по спутниковым данным и данным очевидцев. Более высокое разрешение (1 км) позволило уточнить ряд характеристик анализируемых штормов. В частности, для ряда из них отмечено слияние суперячеек и эффект Фудзивары. Были обнаружены характерные сигнатуры в местах появления особо крупных смерчей, в том числе с помощью вертикальных профилей абсолютной завихренности и аномалий потенциального вихря. Был проведен анализ процесса окклюдирования нисходящего потока и смерчегенеза в Ивановской суперячейке. Выдвинуто предположение о существовании антициклонального смерча как сопутствующего к основному смерчу, прошедшему через Иваново.

Литература:

1. Chernokulsky A.V., Shikhov A.N. 1984 Ivanovo tornado outbreak: determination of actual tornado tracks with satellite data // Atmospheric Research, 2018, V. 207, P.111–121. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.02.011>.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, Z. Liu, J. Berner, W. Wang, J. G. Powers, M. G. Duda, D. M. Barker, and X.-Y. Huang, 2019: A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp. <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>

Сравнение результатов моделирования температурного и ветрового режима зимнего периода в центре ЕТР с помощью моделей COSMO и WRF

¹ Докукин С.А., ^{1,2} Тихоненко Н.Д., ¹ Гинзбург А.С.

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017,

² НПЦ «Мэп Мейкер», Нововаганьковский пер., 5 стр. 1, Москва, 123242,

Comparison of the temperature and wind fields simulations in the center of the ER in winter using COSMO and WRF models

¹ Dokukin S.A., ^{1,2} Tikhonenko N.D., ¹ Ginzburg A.S.

¹ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russia, 119017, Moscow, Pyzhevskii per. 3

² Mapmakers Group LTD, Russia, 123242, Moscow, Novovagankovsky per. 5, str. 1

Модели COSMO-CLM [1] со схемой TERRA-URB [2] и WRF-ARW [3] со схемой SLUCM [4] широко используются для описания мезоклиматических процессов и регионального прогноза метеорологических условий. Однако эти модели дают несколько различные результаты при моделировании температурного и ветрового режима, особенно в зимний период [5].

Это связано, в частности, с отличиями в городской параметризации данных моделей. Например, значения антропогенных потоков тепла, установленные по умолчанию в схеме TERRA-URB в крупных городах московской агломерации существенно выше, чем в схеме SLUCM. Но при этом в схеме SLUCM шире представлены антропогенные потоки тепла в небольших городах центра Европейской территории России (ЕТР).

В данной работе сравниваются результаты моделирования температурного и ветрового режима зимнего периода в центре ЕТР с помощью моделей COSMO и WRF с данными реанализа ERA5 и массива метеонаблюдений. Обнаружено, что поля температуры и скорости ветра в зимний период по результатам моделирования получаются более изменчивыми, чем по данным реанализа. Показано, что в модели COSMO-CLM со схемой TERRA-URB городские острова тепла в центре ЕТР проявляются заметнее, а интенсивность ветра выше, чем в модели WRF со схемой SLUCM.

- Работа выполнена в рамках госзадания ИФА им. А.М. Обухова РАН, регистрационный номер 125021001827-3.

Литература:

1. <http://www.clm-community.eu>
2. http://www.cosmo-model.org/content/tasks/workGroups/wg3b/docs/terra_urb_user.pdf
3. Skamarock, W. C. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 4 // NCAR Tech. Note (2019) 145, <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>.
4. Kusaka H., Kimura F. Coupling a Single-Layer Urban Canopy Model with a Simple Atmospheric Model: Impact on Urban Heat Island Simulation for an Idealized Case // JMSJ Ser. II (2004) 82, 67-80, <https://doi.org/10.2151/jmsj.82.67>.
5. Manco I. et al. A Comparative Performance Study of WRF, COSMO and ICON Atmospheric Models for the Italian Peninsula at Very High Resolution // Tethys: revista meteorología y climatología mediterránea. (2023) 20. 1-20, <https://doi.org/10.3369/tethys.2023.20.01>.

Оценка ветроэнергетического потенциала в высоких широтах Северного полушария на основе моделей CMIP6

^{1,2} Леонова Д.С., ² Акперов М.Г.

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

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

E-mail: daleonovaria@gmail.com, aseid@ifaran.ru

Assessment of wind energy potential in the high latitudes of the Northern Hemisphere based on CMIP6 models

^{1,2} Leonova D., ² Akperov M.

¹ Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V. Lomonosov Moscow State University (MSU); e-mail:

² A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS

В последнее время климат Арктики привлекает к себе внимание из-за его высокой чувствительности к глобальному потеплению. Климатические изменения в Арктическом регионе затрагивают нефтегазовый комплекс, горнодобывающую промышленность, вносят изменения в систему электро- и теплоснабжения, оказывают влияние на транспортную инфраструктуру, делая этот регион более доступным для экономической деятельности. Однако, учитывая его удаленность, возникает проблема высоких затрат на энергоснабжение и необходимость субсидий. В условиях децентрализованной системы энергоснабжения выработка электроэнергии осуществляется с помощью дизельных и бензиновых генераторов, что вызывает сложности с утилизацией отходов топлива и создаёт экологические риски. Эти станции также способствуют выбросам парниковых газов. Внедрение возобновляемых источников энергии, таких как ветер, для энергоснабжения удаленных арктических областей может стать экономически целесообразным решением для обеспечения энергией удаленных арктических регионов [1].

В работе получены количественные оценки возможных изменений мощности ветрового потока (МВП) в высоких широтах Северного полушария, с акцентом на территорию РФ, в XXI в. с использованием данных ансамбля климатических моделей CMIP6 при различных сценариях изменения климата (SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-5.8) для периода 2070-2099 гг. относительно исторического сценария (1970-1999 гг.). Для оценки потенциала ветровой энергии рассчитывалась МВП, Вт/м² [1], пропорциональная кубу скорости ветра на высоте традиционной работы ветрогенераторов (около 100 м). Получено, что изменения МВП наиболее выражены при сценарии SSP5-5.8, характеризующемся интенсивным антропогенным воздействием в XXI в., и связаны с сокращением площади морских льдов в Арктике. Также получена количественная оценка изменений диапазона скоростей ветра, необходимых для эффективной работы ветрогенераторов.

С использованием климатической модели CESM2 [2] выполнены серии численных экспериментов, включающих расчеты с наличием и отсутствием ледяного покрова в Арктике, для оценки его вклада в изменения скорости ветра над территорией РФ, включая акватории арктических морей.

Литература:

1. Потенциал ветровой энергетики в арктических и субарктических широтах и его изменение в XXI веке по расчетам с использованием региональной климатической модели / Акперов М.Г., Елисеев А.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Парфенова М.Р., Кениг Т. // Метеорология и Гидрология №5. 2022. С.18–29.
2. The Community Earth System Model Version 2 (CESM2) / Danabasoglu G., Lamarque J.-F., Baerentzen U., Bailey D.A., et al. // Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 12. 2020.

Циркуляционные паттерны Северной Атлантики в изменениях тепловлагообеспеченности аридной зоны юга Сибири в 2000–2023 гг.

^{1,2} Мамасуева С.П., ^{1,2} Чередыко Н.Н.

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический пр., 10/3, г. Томск, 634055, Россия

² НИ Томский государственный университет, Ленина пр., 36, г. Томск, 634050, Россия

E-mail: atnik3@rambler.ru

North Atlantic circulation patterns in heat and moisture supply changes of southern Siberia arid zone in 2000–2023

^{1,2} Mamasueva S.P., ^{1,2} Cheredko N.N.

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

² Tomsk State University, Tomsk, Russia

Процессы взаимодействия атмосферы и океана в Северной Атлантике оказывают существенное влияние на поля метеорологических элементов Северной Евразии. Для оценки их влияния на изменчивость температурного и влажностного режимов вегетационных сезонов засушливых ландшафтов на юге Сибири оценивалась корреляционная связь изменений сумм температур и осадков за июнь–июль с циркуляционными модами: NAO (Северо-Атлантическое колебание), АМО (Атлантическое мультидекадное колебание) [1]. Тепло- и влагообеспеченность оценивалась привлечением данных суточной температуры и сумм осадков ВНИИ ГМИ-МЦД [2] за 2000–2023 г. для метеостанций, расположенных в непосредственной близости к наиболее типичным участкам степей и лесостепей юга Сибири. Задача актуальна вследствие усиления аридизации засушливых территорий Евразии [3–4].

Характеристики теплообеспеченности вегетационных сезонов, суммы температур $\geq 5^\circ\text{C}$ и $\geq 10^\circ\text{C}$, значительно увеличивались в среднем на $12\text{--}76^\circ\text{C}/10$ и $50\text{--}55^\circ\text{C}/10$ лет. Тенденции в динамике режима увлажненности просматриваются, но они разнонаправлены для разных районов территории и незначимы. Вследствие этого, на фоне повсеместного роста теплообеспеченности, с привлечением вегетационных индексов NDVI, за рассмотренный интервал лет выявлено сокращение биомассы для лесостепной и степной зон Ишимской равнины и положительный тренд NDVI для аридных ландшафтов Хакасии и Тывы.

Ресурсы влаги как лимитирующие продуктивность аридных зон определяются циркуляционными процессами. При положительном NAO западно-восточный перенос усиливается, принося на территорию Сибири больше влаги с Атлантики. Слабая значимая связь изменений сумм температур и NAO выявлена только для станций Северного Казахстана (Казахский мелкосопочник), сумм осадков – для степей Тургайского плато и горнодолинных сухостепных ландшафтов республики Алтай. АМО, отражающей аномалии поверхностной температуры океана в Северной Атлантике, имеет характерный временной масштаб в среднем порядка 60–70 лет и определяет в какой-то степени долю низкочастотной изменчивости тепловлажностного режима Северной Евразии. И, действительно, даже для внутриконтинентальных районов Западносибирско-Казахстанского степного региона выявлена значимая положительная связь с изменениями сумм температур и отрицательная для сумм осадков. Но для восточной части Евразийской степи корреляция отсутствует.

Литература:

1. Центр прогнозирования погоды и климата NOAA. [Электронный ресурс] URL: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml> (дата обращения 19 января 2025).
2. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. [Электронный ресурс] URL: <http://meteo.ru>. (дата обращения 19 января 2025).
- IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М.: Гидрометцентр России, 2020. 109 с. [Электронный ресурс] URL: <http://www.meteorf.ru/press/news/20626>.

Эффекты городского острова тепла на основе данных измерений высокого разрешения в Томске и прилегающих районах

^{1,2} Мамасуева С.П., ^{1,2} Чередыко Н.Н., ¹ Тельминов А.Е.

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический пр., 10/3, г. Томск, 634055, Россия

² НИ Томский государственный университет, Ленина пр., 36, г. Томск, 634050, Россия

E-mail: atnik3@rambler.ru

Urban heat island effects based on high temporal resolution measurement data in Tomsk and surrounding areas

^{1,2} Mamasueva S.P., ^{1,2} Cheredko N.N., ¹ Tel'minov A.E.

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

² Tomsk State University, Tomsk, Russia

Одной из важнейших проблем современности является улучшение моделей климата с целью обеспечения адаптации к меняющимся условиям среды. Один из путей решения – повышение качества и детальности мезомасштабного моделирования энергообмена атмосферы и подстилающей поверхности, сложно пространственно неоднородного в различных ландшафтах. В том числе актуально развитие исследований процессов влияния на поля метеорологических величин урбанизированности территорий, ускоренно развивающейся, способствующей формированию повышенных градиентов турбулентного обмена. Также, влияние городов обуславливает явление «городской остров тепла» (UHI – urban heat island), учет которого повышает качество прогноза температуры и, через это, других метеорологических величин, в т.ч. экстремальных.

Наибольшие неопределенности при решении этой задачи характерны для регионов Северной Евразии, которые, как правило, недостаточно охвачены сетью наземных наблюдений. Проблема решается созданием исследовательских измерительных систем на базе автоматических автономных измерительных комплексов. Научной группой ИМКЭС СО РАН в г. Томске и окрестностях развернута пилотная система высокочастотных пульсационных измерений для исследования характеристик турбулентного энергообмена и метеорологического режима над городским и фоновым ландшафтами (TomskFluxNet). Установка измерительных станций в условиях средней городской застройки и за городом необходима для обеспечения сравнительных исследований процессов турбулентного, теплового обмена в условиях урбанизированной территории по сравнению с фоновыми.

В докладе приводятся результаты сравнительных оценок изменчивости метеорологических величин по данным метеостанции Томск, автоматических автономных измерительных комплексов в городских и фоновых условиях. Рассмотрены различные синоптические ситуации, а также отдельно дневные и ночные части суток внутри них.

На сравнительно небольших расстояниях могут наблюдаться значительные колебания метеовеличин. Показано, что наиболее существенный эффект УИ фиксируется в условиях зимних экстремальных температурных событий. В городских условиях повышены и средние суточные температуры, и экстремальные. Кроме того, тогда же отмечается наибольшее влияние антропогенных потоков тепла на колебания температуры.

■ Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 24-27-00300).

Облачно-радиационный эффект в Арктике: сравнительный анализ глобальных моделей CMIP6 и спутниковых данных CERES

¹ Нарижная А.И., ^{1,2} Чернокульский А.В.

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

² Институт географии РАН, Москва

E-mail: alex.narihnaya@ifaran.ru, a.chernokulsky@ifaran.ru

Cloud radiation effect in the Arctic: a comparative analysis of global CMIP6 models and CERES satellite data

¹ Narizhnaya A.I., ^{1,2} Chernokulsky A.V.

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

² Institute of Geography RAS, Moscow

Арктика испытывает наиболее быстрые изменения климата на Земле в последние десятилетия. Важную роль в полярном усилении играет облачный покров. В данной работе проведен анализ облачно-радиационных характеристик атмосферы Арктики по данным модельных экспериментов с глобальными моделями CMIP6 в сравнении со спутниковыми наблюдениями CERES. Оценивался облачно-радиационный эффект, который определялся как разница между радиационными потоками при условии наличия облаков и в безоблачной атмосфере. Использовались данные с месячным разрешением для всего арктического региона (севернее 65°с.ш.). Сравнительный анализ проводился для периода с 2001 по 2014 гг. для двух сезонов: холодного (месяцы с января по март) и теплого (месяцы с июля по сентябрь). Для каждого месяца из выбранных сезонов радиационные параметры рассчитывались для атмосферы над морскими акваториями отдельно для регионов с разной сплоченностью морского льда (ICE): ICE <5% (открытая вода); ICE от 5% до 95% (переходная сплоченность льда); ICE >95% (сплошной лед).

Показано, что в целом, модели переоценивают балл общей облачности над арктическими регионами в сравнении с данными наблюдений. Также, модели показывают более сильную межгодовую изменчивость (как зимой, так и летом, как для коротковолновой, так и для длинноволновой радиации, и как надо льдом, так и над водой), чем наблюдения. Наилучшее согласие между спутниковыми и модельными данными получено для длинноволнового облачно-радиационного эффекта над открытой водой при низкой сплоченности морского льда в летний период (разброс между данными составил 16 Вт м⁻² при среднем значении длинноволнового облачно-радиационного эффекта ~ 52 Вт м⁻²).

Были отобраны «лучшие» модели по критериям их согласованности со спутниковыми данными наблюдений CERES при оценке пространственного распределения выбранных характеристик, а также при оценке межгодовой изменчивости средних характеристик облачности и облачно-радиационных эффектов в Арктике.

■ Исследование выполнено при поддержке РНФ (грант № 23-47-00104).

Глобальные и региональные особенности воспроизведения площади снежного покрова в осенний период в конце XX – начале XXI вв. по спутниковым данным и реанализу

¹ Парфенова М.Р., ¹ Тимажев А.В., ¹ Аржанов М.М., ^{1,2} Мурышев К.Е.

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (119017, Москва, Пыжевский пер., д.3, стр.1)

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2
E-mail: parfenova@ifaran.ru, timazhev@ifaran.ru, arzhanov@ifaran.ru, kmuryshev@ifaran.ru

Global and regional characteristics of snow cover extent representation during the autumn season in the late 20th – early 21st centuries based on satellite data and reanalysis

¹ Parfenova M.R., ¹ Timazhev A.V., ¹ Arzhanov M.M., ^{1,2} Muryshev K.E.

¹ A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Pyzhyovskiy pereulok, 3, Moscow, Russia

² M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Russia, 119991, Moscow, GSP-1, 1-2 Leninskiye Gory

Снежный покров оказывает существенное влияние на свойства подстилающей поверхности, а также с учетом обратных связей на формирование региональных и глобальных климатических режимов на временных масштабах от нескольких месяцев до миллионов лет. Уменьшение альбедо поверхности в связи с уменьшением площади снежного покрова приводит к увеличению поглощения солнечной радиации в климатической системе с усилением положительной обратной связи. В ряде работ по исследованию современных тенденций изменений снежного покрова отмечается увеличение площади снежного покрова (СП) в Северном полушарии в осенний период в конце XX – начале XXI вв. по данным спутниковых наблюдений, в частности, CDR. Так, в [Мохов, Парфенова, 2022] выявлена положительная корреляция площади снежного покрова и приповерхностной температуры для осенне-зимних месяцев, в том числе статистически значимая для октября, значение коэффициента температурной чувствительности для октября положительно и составляет 3.5 ± 0.8 млн км²/К за 1980–2019 гг..

В представленной работе проанализированы особенности воспроизведения площади снежного покрова в Северном полушарии для осенних месяцев (октября и ноября) с использованием спутниковых данных наблюдений CDR и данных реанализа ERA5-Land для трех десятилетий периода 1991–2020 гг.. Полученные оценки площади снежного покрова в Северном полушарии (без учета Гренландии) для трех десятилетий 1991–2000 гг., 2001–2010 гг. и 2011–2020 гг. для октября составляют 13.9 ± 1.5 , 15.0 ± 2.2 и 17.3 ± 1.8 млн км² по данным CDR и 20.4 ± 1.3 , 18.7 ± 1.8 и 18.4 ± 1.0 млн км² по данным реанализа ERA5-Land, соответственно. Для ноября полученные оценки составляют 31.2 ± 1.3 , 30.2 ± 1.4 и 33.2 ± 1.0 млн км² по данным CDR и 34.8 ± 1.5 , 32.3 ± 2.0 и 32.8 ± 0.8 млн км² по данным реанализа ERA5-Land. Сопоставление полученных оценок показывает большую межгодовую изменчивость площади СП в конце XX – начале XXI вв. для октября по данным CDR по сравнению с реанализом. Тренд площади снежного покрова за 1991–2000 гг. статистически значим и составляет 1.63 ± 0.31 и 0.86 ± 0.16 млн км²/10 лет по данным CDR, 1.01 ± 0.19 и 1.05 ± 0.20 млн км²/10 лет по данным ERA5-Land, для октября и ноября соответственно. Для каждого десятилетия в пределах 1991–2000 гг. тренды статистически незначимы, наибольший положительный тренд (3.12 ± 1.10 млн км²/10 лет) получен для октября за 1991–2000 гг. по данным CDR. Также были проанализированы пространственные распределения СП (по пороговому значению доли ячейки, занятой снегом, равной 50%) в Северном полушарии по двум наборам данных для трех декад периода 1991–2020 гг. Различия между пространственными границами СП выявлены для октября 1991–2000 гг. на юге Сибири, в Тибете и на Аляске, где по данным CDR недооцениваются области, занятые снегом. В период 2001–2010 гг. для октября по данным CDR доля снега в этих областях увеличивается, а в 2011–2020 гг. пространственное распределение СП в Западной Сибири превышает аналогичные значения по данным ERA5-Land. Выявленные изменения СП могут быть связаны с особенностями данных CDR до начала 2000х гг., а также с изменениями переноса водяного пара в атмосфере в связи с уменьшением площади льда в Северном Ледовитом океане [Мохов, Парфенова, 2022].

Литература:

1. Мохов И.И., Парфенова М.Р. Взаимосвязь площади снежного покрова в Северном полушарии по спутниковым данным с приповерхностной температурой // Метеорология и гидрология. 2022. № 2. С. 32–44.

Микроструктура приземных температурных полей в полярных городах России

^{1,2} Семёнова А.А., ^{1,3} Константинов П.И., ⁴ Леонов И.И.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

² Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью» ФМБА России, 119121, Россия, г. Москва, Погодинская ул., д. 10с1

³ Российский Гидрометеорологический университет, 192007, Россия, г. Санкт-Петербург, Воронежская улица, д.79

⁴ АО «Россети Научно-технический центр», 123007, Москва, Каширское ш., д.22, к. 3

E-mail: mos7kit@mail.ru, kostadini@mail.ru, leonov_ii@ntc-power.ru

Приземные температурные инверсии являются характеристикой климата высоких широт из-за благоприятных условий для их формирования (отрицательный радиационный баланс, низкие температуры подстилающей поверхности, частая повторяемость антициклонических ситуаций) [1]. Городские острова тепла благоприятствуют развитию сильных приземных инверсий, особенно в зимний период. Однако, инверсии сами могут в дальнейшем усиливать остров тепла на несколько градусов, удерживая тепло в городе и над ним [2].

Для экологического состояния городов большую опасность представляет приземная температурная инверсия в сочетании со слабыми ветрами, то есть ситуации застоя воздуха [1].

Целью данного исследования было изучение пространственно-временных характеристик тонкой структуры приземных инверсий и их связи с городским островом тепла в полярных городах. В качестве территорий для изучения были выбраны города Апатиты (Мурманская область), Якутск (Республика Якутия), Норильск (Красноярский край). Измерения проводились в январе– марте 2025 года.

В центре каждого города устанавливалась мачта с двумя датчиками температуры TZONE на высоте 1,5 и 3 м. Показания фиксировались каждые пол часа. В Якутске также устанавливалась мачта на фоновой неурбанизированной территории. В Апатитах было установлено 6 мачт в центре города и вокруг него.

Изучение структуры приземной инверсии показало, что инверсия в Апатитах и Норильске наблюдалась в 75% случаев. В Якутске – в 40-50 % случаев, при этом на фоновой территории ее интенсивность в среднем была гораздо выше, чем в центре города. Средняя разница между верхним и нижним датчиком составила 0,2°C в Апатитах, 0,3°C в Норильске и на окраине Якутска.

Также было проведено исследование успешности воспроизведения приземных инверсий региональными прогностическими моделями: моделирование процессов в приземном пограничном слое с использованием мезомасштабной модели WRF-ARW.

В результате исследования впервые была рассмотрена тонкая структура приземной инверсии – как в ночное, так и в дневное время суток на протяжении двух месяцев в холодный период года.

■ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-77-30008.

Литература:

1. Безуглая Э.Ю, Берлянд М.Е //Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере – Ленинград, Гидрометеоиздат, 1983 – 328 с.
2. Magee, N., Curtis, J. & Wendler, G. The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska. Theor Appl Climatol 64, 39–47 (1999). <https://doi.org/10.1007/s007040050109>

Анализ изменений высоты внетропической тропопаузы Южного полушария по данным аэрологического зондирования в 2015–2024 гг.

Соколова У.О., Иванова А.Р.

ФГБУ «Гидрометцентр России» Б. Предтеченский пер., д. 13, стр. 1, Москва, Россия

Analysis of changes in the extratropical tropopause height in the Southern Hemisphere based on upper-air sounding data for 2015–2024

Sokolova U.O., Ivanova A.R.

FSBI «Hydrometeocenter of Russia, 13, bld. 1, Bolshoi Predtechensky Pereulok, 123376, Moscow, Russia

Необходимость исследования атмосферных процессов и их изменчивости в Южном полушарии вызвана потребностью в импортозамещении продукции Всемирной системы зональных прогнозов, заблокировавшей поступление информации для метеобеспечения российской авиации с 2022 г. Кроме параметров атмосферы, эта информация включает сведения об особых характеристиках, к которым относится высота и температура тропопаузы. Значительное преобладание океана и наличие антарктического ледового щита в Южном полушарии обуславливают особенности формирования и динамики границы раздела между тропосферой и стратосферой, особенно во внетропических широтах.

По данным 41 станции аэрологического зондирования атмосферы, расположенных южнее 30 градуса ю.ш., были найдены значения высоты тропопаузы (согласно определению Всемирной метеорологической организации) за сроки 00 и 12 ВСВ в период 2015–2024 гг. (всего более 170 тыс. радиозондов). Определены среднегодовые и среднемесячные значения высоты тропопаузы, проанализированы ее сезонные изменения и возможный тренд в течение последнего десятилетия.

На большей части станций Австралии, юга Африки и Новой Зеландии (14 из 19) был выявлен отрицательный тренд, указывающий на понижение среднегодовой высоты тропопаузы на несколько десятков метров в год. В свою очередь, на 80% станций Южной Америки и Антарктиды отмечается повышение тропопаузы, особенно сильно выраженное на южноамериканской станции 87418 SAME (32.83 ю.ш., 68.78 з.д.) – 965 м за исследуемый период. Увеличение средней высоты тропопаузы над 8 из 11 антарктических станций с 2015 г. зафиксировано в диапазоне 64–378 м.

Оценка качества воспроизведения снежного покрова на ледниках на примере высокогорных районов Камчатки и Кавказа

^{1,2} Сушинцев И.М., ^{1,2} Дроздов Е.Д., ^{1,2} Торопов П.А., ¹ Михаленко В.Н., ¹ Воробьев М.А.,
¹ Хайрединова А.Г.

¹ Институт географии РАН, 119017, Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Россия

E-mail: sushintsev@yahoo.com

Evaluation of reproduction quality of snow cover on glaciers on the example of the high-mountain areas of Kamchatka and Caucasus

^{1,2} Sushintsev I.M., ^{1,2} Drozdov E.D., ^{1,2} Toropov P.A., ¹ Mikhalenko V.N., ¹ Vorobiev M.A.,
¹ Hayredinova A.G.

¹ Institute of Geography RAS, 119017, Moscow, Russia

² Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russia

В работе оценивается возможность применения вычислительного комплекса, включающего модель снежного покрова SNOWPACK и алгоритм расчета орографических осадков для воспроизведения снежного покрова в горах на примере двух различных горно-ледниковых районов, обеспеченных натурными данными: Центрального Кавказа (Эльбрус), и Камчатки (вулкан Ушковский). Численные эксперименты проводились за период 09.2023–02.2024 для Эльбруса и за период 1986–1997 гг. для Ушковского, в качестве форсинга использовались данные реанализа ERA5. Показано, что на сезонном масштабе результаты моделирования хорошо согласуются с натурными данными на Эльбрусе: ошибка величины снегонакопления составила 3 см, средняя по всем уровням ошибка температуры снежной толщи – 1.4 °С. при коэффициенте детерминации $R^2=0.96$. Для Ушковского было проведено 3 численных эксперимента с различными вариантами входных данных по осадкам (ERA 5, метеостанция Ключи, результаты орографической модели осадков промежуточной сложности). Результаты моделирования сравнивались с данными ледникового керна 1996 г. При использовании орографической модели осадков ошибка воспроизведения аккумуляции за 10 лет снизилась до 25% по сравнению с 40% по реанализу. При этом модель неплохо описала стратиграфию снежного покрова: было воспроизведено 4 из 5 ледяных прослоев. Показано, что представленный модельный инструмент может применяться для оценки снегонакопления на длительных временных масштабах и анализа изменения условий льдообразования на горных ледниках. Также обсуждаются возможные пути развития модельного комплекса, которые позволят более точно оценивать структуру снежной толщи и воспроизведение ледяных прослоев.

По данным бурения 2022 года выявлено, что профиль плотности вершины Ушковского сильно отличается от того, что представлено в работе 1996 года. Ранее в снежно-фирновой толще наблюдалось лишь 4% ледяных прослоев, в настоящее время их количество выросло до 53%. Таким образом, наблюдаемые изменения климата существенно влияют на структуру снежной толщи ледников Камчатки. Это проявляется в увеличении повторяемости положительных летних температур и жидких осадков, что приводит к таянию и инфильтрации жидкой влаги внутрь снежной толщи.

■ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №23–17–00247.

Чувствительность среднего многолетнего состояния атмосферы к изменению площади горного оледенения

^{1,2} Сушинцев И.М., ^{1,2} Торопов П.А., ^{3,2} Черненко А.Ю., ^{3,2} Володин Е.М., ² Корнева И.А.

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, ГСП-1

² Институт географии РАН, 119017, Москва, Россия

³ Институт вычислительной математики имени Г. И. Марчука РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, д.8

E-mail: sushintsev@yahoo.com

Sensitivity of long-term average atmosphere state to changes in mountain glacier area

^{1,2} Sushintsev I.M., ^{1,2} Toropov P.A., ^{3,2} Chernenkov A.Yu., ^{3,2} Volodin E.M., ² Korneva I.A.

¹ Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russia

² Institute of Geography RAS, 119017, Moscow, Russia

³ Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Gubkina str., 8, 119333, Moscow

Одна из проблем современных Моделей Земной Системы – отсутствие, либо крайне фрагментарное описание горного оледенения в качестве дополнительного типа поверхности. Из-за грубого шага сетки значительные площади льда и снега в горных районах остаются неучтенными. Цель этой работы – воспроизведение чувствительности регионального климата к аномалиям площади снега и льда в горных районах Земли. Используя данные архивов «Randolph Glacier Inventory» и «Каталога ледников России» была составлена карта процентного содержания горных ледников в каждой ячейке модели Земной Системы ИВМ РАН. Той части ячейки, которые характеризовались как снег или лед предписывались соответствующие значения альбедо поверхности, а также теплоемкости. Был реализован ансамбль численных экспериментов на разных временных промежутках для воспроизведения чувствительности регионального климата к заданным аномалиям площади распространения снега и льда в основных горных районах Земли. Расчёты проводились для всего Земного шара, но статистически значимый отклик получен, как и предполагалось, в крупнейших горно-ледниковых районах мира (прежде всего Гималаи и Аляска). На региональном масштабе были проанализированы отклики в компонентах теплового баланса, которые проявились в значительном увеличении уходящей коротковолновой радиации и заметных изменениях турбулентного теплообмена. Также выявлен заметный отклик в крупномасштабной циркуляции в области индийского муссона: ослабление тибетского антициклона, и, как следствие, заметные изменения в поле осадков по всей юго-восточной Азии, достигающие 10-20% от годовой суммы, то есть близкие к значениям межгодовой изменчивости.

- Исследование выполнено при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

ПРОЦЕССЫ В ДЕЯТЕЛЬНОМ СЛОЕ СУШИ: МОДЕЛИ, НАБЛЮДЕНИЯ И УСВОЕНИЕ ДАННЫХ

Ветровалы, вызванные шквалами и смерчами в лесной зоне России и условия их возникновения по данным реанализа ERA5

^{1,2} Шихов А.Н., ^{2,3} Чернокульский А.В., ^{2,4} Ярынич Ю.И.¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614068, г. Пермь, Россия² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 119717, г. Москва, пер. Пыжевский, д. 3³ Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный переулок, дом 29, стр. 4⁴ НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова, 119234, г. Москва, Ленинские Горы ул., д.1, стр. 4

E-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru, julia.yarinich@yandex.ru

Squall- and tornado-induced windthrow events in the forest zone of Russia and the environments of their formation based on the ERA5 reanalysis data

^{1,2} Shikhov A.N., ^{2,3} Chernokulsky A.V., ^{2,4} Yarynich Yu.I.¹ Perm State National Research University, 614068, Perm, Russia² A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 119717, Moscow, 3 Pyzhevsky per.³ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 119017, Moscow, 29 Staromonetny per.⁴ Lomonosov Moscow State University Research Center, 119234, Moscow, Leninskie Gory St., 1, p. 4

На основе спутниковых снимков Landsat, Sentinel-2, продукта Global Forest Change (Hansen et al., 2013) и различной дополнительной информации (прежде всего данных наблюдений сети метеостанций и сообщений об ущербе, опубликованных в СМИ и социальных сетях) создана и актуализируется картографическая база данных «Ветровалы в лесной зоне России (Шихов и др., 2020). В настоящее время завершена работа по сбору данных о ветровалах на территории Сибири и Дальнего Востока России. Для Европейской территории России (ЕТР) данные доступны за период с 1986 по 2024 гг., а для территории Сибири и Дальнего Востока – с 2001 по 2024 гг. Они опубликованы на открытом картографическом веб-сервисе <https://tornado.gispsu.ru/>.

База данных включает 2777 случаев ветровалов на общей площади свыше 747,8 тыс. га. В целом по территории России 55% ветровалов вызваны смерчами, что обусловлено использованием более низкого порога минимальной площади (5 га) для включения смерчевых ветровалов в базу данных, в сравнении с ветровалами от других явлений (25 га). Но по площади доля смерчевых ветровалов составляет всего 11,8%, максимальна она в Западной Сибири (26,1%). Свыше 66% площади ветровалов приходится на шквалы (на ЕТР это показатель достигает 78%). Остальные 22% приходится на градиентные ветра, к числу которых отнесены в том числе глубокие внетропические циклоны и тайфуны в регионах Дальнего Востока. Межгодовая изменчивость числа случаев и особенно площади ветровалов весьма значительна. Это объясняется большим вкладом наиболее крупных ветровалов в общую площадь поврежденных леса (на 1% крупнейших ветровалов приходится 49% от общей площади всех ветровалов). Для 1558 случаев ветровалов установлена дата возникновения, что обеспечивает возможность анализа условий их возникновения.

В рамках настоящей работы на основе данных реанализа ERA5 (Hersbach et al., 2020) вычислены значения 19 конвективных параметров, характеризующих основные ингредиенты, необходимые для развития сильных конвективных штормов (неустойчивость и влагосодержание воздушной массы, сдвиг ветра, завихренность) за час до развития случаев шквалов и смерчей. Выборка включает свыше 1000 случаев (были исключены случаи, которые отмечались в один день и на расстоянии менее 25 км друг от друга). Вычислены значения конвективных параметров как в стартовой точке ветровала, так и максимумы в радиусе 100 км от нее, что примерно соответствует трем ячейкам реанализа ERA5. На основе созданной выборки выявлены различия по значениям конвективных параметров в случаях со шквалами и смерчами на ЕТР, в Сибири и на Дальнем Востоке, а также для случаев, которые отмечались на равнине и в горной местности.

Литература:

1. Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Калинин Н.А., Пьянков С.В. Ветровалы в лесной зоне России и условия их возникновения. Пермь, Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. 284 с.
2. Hansen M.C. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. V. 342. P. 850–853.
3. Hersbach, H. et al., The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 2020, 146, 1999 – 2049.

Может ли нежилой город создавать свой «остров тепла»? Эти и другие результаты экспериментальных исследований городского приземного слоя в холодный период

^{1,2,3} Константинов П.И., ^{1,2} Коспанов А.А., ⁴ Тимажев А.В., ⁵ Долгих А.В., ¹ Мухартова Ю.В.,
¹ Семенова А.А., ^{1,2} Маратканова В.С.

¹ Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Ленинские горы, д.1, Москва, Россия

² Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, 192007, Россия, Санкт-Петербург, Воронежская улица, дом 79

³ Shenzhen MSU-BIT University, 1 Int. Univ/Park Road, Longgang Shenzhen, Guangdong Province, P.R. China

⁴ ИФА РАН имени А.М.Обухова, 119017, Москва, Пыжёвский переулок, 3

⁵ Институт Географии РАН 119017 Старомонетный пер., 29, Москва, Россия

Изучению низкотемпературных особенностей городской атмосферы в настоящее время уделяется большое внимание, несмотря на то, что города, расположенные в высоких широтах, невелики по размерам, занимают незначительную часть общей территории и не оказывают заметного влияния на региональные атмосферные процессы. Оценка и прогнозирование микроклимата и экологии в таких городах и их окрестностях является задачей определения статистических характеристик стратифицированных турбулентных течений с пространственной детализацией вплоть до масштабов, сравнимых с масштабами отдельных зданий, и такие исследования проводились в отечественной практике.

Однако, пока в литературе остается без ответа фундаментальный вопрос: «Может ли неотапливаемый и нежилой район создавать свой «остров тепла?», и если да, насколько он менее интенсивный, нежели у обитаемых районов?

В рамках настоящего исследования обсуждается методика сбора данных о микроклимате таких населенных пунктов Арктической зоны в холодный сезон 2023-2024 гг, модельные эксперименты с помощью WRF-ARW и первые экспериментальные результаты для жилых районов г.Воркута, респ. Коми как наиболее масштабного населенного пункта, обладающего необходимыми особенностями для изучения микроклиматической изменчивости. Полученные результаты свидетельствуют о наличии слабой тепловой аномалии в зоне наиболее плотной застройки, интенсивностью до 0,5-1 градуса, которая может быть связана как с радиационными, так и с динамическими факторами.

Более детальное изучение причин этого явления в различных синоптических ситуациях будет проведено позже, но уже сейчас ясно, что гипотеза о неоднородной тепловой структуре неотапливаемого заброшенного высотного микрорайона в Арктике, по крайней мере, обоснована в рамках проведенных измерений.

Также описываются результаты микроклиматического эксперимента по изучению термической структуры города Якутск с помощью самостоятельной развернутой сети термических датчиков TZONE в летний и зимний периоды. С ее помощью весь город был охвачен измерительной инфраструктурой, состоящей из 18ти единиц датчиков на двухмесячный срок во второй половине лета 2024 года. В результате полученные данные однозначно указывают на образование в Якутске летней температурной аномалии, которая может быть классифицирована как «летний остров тепла» интенсивность которой в ночные часы (диагностический признак острова тепла) достигает 2.5-3.6 градусов Цельсия. Среднее же значение острова тепла для всего летнего периода может быть оценено в пределах 1.3-1.6 градуса. Также отмечается значительная неоднородность в суточном ходе температуры внутри города и в фоновой зоне.

Особый интерес вызывает исследование острова тепла в зимний период (при температурах воздуха от -35 до -45 градусов Цельсия. Сеть низкотемпературных датчиков из 9 единиц показала существование мгновенных различий до 8-10 градусов с сельской местностью, со средними показателями интенсивности острова тепла до нескольких градусов Цельсия.

Моделирование деградации многолетнемерзлых пород арктического шельфа при сценарии изменения климата по данным CMIP6

Малахова В.В.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева
E-mail: malax@sscc.ru, malaxv@list.ru

Modeling of permafrost degradation on the Arctic Shelf under climate change scenarios based on CMIP6 data

Malakhova V.V.

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS,
Prospect Akademika Lavrentieva, 6, Novosibirsk, Russia, 630090

Изменения уровня океана в течение ледниково-межледниковых циклов приводили к длительному промерзанию арктического шельфа в субаэральных условиях и к формированию в донных отложениях многолетнемерзлых пород. Деградирующие многолетнемерзлые породы могут содержать значительное количество органики. Для оценки последствий деградации мерзлоты необходимо знать мощность и темпы оттаивания твердомерзлых пород в разных районах арктического шельфа. Целью представленной работы является оценка скорости деградации подводной мерзлоты арктического шельфа с помощью численного моделирования в условиях потепления придонных вод до конца 23 века.

Для оценки площади распространения и мощности многолетнемерзлых пород проведено моделирование термического состояния донных отложений в геологическом разрезе 1500 м на основе разработанной модели теплопереноса в грунте. Динамика многолетнемерзлых пород определяется верхними и нижними граничными условиями в области моделирования.

Моделирование проведено для трех периодов по времени:

- 1 – период времени составил полный ледниковый цикл (120 тысяч лет) до 1850 г.
- 2 – период 1850–2014 г.
- 3 – период 2014–2300 г.

На первом этапе с использованием модели теплопереноса при изменениях верхних граничных условий, которые имитируют регрессию и трансгрессию моря, оценивались изменения слоя субаквальной мерзлоты в течение последних 120 тыс. лет. При условиях регрессии моря использовалось пространственное распределение изменений температуры поверхности, полученные с помощью модели земной системы CLIMBER-2. В качестве температуры приземной атмосферы были использованы данные реанализа, осредненные для периода 1950–1970 гг. При трансгрессии моря в качестве верхнего граничного условия учитывались среднемесячные температура и соленость придонного слоя воды из климатических данных.

Для оценки состояния субаквальной мерзлоты в донных отложениях шельфа для периода 1850–2014 гг. использовались результаты расчетов климатических моделей проекта CMIP6. А именно учитывалась придонная температура воды, полученная в сценарии «historical» по моделям ACCESS-ESM1-5 и CanESM5. Для оценки состояния субаквальной мерзлоты в донных отложениях шельфа для будущего периода 2015–2300 использовались результаты расчетов придонной температуры воды по сценарию антропогенных воздействий SSP5-8.5 с климатическими моделями CanESM5 и ACCESS-ESM1-5 до 2300 года.

Получены оценки площади распространения и современного состояния многолетнемерзлых пород арктического шельфа с учетом данных интенсивности теплового потока, солености поровых вод и температуры придонной воды. В настоящем исследовании был выбран наиболее экстремальный сценарий с высокими антропогенными выбросами парниковых газов SSP5-8.5. Показано, что для прогноза темпов деградации подводной мерзлоты, одним из основных факторов является температура придонной воды. В историческом периоде между сценариями обнаруживаются лишь небольшие различия, но в 22–23 веках таяние мерзлоты происходит в 5–10 раз быстрее и различия между сценариями усиливаются. Средние скорости деградации подводной мерзлоты составили 1–2 см/год для периода 1950–2015, 5 см/год для 2015–2100 и 10 см/год для периода 2100–2300.

■ Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNM-2025-0003.

Оценки потоков парниковых газов из проектируемых водохранилищ с помощью модели LAKE 3.2

^{1,2,3} Ломов В.А., ^{2,4} Степаненко В.М., ^{2,3} Романенко В.А.

¹ Кафедра гидрологии суши, Географический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, кафедра гидрологии суши, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 1

² Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 4

³ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

⁴ Московский центр фундаментальной и прикладной математики, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 1

Estimations of greenhouse gas fluxes from planned reservoirs using LAKE 3.2 model

^{1,2,3} Lomov V., ^{2,4} Stepanenko V., ^{2,3} Romanenko V.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Hydrology Department, Moscow, Leninskie Gory, 1, building 1, 119991

² Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Leninskie Gory, 1, building 4, Moscow, 119991

³ A M Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Pyzhevsky pereulok, 3, 119017

⁴ Moscow Centre of Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Leninskie Gory, 1, building 1, 119991

Искусственные водоемы являются значимыми источниками парниковых газов, что подтверждается многочисленными натурными данными измерений и результатами численных экспериментов. В наиболее актуальном докладе ИРСС пресноводные водоемы суши, к которым относятся и водохранилища, вносят наибольший вклад в выбросы метана в атмосферу среди других возможных его источников. Кроме того, водохранилищам, как источникам парниковых газов, должно быть уделено особое внимание, поскольку выработка электроэнергии на гидроэлектростанциях должна быть инвентаризована по сопутствующему углеродному следу, в который и входят эмиссия диоксида углерода и метана с поверхности искусственных водоемов.

Некоторые исследования отмечают, что наибольший выброс парниковых газов происходит в первые годы после создания водохранилищ. Это обусловлено тем, что после наполнения в них происходит активное разложение затопленной массы растительности, которое и приводит к образованию углекислого газа (при разложении в аэробных условиях) и метана (при разложении в анаэробных условиях). Задача оценки эмиссии парниковых газов в первые годы после заполнения водохранилищ может быть решена с помощью методов математического моделирования. В таком случае для нового водохранилища необходимо задать водоем-аналог, по которому будут определены параметры биохимических уравнений, и рассчитать эмиссию из водоема с учетом разложения затопленной фитомассы.

Именно такая задача была поставлена в рамках представленного исследования. В качестве объектов исследования были выбраны проектируемые в дальневосточном регионе РФ Нижне-Зейское и Селемджинское водохранилища. В качестве основного инструмента для математического моделирования была выбрана одномерная термогидродинамическая модель с включением блока биохимических расчетов LAKE 3.2, разработанная в НИВЦ МГУ В.М. Степаненко. Для решения поставленной задачи в модель был добавлен пул затопленной растительной фитомассы, а также параметры его разложения в аэробных и анаэробных условиях. В качестве водохранилища-аналога было выбрано Зейское водохранилище. Несмотря на отличия в морфометрии водоемов, а также в их водном режиме, Зейское водохранилище находится очень близко к исследуемым водохранилищам, и, кроме того, оно уже было исследовано с помощью модели LAKE 3.2, поэтому для него хорошо известны биохимические параметры в модели.

Результаты расчетов показали, что в первые годы после наполнения водохранилищ наблюдаются очень высокие значения удельных потоков парниковых газов, которые в 2-3 раза превышают фоновые значения без разложения затопленной фитомассы. Наибольший вклад в общую эмиссию вносит диоксид углерода, а именно его диффузионный поток с поверхности водоемов и дегазация при сбросах воды в нижний бьеф гидроузлов. Приближение потоков парниковых газов к фоновым значениям происходит через примерно 5-6 лет для метана и около 30 лет для диоксида углерода. Кроме того, в исследовании были проведены расчеты эмиссии парниковых газов спустя 50 лет после наполнения при разных сценариях изменения климата. Показано, что при жестком сценарии потоки метана и углекислого газа несколько больше, чем при мягком сценарии, однако, они значительно ниже потоков в первые годы после создания водохранилищ.

■ Работа выполнена при поддержке ПАО «РусГидро» (договор № 1010-416-2021 от 26.04.2021).

Численное моделирование и интегральные оценки потока метана с поверхности болотных экосистем южной части Западной Сибири.

^{1,2,3} Богомолов В.Ю., ¹ Рязанова А.А., ^{1,4} Дюкарев Е.А.

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

² Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

³ Геолого-географический факультет Томского государственного университета

⁴ Югорский государственный университет

Численные эксперименты проводились с использованием модели земной поверхности TerM (ИВМ РАН-МГУ) в конфигурации для региональных расчетов. Данная модель представляет собой одномерную реализацию тепломассопереноса в почве, радиационного и теплового балансов на поверхности, согласованных с растительными блоками, расчета турбулентных потоков с поверхности, эмиссионных составляющих углеродного баланса и т.д. Как уже упоминалось выше, данная модель включает необходимые параметризации, связанные с описанием особенностей гидрологии торфяника. В частности, параметризация коэффициента диффузии в насыщенной и ненасыщенной зоне, параметризация уровня грунтовых вод с горизонтальным градиентным стоком, которая воспроизводит некоторый средний уровень воды для ячейки в зависимости от осадков, испарения и горизонтального переноса.

Численный эксперимент проведен для территории, включающей южно-таежную часть Западно-Сибирской равнины, на период 30 лет с 1990 по 2021 год. В качестве исходных данных для описания структуры почв и распределения растительности использовались:

1. для землепользования – карта почвенного покрова ИКИ РАН
2. для параметров почв – согласованная и уточненная база данных почв GSDS
3. для распределения болот – карта на основе данных Global Peatland Map v.2.0

Проверка показала, что модель в среднем воспроизводит характерные значения для выбранных микроландшафтов как в отдельных ячейках, так и для всего региона в целом, по сравнению как с точечными измерениями, так и с пространственными оценками.

Анализ тридцатилетних трендов потока метана, усредненных по времени и территории, показывает, что наблюдается увеличение потока метана, особенно в июне и сентябре, для болота, что является отражением общего повышения температуры в этой климатической зоне, характерного для последних 30 лет. В то же время в июне, когда сток минимален, увеличение потока метана практически не заметно.

Numerical modeling and integral estimates of methane flux from the surface of bog ecosystems in the southern part of Western Siberia

^{1,2,4} **Bogomolov V.**, ¹ **Ryazanova A.A.**, ^{1,3} **Dyukarev E.**

¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems RAS

² Research Computing Center, Moscow State University

³ Yugra State University

⁴ Faculty of Geology and Geography of Tomsk State University

Numerical experiments were carried out using the Earth's surface model TerM (IWM RAS-MSU) in a configuration for regional calculations. This model is a one-dimensional realization of heat and mass transfer in the soil along with radiation and heat balances on the surface, consistent with vegetation blocks, calculation of turbulent flows from the surface, emissions components of carbon balance, etc. As mentioned above, this model includes the necessary parameterizations related to the description of the specifics of the hydrology of the peatland. In particular, the parameterization of the diffusion coefficient in the saturated and unsaturated zone, the parameterization of the groundwater level with horizontal gradient runoff, which reproduces some average water level for the cell depending on precipitation, evaporation and horizontal transport.

The numerical experiment was conducted for the territory including the southern taiga part of the West Siberian Plain for a period of 30 years from 1990 to 2021. As input data for the description of soil structure and vegetation distribution were used:

1. for landuse– IKI RAS land cover map
2. for soil parameters– matched and refined GSDS soil database
3. for wetland distribution– map based on Global Peatland Map v.2.0 data

The verification shows that the model reproduces, on average, the characteristic values for the selected micro-landscapes both in individual cells and for the entire region as a whole, compared with both point measurements and spatial estimates.

An analysis of thirty-year trends in the methane flux, averaged over time and territory, shows that there is an increase in the methane flux, especially in June and September, for the swamp, which is a reflection of the general increase in temperature in this climatic zone, characteristic of the last 30 years. At the same time, in June, when the flow is minimal, the increase in methane flow is almost not noticeable.

Отклик потоков диоксида углерода на аномальные температуры и осадки в экосистемах арктической тундры и лесотундры

^{1,2} Горбаренко Е.М., ¹ Гущина Д.Ю., ¹ Тарасова М.А., ¹ Железнова И.В., ² Емельянова Е.Р.,
¹ Гибадуллин Р.Р., ⁷ Осипов А.М., ⁸ Ольчев А.В.

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы д.1

² Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 3 Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы д.1

⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы д.1

⁵ Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 33

⁶ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы д.1

E-mail: lisan.sat@gmail.com, dasha155@mail.ru, mkolennikova@mail.ru, ijeleznova@gmail.com, katikget@yandex.ru, ravil00121@mail.ru, sashaosipov@list.ru, aoltche@gmail.com

Daily carbon dioxide fluxes in Arctic tundra and forest-tundra ecosystems in response to temperature and precipitation extremes

^{1,2} Gorbarenko E., ¹ Gushchina D., ¹ Tarasova M., ¹ Zheleznova I., ² Emelianova E., ¹ Gibadullin R.,
¹ Osipov A., ¹ Olchev A.

¹ M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Leninskie Gory, 1

² Institute of ecology and evolution A.N. Severtsov RAS, Moscow, Leninsky Prospect, 33

Развитие и функционирование экосистем в различных регионах мира, особенно в полярных широтах, может существенно зависеть от возросшей частоты экстремальных погодных явлений, связанных с современными изменениями климата. Эти явления могут влиять на региональные биогеохимические циклы, включая водный, углеродный и азотные циклы, что имеет серьезные последствия для функционирования экосистем и роста растительных сообществ.

Основная цель данного исследования – оценить пространственную изменчивость реакции суточного нетто экосистемного обмена CO₂ (NEE) тундровых и лесотундровых экосистем в Северном полушарии на аномалии температур и осадков в течение вегетационного периода. Эти типы экосистем считаются одними из наиболее уязвимых к изменениям состояния окружающей среды в условиях меняющегося климата. Для анализа данных были использованы метеорологические данные и данные о потоках CO₂ с 21 станции глобальной сети FLUXNET и региональной сети AmeriFlux, а также набор данных реанализа ERA5.

Анализ аномалий потока CO₂ в экосистемах тундры и лесотундры выявил широкий спектр наблюдаемых реакций NEE на аномалии температур и осадков в течение вегетационного периода в зависимости от географического положения и типа ландшафта. В отличие от большинства предыдущих исследований, поглощение и более высокая эмиссия CO₂ при аномально высоких температурах были в основном обнаружены на южной границе полярного региона, где волны жары проявляются более часто, а также в луговых экосистемах и на участках с открытым грунтом и выступом горных пород. Преобладающее поглощение CO₂ в дни с аномально высокой температурой было обнаружено в широколиственных лесах и лиственных и хвойных вечнозеленых кустарниках. Данный отклик можно объяснить температурным режимом полярного региона с не очень высокими температурами воздуха, которые не приводят к тепловому стрессу для растительности, а наоборот, способствуют увеличению валовой первичной продукции (GPP) по сравнению с экосистемным дыханием (RE). Отклик на аномально низкую температуру проявляется в виде увеличения эмиссии CO₂, что связано со снижением GPP в эти периоды.

Реакция потоков CO₂ на аномально высокие и низкие осадки довольно схожа независимо от временного масштаба (краткосрочная или долгосрочная реакция). В большинстве экосистем тундр и лесотундр обильные осадки обычно приводят к увеличению эмиссии CO₂ в атмосферу. Длительный дефицит осадков сопровождается преобладающим поглощением CO₂.

Численная гидродинамическая модель р. Амур и ее приложения

Беликов В.В., Борисова Н.М., Васильева Е.С., Глотко А.В., Федорова Т.А.

Институт водных проблем РАН 119333, Москва, ул. Губкина, д.3

Numerical hydrodynamics model of Amur river and its applications

Belikov V.V., Borisova N.M., Vasilieva E.S., Glotko A.V., Fedorova T. A.

Water problem institute RAS

В докладе представлена двумерная (в приближении мелкой воды) численная гидродинамическая

Потоки диоксида углерода и метана на береговом участке карбонового полигона «Геленджик» в Краснодарском крае

¹ Кочкина М.В., ² Карпунина Д.А., ² Леонова Д.С., ³ Пушкин В.В., ^{1,2} Ольчев А.В.,
¹ Кременецкий В.В., ¹ Гулев С.К.

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

² Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик, Россия

E-mail: moreinty@gmail.com, karpunina.darya20@mail.ru, daleonovaria@gmail.com, sunduksh@gmail.com, aoltche@gmail.com, sk@ocean.ru, gul@sail.msk.ru

Carbon dioxide and methane fluxes at the coastal section of the Gelendzhik carbon polygon in Krasnodar Krai

¹ Kochkina M.V., ² Karpunina D.A., ² Leonova D.S., ³ Pushkin V.V., ^{1,2} Olchev A.V.,
¹ Kremenetsky V.V., ¹ Gulev S.K.

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

² Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ The Southern Branch of the IO RAS, Gelendzhik, Russia

В исследовании представлены результаты мониторинга потоков диоксида углерода (CO₂) и метана (CH₄) на береговом участке карбонового полигона «Геленджик» (Краснодарский край) в период 2022–2024 гг. Целью работы было изучение пространственно-временной изменчивости потоков парниковых газов у поверхности почвы и выявление их зависимости от климатических факторов. Для достижения этой цели были поставлены задачи: проведение полевых измерений потоков CO₂ и CH₄, анализ их сезонной и суточной динамики, и оценка влияния температуры и влажности почвы на газообмен.

Методы исследования включали прямые измерения потоков парниковых газов с использованием почвенной камеры Smart Chamber (LI-COR, США), сопряженной с инфракрасным газоанализатором LI-7810, а также регистрацию температуры и влажности почвы с помощью датчиков HydraProbe.

Экспериментальные данные показали значительную пространственную и временную изменчивость газообмена почвы, обусловленную климатическими условиями, растительностью и структурой почвы. В течение всего периода исследований почва полигона функционировала как источник CO₂ и поглотитель CH₄, причем интенсивность потоков зависела от температуры и влажности. Выявлены разнонаправленные тенденции зависимости потоков от температуры и влажности: эмиссия CO₂ возрастала при показателях температуры почвы ниже 28°C, но снижалась при превышении температуры почвой в 30°C, в то время как поглощение CH₄ уменьшалось как при высокой влажности, так и при высоких температурах почвы. Наблюдалась выраженная сезонная динамика с максимумами поглощения CH₄ и выделения CO₂ в летний период. Полученные данные важны для оценки вклада прибрежных экосистем Северного Кавказа в баланс парниковых газов и могут быть использованы при разработке стратегий адаптации к изменяющимся климатическим условиям, и созданию климатических прогнозов.

модель реки Амур от слияния Шилки и Аргуни до Амурского лимана (включая последний) с основными притоками Зея, Буря, Уссури. Разработка выполнена на основе отечественного программного комплекса STREAM 2D CUDA и большого объема топографических, батиметрических и гидрологических исходных данных. Таким образом, создана гиперпротяжённая гидродинамическая 2D-модель р. Амур, не имеющая мировых аналогов ни по протяжённости (более 4 тысяч км), ни по площади охвата территории.

Модель откалибрована по имеющимся кривым связи $Q(H)$ на гидрологических постах в стационарных режимах, а также верифицирована на экстремальных дождевых паводках 2013, 2020 гг. В результате расчётов получаются графики уровней и расходов воды в 27 створах гидропостов в зависимости от времени; глубины потока, скорости течения в плане, зоны и границы затопления поймы на любом участке модели. При этом учтено большинство дорожных и защитных сооружений на пойме. В Амурском лимане модель позволяет исследовать приливные и ветровые течения во взаимодействии со стоковой составляющей р. Амур

Научная и практическая ценность модели состоит в том, что она при задании гидрологических данных на входных границах может обеспечить с заблаговременностью 7 и более суток достоверное прогнозирование уровней воды и зон затопления по всей длине Среднего и Нижнего Амура.

Кроме того, модель может использоваться для:

- оптимизации регулирования гидрологического режима Амура путём управления сбросами существующих и проектируемых водохранилищ;
- обоснования улучшения условий судоходства на отдельных участках русла;
- обоснования высотно-планировочных решений по застройке и защите селитебных пойменных территорий;

■ моделирования параметров волны прорыва Зейского и Бурейского гидроузлов.

Результаты частично опубликованы в статье:

Belikov, V.V., Alekseyuk, A.I., Borisova, N.M., Vasil'eva, E.S., Glotko, A.V. Experience in Numerical Hydrodynamic Simulation of Long River Reaches // Water Resources, 2023, Vol. 50, No. 4, pp. 465–481. <https://doi.org/10.1134/S0097807823040036>. (WoS, Scopus)

Программы для ЭВМ:

1. Алексюк А.И., Беликов В.В. Программный комплекс STREAM 2D CUDA для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках с использованием технологий Compute Unified Device Architecture (на графических процессорах NVIDIA). // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017660266 от 20.09.2017

2. Алексюк А.И., Малахов М.А., Беликов В.В. Решатель задачи Римана для уравнений мелкой воды с разрывным дном // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660617, 2020

Модельные оценки изменений условий формирования и масштаба наводнений на реках России в XXI веке

^{1,2} Крыленко И.Н.

¹ Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова

² Институт водных проблем РАН

Model assessments of changes in the conditions of formation and scale of floods on Russian rivers in the 21st century

^{1,2} Krylenko I.N.

¹ Lomonosov Moscow State University

² WPI RAS

E-mail: krylenko_i@mail.ru

В докладе представлены результаты оценки возможных изменений характеристик затопления с учетом антропогенного преобразования пойм и изменения климатических условий по результатам модельных расчетов, выполненных на базе российских геоинформационных моделирующих комплексов ECOMAG и STREAM_2D, для чего разработаны методы совместного применения комплекса моделей. Проведенные оценки изменения многолетних гидрографов, средних максимальных и максимальных расходов воды на основе модели ECOMAG по данным климатических моделей для бассейнов рек Томь, Лена, Сев. Двина, Печора, Надым, Колыма позволили выделить речные бассейны с наиболее значимыми изменениями стока на период климатического прогноза – р. Лена, р. Томь, р. Колыма. Полученные для этих бассейнов смоделированные гидрографы и оценки изменений максимальных расходов воды использовались для оценки изменения характеристик затопления под влиянием климатических факторов. Вклад антропогенного преобразования пойм в изменение масштабов затопления исследовался для активно осваиваемых широкопойменных участков речных долин в районе крупных населенных пунктов, включая р. Томь – г. Томск, р. Лена – г. Якутск, р. Надым – г. Надым, р. Обь – г. Сургут, р. Амур – г. Благовещенск, р. М.С. Двина у г. Великий Устюг. На основе выполненных сценарных расчетов проведен анализ вклада каждого из факторов (антропогенного преобразования пойм и климатически обусловленных изменений стока) в трансформацию условий формирования и масштабов наводнений. По сочетанию антропогенной нагрузки на пойму и возможных изменений затопления при ожидаемых изменениях климата можно выделить следующие типы ключевых участков: 1– наиболее подверженные изменениям характеристик затопления участки, где при высоком освоении пойм возможно дальнейшее увеличение стока (р. Томь у г. Томск, р. Лена – г. Якутск), 2.– участки, где ожидается рост затопления на период климатического прогноза, но поймы освоены незначительно (р. Колыма – п. Черский, устьевая область Печоры), 3. – участки со значительным освоением пойм (р. Надым – г. Надым, р. Обь – г. Сургут, р. Амур – г. Благовещенск, р. М.С. Двина у г. Великий Устюг), где по существующим оценкам не ожидается увеличение стока на период климатического прогноза. Выполненные оценки и проведенная типизация ключевых участков позволяет более обоснованно планировать мероприятия по адаптации к климатическим изменениям в условиях активного освоения речных пойм.

- Сбор и анализ исходных данных для адаптации моделей выполнен в рамках ГЗ кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ раздел I.10 (ЦИТИС 121051400038-1). Анализ характеристик затопления выполнен в рамках темы № №FMWZ-2025-0003 Государственного задания ИВП РАН, оценка влияния изменений климата на речной сток для арктических бассейнов– в рамках проекта РНФ 24-17-00084.

Воспроизведение половодий на реках европейской части России в модели деятельного слоя суши TerM

¹ Медведев А.И., ² Степаненко В.М., ³ Гельфан А.Н., ⁴ Богомолов В.Ю.

¹ Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова; Институт водных проблем РАН

² Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова; Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова; Московский центр фундаментальной и прикладной математики

³ Институт водных проблем РАН

⁴ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

Simulation of spring river floods at European part of Russia with TerM land surface model

¹ Medvedev A., ² Stepanenko V., ³ Gelfan A., ⁴ Bogomolv V.

¹ Lomonosov Moscow State University Research Computing Center; RAS Water Problems Institute)

² Lomonosov Moscow State University Research Computing Center; Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography; Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics

³ RAS Water Problems Institute; Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

⁴ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS

Целью работы является усовершенствование модели деятельного слоя суши TerM в отношении воспроизведения фазы весеннего половодья на реках. Качества моделирования исследовалось для рек северной и центральной части Восточно-Европейской равнины (бассейны рек Северная Двина, Печора, Ока). Для данной территории весеннее половодье является важнейшей чертой сезонного гидрологического цикла (до 80% годового стока проходит через русловую сеть в течение нескольких недель).

В работе анализируются результаты численных экспериментов, выполненных с моделью TerM в разных конфигурациях с разным подходом к параметризации процессов стокообразования. Результаты моделирования сравниваются с данными наблюдений за русловым расходом. Существенное влияние на качество воспроизведения половодья оказывает форма параметризации процессов инфильтрации талой воды в почву, параметризации динамики снежного покрова под лесным пологом; особое внимание уделяется необходимости калибровки параметров инфильтрационной емкости почвы для речных бассейнов. Модель TerM с усовершенствованными параметризациями демонстрирует ошибку в воспроизведении рядов суточного стока на исследуемых водосборах на уровне до $NSE=0.7$ (NSE – коэффициент Нэша-Сатклифа).

Возможности валидации модели формирования стока в бассейне высокогорной реки Центрального Кавказа

^{1,2} Павлюкевич Е.Д., ³ Елагина Н.Э., ^{1,2} Крыленко И.Н., ¹ Рец Е.П., ⁴ Гафуров А., ¹ Мотовилов Ю.Г.

¹ Институт водных проблем РАН, 119333, Москва, Россия, ул. Губкина, д. 3

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Россия, Ленинские горы, МГУ, д. 1, географический факультет

³ Институт географии РАН, 119017, Москва, Россия, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4

⁴ Немецкий научно-исследовательский центр геонаук имени Гельмгольца, 14473, Потсдам, Германия, Телеграфенберг

Possibilities for validation of the runoff formation model in the high-mountain river basin of the Central Caucasus

^{1,2} Pavlyukevich E.D., ³ Elagina N.E., ^{1,2} Krylenko I.N., ¹ Rets E.P., ⁴ Gafurov A., ¹ Motovilov Yu.G.

¹ Water Problems Institute RAS, 119333, Moscow, Russia, Gubkina str., 3

² Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russia, Leninskie Gory, 1, Faculty of Geography

³ Institute of Geography RAS, 119017, Moscow, Russia, Staromonetny pereulok, 29, bld. 4

⁴ GFZ German Research Centre for Geoscience, 14473, Potsdam, Germany, Telegrafenberg

Оценка пространственно-временной изменчивости компонентов водного баланса с помощью распределенных гидрологических моделей в региональном масштабе имеет решающее значение для практических задач управления водными ресурсами. Такие исследования требуют точной калибровки и валидации моделей. Традиционные подходы к валидации, основанные исключительно на данных о стоке, часто оказываются недостаточными в горных районах из-за ограниченного количества наблюдательных станций и сложных гидрологических процессов. Для повышения надёжности модели мы выполнили валидацию ее отдельных блоков с использованием различных типов данных.

В данном исследовании рассматриваются возможности и ограничения валидации модели формирования стока ECOMAG в высокогорном бассейне реки Баксан на Центральном Кавказе. Помимо калибровки и валидации модели по данным о расходах воды, проведена валидация модели ECOMAG по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS о покрытости водосбора снегом, по данным масс-балансовых исследований опорных ледников Центрального Кавказа (Джанкуат и Гарабаши), на основе результатов изотопного анализа речных вод в различных створах, а также по данным моделирования ледникового стока с помощью энерго-балансовой модели A-Melt.

Результаты показывают высокую степень совпадения между смоделированными и наблюдаемыми расходами воды, при этом коэффициент эффективности Нэша-Сатклиффа (NSE) превышает 0,8 как в период калибровки (2000–2008 гг.), так и в период валидации (2009–2017 гг.).

Модель успешно воспроизводит сезонную динамику снежного покрова ($R^2 = 0,85$) по сравнению с данными MODIS. Однако наблюдается тенденция к переоценке покрытости снегом весной, что, вероятно, связано с недостаточным количеством метеостанций в бассейне для сложной по рельефу территории.

Результаты валидации модели формирования стока на основе результатов изотопного анализа дополнительно подтвердили надёжность модели в оценке вклада талой ($pBIAS = 19\%$, $R^2 = 0,81$) и дождевой ($pBIAS = 20\%$, $R^2 = 0,86$) составляющих стока. Модель корректно отображает внутригодовую и пространственную изменчивость источников питания.

Валидация модели по данным масс-балансовых исследований опорных ледников Центрального Кавказа (Джанкуат и Гарабаши) показала, что в реальных условиях процессы таяния и распределения снега и льда в столь расчленённом рельефе намного сложнее. Вследствие чего возникает систематическая ошибка в результатах моделирования – заниженные относительно фактических данных модельные результаты. Для ледника Гарабаши точность модели была удовлетворительной ($pBIAS = -12\%$), однако для ледника Джанкуат модель значительно недооценивала абляцию ($pBIAS = -55\%$), что, вероятно, связано со сложной топографией и наличием лавинного питания, не учитываемого в модели ECOMAG.

Кросс-валидация моделей ECOMAG и A-Melt показала хорошее общее соответствие ($pBIAS = 18\%$) смоделированных значений абляции ледников. Однако различия в оценках снежного и ледникового компонентов выявили сложности в параметризации таяния льда в гидрологических моделях. Модель ECOMAG, как правило, переоценивала вклад таяния снега и недооценивала таяние льда по сравнению с моделью A-Melt, что можно объяснить различиями в методах классификации поверхности и калибровке коэффициентов таяния.

Эти результаты подтверждают, что многоцелевой подход к валидации значительно повышает точность гидрологических моделей в высокогорных бассейнах за счёт интеграции различных наборов данных. Такой подход повышает доверие к прогностическим расчетам модели, делая их более надёжными для долгосрочного управления водными ресурсами. Будущие исследования должны быть сосредоточены на улучшении моделирования гидрологических процессов в высокогорных бассейнах путём интеграции метеорологических данных высокого разрешения, совершенствования моделирования перераспределения снега и синтеза гидрологических моделей с энерго-балансовыми моделями таяния ледников.

Калибровка гидрологических моделей по данным группы станций на основе многомерного коэффициента Нэша-Сатклиффа

¹ Гарцман Б.И., ² Соломатин Д.П., ¹ Губарева Т.С.

¹ Институт водных проблем РАН, 119333, г. Москва, ул. Губкина 3

² Delft University of Technology, Mekelweg 5, Delft, 2628CD, Netherlands

E-mail: gartsman@inbox.ru, D.P.Solomatine@tudelft.nl, tgubareva@bk.ru

Calibration of hydrological models using data from a group of stations based on the multivariate Nash-Sutcliffe coefficient

¹ Gartsman B.I., ² Solomatine D.P., ¹ Gubareva T.S.

¹ Water Problem Institute RAS

² Delft University of Technology, Mekelweg 5, Delft, 2628CD, Netherlands

Современные пространственно-распределенные гидрологические модели характеризуются высокой детализацией и совершенством математического описания, но их калибровка и тестирование еще остаются нерешенной проблемой. Обычно они основаны на квадратичных мерах близости расчетных и наблюдаемых гидрографов в единственном замыкающем створе, чаще всего на коэффициенте эффективности моделирования Нэша-Сатклиффа (NSE). Этот подход очевидно недостаточен для калибровки модели с сотнями пространственных расчетных элементов.

В докладе представлено использование многомерной оценки качества моделирования, являющейся естественным обобщением традиционной оценки NSE, но которая агрегирует данные с нескольких гидрологических станций с использованием анализа главных компонент (PCA). Метод был протестирован на модели ECOMAG, разработанной для суббассейна (24 400 км², с 15 гидропостами) реки Уссури в России. Также метод применялся в экспериментальном порядке при разработке региональных гидрологических реанализов на основе модели ECOMAG для бассейна р.Амур в рамках Важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ».

Результаты показывают, что представленная версия многомерного показателя NSE с использованием PCA при калибровке пространственно-распределенных гидрологических моделей имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами: сниженная размерность системы данных без потери значимой информации, упрощенный анализ данных и автоматизированная процедура калибровки; объективное отделение детерминированного сигнала от шума, калибровка с использованием «информационного ядра» данных, что приводит к более точным оценкам параметров. Кроме того, введенное понятие «компактного» набора данных позволяет математически интерпретировать физико-географическую однородность бассейнов, что может быть ценно для гидрологического районирования бассейнов, анализа гидрологических полей и структурирования моделей крупных бассейнов. Не вызывает сомнений целесообразность дальнейшего развития и тестирования предлагаемой методологии при решении пространственных гидрологических задач на основе распределенных моделей, таких как управление качеством водохранилищ, создание гидрологических реанализов и т. д.

Моделирование гетеротрофного дыхания болот бореального пояса

^{1,2} Аббазов А.И., ^{1,2,3} Богомолов В.Ю., ^{1,4} Дюкарев Е.А.

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

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

³ Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

⁴ Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Россия

Modeling heterotrophic respiration of boreal peatlands

^{1,2} Abbazov A.I., ^{1,2,3} Bogomolov V.Yu., ^{1,4} Dyukarev E.A.

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

² National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

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

⁴ Yurga State University, Khanty-Mansiysk, Russia

Болотные экосистемы, занимая 3% суши, играют ключевую роль в глобальном углеродном цикле. Однако их моделирование в LSM/ESM сталкивается с проблемой оценки баланса углерода, особенно гетеротрофного дыхания (CO₂-эмиссии), зависящего от климатических факторов. Анализ существующих моделей (напр., CTEM, ORCHIDEE-PEAT, CLM5, CAMP) выявил недостатки: ограничение глубины сетки до 1 м (игнорирование глубоких торфяных слоёв) и усреднение температур для аэробных/анаэробных зон, что искажает оценки потоков. Глубина сетки расширена до 10 м для учёта глубинных торфяных залежей. Температурная стратификация: общий углеродный пул разделён на 1-метровые слои, где для каждого рассчитываются условия (аэробные/анаэробные) и дыхание с учётом локальной температуры.

Сравнение подходов показало, что усреднение температур завышает CO₂-потоки. Новая модель, использует данные о стратификации температуры и уровне грунтовых вод. В перспективе она интегрируется в модель деятельного слоя для прогнозирования экосистемных изменений с суточным разрешением.

Оценка воспроизведения аномалий увлажнения почвы на основе выходных массивов модели ПЛАВ для земледельческих районов России

Кланг П.С., Тарасова Л.Л., Хан В.М.

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, г. Москва, Россия,
E-mail: klang@mecom.ru, tarasova@mecom.ru, khan@mecom.ru

Для оценки продуктивности агрофитоценозов на вегетационный сезон наиболее актуален долгосрочный прогноз аномалий погоды, и особенно почвенной влаги – агрометеорологического ресурса, лимитирующего рост и развитие посевов. В работе будут представлены первые результаты по выявлению аномалий почвенного увлажнения на основе ретроспективных выходных массивов модели ПЛАВ для отдельных земледельческих районов России с сезонной и 2-3 недельной заблаговременностью. В работе будет представлен календарь периодов засух/избыточного увлажнения за последние 20 лет по Чернозёмной зоне России с разбивкой по интенсивности и продолжительности на основе кластерного анализа средних по области значений гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова. В работе будет представлен архив данных по модельным и фактическим значениям полной влаги, а также оценки качества воспроизведения сильных, средних и слабых засух, а также событий избыточного увлажнения по выделенным районам.

Assessment of the reproduction of the soil moisture anomalies based on the SLAV model dataset for agricultural regions of Russia

Klang P.S., Tarasova L.L., Khan V.M.

Hydrometeorological Centre of Russia, Moscow, Russia

The long-term forecast of weather anomalies is most relevant for assessing the productivity of agrophytocenoses for the growing season. The most relevant weather anomaly in agrometeorology is soil moisture, which limits the growth and development of crops. In this paper will be presented the first results on the identification of the soil moisture anomalies based on the retrospective SLAV model dataset for some agricultural regions of Russia with seasonal and 2-3 weeks lead time. It is article will present a calendar of periods of droughts/excessive humidification over the past 20 years in the Chernozem zone of Russia with gradations in intensity and duration based on a cluster analysis of the average values of the hydrothermal coefficient of G.T. Selyaninov, as well as an archives of the model dataset and the actual values of total moisture. As a result, we present to obtain the quality of reproduction of severe, medium and mild droughts, as well as events of excessive moisture in selected areas to discussion.

Моделирование развития песчаных массивов с использованием цепей Маркова

¹ Кулик К.Д., ² Широкова В.А.

¹ Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, ул. Казакова, 15

² Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН, ул. Балтийская, 14, Москва, 125315, Россия

E-mail: kulik.k2000@gmail.com, shirocova@gmail.com

Modeling the development of sand massifs using Markov chains

¹ Kulik K.D., ² Shirokova V.A.

¹ State University of Land Use Planning, 15 Kazakova str., 105064, Moscow, Russia

² S. Vavilov Institute for the History of Science and Technology RAS, st. Baltiyskaya, 14, Moscow, 125315, Russia

Аннотация. На участке открытых песков в составе Арчединско-Донского массива вблизи х. Вилтов Волгоградской области были выделены 6 типов песков, для которых были составлены карты по длинному ряду аэрокосмических снимков с 1960-х по 2020-е годы. Анализ ручной оцифровки поверхности массива показал тенденцию к зарастанию песков с течением времени, на основе этих данных были рассчитаны матрицы переходов для каждого временного отрезка, охватываемого исследованием. Рассчитанные цепи Маркова показали высокую степень корреляции с данными ручной обработки, рассмотрена возможность использования таких математических моделей для прогнозирования развития рельефа и почвенно-растительного покрова аридных зон.

В современных условиях ускоренного изменения климата особенно важно производить мониторинг экстремальных ландшафтов в регионах, где они могут нарушить экологическую устойчивость соседних биогеоценозов или привести к чрезвычайным ситуациям в хозяйственной деятельности человека, к таким территориям относится и Волгоградская область. Арчединско-Донские пески являются азональным ландшафтом в степной зоне и занимают площадь порядка 1800 км².

В работе для ручной оцифровки использовались методики визуального дешифрирования, где главным показателем как дефляционной деградации, так и зарастания почв, которые можно определить по аэрокосмическим снимкам, является оттенок фотографии. Рисунок также имеет значение, так как элементы рельефа на рассматриваемом участке различаются по высоте, протяжённости на местности. Для математического моделирования были использованы цепи Маркова – последовательности случайных событий с конечным или счётным числом исходов, где вероятность наступления каждого события зависит только от состояния, достигнутого в предыдущем событии.

По данным о площадях типов песков были рассчитаны матрицы перехода для каждого этапа. Цепи Маркова получаются последовательным умножением матриц на вектор начальных состояний. Сначала выбирается исходное распределение – данные на 1961 г., а затем рассчитываются по каждому этапу (5 этапов для данной работы).

В заключении мы отмечаем высокую степень корреляции между данными о площадях, полученными при ручной оцифровке с данными, полученными в ходе расчета математической модели. Использование цепей Маркова для прогнозирования развития аридных территорий может быть эффективным при разработке экологических и мелиоративных мероприятий.

Литература:

1. Салугин А. Н и др. Математические модели динамики и прогноза эволюции аридных экосистем / Всерос. науч.-исслед. агролесомелиорат. ин-т. – Волгоград : ВНИАЛМИ, 2006. – 180 с.
2. Кулик К. Н. Агролесомелиоративное картографирование и фитоэкологическая оценка аридных ландшафтов / Всерос. науч.-исслед. агролесомелиорат. ин-т. – Волгоград : ВНИАЛМИ, 2004. – 247 с.
3. Методические указания по изысканиям и проектированию мероприятий комплексного освоения песков юга и юго-востока Европейской части СССР / под общ. ред. В. Н. Виноградова, В. Н. Тарасюка. – Москва : ВАСХНИЛ, 1985. – 78 с.

Численное моделирование вертикальной термической структуры меромиктических водоемов в районе Кандалакшского залива Белого моря

Меркулова Т.С., Осадчиев А.А.

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

E-mail: merkulova.ts@phystech.edu, osadchiev@mipt.ru

Прибрежные озера морского происхождения, то есть озера, образовавшиеся в результате отделения морских заливов от моря, – наиболее многочисленная категория российских меромиктических водоемов [1]. В частности, на побережье Белого моря можно найти водоемы – озера Еловое и Трехцветное, губа Лобаниха, бухта Биофильтров – находящиеся на различных стадиях изоляции от моря в результате подъема берега, ставшие объектом активного изучения в последние десятилетия [2, 3]. Гидрофизические процессы в этих водоемах, тем не менее, остаются малоизученными из-за сложных природно-климатических условий и, до недавнего времени, недостатка измерений подо льдом в холодный период года. При этом понимание сезонной и межгодовой изменчивости вертикальной термической структуры меромиктических озер и заливов важно для изучения их уникальных гидробиологических и гидрохимических процессов. В данных озерах от поверхности ко дну уменьшается сезонная изменчивость температуры воды, что характерно для меромиктических водоемов [4]. В частности, в них наблюдается практически постоянная придонная температура, но остается неизвестным, почему у разных озер разная придонная температура. Является ли это следствием условий в период изоляции этих озер от моря или эти температуры – результат баланса вертикальных потоков тепла в теплый и холодный периоды года.

Для изучения этих вопросов была создана одномерная численная модель вертикальной термической структуры меромиктического озера. Модель была адаптирована для озера Елового, одного из рассматриваемых водоемов в районе Кандалакшского залива Белого моря, и верифицирована по данным натурных измерений температуры на различных глубинах. Было показано, что модель достоверно воспроизводит сезонный ход вертикальной термической структуры меромиктического озера.

Верифицированная численная модель была применена для исследования вертикального теплообмена между различными слоями озера Еловое, а также между поверхностным слоем озера и атмосферой. С помощью модели было установлено, что температура придонного слоя озера определяется сезонным ходом температуры атмосферы и вызванными им вертикальными потоками тепла в озере. Были получены численные оценки скорости передачи сигнала изменчивости температуры атмосферы к придонному слою озера, а также степени уменьшения амплитуды температурной изменчивости при прохождении слоев озера с различными термохалинными характеристиками. Также была рассмотрена историческая динамика поведения моделируемой термической структуры, а именно, отклик температуры озера на климатические изменения, происходившие в течение последних 70 лет. Был рассчитан прогноз вертикальной термической структуры озера Еловое в будущие десятилетия на основе прогнозов увеличения температуры атмосферы в этом регионе.

Для верификации модели использовались данные натурных измерений температуры, полученных на заякоренной станции в озере Еловом в 2022-2023 годах. Данные атмосферы брались из атмосферного реанализа ERA5 [5]. Климатические прогнозы – из Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6).

- Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, тема FSMG-2024-0037.

Литература

1. Краснова Е.Д. Экология меромиктических озер России. Прибрежные морские водоемы // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 3. С. 322-333.
2. Бudyко Д.Ф., Немировская И.А. Органические соединения и металлы в осадках отделяющихся водоемов Кандалакшского залива Белого моря // Геохимия. 2023. Т. 61 №2. С.
3. Саввичев А.С. [и др.] Микробные процессы в губе Канда – меромиктическом водоеме, искусственно отделенном от Белого моря. // Доклады Академии наук. – 2017. Т. 474, № 5. – С. 637-641.
4. Boehrer B. [et al.] Physical features of meromictic lakes: stratification and circulation // Ecology of meromictic lakes. – 2017. – С. 15-34.
5. Hersbach H. [et al.] The ERA5 global reanalysis // Quarterly journal of the royal meteorological society. – 2020. – Т. 146. – №. 730. – С. 1999-2049.

Оценка пространственной изменчивости потоков диоксида углерода над неоднородной поверхностью по результатам модельных экспериментов

¹ Нариманидзе А.А., ¹ Мухартова Ю.В., ² Загирова С.В., ¹ Ольчев А.В.

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

E-mail: annanarimanidze1563@gmail.com

Estimation of the spatial variability of carbon dioxide fluxes over an inhomogeneous surface from the results of modeling experiments

¹ Narimanidze A.A., ¹ Mukhartova Yu.V., ² Zagirova S.V., ¹ Olchev A.V.

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of RAS, Syktvykar, Russia

Получение достоверной информации о потоках парниковых газов с помощью измерений, проводимых на станциях мониторинга с использованием метода турбулентных пульсаций (eddy covariance), требует комплексной проверки возможных погрешностей проводимых измерений с использованием как традиционных методов обработки данных (Aubinet et al. 2012), так и методов физико-математического моделирования. Особенно существенные погрешности в измерении потоков могут быть связаны с пространственной неоднородностью ландшафтной структуры вокруг измерительной станции, включая сложный рельеф и мозаичную структуру растительности. Целью данного исследования является оценка пространственной неоднородности вертикальных потоков диоксида углерода (CO₂) над лесным участком лесозоологического стационара «Ляльский» в республике Коми.

Для изучения пространственной неоднородности потоков CO₂ была использована трехмерная математическая RANS-модель (Reynolds averaged Navier-Stokes) эмиссии, поглощения и переноса парниковых газов (Mukhartova et al. 2023). Динамическая часть модели основана на решении осредненного векторного уравнения Навье-Стокса и уравнения неразрывности с использованием полуторного порядка замыкания, базирующегося на гипотезе Буссинеска, для расчета компонент скорости ветра и коэффициента турбулентности. Расчет поля скорости ветра и коэффициента турбулентности осуществляется с учетом структуры растительности и рельефа на исследуемой площадке. Трехмерное поле концентрации CO₂ находится из начально-краевой задачи для уравнения адвекции-диффузии с учетом источников CO₂ за счет почвенного дыхания и дыхания стволов и ветвей деревьев, а также стоков за счет фотосинтеза. Используемая схема является компромиссом между вычислительной сложностью модели, ее точностью и доступными экспериментальными данными для ее валидации. Для верификации модели использовались данные измерений потоков парниковых газов на станции долговременного мониторинга методом турбулентных пульсаций. В результате модельных экспериментов, имитирующих разные погодные условия и ветровой режим, была выявлена существенная пространственная изменчивость потоков CO₂ в пределах исследуемого лесного участка. Максимально высокая изменчивость потоков отмечалась на участках с сильно неоднородным рельефом и вблизи границ раздела растительных сообществ. Модельные расчеты показали, что внутри полога растительности потоки CO₂ преимущественно положительны за счет значительного вклада в результирующий поток почвенного дыхания. Над растительным покровом в дневные часы отмечалось преобладающее поглощение CO₂ из атмосферы (до 26 мкмоль/м²с) за счет активного фотосинтеза лесной растительности. Сравнение смоделированных и измеренных потоков CO₂ показало их хорошее соответствие.

Литература:

1. Aubinet, M.; Vesala, T.; Papale, D. Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2012; p. 438
2. Mukhartova I., Kurbatova J., Tarasov D., Gibadullin R., Sogachev A., Olchev A. 2023 Modeling Tool for Estimating Carbon Dioxide Fluxes over a Non-Uniform Boreal Peatland. Atmosphere, 14. 625

Инверсионное моделирование приземных потоков парниковых газов над неоднородной подстилающей поверхностью по результатам дистанционных измерений

¹ Обаев Е.С., ¹ Мухартова Ю.В., ¹ Гибадуллин Р.Р., ² Ильясов Д.В., ² Дюкарев Е.А., ^{1,2} Ольчев А.В.

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, ГСП-1

² Югорский государственный университет, Россия, 628012, г.Ханты-Мансийск, ул.Чехова, д.16

E-mail: obaeves@my.msu.ru, muhartova@yandex.ru, ravil00121@mail.ru, d_ilyasov@ugrasu.ru, e_dyukarev@ugrasu.ru, aoltche@gmail.com

Inversion modeling of surface greenhouse gas fluxes over a non-uniform underlying surface using remote sensing data

¹ Obaev E.S., ¹ Mukhartova I.V., ¹ Gibadullin R.R., ² Il'yasov D.V., ² Dyukarev E.A., ^{1,2} Olchev A.V.

¹ Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

² Yurga State University, 16, Chekhova Str., Khanty-Mansiysk 628012, Russia

В исследовании предложен инновационный алгоритм для восстановления приземных потоков парниковых газов над неоднородной подстилающей поверхностью с высоким пространственным разрешением с помощью данных измерений с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Алгоритм основан на решении обратной задачи по восстановлению потоков парниковых газов по данным измерений концентраций искомого парникового газа, данных о поле ветра и коэффициентах турбулентной диффузии на двух уровнях над земной поверхностью в пределах атмосферного пограничного слоя. Алгоритм использует модификацию трехмерной гидродинамической модели (Mukhartova et al., 2024), которая позволяет определить параметры воздушного потока, влияющие на пространственное распределение концентраций парниковых газов в атмосфере. На первом этапе в ходе решения прямой задачи был проведен расчет стационарного распределения концентраций и потоков парниковых газов на разных уровнях над неоднородной поверхностью суши в пределах модельной области при разных направлениях и скоростях ветра. Полученные результаты использовались для имитации измерения с БПЛА и в качестве целевого (теоретического) потока в обратной задаче. Обратная задача заключается в нахождении потока на выбранной высоте над поверхностью, при котором достигается минимум функционала квадратичного отклонения модельных значений концентрации парниковых газов от измеренных значений на двух выбранных уровнях над поверхностью. Для проверки разработанного алгоритма была проведена серия численных экспериментов, в ходе которых имитировались наблюдения с БПЛА с различной точностью и плотностью измерений концентрации парниковых газов. Объектом исследования послужил тестовый лесной участок карбонового полигона «Мухрино» (60°53'40.3"с.ш., 68°42'34.1"в.д.), расположенный в Ханты-Мансийском автономном округе. В результате численных экспериментов было получено качественное и количественное соответствие значений потоков, восстановленных в результате использования инверсионного алгоритма, с теоретическим модельным распределением потоков, полученным в результате решения прямой задачи. Максимальная погрешность оценки потока наблюдается вблизи границ расчетной области. Это обусловлено используемыми в задаче граничными условиями.

Литература:

1. Mukhartova, I.; Sogachev, A.; Gibadullin, R.; Pridacha, V.; Kerimov, I.A.; Olchev, A. An Inverse Modeling Approach for Retrieving High-Resolution Surface Fluxes of Greenhouse Gases from Measurements of Their Concentrations in the Atmospheric Boundary Layer. *Remote Sens.* 2024, 16, 2502. <https://doi.org/10.3390/rs16132502>

Внедрение модели растительного полога в модель деятельного слоя суши TerM ИВМ РАН-МГУ

¹ Павинский С.В., ^{1,2} Степаненко В.М.

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

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва

E-mail: stanislavpavinskij@gmail.com, vstepanenkomeister@gmail.com

Implementation of the model of the plant canopy in the Terrestrial model TerM INM RAS-MSU

¹ Pavinsky S.V., ^{1,2} Stepanenko V.M.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Russia, 119991, Moscow, GSP-1, 1 Leninskiye Gory

² Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Leninskiye Gory, 1, building 4, Moscow, 119234

Была разработана модель (и представлена на конференции ENVIROMIS-2024), которая рассчитывает температуру почвы и верхнего слоя растительности, участвующего в теплообмене с атмосферой (сапору), в соответствии с теорией подобия, согласно предположению о том, что абсолютные значения потоков значительно превосходят аккумуляцию тепла деревьями. Ее валидация проводилась на основе данных измерений, проведенных на территории Хибинской учебно-научной станции (травянистая растительность), Федоровского Центрально-Лесного заповедника (влажный ельник) и карбонового полигона «Мухрино» (темнохвойно-осиновый зеленомошный лес). Она показала хороший результат, который в целом согласуется с данными измерений.

Система уравнений модели:

$$\begin{cases} SWB_{skin} + LWB_{skin} - H_{skin} - LE_t + H_{soil} = 0 \\ SWB_{soil} + LWB_{soil} - H_{soil} - LE_{soil} - F = 0 \end{cases}$$

SWB_{skin} , SWB_{soil} – баланс коротковолновой радиации для верхнего уровня растительности и почвы соответственно, Вт м⁻²; LWB_{skin} , LWB_{soil} – баланс длинноволновой радиации для растительности и почвы соответственно, Вт м⁻²; F – поток тепла в почву, Вт м⁻²; H_{skin} , H_{soil} – явный поток тепла из растительности и из почвы соответственно, Вт м⁻²; LE_t , LE_{soil} – скрытый поток тепла из растительности и из почвы, Вт м⁻².

Изначально в модели TerM ИВМ РАН-МГУ [V. M. Stepanenko et al., 2024] в уравнении теплового баланса приповерхностного слоя почвы на участках с растительностью потоки явного и скрытого тепла уходили сразу в приземный слой. В ходе работы они были заменены на H_{soil} и LE_{soil} :

$$\rho_s c_s h_s \frac{\partial T_{s,i}}{\partial t} = SWB_{soil} + LWB_{soil} - H_{soil} - LE_{soil} - LM_{soil} - B_T,$$

где ρ_s – плотность приповерхностного слоя, кг м⁻³; c_s – удельная теплоемкость приповерхностного слоя, Дж кг⁻¹ К⁻¹; h_s – толщина приповерхностного слоя, м; LM_{soil} – затраты тепла на таяние льда, Вт м⁻²; B_T – поток тепла в подстилающую поверхность, Вт м⁻².

Потоки тепла, уходящие в атмосферу теперь есть H_{skin} и $LE_{soil} + LE_t$. Расчет забора воды из почвы корнями растений и расчет водного баланса почвы были также скорректированы.

В будущем будут описаны более детально изменения, внесенные в модель, а также будут представлены результаты моделирования температуры растительного полога и потоков явного и скрытого тепла, а также сравнение с данными наблюдений, проведенных в Фёдоровском.

Оптимизация углеродного цикла модели деятельного слоя суши TerM

^{1,2} Покровская А.И., ^{1,3} Степаненко В.М.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

² Институт Географии РАН

³ Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ

E-mail: aipokrovskaya@mail.ru, v.stepanenko@rcc.msu.ru

Optimization of the Carbon Cycle in the TerM Land Surface Model

^{1,2} Pokrovskaya A., ^{1,3} Stepanenko V.

¹ Lomonosov Moscow State University

² Institute of Geography RAS

³ Research Computing Center MSU

Современные климатические исследования опираются на численное моделирование как ключевой метод изучения сложных процессов в Земной системе. Направления развития климатических моделей связаны с двумя фундаментальными аспектами: переходом к более высокому пространственному разрешению, позволяющему явно воспроизводить ранее параметризованные процессы, и совершенствованием самих физических параметризаций подсеточных масштабов. Особое место среди этих параметризаций занимает описание взаимодействий на границе раздела атмосферы и почвы, где процессы энерго- и массообмена определяют энергетический баланс системы. Деятельный слой почвы представляет собой тонкий приповерхностный горизонт почвы, характеризующийся наиболее интенсивным процессом тепло- и влагообмена с атмосферой. В пределах данного слоя происходят основные вариации температуры и влажности почвы, определяющие энергетический и водный режим на границе «атмосфера-почва», а также интенсивность биогеохимических процессов.

Модель деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ (TerM) является автономной веткой модели Земной системы ИВМ РАН. Описание основных процессов на границе атмосферы и почвы строится на системе уравнений тепло- и влагопереноса. В модели принимается одномерное вертикальное приближение системы уравнений, решение которой в данной работе будет выполняться в одноколоночном режиме расчетов для станции FLUXNET Федоровское.

Блок углеродного цикла концептуально строится на идее углеродных пулов. Этот подход был разработан в модели CLM и основывается на разделении углерода на три основных резервуара: почвенный, растительный и антропогенный пулы, каждый из которых характеризуется содержанием углерода и временем его оборота. Общий объем CO₂, поступающий в атмосферу, является результирующим между поглощением CO₂ растениями во время фотосинтеза, выделением в процессе дыхания и разложения органического вещества микроорганизмами, а также потоком углерода вследствие землепользования. Математически динамика каждого пула описывается дифференциальным уравнением баланса, где скорость изменения массы углерода равна разности между потоками. Описание биохимических процессов в почве и растениях строится на параметрических уравнениях. Значения параметров варьируются в зависимости от типа растительности и экосистемных особенностей. Для повышения качества результатов моделирования потоков углерода необходима калибровка параметров и оптимизация самой модели.

В данной работе используются данные и результаты моделирования для станции FLUXNET Федоровское на период 1998–2014 гг. Для калибровки были предварительно выбраны параметры из уравнений углеродного цикла. В силу ограниченности вычислительных мощностей был проведен анализ на чувствительность модели к изменениям параметров. Для анализа использовался метод FAST, основанный на алгоритме разложения Фурье, который отличается высокой вычислительной эффективностью. Для наиболее значимых параметров применялся метод оптимизации ROPE (RObust Parameter Estimation). В качестве метрики использовался коэффициент эффективности Нэша-Сатклиффа. С учетом откалиброванных параметров качество модели по воспроизведению потоков углерода, явного и скрытого тепла улучшилось. Верификация результатов модели проводилась при сравнении с данными пульсационных измерений на станции Федоровское.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности предложенного подхода к калибровке параметров углеродного цикла и возможности его применения в различных гидрологических и климатических моделях для повышения точности моделирования взаимодействий в системе «атмосфера-подстилающая поверхность».

Оценка характеристик максимального стока реки Томи в XXI веке

^{1,2} Разаренова А.Д., ^{1,2} Крыленко И.Н.

¹ Институт водных проблем РАН

² Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова

E-mail: svd010100@mail.ru

Assessment of the maximum flow characteristics for the Tom River in the XXI century

^{1,2} Razarenova A.D., ^{1,2} Krylenko I.N.

¹ MSU M.V. Lomonosov

² WPI RAS

В работе представлена оценка трансформации режима стока реки Томи в условиях меняющегося климата на основе модели формирования стока ECOMAG (авт. Ю.Г. Мотовилов) с привлечением данных глобальных климатических моделей проекта CMIP5 при 4-х сценариях эмиссии парниковых газов для 4-х основных моделей проекта ISI-MIP2: GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM. Калибровка и верификация модели ECOMAG для бассейна Томи проводилась по данным гидрологических постов в бассейне при расчетах по данным реанализа EWMBI за период 1989-2002 и 2003-2016 гг. На основе результатов моделирования для поста р. Томь – г. Томск (гидроствор) проведена не только оценка относительного изменения объемов стока и трансформации среднесезонных гидрографов на период климатического прогноза, но и анализ статистических параметров рядов максимальных годовых расходов воды с оценкой возможного изменения максимальных расходов 1%-ной обеспеченности в XXI веке. Сравниваются результаты оценок среднемаксимальных расходов ($\overline{Q_{max}}$) и квантилей максимального расхода 1%-ной обеспеченности ($Q_{max1\%}$). Анализ изменений внутригодового распределения стока на последнюю треть XXI века при сценарии rcp8.5 показывает, что период половодья уменьшается и сдвигается на более ранние сроки. Максимальные расходы в половодье относительно исторического периода для бассейна р. Томи увеличиваются при расчетах по данным всех моделей и наблюдаются на 10-20 дней раньше. Кроме того, в XXI веке возможно увеличение максимального суточного стока – расход 1%-ной обеспеченности в среднем по ансамблю моделей и сценариев увеличивается на 5-10%. Полученные аномалии характеристик речного стока используются в качестве граничных условий в гидродинамической модели STREAM_2D (авт. В.В. Беликов и др.) для оценки характеристик возможного затопления участка р. Томи в районе г. Томск.

- Сбор и анализ исходных данных для адаптации модели для бассейна р. Томи выполнен в рамках ГЗ кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ раздел I.10 (ЦИТИС 121051400038-1). Анализ максимальных расходов выполнен в рамках темы № №FMWZ-2025-0003 Государственного задания ИВП РАН. Оценка влияния изменений климата на речной сток в рамках проекта РНФ 23-77-01097.

Сравнение моделей углеродного цикла почвы RothC, SOCS, INMC в рамках конструктора моделей биогеохимических циклов

¹ Файкин Г.М., ¹ Степаненко В.М., ² Рыжова И.М., ² Романенков В.А., ¹ Медведев А.И.,
¹ Шангареева С.К.

¹ Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ, Российская федерация, Москва, ул. Ленинские Горы, д.1 стр.4, 119992.

² Московский государственный университет, Российская федерация, Москва, территория Ленинские Горы, 1с12, 119234

Comparison of soil carbon cycle models RothC, SOCS, INMC within the framework of the biogeochemical cycle model constructor

¹ Faykin G.M., ¹ Stepanenko V.M., ² Ryzhova I.M., ² Romanenkov V.A., ¹ Medvedev A.I.,
¹ Shangareeva S.K.

¹ Research Computing Center of Moscow State University, Russian Federation, Moscow, st. Leninskie Gory, 1 building 4, 119992

² Moscow State University, Russian Federation, Moscow, Leninskie Gory territory, 1s12, 119234

В работе рассматривается созданный для последующего применения в численной модели деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ универсальный конструктор моделей углеродного цикла (УЦ) в почве и растительности для возможности реализации широкого спектра существующих и перспективных моделей УЦ для задач климатологии, экологии и рационального природопользования. На настоящем этапе в рамках конструктора реализованы три модели: SOCS, RothC и модель УЦ почвы ИВМ РАН. Входные данные для моделей и данные для проверки их качества заимствованы с сельскохозяйственных опытов в Ростовской, Московской, Тверской и Владимирской областях.

Carbon cycle model	The variant of external conditions (station)	Rostov	DAO3	DAO4	TRGK	VLMR
INMC						
Control		0,792	0,660	1,260	1,930	0,229
Fertilizer supply option 1		0,686	2,285	1,638	2,066	1,957
Fertilizer supply option 2		0,510	1,841	1,194	2,760	1,058
Fertilizer supply option 3			2,309	1,232		
SOCS						
Control		0,068	0,291	0,450	0,321	0,145
Fertilizer supply option 1		0,109	0,254	0,288	0,385	0,173
Fertilizer supply option 2		0,168	0,402	0,304	0,385	0,189
Fertilizer supply option 3			0,140	0,406		
RothC						
Control		0,133	0,357	0,167	0,310	0,118
Fertilizer supply option 1		0,332	0,205	0,134	0,520	0,148
Fertilizer supply option 2		0,352	0,399	0,169	0,449	0,184
Fertilizer supply option 3			0,155	0,214		

Рисунок 1. Среднеквадратичное отклонение значений концентрации углерода, рассчитанное на основе результатов работы конструктора и данных наблюдений, взятых со станций наблюдения за агроклиматическими параметрами.

Применение вариационных методов усвоения данных к моделям углеродного цикла

^{1,2} Шангареева С.К., ² Степаненко В.М., ^{1,2} Файкин Г.М., ² Медведев А.И.

¹ Московский государственный университет, Российская федерация, Москва, территория Ленинские Горы, 1, с. 12, 119234

² Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ, Российская федерация, Москва, ул. Ленинские Горы, д.1 стр.4, 119992

E-mail: s.shangareeva@rcc.msu.ru, stepanen@srcc.msu.ru, Egorc16@mail.ru, alexbear95@yandex.ru

Application of Variational Data Assimilation Methods to Carbon Cycle Models

^{1,2} Shangareeva S.K., ² Stepanenko V.M., ^{1,2} Faykin G.M., ² Medvedev A.I.

¹ Moscow State University, Russian Federation, Moscow, Leninskie Gory territory, 1, b. 12, 119234; Research Computing Center of Moscow State University

² Research Computing Center of Moscow State University, Russian Federation, Moscow, st. Leninskie Gory, 1 building 4, 119992

В работе рассматривается применение вариационного метода 4D-Var для идентификации параметров моделей, описывающих динамику пулов углерода, а также для определения начальных условий. В методе 4D-Var минимизируется функционал, включающий отклонения от априорной оценки параметров и наблюдений:

$$J(\theta) = \frac{1}{2}(\theta - \theta_b)^T B^{-1}(\theta - \theta_b) + \frac{1}{2} \int_{t=0}^T (HC(t, \theta) - y^{obs}(t))^T R^{-1}(HC(t, \theta) - y^{obs}(t)) dt,$$

здесь C – концентрация углерода в пулах, θ – вектор параметров, θ_b – начальное приближение, B – ковариационная матрица ошибок априорного поля, R – ковариационная матрица ошибок данных наблюдений, H – оператор наблюдения. Минимизация функционала происходит посредством модифицированного метода градиентного спуска: Adagrad [1], градиент функционала ищется с помощью сопряженной модели [2]. Для оценки неопределенности параметров далее ищется апостериорная ковариационная матрица ошибок, которая совпадает с обратным гессианом в точке оптимального решения [3].

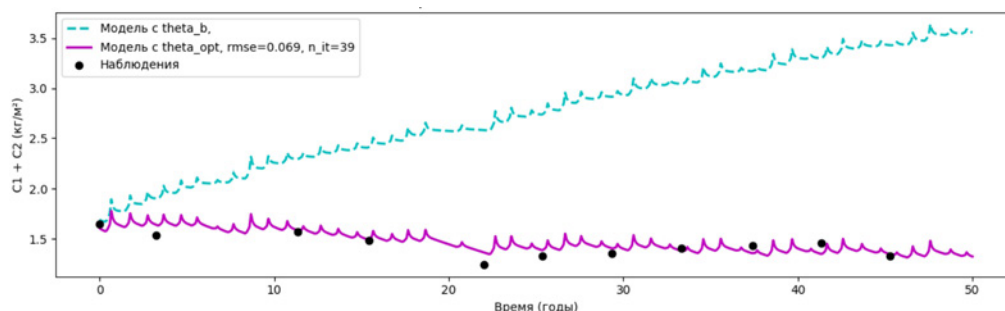


Рисунок 1 – Сравнение моделируемого содержания углерода в почве и данных наблюдений.

На рисунке 1 показаны результаты применения усвоения данных измерения содержания углерода в почве к модели SOCS [4] на станции во Владимирской области.

Литература:

1. Lewis J. M., Derber J. C. The use of adjoint equations to solve a variational adjustment problem with advective constraints // Tellus A. – 1985. – Т. 37. – №. 4. – С. 309-322.
2. Duchi J., Hazan E., Singer Y. Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization // Journal of machine learning research. – 2011. – Т. 12. – №. 7.
3. Шутяев В. П. Методы усвоения данных наблюдений в задачах физики атмосферы и океана // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 55. – №. 1. – С. 17-34.
4. Рыжова И. М. Анализ динамики органического вещества почв на основе минимальных моделей круговорота углерода // Почвы-стратегический ресурс России: тезисы докладов VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв (Сыктывкар, 2020-2022 гг.). Часть 2. – Москва-Сыктывкар: ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2021. – с.130-131.

Совместное влияние осадков и скорости ветра на возникновение ветровалов в лесной зоне России

^{1,2} Шихов А.Н., ^{2,3} Чернокульский А.В.

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614068, г. Пермь, Россия

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 119017, г. Москва, пер. Пыжевский, д. 3

³ Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный переулок, дом 29, стр. 4

E-mail: and3131@inbox.ru, a.chernokulsky@ifaran.ru

Combined effect of precipitation and wind speed on the windthrow events occurrence in the Russian forest zone

^{1,2} Shikhov A.N., ^{2,3} Chernokulsky A.V.

¹ Perm State University, 614068, Perm, Russia

² A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 119017, Moscow, Pyzhevsky per. 3

³ Institute of Geography RAS, 119017, Moscow, Staromonetny per., 29, p. 4

Одним из факторов, благоприятствующих возникновению масштабных ветровалов, является сочетание сильного ветра и интенсивных осадков. Для выявления возможного влияния осадков на возникновение ветровалов на основе базы данных (Шихов и др., 2023) была сформирована выборка случаев шквалов, зафиксированных метеостанциями в лесной зоне России, которые сопровождалась или не сопровождалась ветровалами. В качестве одного случая рассматривается одно сообщение метеостанции о порывах ветра в срок или между сроками по данным стандартных трехчасовых наблюдений. Выборка включает 117 случаев шквалов без ветровала, которые собраны на основе сообщений метеостанций о порывах ветра ≥ 25 м/с за период с 2000 по 2024 гг. Доля площади леса в радиусе 25 км от метеостанции во всех случаях составляет не менее 25%. Также в выборку включены 173 случая с ветровалами. В 118 случаев метеостанция располагалась на траектории смещения шторма (расстояние от метеостанции до ветровала до 80 км), в 26 случаях – слева и в 29 случаях – справа от траектории смещения шторма (расстояние от метеостанции до ветровала до 30 км). Для всех случаев в выборке определены скорость порывов ветра и количество осадков за 12 ч на метеостанции, доля лесопокрытой площади и доля площади 4-х разных типов леса (темнохвойных, сосновых, смешанных и лиственных) в радиусе 25 км от метеостанции, согласно Карте растительности России (Барталев и др., 2016). Из выборки исключены случаи, связанные с ветрами неконвективной природы (когда по данным метеостанций не отмечались грозы или ливневые осадки, и усиление ветра было обусловлено увеличением барического градиента). Также исключены два подтвержденных случая прохождения смерчей над метеостанциями.

Установлено, что распределение осадков в случаях с ветровалами и без ветровалов согласно K-S тесту различается статистически значимо. Для группы 1 (шквалы без ветровалов) характерна высокая доля случаев со слабыми осадками ≤ 3 мм или вообще без осадков (24%). В случаях с ветровалами слабыми осадками (≤ 3 мм) сопровождалась всего 13% случаев, а преобладали умеренные или сильные осадки от 10 до 30 мм (на них приходится примерно 50%). В то же время в случаях без ветровалов выше доля очень сильных осадков (30 мм и более) – на них приходится 12% случаев, тогда как среди случаев с ветровалами таких чуть более 10%. Аналогичные зависимости выявлены и для суточных сумм осадков по данным IMERG.

Выявлено статистически значимое различие между распределением дат возникновения случаев шквалов с ветровалами и без них. Случаи с ветровалами имеют максимум повторяемости в середине лета, а случаи без ветровалов – в третьей декаде мая. Такое распределение может быть связано как с отсутствием в мае листвы на деревьях (что существенно уменьшает ветровое давление), так и с меньшей интенсивностью осадков при шквалах в мае в сравнении со шквалами в летний период. Так, среднее количество осадков при шквалах в апреле-мае (49 случаев) составляет 10,3 мм, а в остальной части выборки (июнь-сентябрь) – 15,3 мм. Различие является статистически значимым.

Литература:

1. Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Калинин Н.А., Пьянков С.В. Ветровалы в лесной зоне России и условия их возникновения. Пермь, Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. 284 с.

Генерализация шестиугольных дискретных сеточных моделей направлений стока

¹ Шурыгина А.А., ^{1,2} Самсонов Т.Е.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

² ФГБУ «Гидрометцентр России»

E-mail: ashurygina@geogr.msu.ru, tsamsonov@geogr.msu.ru

Generalization of hexagonal discrete grid models of flow directions

¹ Shurygina A.A., ^{1,2} Samsonov T.E.

¹ Lomonosov Moscow State University

² Hydrometcenter of Russia

В науках о Земле востребована модель направлений поверхностного стока, получаемая на основе алгоритмов маршрутизации потоков (англ. flow-routing algorithms). Модели направлений стока, как правило, рассчитывают на регулярной квадратной сетке в системе плоских прямоугольных координат по данным цифровых моделей рельефа для крупных масштабов. Для мелких масштабов используют генерализацию, и направления стока связывают с сеткой сфероидических трапеций, образованных линиями сетки географических координат. Неправильность формы её ячеек может вносить искажения в модели изучаемых параметров.

Учесть данный фактор возможно, используя дискретные глобальные сеточные системы (ДГСС, англ. Discrete Global Grid Systems, DGGS), как основу моделирования. ДГСС представляют собой математически определённое, иерархическое разбиение поверхности Земли на ячейки равной формы и площади, а также систему навигации по ним. Несмотря на то, что разбиение определено для всего земного шара, в задачах может быть использован любой его фрагмент. В этом случае систему сеток корректнее называть не глобальной, а, например, крупнорегиональной. ДГСС рассматривается как структура пространственных данных, тогда как данные, организованные в соответствии с этой структурой, будем называть дискретной глобальной (крупнорегиональной) сеточной моделью.

В контексте гидрологического анализа всё чаще используются шестиугольные ДГСС. Для них адаптированы алгоритмы вычисления базовых параметров, разработанные для квадратных сеток: направления стока, водосборные бассейны, водосборная площадь, линии водоразделов, структура речной сети. Однако работы по генерализации направлений стока отсутствуют.

В предыдущем исследовании авторов была разработана методика параллельного расчёта направлений стока на ДГСС НЗ для фрагментов крупной территории с последующим объединением результатов. Был получен набор данных на территорию Африки на шестиугольной сетке с диаметром ячеек около 1 км. В текущей работе были адаптированы алгоритмы генерализации, разработанные для прямоугольных сеток, и получены разномасштабные наборы данных на шестиугольных сетках с диаметрами ячеек 2,5; 6,5; 17; 45 и 120 км. Размеры продиктованы доступными разрешениями ДГСС НЗ. Были использованы следующие алгоритмы: COTAT, NSA и VVRFRA.

Пространственная точность полученных результатов оценивалась традиционными для данной области методами и вновь разработанным авторами. К первым относятся визуальное сравнение направлений с глобальным набором данных HydroSHEDS; вычисление водосборных площадей для ключевых точек, сравнение длин водотоков и распределений направлений течения сегментов относительно крупномасштабного набора данных. В авторской методике для каждой мелкомасштабной ячейки направление стока считается корректным, если сток из неё попадает в какую-либо из ячеек, пройденных водоток исходного крупного масштаба ниже по течению. Точность всей модели направлений стока рассчитывается как доля ячеек с корректным направлением, при этом данный показатель может быть вычислен для водотоков заданного и более высокого порядка. В отличие от ранее предложенных подходов, данная метрика позволяет оценить точность воспроизведения основных направлений стока в рамках всей территории, что способствует более ясной географической интерпретации результатов их генерализации. Кроме того, проведено сравнение геометрической схожести линий потенциальных водотоков, полученных по прямоугольным сеткам, шестиугольным и по данным HydroSHEDS.

Выполненная работа показала возможность создания разномасштабных наборов данных направлений поверхностного стока внутри иерархической системы шестиугольных сеток при помощи алгоритмов генерализации – дискретной сеточной модели направлений стока на примере Африки. Комплексная верификация результатов позволила сделать выводы о систематически более точной работе метода COTAT и более точной геометрической составляющей потенциальных водотоков при их моделировании на шестиугольных сетках с равновеликими ячейками, чем на сетках, образованных линиями географических координат.

СЕКЦИЯ IV

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЁВ

Численное моделирование сезонного ледового режима Рыбинского водохранилища

^{1,3,6,7} Ахтамьянов Р.А., ^{1,2,3} Гладских Д.С., ^{1,3,4} Мортиков Е.В., ^{1,5,6} Ломов В.А.¹ Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ² Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН³ Московский центр фундаментальной и прикладной математики⁴ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН⁵ Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН⁶ Географический факультет МГУ⁷ Гидрометцентр РФE-mail: ramil.rgk@gmail.com, daria.gladskikh@gmail.com, evgeny.mortikov@gmail.com, lomson620@mail.ru

Numerical modeling of seasonal ice regime of Rybinsk reservoir

^{1,3,6,7} Ahtamyanov R.A., ^{1,2,3} Gladskikh D.S., ^{1,3,4} Mortikov E.V., ^{1,5,6} Lomov V.A.¹ Research Computing Center of Moscow State University² Institute of Applied Physics n.a. A.V. Gaponov-Grekhov RAS³ Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics⁴ Institute of Numerical Mathematics n.a. G.I. Marchuk RAS⁵ Institute of Atmospheric Physics n.a. A. M. Obukhov RAS⁶ Faculty of Geography of Moscow State University⁷ Hydrometeorological Center of the Russian Federation

Озера и водохранилища являются важными объектами исследований в области климатологии и гидрофизики. Особый интерес представляет изучение сезонного ледового режима внутренних водоемов, который оказывает значительное влияние на термическую структуру и биохимические процессы, а также является чувствительным индикатором изменений климата.

Рыбинское водохранилище расположено в центральной части Европейской территории России, занимая площадь 4550 км² при среднем уровне воды. Средняя глубина водоема составляет 5,6 м, максимальная – 30 м. Ледообразование на водохранилище начинается в середине ноября и завершается в середине апреля. Изучение ледового режима водохранилища проводилось на основе данных натурных измерений толщины и структуры льда и снега, а также спутниковых изображений, полученных в 2022 году. Толщина льда в январе варьировалась в пределах 30–40 см, достигая более 60 см в отдельных районах в апреле.

В работе использована трехмерная численная модель термогидродинамики внутренних водоемов, разработанная на основе единого гидродинамического кода НИВЦ МГУ, реализующего различные подходы (DNS, LES, RANS) к описанию турбулентных процессов с высоким пространственным и временным разрешением [1-2]. В модель внедрено упрощенное описание термодинамики льда и снега, учитывающее перенос тепла в трех сопряженных слоях: прозрачном («голубом») льду, снежном («белом») льду и снеге.

Численные эксперименты охватывали период с мая 2021 г. по январь 2023 г. Метеорологические условия задавались по данным реанализа ERA5Land. Полученные результаты моделирования продемонстрировали хорошее соответствие с натурными измерениями и спутниковыми наблюдениями. Таким образом, предложенная модель термодинамики льда и снега может быть успешно использована для долгосрочных исследований ледового режима внутренних водоемов и оценки их роли в климатических и погодных процессах.

■ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-77-01032.

Литература:

1. Гладских Д.С., Степаненко В.М., Мортиков Е.М. О влиянии горизонтальных размеров внутренних водоемов на толщину верхнего перемешанного слоя. // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 2. С. 155-163.
2. Gladskikh D., Ostrovsky L., Troitskaya Y, Soustova I, Mortikov E. Turbulent Transport in a Stratified Shear Flow // J. Mar. Sci. Eng. 2023. V. 11(1). P. 136.

Тензор турбулентного обмена в пограничном слое атмосферы. Решение обратной задачи

^{1,2} Гордин В.А., ¹ Ефременко Д.С.

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» Москва, Покровский бульвар 11

² Федеральное государственное бюджетное учреждение Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, 123376, Россия, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.13, строение 1
E-mail: vagordin@mail.ru, efremenkods@gmail.com

The tensor of turbulent exchange in the boundary layer of the atmosphere.

The inverse problem solution

^{1,2} Gordin V.A., ¹ Efremenko D.

¹ National Research University «Higher School of Economics, Pokrovsky Bulvar, Moscow, 109028, Russia

² Hydrometeorological Research Center of Russian Federation (Hydrometcenter of Russia), 13, building 1, Bolshoy Predtechensky lane, Moscow, 123376, Russia

Использовались данные измерений радиозондов с высоким разрешением по вертикали. Мы решаем обратную задачу о восстановлении тензора турбулентного обмена по данным о ветре для модели Акерблома – Экмана. Для аппроксимации используется компактная разностная схема и сплайн-аппроксимация. Получен тензор, который обеспечивает наилучшее согласование с архивом данных наблюдений. При сохранении инвариантности тензора относительно вращений в горизонтальной плоскости он содержит не одну (как в классической модели А.-Э.), а две функциональные степени свободы. Это принципиальное изменение модели турбулентности пограничного слоя, и оно позволяет существенно улучшить согласование модели с реальными данными. Оптимальный тензор существенно зависит от разности температур на границах пограничного слоя. Работа выполнена в рамках темы 125032004255-7 по заданию Росгидромета

Литература:

1. Ph.Bykov, V.A.Gordin. Complex turbulent exchange coefficient in Akerblom–Ekman model. Journal of Inverse and Ill-posed Problems, vol. 32, no. 2, 2024, pp. 199-211.

Об определении распределения источников двуокиси азота в тропосфере по измерениям КА серии Ресурс-П

^{1,2} Христова А.С., ¹ Постыляков О.В., ^{1,2} Чуличков А.И., ¹ Боровский А.Н., ² Мухартова Ю.В.

¹ ИФА им.А.М. Обухова РАН

² МГУ им.М.В. Ломоносова

E-mail: khristova.as19@physics.msu.ru, oleg.postylyakov@gmail.com

On the determination of the distribution of nitrogen dioxide sources in the troposphere based on measurements by the Resurs-P series spacecraft

^{1,2} Khristova A.S., ¹ Postylyakov O.V., ^{1,2} Chulichkov A.I., ¹ Borovsky A.N., ² Mukhartova Yu.V.

¹ A.M. Obukhov IAP RAS

² M.V. Lomonosov MSU

Семейство окислов азота ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) играет главную роль в разрушении озона в стратосфере и его образовании в тропосфере. С 2013 года работает серия российских спутников Ресурс-П. Гиперспектральная аппаратура (ГСА), установленная на борту Ресурс-П, регистрирует рассеянное солнечное излучение в спектральном диапазоне 430–520 нм, который используется для определения содержания в атмосфере такой примеси как диоксид азота. Мы разработали метод определения 2D поля содержания NO_2 по измерениям ГСА Ресурс-П, который позволяет получить содержание NO_2 с пространственным разрешением около 2.4 км при типичной для космических измерений точности 1.0×10^{15} молек/см² на сетке представления данных 120 м [1], что превышает пространственное разрешение других современных спутниковых инструментов. Его использование позволило в 2016 году впервые выявить точечные антропогенные источники примеси масштаба предприятия по измерениям из космоса [1].

Для определения распределения источников, создающих наблюдаемое 2D поле содержания NO_2 , мы рассмотрели несколько методов. Они используют химико-транспортная модель с высоким пространственным разрешением [2].

В первом случае для оценки поля распределения источников мы использовали методы восстановления изображений. В некотором приближении поле распределения NO_2 $g(x,y)$ в пространстве координат (x,y) хорошо представимо в виде свертки: $g(x,y) = (k*f)(x,y) + v(x,y)$, – функции распределения источников $f(x,y)$ и шлейфа $k(x,y)$ точечного стационарного источника загрязнения, искаженных шумом v . В этом случае для оценки $\hat{f}$ фурье-образа $\hat{f}$ функции f можно использовать деконволюцию Винера: $\frac{\hat{k}^*}{\hat{k}^* \hat{k} + \lambda^2 I} \hat{g}$. Здесь $\hat{k}, \hat{g}$ – фурье-образы функций k, g ; а λ – параметр.

Второй рассмотренный метод – метод квадратичного программирования с ограничением в виде положительности оценки распределения источников $\hat{f}$. Данный алгоритм реализован на основе итерационного метода проекции градиента.

В докладе приводятся результаты восстановления распределения источников NO_2 , получаемые с применением разработанных методов.

Литература:

- Postylyakov, O.V., A.N. Borovski, A.A. Makarenkov. First experiment on retrieval of tropospheric NO_2 over polluted areas with 2.4-km spatial resolution basing on satellite spectral measurements, Proc. SPIE, 10466, 104662Y-8 (2017); <https://doi.org/10.1117/12.2285794>.
- Мухартова Ю.В., Пашенцева Е.В., Мортиков Е.В., Постыляков О.В. Моделирование переноса окислов азота с учетом химических трансформаций с помощью RANS и LES моделей// ENVIRO-MIS 2024. 1-6 июля 2024.

Особенности временных вариаций среднемесячных значений температуры по данным обсерватории Хойнпейсенберг

Рябова С.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, 119334, г. Москва, Ленинский проспект, дом 38, корпус 1
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, 123242, г. Москва, Гruzинская Б., 10 стр. 1

Features of temporal variations of monthly average temperature values according to the Hohenpeissenberg Observatory data

Riabova S.A.

Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS
Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS

The analysis of the temporal dynamics of average monthly air temperature values is carried out based on instrumental observations of temperature variations at the Hohenpeissenberg observatory, which is the world's oldest mountain observatory.

The study also involved instrumental observations of temperature variations at the Hohenpeissenberg observatory, located at an altitude of 977 m on Mount Hohenpeissenberg, approximately 20 kilometers from the foot of the Alps. Geographical coordinates: 47°48'06" N, 11°00'42" E. The average monthly temperature values for the period from January 1900 to December 2024 were considered.

The trend component of temporal variations in air temperature was extracted by one of the well-proven methods for extracting the trend component – SSA method. Based on the average monthly air temperature values, the arithmetic mean values were calculated for the month over the selected time interval. In addition, the standard deviation (SD) was calculated.

The study of the variations in the trend component calculated using the singular spectrum analysis method showed that the rate of temperature increase has increased significantly since 1969.

The seasonal variation of air temperature at the Hohenpeissenberg observatory for the entire observation period from 1901 to 2024, for the period from 1969 to 2024, and for the period from 1901 to 1968 were researched. The temperature time series exhibit periodic variations that are associated with the annual seasonal cycle. The maximum seasonal temperature variation is observed in the period from 1969 to 2024. The minimum values of average monthly temperature correspond to the period from 1901 to 1968. For all considered intervals, the warmest month is July: 19.3 °C (1901–1968), 20.38 °C (1901–2024), 19.78 °C (1901–2024). For all considered intervals, the coldest month is January: 0.77 °C (1901–1968), 2.18 °C (1901–2024), 1.41 °C (1901–2024).

The analysis of anomalies of the average annual temperature at the Hohenpeissenberg observatory from 1901 to 2024 relative to the base period from 1961 to 1990 (the average for this thirty-year interval is approximately 10.24 °C) shows a significant increase in temperature compared to the base period since the 1970s. The maximum increase compared to the base period was observed in 2024 and amounted to 3.40 °C. The average value for the period 1901 to 1931 is 9.77 °C, from 1971 to 2000 is 10.47 °C, from 1981 to 2010 is 10.92 °C, from 1991 to 2020 is 11.50 °C. Thus, the difference between the earliest and latest 30-year episode is 1.73 °C. The linear trend over the period 1901 to 2024 is about 2.46 °C, but in the last decade (2014 to 2024), the temperature was mostly above the trend line.

- The research was carried out within the framework of the state assignment of the Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences «Transformation of geophysical fields as the main factor of intergeospheric interactions» (No. 125012700798-8) and within the framework of the state assignment of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.

Аномалии геомагнитного поля в Московском регионе перед холодным атмосферным фронтом циклона с центром над Балтийским морем 21 ноября 2024 года

Рябова С.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, 119334, г. Москва, Ленинский проспект, дом 38, корпус 1
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, 123242, г. Москва, Грузинская Б., 10 стр. 1

Geomagnetic field anomalies in the Moscow region ahead of a cold atmospheric cyclone front centered over the Baltic Sea on November 21, 2024

Riabova S.A.

Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS
Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS

Currently more frequent dangerous atmospheric phenomena such as hurricanes, hail, lightning, storms, tornadoes, etc., in most cases occur in the cold frontal zone of cyclones. A cold front is formed when a cold air mass moves toward a warm air mass. In this case, cold advection occurs. A cold air mass comes after the cold front. The nature of the weather on a cold front varies significantly depending on the speed of the front's displacement, the properties of the warm air ahead of the front, and the nature of the ascending movements of warm air over the wedge of cold air.

Based on the analysis of the results of instrumental observations, magnetic field disturbances over the Moscow region are identified that were observed ahead of the cold atmospheric front of the cyclone centered over the Baltic Sea on November 21, 2024.

The initial data used were the results of observations of variations in meteorological parameters carried out at the Center for Geophysical Monitoring Moscow of Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, the results of observations of variations in meteorological parameters carried out at the Moscow Observatory of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation, Russian Academy of Sciences, as well as the results of observations of variations in the Earth's magnetic field (GC RAS) and meteorological parameters carried out at the Mikhnevo Geophysical Observatory of Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences.

Analysis of time variations and the results of spectral analysis based on the wavelet transform indicate that variations in the Earth's magnetic field are observed before the cold front on November 21, 2024, the frequency range of which corresponds to the range of atmospheric internal gravity waves (IGW). If we involve the dispersion relation for IGW and take into account the conditions for the ionospheric heights $k_z 2H \gg 1$ and $k_z^2 \gg k_x^2$, we obtain for the group velocity $c_{grx} \approx \frac{\omega_g}{k_z} = \frac{1}{T_g} 2H \approx \frac{12 \text{ km}}{5 \text{ min}}$, which is less than the speed of advance of the atmospheric cold front (50–60 km/h). During the analysis of geomagnetic disturbances, it was established that the low-frequency part of the geomagnetic disturbances arrives earlier than the high-frequency part. If we use the dispersion relation for IGW and take into account the conditions for the ionospheric heights $k_z 2H \gg 1$ and $k_z^2 \gg k_x^2$, we obtain $c_{grx} = \frac{d\omega}{dk_x} \approx \frac{k_x \omega_g^2}{k_z^2 \omega}$ i.e. an inverse dependence on the wave frequency is observed.

- The research was carried out within the framework of the state assignment of the Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences «Transformation of geophysical fields as the main factor of intergeospheric interactions» (No. 125012700798-8) and within the framework of the state assignment of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.

Сравнение данных вихреразрешающего моделирования с измерениями пульсаций метеопараметров внутри и над городской застройкой

¹ Пашкин А.Д., ^{3,4,1} Мортиков Е.В., ^{1,3,4} Репина И.А., ^{2,3} Богомолов В.Ю., ^{2,3} Тельминов А.Е.,
² Смирнов С.В.

¹ Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, г. Москва

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

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

⁴ Московский центр фундаментальной и прикладной математики, г. Москва

E-mail: artemp@ifaran.ru

Comparison of the data from large eddy simulation with measurements of the meteorological parameters pulsation inside and above the urban canopy

¹ Pashkin A.D., ^{3,4,1} Mortikov E.V., ^{1,3,4} Repina I.A., ^{2,3} Bogomolov V.Yu., ^{2,3} Telminov A.E.,
² Smirnov S.V.

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

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

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

⁴ Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Russia, Moscow

Моделирование турбулентности осуществлялось с помощью вихреразрешающей модели, разрабатываемой в Научно-исследовательском вычислительном центре МГУ им. М.В. Ломоносова. Измерения проводились в Геофизической обсерватории Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ГО ИМКЭС СО РАН), г. Томск.

Для численных экспериментов с реалистичной застройкой были уточнены данные по высотности зданий и растительности в области ГО ИМКЭС СО РАН для использования в LES модели. Создана растровая карта высот с необходимым для конкретного эксперимента пространственным разрешением.

В численных экспериментах задавалось предписанное распределение скорости ветра на западной границе области. На восточной границе использовались выходные граничные условия: для расчета граничных значений скорости ветра использовалась вспомогательная конфигурация модели, в которой рассматривалось течение над плоской поверхностью при предписанном внешнем градиенте давления. Данные вспомогательного расчета передаются с помощью библиотеки MPI в основную расчетную область, включающую область застройки ИМКЭС СО РАН, непосредственно во время выполнения расчетов. Шаг сетки модели составлял 1 м по вертикали и горизонтали.

На площадке обсерватории выбраны точки измерений, находящиеся внутри и над застройкой. Для проведения сравнений с данными измерений в этих точках с результатами вихреразрешающего моделирования в LES модели реализована возможность расчета совместных функций распределения по временным рядам в отдельных точках. Представлены результаты сравнения данных нескольких приборов из измерительной системы, состоящей из 8 акустических анемометров АМК-03, которые позволяют измерять пульсации трех компонент скорости ветра и температуры с частотой до 80 Гц, производства ИМКЭС СО РАН совместно с ООО «Сибаналитприбор». Для сравнения отобраны данные измерений, полученные в метеоусловиях, схожих с численными постановками. Проведено сравнение средних значений и пульсационных характеристик компонент скорости ветра и температуры с данными вихреразрешающего моделирования.

- Калибровка и подготовка измерительной аппаратуры выполнена по госзаданию ИМКЭС СО РАН (проект FWRG-2021-0006). Измерения и моделирование проведены при поддержке РНФ 24-17-00155. Анализ данных измерений выполнен при поддержке темы государственного задания ИФА им. А.М. Обухова РАН (Диагноз и моделирование процессов взаимодействия пограничных слоев атмосферы и гидросферы, 125020501524-9).

Применение нейронной сети для расчёта турбулентных потоков в приземном слое атмосферы

¹ Шишков Е. Н., ² Мортиков Е. В., ² Дебольский А. В., ² Бычкова В. И.

¹ Механико-математический факультет, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Научно-исследовательский вычислительный центр, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: shishkovv17_e@mail.ru

Application of neural networks for calculating turbulent fluxes in the atmospheric surface layer

¹ Shishkov E.N., ² Mortikov E.V., ² Debolskiy A.V., ² Bychkova V.I.

¹ Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

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

В пограничных слоях атмосферы турбулентные потоки тепла и импульса играют важнейшую роль в формировании глобального и регионального климата, оказывая значительное влияние на процессы, такие как таяние морского льда, циркуляцию атмосферы и взаимодействие с подстилающей поверхностью.

Традиционные методы, основанные на теории подобия Монина-Обухова (ТПМО) или её обобщениях, широко применяются в современных численных моделях погоды и климата, однако их ограниченность становится особенно явной в экстремальных условиях, например в полярных регионах. ТПМО предполагает существование слоя постоянных потоков, в котором безразмерные градиенты скорости ветра, температуры и влажности зависят от отношения высоты над поверхностью к характерному масштабу длины Обухова, отражающего устойчивость атмосферы. Это предположение оказывается неверным в условиях тонкого пограничного слоя (около 10–100 метров). Кроме того, ТПМО не учитывает неградиентный перенос, характерный для дневного конвективного пограничного слоя, а также не учитывает влияние рельефа и термической неоднородности, что приводит к систематическим ошибкам в оценке турбулентных потоков и увеличивает неопределенности в климатических прогнозах.

В докладе обсуждается применение алгоритма на основе нейронной сети, способного учитывать сложные нелинейные взаимосвязи между метеорологическими параметрами и компенсировать ограничения известных полуэмпирических подходов. Модель обучается на обширных наборах данных, полученных в результате полевых экспериментов (MOSAIC, SHEBA и других), что позволяет не только восстановить общий тренд, но и точно воспроизводить амплитуду турбулентных потоков даже в условиях сильной устойчивости. Полученные результаты демонстрируют значительное улучшение точности расчетов по сравнению с методами, основанными на ТПМО, что открывает перспективы для интеграции машинного обучения в современные численные модели турбулентных потоков и повышения надежности прогнозов в сложных метеорологических условиях.

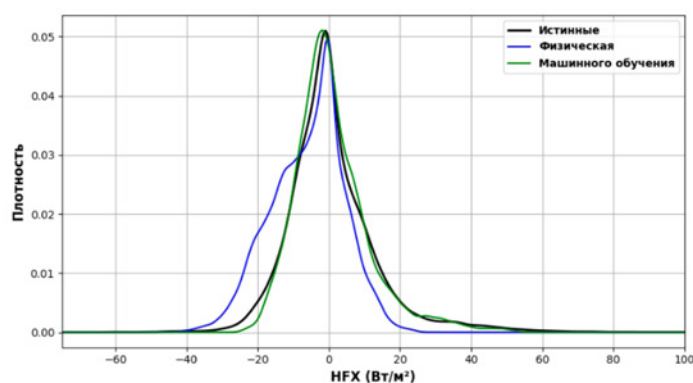


График сравнения плотности распределения потока тепла, рассчитанного с помощью модели, основанной на ТПМО, и модели машинного обучения

Параметризации процессов энерго- и газообмена для водоемов суши

Репина И.А.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер. 3-1

Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова

E-mail: repina@ifaran.ru

Parameterization of energy and gas exchange processes for land water bodies

Repina I.

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Pyzhevski 3-1, Moscow, 119017

Research Computing Center of Lomonosov Moscow State University, Moscow

Обменные процессы на границе раздела вода-воздух являются ключевым фактором гидродинамических и экологических процессов в водных экосистемах и основой формирования погоды и климата. Они ответственны за образование течений, поверхностных волн и турбулентного перемешивания, которое напрямую влияет на перенос примесей, характеристики стратификации, кислородный режим и газообмен. Основными характеристиками взаимодействия являются вертикальные турбулентные потоки импульса, тепла и влаги (явного и скрытого тепла). Знание о величинах этих потоков необходимо для численного прогноза погоды, в моделях Земной системы, для интерпретации данных дистанционного зондирования и в других геофизических приложениях.

Турбулентность играет весьма значительную и многообразную роль в физических процессах, определяющих режим приземного и пограничного слоев атмосферы. Любая модель пограничного слоя атмосферы должна учитывать ряд основных характеристик турбулентности, таких как турбулентный перенос тепла, влаги (скрытого тепла) и количества движения. Практически во всей толще пограничного слоя, где эффекты молекулярного обмена пренебрежимо малы по сравнению с вертикальным турбулентным переносом импульса, тепла и влаги, эти величины характеризуют полные потоки, пересекающие подстилающую поверхность.

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

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

Пресные воды суши, при относительно небольшой площади покрытия, вносят непропорционально большой вклад в выбросы парниковых газов. Потоки парниковых газов из неглубоких озер, рек и особенно водохранилищ могут иметь серьезные последствия для глобального углеродного цикла в условиях современных изменений климата.

В работе из экспериментальных измерений характеристик атмосферной турбулентности получены параметризации для расчета коэффициентов обмена, динамического параметра шероховатости и параметров шероховатости для температуры и влажности для озер и водохранилищ. Рассматриваются параметризации скорости газообмена для небольших озер и рек.

Исследование температурного режима и горизонтальной неоднородности в Рыбинском водохранилище в период открытой воды с использованием трехмерного математического моделирования

^{1,2,3} Гладских Д.С., ^{4,1,5} Ломов В.А., ^{1,3,4,6} Ахтамьянов Р.А., ^{1,3,7} Мортиков Е.В., ⁸ Законнова А.В.,
⁸ Лазарева В.И.

¹ Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ

² Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

³ Московский центр фундаментальной и прикладной математики

⁴ Географический факультет МГУ

⁵ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

⁶ Гидрометцентр РФ

⁷ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

⁸ Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

E-mail: daria.gladskih@gmail.com, lomson620@mail.ru, ramil.rgk@gmail.com,
evgeny.mortikov@gmail.com, zak@ibi.ru, lazareva_v57@mail.ru

Study of temperature regime and horizontal heterogeneity in the Rybinsk reservoir during the open water period using three-dimensional mathematical modeling

^{1,2,3} Gladskih D.S., ^{1,5,6} Lomov V.A., ^{1,3,6,7} Ahtamyanov R.A., ^{1,3,4} Mortikov E.V., ⁸ Zakonnovs A.V.,
⁸ Lazareva V.I.

¹ Research Computing Center of Lomonosov Moscow State University

² A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS

³ Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics

⁴ Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University

⁵ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS

⁶ Hydrometeorological Center of the Russian Federation

⁷ Marchuk Institute of Numerical Mathematics

⁸ Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS

В работе представлено исследование температурного режима Рыбинского водохранилища с использованием трехмерной численной модели и комплексного набора данных натурных измерений. Объект исследования представляет собой искусственный водоем с достаточно сложной термической структурой. В качестве основного инструмента исследования авторами использовалась трехмерная модель внутреннего водоема, созданная на основе единого гидродинамического кода НИВЦ МГУ, объединяющего DNS, LES, RANS подходы для описания турбулентных течений в высоком пространственном и временном разрешении [1-5]. Полученные в рамках измерительных кампаний профили распределения характеристик водной толщи по глубине на разных участках водохранилища были использованы для разработки трехмерной конфигурации модели, соответствующей условиям Рыбинского водохранилища, а также для оценки результатов, полученных с помощью созданных конфигураций.

В рамках исследования использовались две конфигурации модели: первая подразумевала максимально детальное воспроизведение структуры Рыбинского водохранилища с учетом рельефа дна и перемешивания за счет сейшевых колебаниями, во второй, упрощенной конфигурации рассматривалась постановка, соответствующая одномерной модели, а члены, отвечающие за горизонтальные эффекты, осреднялись.

Показано, что одномерное моделирование без параметризации эффектов, связанных с горизонтальным переносом и, в частности, сейшевыми колебаниями, не позволяет корректно воспроизводить процессы перемешивания, что приводит к занижению толщины эпимниона и ошибкам в распределении температуры. Трехмерная модель также учитывает вертикальные «ветви» циркуляционной ячейки, роль которых заключается в передаче импульса и тепла между верхней и нижней границами перемешанного слоя, тем самым воспроизводя перемешивание корректной интенсивности.

Для изучения горизонтальной неоднородности в различных точках Рыбинского водохранилища были выбраны три станции наблюдений и проведено сравнение модельных результатов, полученных в двух конфигурациях, с измеренными профилями. Для количественной оценки результатов использовались статистические показатели, подтвердившие обоснованность использования трехмерного моделирования для водного объекта, характеризующегося высокой пространственной неоднородностью.

Подводя итог сопоставления результатов моделирования и данных измерений, выявлено, что трехмерная модель в полной конфигурации способна достаточно корректно воспроизводить термическую структуру Рыбинского водохранилища, в том числе, в условиях высокой пространственной неоднородности. Показано хорошее согласие результатов с натурными измерениями как в период устойчивой стратификации, так в условиях гомотермии. Использование упрощенной конфигурации, соответствующей одномерной постановке, занижает интенсивность перемешивания и не учитывает влияние сейш. Таким образом, можно заключить, что построение достаточно точной одномерной модели для Рыбинского водохранилища возможно, но с параметризациями горизонтального переноса и поправками на турбулентный обмен.

Предложенная в работе конфигурация численной модели Рыбинского водохранилища может быть использована при дальнейших исследованиях биохимических процессов в водоеме, в том числе, для оценок эмиссии метана.

- Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российского научного фонда № 23-77-01032.

Литература:

1. Gladskikh D. S., Mortikov E. V. On Parameterization of Dissipative Processes in Turbulent Transport Models for Description of Thermohydrodynamics and Biogeochemistry of Stratified Inland Water Bodies //Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2024. – Т. 60. – №. 3. – С. 286-296.
2. Gladskikh D. et al. Turbulent transport in a stratified shear flow //Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Т. 11. – №. 1. – С. 136.
3. Kadantsev E., Mortikov E., Zilitinkevich S. The resistance law for stably stratified atmospheric planetary boundary layers //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2021. – Т. 147. – №. 737. – С. 2233-2243.
4. Mortikov E. V., Glazunov A. V., Lykosov V. N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations //Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2019. – Т. 34. – №. 2. – С. 119-132.
5. Mortikov E. V. Numerical simulation of the motion of an ice keel in a stratified flow //Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2016. – Т. 52. – С. 108-115.

Учет влияния неоднородности поверхностных волн при расчетах климатической модели

^{1,2} Кузнецова А.М., ² Суязова В.И., ² Мортиков Е.В.

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФРАН), 603950, г. Нижний Новгород, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

² Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 119234 Ленинские Горы ул., д. 1, стр. 4, Москва

E-mail: alexandra@ipfran.ru, er-riad@mail.ru, evgeny.mortikov@gmail.com

Accounting the influence of surface wave heterogeneity in climate model calculations

^{1,2} Kuznetsova A., ² Suyazova V., ² Mortikov E.

¹ Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS)

² Research Computing Center Lomonosov Moscow State University (RCC MSU)

Развитие климатических моделей во многом связано с совершенствованием описания взаимодействия океана и атмосферы. Состояние границы раздела океан-атмосфера определяет механизмы переноса импульса, тепла и веществ между океаном и атмосферой. Важной особенностью переноса импульса, тепла и влаги на границе океан-атмосфера является многофазность этой границы, присутствие в ней пены и брызг. Их влияние становится все существеннее с возрастанием скорости ветра, однако и при умеренных скоростях ветра они могут принести существенный вклад в модель Земной системы.

Кроме того, использование одинаковых параметризаций, определяющих, в частности, потоки импульса, как в открытом океане, так и в прибрежной зоне, неправильно, и ведет к накоплению ошибки при расчете характеристик климата. Дело в том, что близость береговой линии, наличие границы перехода суша–вода влияют на структуру воздушного потока. Пограничный слой формируется над твердой поверхностью берега, а потом «адаптируется» к условиям взволнованной водной поверхности. Кроме того, для прибрежной зоны характерны малые разгоны волн в случае, если ветер дует с берега, что провоцирует более интенсивную передачу энергии от ветра к волнам по сравнению с условиями открытого океана [1]. Также вследствие высокой нелинейности волны в прибрежной зоне характеризуются большей крутизной по сравнению с условиями открытого океана, при которой можно ожидать большее количество обрушений, то есть диссипации волн.

Были проведены предварительные оценки чувствительности модели Земной системы INMCM60 [2] к изменению, во-первых, параметризации аэродинамического сопротивления в прибрежной зоне, во-вторых подстройки коэффициентов переноса тепла и энтальпии в присутствии брызг. Была продемонстрирована чувствительность модели к внесенным изменениям, главным образом, для скорости ветра, что также влияло на расчетную высоту планетарного пограничного слоя. Продemonстрировано влияние на температуру поверхности вблизи прибрежной зоны, меньшее влияние наблюдалось для температуры воздуха.

- Работы по исследованию механизмов переноса импульса, тепла и веществ между океаном и атмосферой поддержаны грантом РНФ № 24-17-00299, работы по исследованию чувствительности модели Земной системы к изменению параметризации прибрежной зоны поддержаны проектом ФНТП № 124042700008-6 «Исследование процессов в геофизических пограничных слоях и создание новых подходов для их параметризации в моделях Земной системы» в рамках мероприятия «Усовершенствование глобальной модели Земной системы мирового уровня для исследовательских целей и сценарного прогнозирования климатических изменений».

Литература:

1. Björkqvist, J.-V., O. Vähä-Piikkiö, V. Alari, A. Kuznetsova, and L. Tuomi. «WAM, SWAN and WAVE-WATCH III in the Finnish archipelago—the effect of spectral performance on bulk wave parameters». *Journal of Operational Oceanography* 13, no. 1 (2020): 55-70.
2. Volodin, E. M. «Simulation of present-day climate with the INMCM60 model». *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 59, no. 1 (2023): 16-22.

Исследование влияния начальных данных моделирования скорости ветра в приводном слое атмосферы на прогноз ветрового волнения в Балтийском море

Марчук Е.А.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 119017, Пыжевский пер., 3, Москва

Точные прогнозы скорости ветра в приморской зоне имеют решающее значение для обеспечения сохранности жилой инфраструктуры, снижения рисков во время экстремальных погодных явлений, а также при производстве ветровой энергетики. Как показали исследования, численные модели прогнозирования погоды, к которым относится модель Weather Research and Forecasting (WRF-ARW), значительно выигрывают при ассимиляции данных наблюдений за ветром в реальном времени, как показали исследования, сосредоточенные на морских и наземных ветровых электростанциях. Прогноз поля ветра важен не только для предсказания погоды, но также и для корректного прогнозирования морского волнения и энергомассообмена между океаном и атмосферой.

В данном исследовании рассматривается процесс усвоения данных наблюдения скорости ветра в мезомасштабной модели WRF-ARW. В качестве данных наблюдений используются скорость и направление ветра, измеренные с помощью акустических анемометров. Приборы располагаются на уровнях 36 м и 54 м на метеовышке, установленной на побережье Балтийского моря в поселке Пионерский на базе учебных практик БФУ им. И. Канта. Наблюдения на вышки ведутся с 2023 года. Для усвоения взяты ежечастные данные.

В дальнейшем улучшенные с помощью усвоения поля скорости ветра модели WRF-ARW будут использованы в качестве начальных данных в модели WW3. Ожидается, что такая модельная связка поможет точнее и эффективнее прогнозировать морское волнение.

- Исследование проводится при поддержке гранта РНФ 241700155.

Моделирование мезомасштабных циркуляций над океаном внутри морских холодных вторжений

¹ Чечин Д.Г., ¹ Шестакова А.А., ² Люпкес К.

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер. 3 стр. 1

² Гельмгольц-центр Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, 27560, Буссештрассе, 24, Бремерхафен, Германия,

E-mail: chechin@ifaran.ru, shestakova@ifaran.ru, christof.luepkes@awi.de

Modelling mesoscale circulations over the ocean in marine cold-air outbreaks

¹ Chechin D.G., ¹ Shestakova A.A., ² Lüpkes C.

¹ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, 119017, Moscow, Russia, Pyzevsky per. 3 build.1

² Helmholtz-Centre Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, 27560, Bussestr. 24, Bremerhaven, Germany

Морские холодные вторжения представляют собой адвекцию холодного воздуха над сравнительно теплой морской поверхностью. Вследствие разности температуры поверхности океана и воздуха потоки тепла на поверхности океана во время холодных вторжений достигают экстремально больших значений. Энергообмен атмосферы и океана также зависит от скорости приводного ветра, которая в основном определяется крупномасштабными синоптическими процессами, но также и мезомасштабными циркуляциями, среди которых выделяются циркуляции ледового бриза, линий конвергенции, роликовые циркуляции и мезомасштабные циклоны.

В работе рассматривается вопрос о воспроизведении мезомасштабных циркуляций с помощью двумерной интегральной модели пограничного слоя, которая представляет собой аналог уравнений мелкой воды. В сравнении с данными наблюдений и результатами более полной трехмерной негидростатической модели, интегральная модель пограничного слоя хорошо описывает рост и прогрев конвективного пограничного слоя, а также влияние связанной с этим бароклинности в пограничном слое на скорость приводного ветра. Вместе с тем, сравнение с трехмерной моделью демонстрирует также недостатки однослойного представления атмосферы. В частности, недоучет динамического взаимодействия перемешанного слоя с вышележащими слоями приводит к завышенному отклику скорости в пограничном слое на прогрев. Частично эти недостатки могут быть учтены с помощью предложенной в работе параметризации для крупномасштабных холодных вторжений. Также в работе рассматривается применимость интегральной модели к воспроизведению линий конвергенции и роликовых циркуляций, и также показано качественное согласие с результатами трехмерной модели.

Можно сделать вывод, что модель перемешанного слоя является полезным приближением, позволяющим качественно объяснить пространственную изменчивость приводной скорости ветра. Вместе с тем, можно также заключить, что для более адекватного воспроизведения циркуляций, связанных с неоднородным прогревом, необходима как минимум двухслойная модель, которая описывает отклик вышележащих слоев атмосферы на процессы в пограничном слое.

- Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 24-17-0015, а также при поддержке темы государственного задания «Диагноз и моделирование процессов взаимодействия пограничных слоев атмосферы и гидросферы» №125020501524-9.

Субмезомасштабные структуры, регистрируемые в устойчивом атмосферном пограничном слое при помощи многоточечных содарных измерений

¹ Зайцева Д.В., ^{1,2} Люлюкин В.С., ¹ Кузнецов Д.Д., ¹ Каллистратова М.А.

¹ ИФА им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3

² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5

E-mail: zaycevad@gmail.com, lyulyukin@ifaran.ru

Submesoscale structures observed in the stable atmospheric boundary layer with the help of multipoint sodar measurements

¹ Zaitseva D.V., ¹ Lyulyukin V.S., ¹ Kuznetsov D.D., ¹ Kallistratova M.A.

¹ A.M. Obukhov IAPh, Moscow, Pyzhevsky per, 3

² Bauman Moscow State Technical University, 2nd Baumanskaya street, 5, building 1, Moscow, Russia

В работе представлены результаты анализа данных полевого эксперимента по исследованию субмезомасштабных когерентных структур в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое (УАПС) с использованием многоточечных измерений при помощи акустических локаторов (содаров). Под субмезомасштабными структурами в УАПС подразумевают разнообразие форм нетурбулентных метеорологических образований с временными и горизонтальными масштабами, меньшими одного часа и нескольких километров соответственно [Mahrt and Bou-Zeid 2020]. Они визуально идентифицируются на высотно-временных развёртках содарного эхо-сигнала (содарных эхограммах). Использование содарных измерений для исследования субмезомасштабных структур в УАПС даёт возможность судить не только об их временных масштабах, но и об их вертикальной структуре. Использование многоточечных измерений позволяет дополнительно получить оценки пространственных масштабов регистрируемых структур, их пространственной и временной когерентности, а также сопоставить скорость и направление их распространения со средним ветром.

Измерения производились при помощи доплеровских моностатических содаров серии ЛАТАН-3m [Kouznetsov 2009]. Измерения проводились в трёх точках над однородной степной поверхностью. Разрешение по времени составляло 3 с. В процессе проведения эксперимента высотное разрешение менялось от 5 до 10 м, а разнесённость точек измерений – от 200 до 400 м. В двух точках были расположены одноантенные содары, измеряющие профили интенсивности эхо-сигнала и профили вертикальной компоненты скорости ветра. В третьей точке располагались несколько приборов: трёх-антенный содар, измеряющий профили трех компонент скорости ветра; микробарограф; температурный профилемер; ультразвуковые термометры-анемометры на трёх высотных уровнях мачты (2, 10 и 30 м). Получены оценки скоростей и направлений распространения наблюдаемых на содарных эхограммах когерентных структур, эти оценки были сопоставлены со скоростью и направлением ветра на разных высотах. Получены оценки временных, горизонтальных и вертикальных масштабов для когерентных структур с различной вертикальной формой. Благодаря использованию комплекса измерений были получены данные о корреляции между временными вариациями различных метеорологических параметров в присутствии наблюдаемых структур. С помощью метода кратномасштабного разложения потоков (например, [Vicker and Mahrt 2003]), были получены оценки положения спектрального провала в смежные промежутки времени до, во время и после наблюдения когерентных структур.

- Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН № 125020501402-0

Литература:

1. Mahrt, L., and Bou-Zeid, E. Non-stationary boundary layers // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2020. – V. 177. – No 2. – P. 89-204.
2. Kouznetsov R.D. The multi-frequency sodar with high temporal resolution // *Meteorologische Zeitschrift*. – 2009. – V. 18. – No. 2. – P. 169.
3. Vickers D., Mahrt L. The cospectral gap and turbulent flux calculations // *Journal of atmospheric and oceanic technology*. – 2003. – V. 20. – No 5. – P. 660-672.

Многолетняя динамика температурных градиентов в пограничном слое атмосферы по данным метеокомплекса «Останкино» и профиломеров МТП-5 в Москве

Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А., Акопян С.С., Лябина В.А.

ГПБУ «Мосэкомониторинг», г. Москва, ул. Новый Арбат, д. 11 стр. 1

E-mail: ShalyginalY@eco.mos.ru

Long-term dynamics of temperature gradients in the atmospheric boundary layer according to data from the Ostankino meteorological complex and MTP-5 profilers in Moscow

Shalygina I.Y., Lezina E.A., Akopian S.S., Lyabina V.A.

BEPI Mosecomonitoring, Moscow, 11 str. 1, Noviy Arbat

Стратификация температуры в атмосферном пограничном слое является одной из важнейших характеристик определяющих условия рассеивания загрязняющих веществ. На телевизионной башне Останкино (ТБО) в Москве в слое до 503 м на 8-ми уровнях ведутся наблюдения за температурой, скоростью и направлением ветра. Микроволновые профиломеры МТП-5 установлены на восточной и юго-западной окраинах, в центре города, внутри Садового кольца и в районе ТБО. МТП-5 позволяют оценить стратификацию температуры в 1000 м слое.

Измерения температуры на ТБО позволили установить многолетнюю динамику температуры в слое до 503 м и температурных градиентов. С 2007 года на ТБО отмечается положительный тренд приземной температуры 0,01°C/год. В многолетней динамике отмечено снижение в среднем за год градиента температуры в слое 0-200 и 0-300 м, при этом градиент температуры в слое 0-500 м значительно не изменился.

В центре города, по данным архивных наблюдений (2004-2005 гг.) МТП-5 (Красная Пресня) и данным за 2023-2024 гг. по установленному в 2022 году внутри Садового кольца микроволновому профиломеру МТП-5 проведена оценка многолетней динамики градиентов температуры. Установлено, что в слое 0-100, 200, 300 м отмечено снижение градиентов температуры, как и по данным ТБО. Наибольшие отличия градиентов отмечены в слое 0-100 м. В слое 0-200 и 0-300 м в утренние часы (6-9 ч) в многолетней динамике градиенты температуры изменились мало. В слое 0-500 м снижение градиентов температуры менее значительные.

Вычислительные технологии многомасштабного численного моделирования атмосферного пограничного слоя

^{1,2} Мортиков Е.В., ^{1,3} Дебольский А.В., ² Глазунов А.В.

¹ Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ

² Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

³ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

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

В докладе обсуждается создание вычислительной технологии для численного моделирования турбулентности и переноса примесей в атмосфере, допускающей последовательную регионализацию с измельчением пространственных сеток. Данный подход представляется необходимым для изучения влияния неоднородности подстилающей поверхности и, в частности, городской среды на процессы обмена с возможностью детализации до масштаба отдельных улиц и зданий.

Вычислительная технология разрабатывается на основе унифицированного комплекса численных моделей, развиваемого в НИВЦ МГУ и ИВМ РАН, для расчета турбулентных течений в пограничных слоях атмосферы и океана и объединяющего три подхода: прямое численное моделирование (DNS, Direct Numerical Simulation), вихреразрешающее моделирование (Large-Eddy Simulation) и численное решение осредненных по Рейнольдсу уравнений гидродинамики (RANS, Reynolds-Averaged Navier-Stokes).

В работе сформулированы основные требования к численным моделям и подсеточным замыканиям, а также представлены результаты моделирования атмосферного пограничного слоя при наличии неоднородной подстилающей поверхности с помощью разрабатываемой вычислительной технологии.

Численное моделирование переноса аэрозоля в различных типах городской застройки на основе классификации локальных климатических зон

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

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

³ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет

E-mail: aivarentsov98@gmail.com, evgeny.mortikov@gmail.com, and.glas@gmail.com, stepanen@srcc.msu.ru

Numerical simulation of aerosol transport in various types of urban geometry on the local climate zones basis

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

¹ Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center

² Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS

³ Marchuk Institute of Numerical Mathematics Russian RAS

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

В данном исследовании используется подход, комбинирующий вихреразрешающее моделирование (LES) с классификацией локальных климатических зон (LCZ) для симуляции Лагранжева переноса аэрозольных частиц в различных типах городской застройки. Воспроизводится несколько городских конфигураций, основанных на классификации LCZ – это открытые типы застройки, различающиеся по высоте зданий и соотношению сторон: LCZ 4 (многоэтажная застройка), LCZ 5 (среднеэтажная), LCZ 6 (малоэтажная). Для оценки влияния геометрии застройки на распространение частиц были изучены как регулярные, так и рандомизированные конфигурации городской застройки. Перенос твердых частиц, выбрасываемых линейным источником в уличном каньоне, был смоделирован в условиях нейтральной стратификации атмосферы.

Исследование показало, что ориентация зданий существенно влияет на распределение частиц, особенно для регулярной застройки. Структуры, расположенные параллельно ветру, способствуют горизонтальному рассеиванию, в то время как перпендикулярные способствуют вертикальному перемешиванию. В отсутствие регулярных однородных структур значительно влияют на перенос аэрозоля геометрические характеристики застройки в масштабах кварталов и районов. В рандомизированных городских конфигурациях крупномасштабные морфологические характеристики различных типов LCZ оказывают значительно большее влияние на рассеивание частиц, чем локальные геометрические различия между конфигурациями в пределах одной и той же LCZ.

■ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 24-17-00155.

Исследование температурного режима и горизонтальной неоднородности в Рыбинском водохранилище в период открытой воды с использованием трехмерного математического моделирования

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

¹ Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ им. М.В. Ломоносова

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

³ Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

⁴ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

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

В вихреразрешающей модели НИВЦ МГУ реализован блок расчета аэрозольных частиц в виде bin-модели для 6 типов аэрозолей, согласованно с моделью CAMS, включающий в себя минеральную пыль, морскую соль, черный углерод, сульфаты и аэрозоли органического происхождения. Это позволяет использовать в вихреразрешающей модели в качестве начальных и граничных условий данные реанализа CAMS, а также оптические характеристики аэрозолей, согласованные с моделью радиационного переноса EcRad. Для валидации проведены численные эксперименты с вихреразрешающей моделью по воспроизведению изменения аэрозольного радиационного форсинга в районе Метеорологической обсерватории МГУ. Рассматривалась воспроизведение оптических характеристик аэрозоля в ясную погоду 18.06.2021-20.06.2021. Крупномасштабный метеорологический форсинг задавался по данным реанализа ERA5. Для тестирования, рассматривалось 2 варианта аэрозольных концентраций: концентрации, соответствующие климатической норме 1980-х и по данным реанализа CAMS. Различия в получаемой оптической толщине аэрозоля (AOT) между климатической нормой и периодом низких концентраций в июне 2021г. (в следствие ограничений, связанных с распространением новой коронавирусной инфекции) составили 0.1882 и 0.1297 AOT соответственно, в основном за счет уменьшения концентрации сульфатного аэрозоля втрое. На рис. 1, показаны разница между временным ходом профиля температуры между экспериментами, изменения в высоте пограничного слоя и изменения во временном ходе коротковолновой составляющей солнечного излучения у поверхности. Как видно динамический эффект от изменения концентраций аэрозоля наибольшим образом проявляется у поверхности и в слое вовлечения.

Данные этих экспериментов согласуются с более ранними исследованиями (Poliukhov et al. 2024).

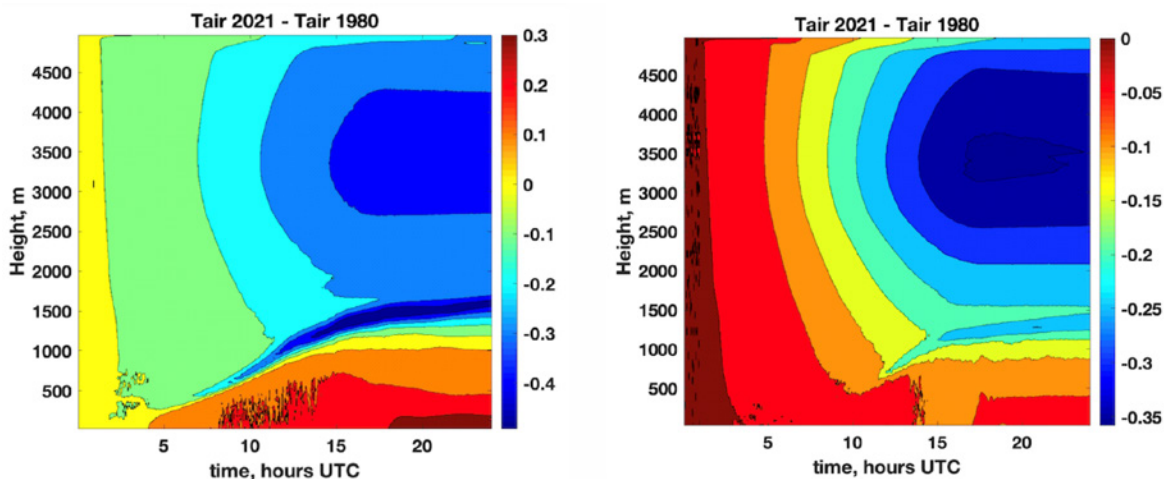


Рис. 1 Разница во временном ходе профиля температуры между численными экспериментами с воспроизведением суточного хода с концентрациями аэрозолей соответствующим периоду 1980-х и периоду пониженных концентраций (июнь 2021г.). Слева представлен отклик в экспериментах с фиксированной температурой поверхности, справа – для экспериментов с использованием интерактивной модели почвы.

Литература:

1. Poliukhov AA, Zhdanova EY, Chubarova NY. Long-term variations of aerosol optical depth according to satellite data and its effects on radiation and temperature in the Moscow megacity // Atmospheric Research. 2024, V. 304, P.107398.

Изменение характеристик приземного слоя при наличии переноса взвешенных снежных частиц в модели Земной системы INMCM и модели деятельного слоя суши TerM

^{1,3,4} Суязова В.И., ^{1,3,4} Дебольский А.В., ^{1,2,3,4} Мортиков Е.В., ¹ Медведев А.И.

¹ Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. 119991, Российская Федерация, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, дом 1, стр. 4

² Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, 119333, Российская федерация, г. Москва, улица Губкина, 8

³ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 119107, Российская Федерация, г. Москва, Пыжевский переулок 3

⁴ Московский центр фундаментальной и прикладной математики, 119991, Ленинские Горы, 1, Москва, Россия

Перенос над поверхностью снежных частиц представляет собой двухфазный поток, состоящий из воздуха и взвешенных частиц. При наличии частиц снега в воздухе, в приземном слое появляется дополнительная устойчивость за счет градиента плотности. Градиент плотности снижает турбулентность и влияет на свойства приземного слоя. Этот механизм не описывается в общей формулировке теории подобия Монина-Обухова. Ранее авторами предложена параметризация приземного слоя, в которой влияние снега учитывается путем переопределения масштаба длины Обухова (Suiazova et al., 2024). Данная параметризация успешно внедрена в новые блоки приземного слоя моделей Земной системы INMCM (Володин и др., 2020) и модели деятельного слоя суши TerM (Stepanenko et al., 2024). Новые блоки приземного слоя обладают вариативностью выбора функций устойчивости и выбору параметризаций для расчета термической и динамической шероховатости.

Во многих моделях в качестве значения динамической шероховатости используется постоянное значение, однако поверхности, покрытые снегом, характеризуются широким диапазоном масштаба уровня шероховатости, z_0 может значительно изменяться со временем на конкретном участке по мере того, как эти особенности развиваются или исчезают во время ветровой эрозии (Andreas and Claffey 1995). Ветровой перенос снега в тонком приповерхностном слое может привести к изменению шероховатости, аналогично соотношению Чарнока для волнистых водных поверхностей [Owen 1964]. В блок приземного слоя добавлена возможность расчета с несколькими параметризациями динамической шероховатости. Эксперименты с моделью деятельного слоя суши TerM показали улучшение качества воспроизведения снегозапаса (по сравнению с данными наблюдений снегомерных съемок) при использовании параметризации [Owen 1964].

Влияние снежных частиц включено в функции устойчивости Бусингера-Дайера (Businger et al., 1971) и SHEBA (Gryanik et al., 2023) для устойчивой стратификации. Включение в схему снежных частиц оказывает влияние в планетарном масштабе, основной отклик выражается в увеличении скорости ветра в полярных областях, так как уменьшение турбулентности будет приводить к росту скорости потока.

СЕКЦИЯ V

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НАУК О ЗЕМЛЕВозможности системы RANGES для оценки климатических
областей распространения явлений**Богданович А.Ю.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля», 107258, Москва, ул. Глебовская, 20Б

E-mail: fgbuigce@igce.ru

Possibilities of the RANGES system for assessing the climatic region of distribution
of natural phenomena**Bogdanovich A.Yu.**

Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Glebovskaya st. 20B, Moscow, 107258 Russia

Разработка математических статистических моделей, описывающих климатические области распространения (КОР) явлений, обусловленных климатическими факторами, играет ключевую роль в оценке последствий изменения климата. Такого рода исследования необходимы в том числе для прогнозирования воздействия климата на экосистемы, хозяйственную деятельность и здоровье человека. Под КОР явления понимается область, где сочетание климатических параметров создаёт устойчивые условия для существования этого явления при благоприятном сочетании остальных факторов среды. Для описания этих условий применяются специальные климатические индексы или количественные характеристики гидрометеорологических величин (климатические предикторы). Соответственно, границы КОР формируются на основе набора критериев, задающих требования к параметрам.

Система RANGES (Свидетельство Роспатента №2024668052 [Богданович и др., 2024]) представляет собой программный комплекс для вычисления КОР различных явлений. Она использует климатические данные наблюдений, реанализов или климатических моделей. Программная реализация написана на языке программирования Fortran.

За последние годы система RANGES активно развивалась. В новых версиях появились дополнительные возможности, включая использование расширенного набора климатических предикторов, что позволяет точнее описать различные аспекты влияния климатических условий. Эти новые предикторы повышают гибкость программы и расширяют её область применения по сравнению с ранними версиями.

Ключевая особенность системы RANGES заключается в применении вероятностного байесовского подхода [Семенов и др., 2020; Добролюбов и др., 2023]. Вместо рассмотрения усреднённых климатических данных система вычисляет вероятностную оценку того, что конкретная географическая точка относится к КОР, основываясь на ежегодных изменениях климатических параметров. Это позволяет учитывать межгодовые вариации и оценивать степень неопределённости. Такой подход соответствует рекомендациям МГЭИК – Межправительственной группы экспертов по изменению климата [Mastrandrea et al., 2010].

Интерфейс RANGES разработан таким образом, чтобы пользователь мог задавать широкий диапазон климатических предикторов и их оптимальные значения. Благодаря этому система остаётся удобной, надёжной и легко адаптируется к различным задачам.

В рамках настоящей работы представлены результаты моделирования КОР некоторых природных явлений. В качестве примера были рассмотрены: (1) доминирование теплой части года в календарном году и (2) климатический ареал опасного насекомого-вредителя –Европейского лесного клеща (*Ixodes ricinus* Linnaeus, 1758). Этот клещ является переносчиком таких заболеваний, как клещевой энцефалит, болезнь Лайма, Ку-лихорадка и туляремия. Для выполнения расчётов использовались климатические данные за периоды 1990–1999 гг., 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. по сценариям семейств RCP и SSP.

Для анализа климатических условий на территории России применялись данные региональной модели Главной геофизической обсерваторией им. А.И. Воейкова. Для выполнения глобальных расчётов использовались данные модели, разработанной Институтом вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН.

Литература:

1. Богданович А.Ю., Семенов С.М., Добролюбов Н.Ю. Система RANGES // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024668052. Дата государственной регистрации 01 августа 2024 года.
2. Добролюбов Н.Ю., Семенов С.М., Володин Е.М., Богданович А.Ю. Алгебраический алгоритм статистической оценки параметра биномиального распределения и пример его применения в одной глобальной геоинформационной задаче прикладной климатологии // Метеорология и гидрология. 2023. № 10. С. 16–24.
3. Семенов С.М., Попов И.О., Ясюкевич В.В. Статистическая модель для оценки формирования климатогенных угроз по данным мониторинга климата // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 59–65.
4. Mastrandrea M.D., Field C.B., Stocker T.F., Edenhofer O., Ebi K.L., Frame D.J., Held H., Kriegler E., Mach K.J., Matschoss P.R., Plattner G.-K., Yohe G.W., Zwiers F.W. (Core Writing Team). IPCC Fifth Assessment Guidance Note for Lead Authors IPCC Cross-Working Group for Uncertainties. Jasper Ridge, CA, USA 6–7 July 2010. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2010. Available at <http://archive.ipcc.ch/pdf/supporting-material/uncertainty-guidance-note.pdf> (accessed 10 March 2025).

О влиянии волн тепла на состояние посевов зерновых культур

Павлова А.В., Шакина Н.П.

ФГБУ Гидрометцентр России

E-mail: ctasia20@yandex.ru, chakina37@gmail.com

On the effect of heat waves on the condition of grain crops

Pavlova A.V., Shakina N.P.

Hydrometcenter of Russia

Актуальность исследования обусловлена недостаточной изученностью непосредственного влияния волн тепла на сельскохозяйственные культуры, что особенно важно в контексте их прогнозирования.

На материале базы данных о повреждениях растений в центрально-черноземных областях России и Приволжском федеральном округе (2001-2024), метеорологических наблюдений на станциях и данных объективного анализа изучается влияние волн тепла различной интенсивности и продолжительности на состояние посевов зерновых культур. Рассмотрены индексы волн тепла, используемые в мировой практике для оценки эффектов волн тепла на жизнь и хозяйственную деятельность людей, и отобраны индексы, наиболее соответствующие поставленной задаче. Выделены классы характерных синоптических ситуаций, при которых отмечены различные повреждения растений. Оценивается возможность прогноза повреждений растений на основе численного прогноза погоды и моделирования.

Применение информационной модели для прогноза русловых деформаций на р. Селенга

¹ Ревазов Д.Е., ² Пилипенко Т.В., Ефграфова А.В.

¹ ФКУ «Речводпуть» 125993, г. Москва, ул. Петровка, д 3/6

² ФГБОУ ВО НГАСУ (Сибстрин) 630008, Новосибирск-8, ул. Ленинградская, 113

E-mail: redmev@yandex.ru, taniavp_2005@rambler.ru, a.evgrafova@sibstrin.ru

Application of an information model for forecasting channel deformations on the Selenga River

¹ Revazov D.Ye., ² Pilipenko T.V., Efgrafova A.V.

¹ FCU Rechvodput 125993, Moscow, Petrovka St., d., 3/6

² NGASU (Sibstrin) 630008, Novosibirsk-8, Leningradskaya St., 113

Судоходство на Селенге имеет более чем вековую историю, причем пароходы доходили до устья р. Орхон, что на территории Монголии. Регулярное судоходство на Селенге началось с 30-х годов XX столетия на участке от Усть-Кяхты до устья протяженностью 372 км. Развитие судоходства потребовало проведения дноуглубительных и выправительных работ, которые начали активно проводиться с 20-х годов. По данным (Водный транспорт, 1939) в навигации 1936-1937 гг. на Селенге работало три земснаряда, которые перемещали около 150-180 тыс.куб.м. грунта за сезон. С тех пор технология производства этих работ существенно не изменилась.

Дноуглубительные работы для отдельных участков реки являются определяющими факторами по формированию русловых процессов. Русловые процессы в районе г. Улан-Удэ развиваются по типу пойменной многорукавности. Река Селенга здесь протекает несколькими рукавами, каждый из которых имеет свой тип руслового процесса. В связи с этим, правый рукав полностью заполнился наносами. Причем это в большей степени наносы р. Уды. Это вызвало ряд негативных последствий, которые проявились в течение последних десятилетий. На совмещении лоцманских карт отчетливо прослеживается смещение и видоизменение очертаний крупных русловых форм (в частности о. Малый Улан), исчезновение и образование множества мелких осередков, побочней, кос и островов, что приводит к свойственному многорукавности изменению плановых очертаний и водности основных протоков. Прекращение периодических дноуглубительных работ в районе о. Малый Улан и прохождение основного расхода воды по левому рукаву приводят к неконтролируемым русловым процессам. Поэтому следует констатировать, что особенности русловых процессов на рассматриваемой участке свидетельствуют о динамически неустойчивом состоянии русла.

Русловые процессы могут приводить к коренным изменениям русла и условий прохождения водного потока как естественным путем, так и за счет искусственного регулирования. Учитывая сложившуюся ситуацию с русловыми процессами необходимо срочно решить ряд практических задач, касающихся в итоге- занесение дельты р. Селенга и вынос донных отложений в озеро Байкал.

В целях детального исследования русловых процессов и защиты населенных пунктов, сельхугодий, мостовых переходов от вредного воздействия вод необходимо создать информационную модель по всей длине р. Селенги, с помощью которой можно было бы отслеживать поступление наносов, их осаждение и изменение русловых процессов как на самой реке Селенга, так и в ее дельте- при впадении реки в озеро Байкал.

Прогнозирование переноса углеводородного загрязнения на основе результатов работы прогностической системы Черного моря

Пузина О.С., Мизюк А.И., Холод А.Л., Коротаев Г.К., Кубряков А.А.

Морской гидрофизический институт РАН, ул. Капитанская, 2, Севастополь, 299011, Россия

E-mail: oksana_puzina@mail.ru, artem.mizyuk@mhi-ras.ru, antonholod@mail.ru, gkorotaev@gmail.com, kubryakov_arseny@mhi-ras.ru

Forecasting of hydrocarbon pollution transfer based on the results of the Black Sea marine forecast system

Puzina O.S., Mizyuk A.I., Kholod A.L., Korotaev G.K., Kubryakov A.A.

Marine Hydrophysical Institute of RAS

В районе Керченского пролива 15 декабря 2024 года произошло крушение танкеров «ВОЛГОНЕФТЬ 212» и «ВОЛГОНЕФТЬ 239». В результате чего случился разлив нефтепродуктов в точке с координатами 36,51 В.Д. 45,04 С.Ш. Необходимо было оперативно предоставлять ежедневную информацию о течениях на разных уровнях и о возможном перемещении нефтяных загрязнений в районе Керченского пролива на 3 суток.

Для решения поставленной задачи использовалась система прогноза ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН» (ФГБУН ФИЦ МГИ). Система прогнозирования работает на основе комплекса численного моделирования NEMO. Пространственное разрешение региональной конфигурации, охватывающей Эвксинский каскад (Азовское, Черное и Мраморное моря), составляет 4,6×4,6 км. Топография дна на этой сетке построена на основе цифрового массива рельефа EMODNet. Вертикальная дискретизация выполнена с использованием z-координаты с дробным шагом на 35 горизонтах. Вертикальное перемешивание параметризуется с помощью k-ε модели замыкания. Система уравнений дискретизирована на сетке «C» по терминологии Аракавы.

Для учета атмосферного воздействия используются данные оперативного прогноза погоды NOMADS. В региональной конфигурации также учитываются климатические расходы 13 рек, впадающих в Черное море. Для Азовского моря учитываются наблюдения объемного стока рек Дон и Кубань. Система работает на вычислительном кластере ФГБУН ФИЦ МГИ. Для воспроизведения переноса нефтепродуктов используется пакет Parcels, представляющий собой набор классов и методов, реализованных на языке программирования Python.

Моделирование переноса частиц проводилось ежедневно с 15 по 26 декабря в 9 часов утра из точки разлива нефтепродуктов. Воспроизведение движения лагранжевых частиц выполнялось с шагом по времени равным 3 часам. В акватории Керченского пролива 15 декабря наблюдаем южный ветер. Прогноз переноса нефтепродуктов на 3 дня от 15 декабря показал, что изначально углеводородные загрязнения были направлены в сторону Таманского полуострова, после частицы движутся вдоль побережья Кизилштанского лимана в сторону Витязево. По прогнозу от 18 декабря за 1 день нефтяные загрязнения переносятся с северо-запада на юго-восток. Ветер в этот день западный и северо-западный, со скоростью более 10 м/с. На следующий день ветер ослабевает и меняет своё направление на противоположное. С 19 по 21 декабря ветер юго-восточный, в этот период частицы значительно перемещаются обратно на запад. В случае выброса нефтепродуктов 19 декабря частицы за 3 дня с начала перемещаются на восток, а после по кругу возвращаются на исходную точку. Схожую динамику наблюдаем 20 и 21 декабря. В эти дни согласно прогнозу, наблюдаем слабый северо-западный ветер. На следующий день 22 декабря ветер становится штормовым. В этот период интенсифицируется течение, направленное на запад. Нефтяные углеводороды за 3 дня идут вдоль Керченского полуострова и доходят до мыса Чауда.

Полученные результаты соответствуют прогнозу комплекса расчета перемещения плавающих объектов и нефтяных загрязнений. Модель также разработана в ФГБУН ФИЦ МГИ. Данная система учитывает по мимо скоростей течений и более сложные процессы, влияющие на перенос нефтепродуктов, такие как растекания, испарение, диспергирование, эмульсификация.

Алгоритмы усвоения данных на основе ансамблей решений сопряжённых уравнений для систем оценки и прогноза качества воздуха

¹ Пененко А.В., ^{1,2} Гочаков А.В., ³ Антохин П.Н., ¹ Пененко В.В.

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

² Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Новосибирск, Россия

³ Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

E-mail: aleks@ommgp.sccc.ru, gochakov@sibnigmi.ru, apn@iao.ru, penenko@sscc.ru

Adjoint ensemble data assimilation algorithms for air quality assessment and forecasting systems

¹ Penenko A., ^{1,2} Gochakov A., ³ Antokhin P., ¹ Penenko V.

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

² Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk, Russia

³ V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

Трёхмерные модели переноса и трансформации примеси позволяют учитывать вертикальную неоднородность атмосферных процессов, но вместе с тем их использование требует задания большого количества параметров и существенных вычислительных ресурсов для проведения расчетов, особенно при решении обратных задач и задач усвоения данных (задач обратного моделирования). В работе рассматривается алгоритм усвоения данных измерений для трехмерной модели переноса и трансформации примесей с неизвестными источниками выбросов. Для создания алгоритмов обратного моделирования используется подход на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряжённых уравнений, развивающий идеи Г. И. Марчука, и реализованный в системе обратного моделирования Inverse Modeling Data Assimilation Framework [1]. Реализация алгоритмов на машинах с распределённой памятью позволяет работать с трехмерными моделями переноса и трансформации примесей в реалистичных «городских» и «региональных» сценариях [2]. Изучаются вопросы организации вычислений, учета априорной информации и работы с комплексом атмосферных моделей различной сложности.

- Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области № 25-11-20061, <https://rscf.ru/project/25-11-20061/>.

Литература:

1. Penenko A. V., Gochakov A. V., Antokhin P. N. Data Assimilation Algorithm Based on the Sensitivity Operator for a Three-Dimensional Model of Transport and Transformation of Atmospheric Contaminants // Atmospheric and Oceanic Optics. 2024. Т. 37. № 6. С. 822–832.
2. Penenko A., Rusin E. Parallel Implementation of a Sensitivity Operator-Based Source Identification Algorithm for Distributed Memory Computers // Mathematics. 2022. Т. 10. № 23. С. 4522.

Многокомпонентные модели природных временных рядов с адаптивными составляющими и нейросетевой компонентой: применение в задачах космической погоды (на примере интерактивной системы Aurora)

Мандрикова О.В.

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, Россия, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная, д. 7
E-mail: oksanam1@mail.ru

Multicomponent models of natural time series with adaptive components and a neural network component: application to space weather problems (using the interactive Aurora system as an example)

Mandrikova O.V.

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Mirnaya St, 7, Paratunka, 684034 Kamchatskiy Kray, Russia

Математические модели составляют важную основу изучения природных процессов и явлений и находят применение в разных сферах деятельности (физика, экология, биология и др.). В работе рассматриваются задачи моделирования и анализа данных геофизического мониторинга (данные зондирования ионосферы, вариаций геомагнитного поля, параметры и характеристики межпланетной среды). Нестационарная структура данных, высокая доля неполных априорных знаний, ограниченность выборок и коррелированность помех существенно снижают эффективность классических методов моделирования и анализа данных. Современные подходы к построению моделей природных временных рядов, включая последние разработки в области искусственного интеллекта и машинного обучения, вследствие наложения характеристик полезной составляющей данных и помех, также не всегда обеспечивают получение адекватных моделей. В последние годы в этой области интенсивно развиваются гибридные подходы, основанные на комбинации разных методов, сочетающих как классические, так и современные средства моделирования и анализа данных. Но эвристическая основа таких подходов не всегда позволяет получить наилучшее решение. Более того, вследствие природных помех, полученное эвристическое решение может оказаться ложным и дать основу неверным теоретическим суждениям.

В данной работе рассматривается класс многокомпонентных моделей временных рядов, применительно к задаче обнаружения аномалий космической погоды. Аномалии космической погоды связаны с событиями на Солнце, в солнечном ветре, магнитосфере и ионосфере Земли. Негативное воздействие факторов космической погоды на здоровье людей и объекты современной инфраструктуры (навигация, энергетика, спутниковые наблюдения и др.) требует создания эффективных средств анализа данных и обнаружения аномалий. На международном уровне вопросами прогноза космической погоды занимается Всемирная метеорологическая организация (WMO), в разных странах существуют Центры прогноза космической погоды (Россия, Китай, США, и др.). Но, несмотря на усилия ученых многих стран, задача эффективного и своевременного обнаружения аномалий космической погоды в настоящее время не решена. Наиболее сильные проявления космической погоды характерны для полярных и авроральных широт, но возмущения могут распространяться вплоть до средних широт, т.е. в большей части затронутой российской территории.

Основу построения предлагаемого в докладе класса многокомпонентных моделей временных рядов составляет комбинация теории рисков с конструкциями вейвлет-преобразования и нейронными сетями различных архитектур [1-5]. Предлагаемый гибридный подход к построению моделей позволяет уменьшить степень неопределенности в данных, понизить уровень помех и получить наилучшее решение, в определенном статистическом смысле. Численная реализация предлагаемых моделей и построенных на их основе методов анализа данных представлена на примере интерактивной системы прогноза космической погоды на региональном уровне Aurora (Камчатский край, ИКИР ДВО РАН, <https://lsaoperanalysis.ikir.ru/lsaoperanalysis.html>). Также, в докладе, в продолжение этой теории, будет предложено развитие класса многокомпонентных моделей временных рядов с включением нейросетевой составляющей архитектуры Колмогорова-Арнольда (KANs). Будет показано, что нейронные сети KANs дают возможность использовать машинное обучение для получения формализованного описания зависимостей и природных явлений, что расширяет возможности средств идентификации при построении моделей сложных процессов и систем.

■ Работа выполнена за счет Государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № темы 124012300245-2).

Литература:

1. Mandrikova O., Mandrikova B. Hybrid model of natural time series with neural network component and adaptive nonlinear scheme: application for anomaly detection // Mathematics. 2024. 12. 1079. <https://doi.org/10.3390/math12071079>.
2. Мандрикова, О.В. Интеллектуальные методы анализа природных данных: приложение к космической погоде // Компьютерная оптика. 2024. Т. 48. № 1. С. 139-148. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1367>.
3. Mandrikova O., Mandrikova B., Esikov O. Detection of anomalies in natural complicated data structures based on a hybrid approach // Mathematics. 2023. 11. 2464. <https://doi.org/10.3390/math11112464>.
4. Mandrikova O., Fetisova N., Polozov Y. Hybrid model for time series of complex structure with ARI-MA components // Mathematics. 2021. 9. 1122. <https://doi.org/10.3390/math9101122>.
5. Mandrikova O.V., Polozov Yu.A., Mandrikova B.S. Method of natural data analysis and anomaly detection based on a collective of NARX neural networks // Pattern Recognition and Image Analysis. 2024. Vol. 34. No. 4. pp. 1223–1232.

Технология бесшовного гидрологического прогноза притока воды в оз. Байкал на основе модели формирования речного стока

Морейдо В.М., Калугин А.С.

Институт водных проблем РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3

E-mail: vsevolod.moreydo@iwp.ru, kalugin-andrei@mail.ru

В работе демонстрируется результат разработки прогностической системы для выполнения бесшовного прогноза притока воды в озеро Байкал заблаговременностью 60 суток в период с мая по октябрь на основе модели формирования речного стока в его бассейне. Система выполнена на базе программного комплекса ECOMAG, разработанного в ИВП РАН. Программный комплекс использует метеорологические данные для описания процессов формирования речного стока на территории водосбора. Учитывая трансграничный характер части бассейна и связанные с этим трудности получения оперативных гидрометеорологических данных, в качестве входной метеорологической информации для модели использован глобальный синоптический реанализ ERA5Land, выпускаемый Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) с запаздыванием 3 суток от текущей даты. Для расчета среднесрочного прогноза заблаговременностью до 10 суток использованы данные глобальной системы прогнозирования GFS NOAA NCEP. Для объединения данных упомянутых систем и адаптации к формату модели формирования стока была разработана специализированная информационная система.

Модель формирования стока была адаптирована к данным глобального метеорологического реанализа и проверена ее способность воспроизводить как ряды речного стока в замыкающих гидрометрических створах на основных притоках оз. Байкал (рр. Селенга, Баргузин и Верхняя Ангара). Качество моделирования трех речных створов, совместно покрывающих около 75% притока воды в озеро, было проверено за период с 2008 по 2022 и получены высокие показатели соответствия расчетов и наблюдений. Так, для замыкающего створа рзд Мостовой на р. Селенге значения статистических критериев соответствия смоделированного среднесуточного стока фактическому составили $KGE = 0.79$ и $PBIAS = -2\%$. Для замыкающего створа с. Верхняя Заимка на р. Верхняя Ангара $KGE = 0.82$ и $PBIAS = 3\%$. Для замыкающего створа с. Баргузин на р. Баргузин $KGE = 0.71$ и $PBIAS = 13\%$.

Оперативный среднесрочный прогноз речного стока в замыкающих створах притоков на 10 суток был разработан и проверен за период с 1 мая по 31 октября 2017–2021 гг. на основании использования доступного архива данных ERA5Land для расчета начальных условий модели формирования стока и метеорологического прогноза GFS. Оперативный долгосрочный прогноз выполнялся на основании ансамблевого подхода с использованием архивных данных ERA5Land за период с 1979 по 2022 годы. В разработанной схеме предусмотрена коррекция среднесрочного прогноза по данным наблюдений за расходами воды, а также долгосрочного прогноза по данным об ошибке прогнозов. Последовательное выполнение расчетов с последующей корректировкой прогнозов и представляет собой т.н. бесшовный прогноз.

Использование большого числа статистических критериев верификации разработанных прогнозов позволило оценить разработанную систему как удовлетворяющую требованиям по качеству как на среднесрочном интервале заблаговременности, так и на долгосрочном.

Технологии верификации, интерполяции и ассимиляции данных в задачах мониторинга состояния морских акваторий

¹ Захарова Н.Б., ¹ Пармузин Е.И., ¹ Агошков В.И., ¹ Шелопут Т.О., ² Никулин И.Д.

¹ ИВМ РАН, 119333, Москва, Россия

² МИЭТ, 124498 Зеленоград, Москва, Россия

E-mail: zakharova_nb@inm.ras.ru

Technologies of Data Verification, Interpolation, and Assimilation in Marine Environment Monitoring

¹ Zakharova N.B., ¹ Parmuzin E.I., ¹ Agoshkov V.I., ¹ Sheloput T.O., ² Nikulin I.D.

¹ INM RAS, 119333 Moscow, Russia

² MIET, 124498 Zelenograd, Moscow, Russia

В ИВМ РАН проводятся исследования на базе научной инфраструктуры мирового уровня – Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ– Мониторинг». ЦКП «ИКИ–Мониторинг» создан в ИКИ РАН и обеспечивает пользователям доступ к системам архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений с целью решения задач изучения и мониторинга окружающей среды [1]. Одной из специализированных систем работы с данными, предоставляемыми ЦКП «ИКИ– Мониторинг», выступает Информационно-вычислительная система See the Sea, ориентированная на работу с данными спутниковых наблюдений для решения междисциплинарных задач исследования морских акваторий [2]. Настоящая работа направлена как на использование системы «See the Sea», так и на расширение состава данных и возможностей системы путем включения трехмерных полей реанализа основных гидрофизических параметров морских акваторий.

В исследовании используются данные о температуре поверхности моря со спутников Aqua и Terra (MODIS), Suomi NPP (VIIRS), Sentinel (SLSTR), Метеор-М №2-2 (MCY-MP) и решается ряд проблем, связанных с вариационной ассимиляцией данных наблюдений [3] при моделировании термодинамики Черного и Азовского морей [4]. В работе представлены технологии верификации данных наблюдений, позволяющие устранять случайные или систематические ошибки. Реализованы процедуры интерполяции наблюдений, позволяющие определять и исключать аномальные значения в полях данных, а также заполнять пропуски, возникающие при работе измерительных приборов. На основании проведенного анализа данных и расчета статистических характеристик исследуемых наблюдений, проведена модификация методологии вариационной ассимиляции с учетом ошибок используемых данных.

■ Работа выполнена при поддержке РНФ (№19-71-20035).

Литература:

1. Лупян Е.А. и др. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды. Современные проблемы ДЗЗ из космоса (2015) 12(5) 263–284.
2. Лаврова О.Ю. и др. Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 266–287.
3. Agoshkov V.I. et al. Variational Data Assimilation in the Mathematical Model of the Black Sea Dynamics // Physical Oceanography. 2019. V. 26, No. 6, 515–527.
4. Zalesny V.B., Diansky N.A., Fomin V.V. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2012. V. 27, No. 1, 95–111.

Принципы информационно-технологического обеспечения национальной гидрологической моделирующей системы и создания баз сеточных данных реанализа гидрологических характеристик

^{1,2} Гончуков Л.В., ^{2,3} Бугаец А.Н., ⁴ Гельфан А.Н., ¹ Соколов О.В., ² Морейдо В.М.

¹ Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Владивосток, ул. Фонтанная, 24, 690091

² Институт водных проблем РАН, г. Москва, ул. Губкина, 3, 119333

³ Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, ул. Радио 7, 690041

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, 119991

Information technologies of the national system of hydrological modeling and databases for reanalysis of hydrological characteristics

^{1,2} Gonchukov L.V., ^{2,3} Bugaets A.N., ⁴ Gelfan A.N., ¹ Sokolov O.V., ² Moreido V.M.

¹ Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute

² Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences

³ Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

⁴ Lomonosov Moscow State University

Национальная гидрологическая моделирующая система (НГМС) представляет собой структурный элемент адаптивной системы гидрологического мониторинга (АСГМ) и разрабатывается как национальный методологический и технологический стандарт информационного обеспечения для поддержки принятия решений по управлению водными ресурсами речных бассейнов в условиях происходящего и прогнозируемого изменений климата, адаптации водохозяйственного комплекса страны к этим изменениям.

Информационная система поддержки НГМС реализована в виде сети распределенных источников данных. Структура информационного обеспечения НГМС включает элементы, предназначенные для сбора данных наблюдений от различных источников гидрометеорологической информации, их усвоения, накопления, хранения, обработки, представления, экспорта и доступа к ним, а также элементы, обеспечивающие взаимодействие АСГМ и НГМС. Структурно система состоит из следующих компонентов:

- База метаданных, обеспечивающая целостность и непротиворечивость данных, которая содержит справочники и словари предметной области (гидрометеорология)
- Каталог данных является сущностью базы, содержащей информацию об атрибутах данных и непосредственно связан с сущностями базы метаданных: пунктами, типами значений, переменными – физическими величинами, измерительным оборудованием, методом получения данных, собственником или источником данных и базой, в которой хранятся данные, относящиеся к записи каталога.
- Базы, содержащие непосредственно данные: наблюденные исторические и оперативные данные, модельные данные, данные прогнозов и др.
- Программный интерфейс приложений (application programming interface– API) предназначен для доступа к данным и метаданным посредством REST-сервисов.
- Уровень приложений содержит процедуры обработки данных и метаданных посредством запросов к API.
- Специализированные базы и наборы данных являются результатом обработки исходных данных. Формат и состав таких наборов данных определяется приложением, с помощью которого они созданы

Модульная архитектура системы позволяет расширять функционал НГМС без перепрограммирования существующих модулей путем добавления новых. Средства хранения и передачи данных обеспечивают эффективную интеграцию моделей и баз данных, позволяют изменять и дополнять (масштабировать) компоненты системы при появлении новых задач и объектов.

Схемы баз данных, интерфейс прикладного программирования (application programming interface, API) и web-сервисы НГМС обеспечивают высокую эффективность и производительность для хранения и обработки всех видов данных наблюдений, включая данные от автоматических датчиков, а также прогнозную информацию, поступающую из глобальных и региональных систем диагноза и прогноза состояния атмосферы. Результаты работы вычислительного ядра НГМС географически относятся к расчетным элементам, в качестве которых выступают модельные водосборы либо элементы русловой сети. Возможности современных СУБД сохранять геопространственные описания объектов позволяют организовать доступ к данным средствами стандартных специализированных веб-сервисов семейства WxS

Программная архитектура НГМС за счет использования современных технологий межмодельной и кроссплатформенной совместимости, основанных на использовании веб-сервисов REST, открытого формата обмена данными гидрологических наблюдений OGC WaterML2.0 и открытого стандарта моделирования OGC OpenMI 2.0 позволяет создавать многоуровневые схемы интеграции любой сложности при минимальных затратах на написание исходного кода и сохранении свободы выбора средств реализации программного обеспечения.

Решатель Римана для уравнений мелкой воды на разрывном дне с приложениями в гидрологии и речной гидродинамике

Беликов В.В., Борисова Н.М., Васильева Е.С., Глотко А.В., Федорова Т.А.

Институт водных проблем РАН 119333, Москва, ул. Губкина, д.3

Shallow water Riemann solver with discontinuous bottom for the hydrological and river hydrodynamics tasks

Belikov V.V., Borisova N.M., Vasilieva E.S., Glotko A.V., Fedorova T. A.

Water problem institute RAS

Представленный доклад посвящен совершенствованию методов численного моделирования течений мелкой воды и их практическим приложениям. Разработан новый алгоритм решения задачи Римана о распаде произвольного разрыва для уравнений мелкой воды над скачком дна. Предложена гипотеза о физически реализуемых решениях, и на ее основе доказано существование и единственность решения задачи. Построены все возможные конфигурации течения и показано, как правильно осуществлять выбор решения в точках бифуркации режимов течения. Практическая ценность этого направления работ связана с появлением возможности применения нового точного решателя задачи Римана в численных методах (типа Годунова). Показано, что численный алгоритм на основе нового решателя задачи Римана в ряде случаев существенно точнее традиционных подходов при моделировании течений со сложным рельефом дна. Приводится убедительный тестовый пример. Разработанный решатель встроен в отечественный программный комплекс Stream 2D Cuda и апробирован при моделировании многих десятков прикладных задач. Ряд примеров приводится в докладе.

Результаты полученных исследований послужили основой для организации ряда научных и практических работ, выполняемых в ИВП РАН с использованием пакета программ «Stream 2D Cuda» для моделирования течений мелкой воды с учетом транспорта неоднородных наносов, теплопереноса и ледовых явлений. Этот пакет также находит применение в работе других коллективов ученых и образовательном процессе на географическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова; с его использованием защищена докторская и несколько кандидатских диссертаций, выполнено научное обоснование большого числа проектных работ.

Результаты опубликованы в статьях [Aleksyuk et al., J. Comp. Phys., 2022] (WoS, Q1), [Aleksyuk, Belikov, J. Comp. Phys., 2019] (WoS, Q1), [Aleksyuk, Belikov, Comput. Math. Math. Phys., 2017] (WoS, Q2) и монографиях [Беликов, Алексюк, М.:РАН, 2020], Беликов и др. М., Янус-К, 2023].

Программы для ЭВМ:

1. Алексюк А.И., Беликов В.В. Программный комплекс STREAM 2D CUDA для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках с использованием технологий Compute Unified Device Architecture (на графических процессорах NVIDIA). //Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017660266 от 20.09.2017

2. Алексюк А.И., Малахов М.А., Беликов В.В. Решатель задачи Римана для уравнений мелкой воды с разрывным дном // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020660617, 2020

3. Алексюк А.И., Беликов В.В. Модуль учета действия вязких сил в программном комплексе Stream 2D Cuda //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612100 от 30.01.2023

О развитии гидрометеорологического обеспечения на основе архитектуры «Сетка данных» и ЕСИМО

Вязилов Е.Д., Мельников Д.А.

ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 249035, г. Обнинск, ул. Королева, 6

E-mail: vjaz@meteo.ru

On the development of hydrometeorological support based on the «Data Mesh» architecture and ESIMO

Viazilov E.D., Melnikov D.A.

RIHMI-WDC, 6, Koroleva St., 249035 Obninsk, Russia

Сегодня пользователям нужно быстрое получение в режиме реального времени данных, расположенных в различных облачных хранилищах, «озерах данных», базах данных (БД), структурированных файлах и файловых системах с объектными файлами, их автономная обработка с выявлением опасных явлений (ОЯ) и доставка в бизнес процессы предприятий, зависящие от гидрометеорологических условий. Реализация обработки, выявления ОЯ и принятие решений требует развития архитектуры в виде «Сетки данных» (Data Mesh), позволяющей организовать сквозной автономный процесс обработки данных «от наблюдения до принятия решений». Развитие гидрометеорологического обеспечения (ГМО) направлено в сторону персонализированного обслуживания различных технологических процессов и видов деятельности предприятий. При этом необходимо использовать интегрированные, распределенные и неоднородные данные в виде цифровых двойников (ЦД) для применения в различных приложениях и моделях, например, для проведения машинного обучения на основе полученных данных. Целью статьи является показ возможностей развития ГМО с использованием архитектуры «Сетка данных».

Предлагается архитектуру «Сетка данных» развивать на основе Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (<http://esimo.ru>), которая берет на себя интеграцию различных типов и видов данных. Это значительно облегчает переход к архитектуре «Сетка данных». Основным способом получения данных в такой архитектуре являются API, REST или web сервисы. Услуги «Сетки данных» будут предоставляться через каталоги информационных ресурсов, продукции и сервисов. Источниками данных для развития такой архитектуры могут стать дата-центры с облачными хранилищами данных и отдельные Интернет-узлы с БД.

Использование ИИ, машинного обучения, ЦД в предложенной архитектуре позволяет дополнить эти технологии передовыми возможностями для автоматизации и оптимизации процессов управления данными. При этом создается единая, согласованная и интегрированная среда данных для всех данных, приложений и сервисов. Такая унифицированная архитектура позволяет устранять изолированность данных и способствует динамическому созданию электронных продуктов с использованием средств автоматизированного управления метаданными.

Представлен обзор развития архитектур данных от централизованных систем до архитектуры «Сетка данных». Показаны подходы по разработке архитектуры «Сетка данных» в гидрометеорологии. Основным способом получения данных и продукции в электронном виде с персонализацией доставки являются API сервисы. Услуги в архитектуре «Сетка данных» предоставляются через каталоги информационных ресурсов, продукции и сервисов.

Такой подход позволяет быстрее доставлять данные до пользователей. Более дальними перспективами является создание сети связанных распределенных БД с использованием ЦД и графов знаний. Архитектура «Сетка данных» лучше подходит для организаций, обладающих широким спектром объектов метаданных, на основе которых можно производить обогащение данных. Появляется возможность получать информационные продукты в виде данных различного уровня агрегации данных, наблюдаемые данные вместе с прогнозами в виде временных рядов и сеточных данных.

Применение сегментации Mask R-CNN и регрессионных моделей для оценки характеристик сосновых древостоев по данным БПЛА

Никитина А.Д.

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А.С. Исаева РАН, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

E-mail: nikitina.al.dm@gmail.com

Одной из актуальных задач лесной экологии в условиях климатических изменений является повышение точности оценки углеродных запасов и расширение пространственного охвата наблюдений. Использование данных, полученных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), открывает возможность получения информации о структуре древостоев с высокой детализацией, вплоть до уровня отдельных деревьев.

В данной работе представлен подход к оценке структурных характеристик и запасов углерода в сосновых древостоях хвойно-широколиственной подзоны на основе высокодетальной аэрофотосъёмки с БПЛА и применения методов машинного обучения. Исследование основано на наземных таксационных данных, собранных в сосновых лесах западной части Русской равнины, охватывающих широкий спектр возрастных групп и природно-климатических условий.

Ключевым элементом методологии является автоматическая сегментация крон деревьев на RGB-ортофотопланах с использованием нейронной сети архитектуры Mask R-CNN, дообученной на размеченных изображениях сосновых лесов. Полученные структурно-биометрические признаки (число деревьев, сомкнутость, периметр и площадь крон) агрегировались на уровне пробных площадей. Из цифровой модели местности дополнительно извлекались значения высоты деревьев.

Для оценки средних биометрических и структурных характеристик древостоев (высоты, диаметра, густоты, возраста, объёма стволовой древесины и запаса углерода) были построены и протестированы регрессионные модели. Наилучшие результаты показали модели многослойного персептрона, особенно при прогнозировании биометрических характеристик. При оценке запаса углерода наблюдалась тенденция к занижению значений в старовозрастных лесах.

Предложенный подход демонстрирует потенциал для создания автоматизированных решений по анализу БПЛА-съёмки, способных эффективно работать на уровне отдельных деревьев и использоваться для мониторинга лесов, оценки воздействия климатических факторов и планирования лесовосстановительных мероприятий. Методология адаптирована под условия хвойно-широколиственной подзоны и может быть масштабирована на другие типы лесов и экосистем.

- Работа выполнена в рамках деятельности молодёжной лаборатории ЦЭПЛ РАН «Биоразнообразие и климаторегулирующие функции лесов» (регистрационный номер 1024100700084-5-1.6.19).

Application of Mask R-CNN segmentation and regression models for estimating characteristics of pine forests from UAV data

Nikitina A.D.

Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity RAS, 84/32 Profsoyuznaya St., Moscow, 117997, Russia

E-mail: nikitina.al.dm@gmail.com

One of the relevant tasks in forest ecology under climate change is to improve the accuracy of carbon stock assessments and expand the spatial coverage of forest observations. UAV-derived data provide an opportunity to obtain detailed information on forest stand structure down to the level of individual trees.

This study presents an approach to the assessment of structural characteristics and carbon stocks in Scots pine forests within the coniferous-broadleaved forest subzone, based on high-resolution UAV imagery and machine learning methods. The analysis is based on ground-based forest inventory data collected in pine forests of the western part of the Russian Plain, covering a wide range of age classes and environmental conditions.

A key element of the methodology is the automatic segmentation of tree crowns on RGB orthophotos using a Mask R-CNN neural network trained on annotated imagery of pine forests. Extracted structural and biometric features (tree count, canopy cover, crown perimeter and area) were aggregated at the sample plot level. Tree height values were additionally derived from the digital surface model.

To estimate average biometric and structural characteristics of forest stands (tree height, diameter, density, age, stemwood volume and carbon stock), several regression models were constructed and evaluated. The best results were achieved using multilayer perceptron models, especially in predicting biometric parameters. In carbon stock estimation, a tendency toward underestimation in old-growth forests was observed.

The proposed approach demonstrates the potential for creating automated UAV-based analysis tools capable of operating at the level of individual trees and being applied for forest monitoring, climate impact assessment and reforestation planning. The methodology is adapted to the conditions of the coniferous-broadleaved forest subzone and can be scaled to other forest types and ecosystems.

- This study was conducted within the Youth Laboratory «Biodiversity and Climate-Regulating Functions of Forests» at the CEPF RAS (project ID: 1024100700084-5-1.6.19).

Технологии и методы построения сервиса обработки геопространственных данных с КА с МСА и ГСА

Трофимова А.В., Трофимов И.С.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 117303, г. Москва, ул. Керченская, д. 1А, корп. 1
E-mail: trofimova.anna@phystech.edu

Technologies and methods for creating a geospatial data processing service with spacecraft with multispectral and hyperspectral data

Trofimova A.V., Trofimov I.S.

Moscow Institute of Physics and Technology, 1A Kerchenskaya str., building 1, Moscow, 117303, Russia

Современные пользовательские геопорталы, предоставляют информацию потребителям в большей степени путем заказа платно необходимых данных или в режиме демо-доступа. При всем при этом список группировок космических аппаратов и индексов доступных для расчета чаще всего имеет ограниченный размер в связи с техническими сложностями реализации масштабных сервисов, а также с юридическими условиями проектов. Кроме того, на сегодняшний день в открытых источниках не содержится информации о реализации проектирования и обработки данных геоинформационных систем на основе объектно-ориентированного подхода проектирования ГИС для данных гиперспектральной съемки. Стоит отметить, что для большинства оперативных задач экологического мониторинга, необходимо применение данных с мультиспектральных камер совместно с данными гиперспектральных камер, что подтверждено мировым опытом отечественных и иностранных исследователей (Аншаков Г.П., Журавель Ю.Н., Федосеев А.А, Рашупкин А.В.). Применение гиперспектральных камер возможно для задач сельского и лесного хозяйства, например, мониторинга посевных площадей и целеуказания на их обработку (Фирсов Н.А., Подлипов В.В., Ивлиев Н.А., Aneese I., Thenkabail P., McCann C., Repasky K., Lawrence R. и Powell S.), а также для задач рыбохозяйственного комплекса РФ – определения содержания и количественных характеристик хлорофилла-а, цианобактерий, мутности воды, мониторинга динамики эвтрофикации водоемов (Xin Pan, Jorge E. Pezoa, Diogo Olivetti), температуры поверхности (LST) водоемов и территорий близлежащих к ним.

Упомянутое состояние вопроса подтверждает научную новизну исследования, которая заключается в создании такого геопортала, который был бы способен обеспечить доступ пользователей к данным различных типов съемочных систем и устранить недостатки, отмеченные выше. В разработанном нами геопортале представлены следующие индексы: NDVI, NDWI, NDBI, NDSI, а также LST (индекса температуры земной поверхности), автоматический расчет которого ранее не был представлен в отечественных сервисах. Преимуществом разработанного нами продукта является представление и оперативная обработка данных НА «Гиперспектрометр МФТИ». Также нашими достоинствами являются:

- 1) использование отечественных технологий при развертывании сервиса: Selectel и Яндекс Диск (REST API);
- 2) маленькое время на загрузку результатов обработки за счет системы кэширования;
- 3) представление классификации не только для данных с МСА, но и для данных с ГСА;
- 4) обезличенное отслеживание кликов для поиска АОИ/ПОИ пользователей, а, следовательно, улучшения качества будущих тематических продуктов (за счет наземной валидации и др.).

При разработке геопортала нами были использованы следующие технологии: база данных – PostgreSQL, основные языки программирования – Python 3.10 и Javascript, бекенд-фреймворк – Django, хранение снимков – Yandex Disk, обработка снимков – numpy. В качестве источника данных были выбраны КА с МСА и ГСА: Landsat 8, EO-1 Hyperion, НА «Гиперспектрометр МФТИ», также в настоящее время в геопортал интегрируются данные с Sentinel 2 через API. На рис. 1 представлена архитектура внутренней части геопортала.

Непосредственно сам сервис расположен по адресу <https://geosmipt.ru/>. На геопортал получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024690723 от 17.12.2024. Внешний интерфейс портала и пример расчета индексов для КА с МСА и ГСА представлен на рис.2.

По итогу работы был разработан и развернут бесплатный для пользователей геопортал для обработки данных ДЗЗ, использующий в качестве источника данных не только данные с МСА, но и данные с отечественного прибора, работающего в узких диапазонах видимого и ИК-спектра на борту МКС. В ходе апробации данной работы был отмечен интерес к возможности просмотра данных гиперспектральной съемки сотрудниками ведущих космических предприятий.

Данный сервис позволил оперативно предоставлять готовые тематические продукты потребителю, а именно карты распределения индексов, которые широко используются в научной среде, индекса LST, которого не было ранее представлено в российских цифровых продуктах и результаты проведенной на сервере геопортала алгоритмической классификации по основным типам подстилающей поверхности.

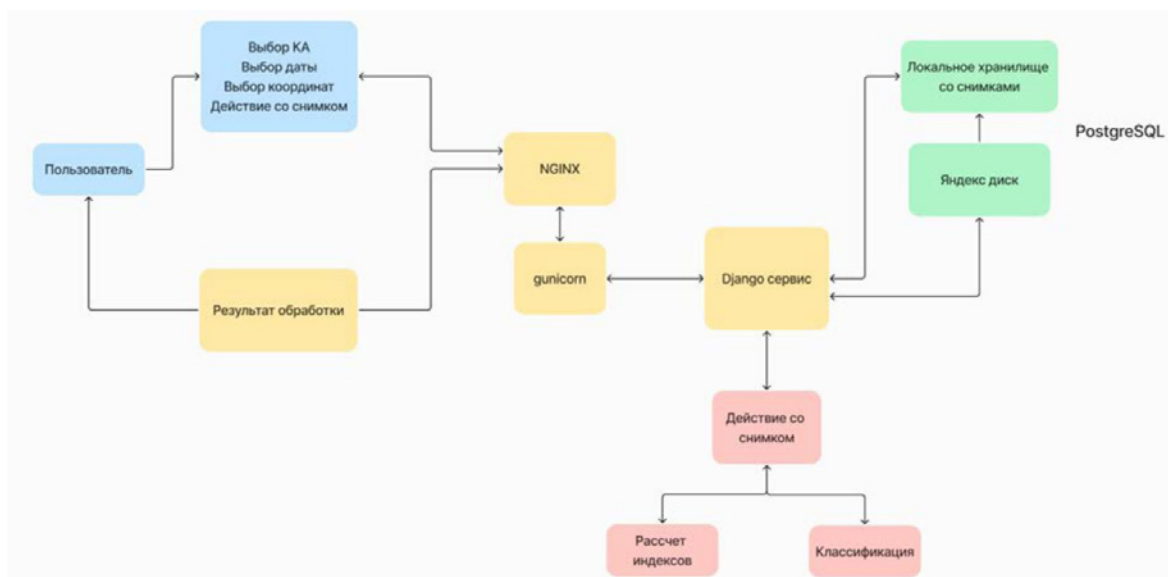


Рис. 1. Архитектура внутренней части сервиса.

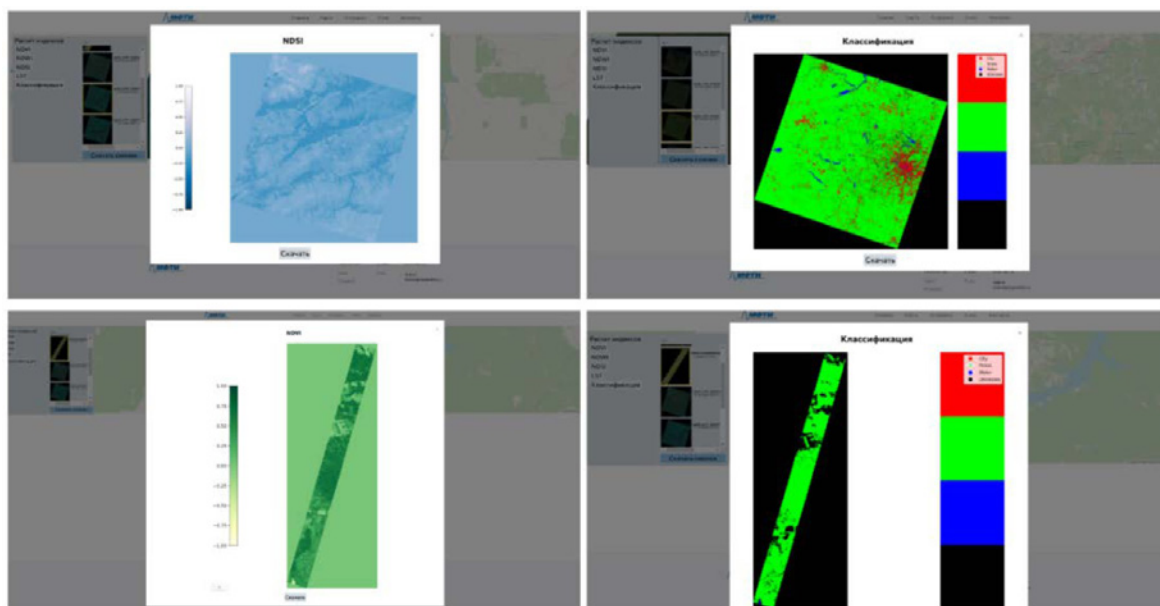


Рис. 2. Пример расчета индексов для Landsat 8 и НА «Гиперспектрометр МФТИ».

СЕКЦИЯ VI

28-Я СЕССИЯ СЕВЕРО-ЕВРАЗИЙСКОГО
КЛИМАТИЧЕСКОГО ФОРУМАРазвитие Северо-Евразийского Климатического Центра ВМО:
Результаты и Стратегии

**Хан В.М., Емелина С.В., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Набокова Е.В., Субботин А.В.,
Сумерова К.А., Тищенко В.А.**

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации Москва, Россия
E-mail: khan@mecom.ru

Development of the North Eurasian Climate Centre of WMO: Results and Strategies

**Khan V.M., Emelina S.V., Kruglova E.N., Kulikova I.A., Nabokova E.V., Subbotin A.V.,
Sumerova K.A., Tishchenko V.A.**

Hydrometeorological Research Centre of the Russian Federation, Moscow, Russia

В докладе представлен обзор ключевых направлений текущей работы Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) Всемирной метеорологической организации (ВМО), его роли в мониторинге климатических изменений и обеспечении НГМС Северной Евразии достоверной диагностической и прогностической климатической информацией. Представлены актуальные результаты научных исследований, проводимых СЕАКЦ, включая анализ воспроизведения прогностическими моделями климатических тенденций на сезонных и межгодовых интервалах времени, экстремальных погодных явлений. Особое внимание уделено разработкам в области верификации прогнозов и применению методов статистической интерпретации.

Отдельный блок доклада посвящён работе по организации и проведению Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ) – ключевой платформы для координации усилий стран региона в области климатического прогнозирования и мониторинга. Рассматриваются итоги последних сессий форума, включая согласованные прогностические продукты, рекомендации для секторов экономики и инициативы по укреплению международного сотрудничества.

Освещаются перспективы развития СЕАКЦ, такие как усовершенствование системы климатических предупреждений, интеграция в научно-практическую деятельность новых источников данных и расширение взаимодействия с глобальными и региональными партнерами (ЭСКАТО, ВПП) и климатическими инициативами ВМО.

Climate Services for Disaster Resilience: Opportunities for Action

Srivastava S.

United Nations, Economic and Social Commission for Asia and Pacific (ESCAP)

E-mail: srivastavas@un.org

As climate change intensifies, many regions face growing threats from slow-onset disasters such as droughts, land degradation, and water stress. These processes exacerbate socio-economic vulnerabilities, demanding new risk management approaches grounded in science-based solutions.

In this context, ESCAP, in partnership with the World Meteorological Organization (WMO) and other key stakeholders, is developing and implementing innovative impact-based forecasting for climate-sensitive sectors. These methodologies aim to enhance countries' adaptive capacities while supporting subregional platforms such as NEACOF, SASCOF and FOCRA II.

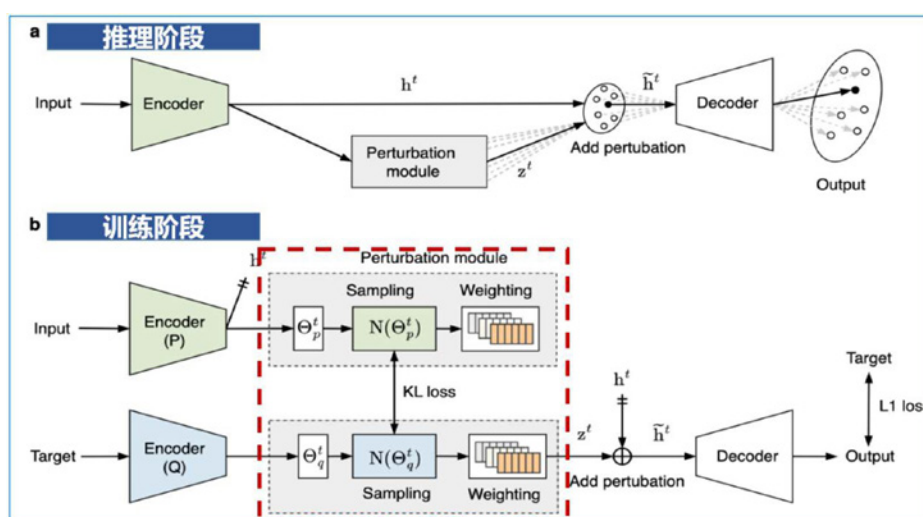
A special focus is placed on Central Asia, where collaboration with the North-Eurasian Climate Center (NEACC) seeks to improve the accuracy and practical application of seasonal forecasts.

Latest Advances in Machine Learning-based Sub-seasonal to Seasonal Prediction by the China Meteorological Administration

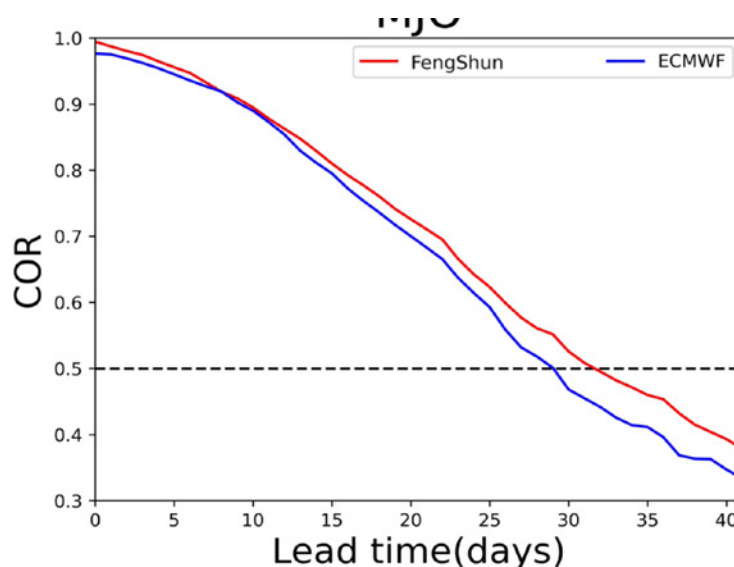
Chenguang Zhou, Bo Lu, Jie Wu

National Climate Centre, China Meteorological Administration

Skillful subseasonal forecasts are crucial for various sectors of society but pose a grand scientific challenge. Recently, machine learning-based weather forecasting models outperform the most successful numerical weather predictions generated by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), but have not yet surpassed conventional models at subseasonal timescales. This study introduces FengShun Sub-seasonal to Seasonal (FengShun-S2S), a machine learning model that provides global daily mean forecasts up to 42 days, encompassing five upper-air atmospheric variables at 13 pressure levels and 11 surface variables. FengShun-S2S, trained on 72 years of daily statistics from ECMWF ERA5 reanalysis data, outperforms the ECMWF's state-of-the-art Subseasonal-to-Seasonal model in ensemble mean and ensemble forecasts for total precipitation and outgoing longwave radiation, notably enhancing global precipitation forecast. The improved performance of FengShun-S2S can be primarily attributed to its superior capability to capture forecast uncertainty and accurately predict the Madden-Julian Oscillation (MJO), extending the skillful MJO prediction from 30 days to 32 days. Moreover, FengShun-S2S not only captures realistic teleconnections associated with the MJO but also emerges as a valuable tool for discovering precursor signals, offering researchers insights and potentially establishing a new paradigm in Earth system science research.



Schematic diagram of the structures of the FengShun-S2S model. (a) Inference stage of the FengShun-S2S model and (b) Training stage of the FengShun-S2S model.



Comparison of the correlation (COR) skills for the real-time multivariate Madden-Julian Oscillation (MJO) (RMM) index between ECMWF S2S forecasts (in blue) and FengShun-S2S forecasts (in red).

Водные ресурсы Таджикистана. Критическая тенденция абляции ледника Зарафшан

Давлятов Р.Р.

Агентство по гидрометеорологии Комитета охраны окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан
E-mail: drrashid63@mail.ru

Проведен анализ фоновой температуры и осадков на основе метеорологических измерений в верхнем, среднем и нижнем течении реки Зарафшан в бассейне ледника Зарафшан. В данном исследовании были использованы многолетние исторические данные, где в настоящее время действуют метеорологические станции: Дехавз– верховья, аккумулятивная зона реки; Мадрушкат– средняя зона реки; Пенджикент– низовья реки.

Исследование показало, что метеорологические данные на разных высотах различны и изменяются в зависимости от высоты местного горного рельефа.

В ходе исследования было выявлено влияние теплого фонового температурного режима на зону снегонакопления в верховьях реки Зарафшан (бассейн ледника Зарафшанский).

Климат Таджикистана континентальный, с сухим воздухом и малой облачностью. Изменение климата, происходящее в Таджикистане, уже не прогноз на будущее, а все более осязаемая реальность. Географические особенности делают Таджикистан наиболее уязвимым к изменению климата в Центральной Азии.

Ледник Зарафшанский – крупнейший долинный, древовидный ледник в горной системе Гиссаро-Алая. Состоит из главного потока и 20 крупных притоков. Дает начало реке Матча, истоку реки Зарафшан. Первые упоминания о реке Зарафшан можно отнести ко временам IV-II вв. до н. э., ко времени Саразма.

Study Area: Метеорологические данные МС Дехавз (высота 2564 метра над уровнем моря) средняя суточная температура и осадки (бассейн ледника Зарафшанский).

Метеорологические данные МС Мадрушкат (высота 2254 метра над уровнем моря) средняя суточная температура и осадки (бассейн ледника Зарафшанский).

В сентябре 2024 года в Душанбе в ходе 35-й сессии Межгосударственного совета по гидрометеорологии стран СНГ была проведена воздушная экскурсия для руководителей гидрометеорологических служб на ледник Зарафшанский.

Оценены масштабы таяния ледника Зарафшанский и его влияние на сток реки.

В ближайшие 10 лет точка абляции ледника увеличится, и ледник потеряет свое значение для стока воды в Центральной Азии

В период с IV в. до н.э. по IV в. н.э. на территории Средней Азии образовались такие большие деспотические государственные образования, как Кангуйское, Греко-Бактрийское и особенно Кушанское (I – IV вв. н. э.), где античная ирригация в этот период достигла наивысшего расцвета. Остатки древних оросительных систем в Южном Узбекистане, в долинах Южного Таджикистана (Кабадианский оазис, Вахшская и Гиссарская долина), на землях древнего орошения в низовьях Амударьи, Сырдарьи и Зеравшана, свидетельствует о том, что античная ирригация достигла наибольшего расцвета именно в Кушанский период. В Кушанское время была освоена вся долина верхнего Зеравшана, вплоть до современной Матчи. Затем наступили времена нападения на регион варварских кочевых племен, все пришло в запустение, люди покидали эти территории, вновь возвращались на эти земли и возрождали ирригацию, без которой не возможно было выжить в этих местах. Так продолжалось с античных времен и в периоды средневековья, особенно раннего. Затем арабские завоевания и особенно монгольское нашествие принесли в регион неисчислимые беды, многие люди погибли, а остальные вынуждены были покинуть эти земли и все оросительные системы пришли в негодность. В период позднего средневековья оросительные системы пришли в полный упадок.

Литература:

1. Statistic, RT. Паспорт Варзобского Района, 2008, Государственный Комитет Статистики РТ-Регионы РТ; Statistic RT: Dushanbe, Tajikistan, 2008; p. 82. (In Russian)
2. Atlas. Атлас Таджикской ССР [Текст] ГУГК; Atlas: Dushanbe, Tajikistan, 1968; p. 199. (In Russian)
3. Nazirova, D. Природные Условия Развития Георисков в Пределах Территории Бассейна Реки Зеравшан; Science and Innovation: Dushanbe, Tajikistan, 2016; pp. 89–92. (In Russian)
4. Scientific Notes. Очерки По Географии Таджикистана [Текст]/Ученые Записки, т. XXI; Серия географическая: Stalinabad, Tajikistan, 1959; pp. 8–58. (In Russian)
5. Gulakhmadov, A.; Chen, X.; Gulahmadov, N.; Liu, T.; Davlyatov, R.; Sharofiddinov, S.; Gulakhmadov, M. Long-Term Hydro– Climatic Trends in the Mountainous Kofarnihon River Basin in Central Asia. Water 2020, 12, 2140. [CrossRef] pp. 2 –20. (in English)

6. Second National Communication of the Republic of Tajikistan under the UN Framework Convention about climate change. Dushanbe, 2008., p. 93. (In Russian)
7. Third National Communication of the Republic of Tajikistan under the UN Framework Convention climate change. Dushanbe, 2014., p. 167 (In Russian)
8. Archival data of the Agency for Hydrometeorology of the Committee for Environmental Protection under the Government of the Republic of Tajikistan
9. Archival data from the author's library
10. Archival data from the Dehavz meteorological station, the Madrushkat Weather Station
11. Katalog lednikov SSSR. Каталог Ледников СССР. Т. 14. Средняя Азия. Выпуск 3. Амударья. Ч.5. Бассейн р. Кофирнигана //В.И. Квачев, А.Г. Санников, Л.Н. Соколов; Gidrometeoizdat: Leningrad, Russia, 1968; p. 44. (In Russian)
12. Third National Communication of the Republic of Tajikistan under the UN Framework Convention climate change. Dushanbe, 2014., p.167. (In Russian).

Экстремальные метеорологические явления: долгопериодная изменчивость и предсказуемость

Куликова И.А.

Гидрометцентр России, Москва, Россия

E-mail: i.kulikova2009@yandex.ru

Extreme weather events: long-term variability and predictability

Kulikova I.A.

Hydrometeorological Center of Russia, Moscow, Russia

Рассматриваются основные определения и количественные характеристики экстремальных метеорологических явлений на длительных интервалах времени. Особое внимание уделяется волнам тепла и холода. Показано, что распределения рекомендованных ВМО индексов волн тепла и холода (WSDI и CSDI) существенно отличаются от нормального и имеют специфические структурные особенности, характерные для вероятностных распределений экстремальных величин. С использованием данных реанализа ЕЦСПП (ERA5) выявлены статистически значимые положительные (отрицательные) тренды в изменениях экстремальных характеристик климата на территории Северной Евразии в зимний и летний сезоны 1981-2024 гг. Выделены новые тенденции и направления в развитии прогностической системы Гидрометцентра России/СЕАКЦ, связанные с прогнозами экстремальных метеорологических явлений. Показано, что верификация прогнозов экстремальных явлений требует применения специальных методов, учитывающих их малую повторяемость. Особое внимание уделяется синоптическим ситуациям и режимам атмосферной циркуляции, на фоне которых сформировались волны тепла и холода. Полученные результаты могут оказаться полезными в контексте оценки климатических рисков и решения прикладных задач, связанных с различными социально-экономическими сферами жизни общества.

Основные особенности климатических условий зимнего сезона 2024-25 гг.

¹ Сумерова К.А., ² Варгин П.Н., ¹ Тищенко В.А.

¹ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

² Центральная аэрологическая обсерватория, Московская область, Россия

The main features of climatic conditions of the winter season 2024-25

¹ Sumerova K.A., ² Vargin P.N., ¹ Tishchenko V.A.

¹ Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

² Central Aerological Observatory, Moscow region, Russia

Проведение регулярного мониторинга является неотъемлемой частью работ в области климатического обслуживания, поскольку обеспечивает возможность с высокой надежностью анализировать и оценивать происходящие климатические изменения.

В работе проведен комплексный синоптический анализ особенностей крупномасштабной атмосферной циркуляции и долгопериодных тенденций изменчивости температуры воздуха и количества осадков в Северном полушарии с упором на территорию Северной Евразии за зимний сезон 2024-25 годов. Зима в Северном полушарии за последние 175 лет была рекордно теплой. Учитывая тенденции роста частоты и интенсивности экстремальных погодно-климатических явлений, важность регулярного мониторинга атмосферной циркуляции возрастает. Сезон характеризовался необычными явлениями как в стратосфере, так и в тропосфере. В стратосфере необычайно глубокий и интенсивный стратосферный вихрь. В средней тропосфере над территорией Европы и Европейской части России наблюдались блокирующие процессы, которые приводили к нарушению нормальной циркуляции над Атлантикой и Северной Евразией. На всей территории Северной Евразии прошедший зимний сезон был теплым. Наиболее крупными положительными аномалиями были в центре Сибири. Несмотря на положительные аномалии приземной температуры за весь сезон, зимой 2024-25 годов наблюдались волны холода в ЦФО, СКФО и ДФО.

Зимний сезон 2024-25 года подтвердил тенденцию к усилению экстремальности климата, что требует дальнейшего развития методов прогнозирования и мониторинга для адаптации к изменяющимся климатическим условиям.

Бюллетень сезонных метеопрогнозов. Лето 2025

Сумерова К.А., Куликова И.А.

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

Seasonal outlook for summer 2025

Sumerova K.A., Kulikova I.A.

Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

В докладе представлен анализ ожидаемых циркуляционных условий в северном полушарии на лето 2025 года в нижней и средней тропосфере. Рассмотрены материалы прогностических центров ВМО, низкочастотная изменчивость, прогноз индексов атмосферной циркуляции по модели ПЛАВ (Гидрометцентр России/Институт вычислительной математики им. Марчука РАН). Сделаны основные выводы по прогнозам на летний сезон 2025 года ведущих мировых прогностических центров ВМО и российских моделей. Обсуждается наиболее вероятное развитие температурно-влажностного режима на территории Северной Евразии по оценкам большинства мировых климатических моделей.

Консенсусный прогноз аномалий приземной температуры воздуха и осадков на летний сезон 2025 г.

Тищенко В.А., Хан В.М.

Гидрометцентр России, Москва, Россия

E-mail: hydrometcentr@gmail.com, valentina_khan2000@yahoo.com

Consensus forecast of surface air temperature and precipitation anomalies for summer 2025

Tishchenko V.A., Khan V.M.

Hydrometcentre of Russia, Moscow, Russia

На основе данных трех российских моделей ПЛАВ, ГГО и ИВМ на СЕАКОФ-28 составлен вероятностный прогноз температурного режима и количества осадков на летний сезон 2025 года по территории Северной Евразии. В исходной версии прогноза используются прогнозы с равными весами.

Учтены региональные климатические прогнозы стран – участниц СЕАКОФ. На основе региональных климатических прогнозов введены весовые коэффициенты для каждой модели.

Общее решение участников о консенсусном прогнозе аномалий приземной температуры воздуха и осадков на июнь-август 2025 года принимается на форуме СЕАКЦ.

Анализ условий формирования температурного режима летнего сезона 2023 г. в Казахстане

¹ Исабекова Ж.К., ¹ Васюкова О.В., ² Иванова И.А.

¹ РГП «Казгидромет» ГМЦ, Астана, Казахстан

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

E-mail: isabekova_zh@meteo.kz, ira.nova@mail.ru

Представлены результаты анализа температурного режима и синоптических процессов, наблюдавшихся на территории Казахстана в летний период 2023 года. По результатам исследования выделены основные атмосферные процессы, приводящие к формированию аномально-жаркой погоды. Рассмотрены особенности погодных условий в следующих сезонах (осень 2023 г, декабрь 2023 г, январь 2024 г.) Результаты исследования могут быть использованы для улучшения качества долгосрочного прогнозирования в регионе.

В целом, 2023 год в Казахстане был самым теплым за всю историю наблюдений.

Анализ тенденций в экстремумах температуры приземного воздуха и количества атмосферных осадков на территории Казахстана показал, что за период 1961–2022 гг.:

- прослеживается устойчивое увеличение количества летних дней с температурами выше $+25^{\circ}\text{C}$ и $+30^{\circ}\text{C}$, а также тропических ночей с температурами выше $+20^{\circ}\text{C}$, особенно заметное на юге, юго-западе и западе республики;

- повсеместно происходит увеличение количества волн жары в теплое время года, общей максимальной продолжительности волн жары, увеличивается также продолжительность волн тепла в целом за год.

Наблюдаемое повышение повторяемости и продолжительности периодов с высокими температурами воздуха в теплый период года ведет к негативным последствиям как для организма человека и животных, так и для различных секторов экономики.

Во многих странах внедрена система раннего предупреждения о наступлении волн жары, проводятся превентивные мероприятия, в результате которых спасают жизни людей, в целом принимаются меры по адаптации к экстремальным погодным условиям.

В РГП «Казгидромет» при достижении температуры воздуха критериев ОЯ и СГЯ составляются штормовые предупреждения о сильной и очень сильной жаре.

На большей части Казахстана критерий сильной жары по [1] составляет $+35^{\circ}\text{C}$ (ОЯ), очень сильной жары $+40^{\circ}\text{C}$ (СГЯ), а для юга страны $+40^{\circ}\text{C}$ (ОЯ) и $+45^{\circ}\text{C}$ (СГЯ). Например, для г. Астана к сильной жаре относится температура $+35^{\circ}\text{C}$, к очень сильной жаре $+40^{\circ}\text{C}$.

По данным СЕАКЦ (Северо-Евразийский климатический центр) аномально жаркой погодой считается период, когда отклонение среднесуточной температуры воздуха от нормы составляет 7° и более в течение 5 дней и более [2].

Согласно критериям Росгидромета, аномально жаркой погодой считается период, когда отклонение среднесуточной температуры воздуха от нормы составляет 7° и более в течение не менее 3 дней подряд [3].

Для прогноза температуры воздуха на длительные сроки используются долгосрочные методы прогнозирования – прогноз будущих отклонений метеорологических элементов от климатических норм, которые формируются под влиянием общей циркуляции атмосферы. Для этого необходимо прогнозировать будущий тип атмосферной циркуляции. Практические методы долгосрочного прогнозирования построены на базе изучения крупномасштабных процессов общей циркуляции атмосферы в конкретном географическом регионе и развития этих процессов в течение длительного промежутка времени. В долгосрочном прогнозировании используются синоптические, физико-статистические, статистические и гидродинамические методы прогнозирования.

Июнь в 2023 г. начался с интенсивной волны жары, когда над территорией Казахстана сформировалась форма циркуляции СЗ по Байдалу М.Х. [4], однако завершился он по-осеннему прохладной погодой. Над территорией Казахстана в приземном слое атмосферы отмечалось чередование барических образований разного знака, однако преобладало поле пониженного давления, а в средней тропосфере наблюдались западные и юго-западные потоки.

Первая декада июня выдалась аномально жаркой, дневные температуры воздуха побили рекорды абсолютных максимумов прошлых лет. Такой высокий фон температуры воздуха был связан с устойчивым выносом тропических воздушных масс с районов Ирана и Средней Азии. Температура воздуха повышалась днем до $+33+40^{\circ}\text{C}$. Над западной половиной Казахстана наблюдался высотный гребень тепла, который оставался стационарным с начала третьей декады мая, затем в течение первой декады июня сместился в восточном направлении. На рис. 1 в качестве иллюстрации процесса, представлены карты геопотенциала поверхности 500гПа и сборно-кинематические карты за первую декаду июня с разбивкой на 5-ти дневки по ЕСП.

Во второй и третьей декадах июня постепенно осуществлялся заток холодных воздушных масс из районов Северных морей, в связи с чем наблюдался спад жары.

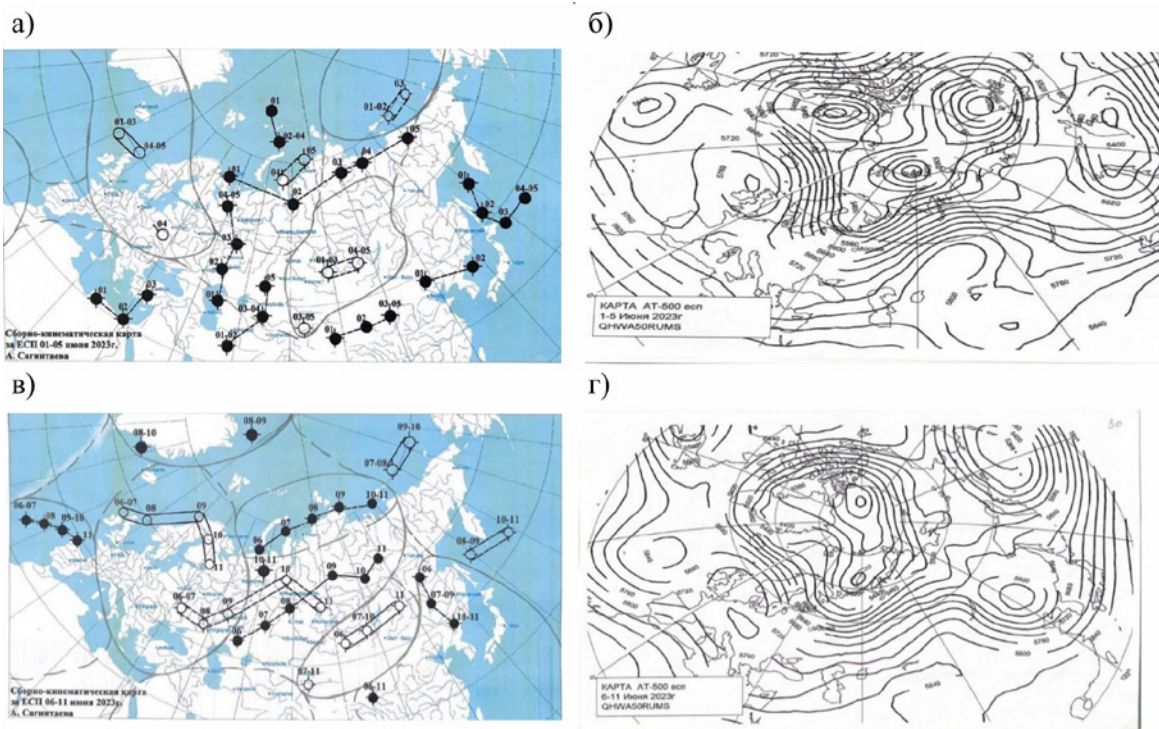


Рисунок 1. Карты AT-500: б). период 1-5 июня, г). период 6-11 июня. Сборно-кинематические карты: а) период 1-5 июня, в). период 6-11 июня.

Июль был жарким практически на всей территории Казахстана, этому способствовал интенсивный вынос теплых воздушных масс с Ирана и Средней Азии, над территорией республики стационарировал блокирующий высотный гребень (рис.2). Пик жары пришелся на западные регионы – в конце первой декады ($+40+46^{\circ}\text{C}$), на северо-западные, северные – в начале второй декады ($+40+46^{\circ}\text{C}$), на восточные, юго-восточные, южные – в середине месяца ($+40+44^{\circ}\text{C}$). На большей части Казахстана на фоне высоких температур воздуха наблюдалась пожарная опасность 5 класса.

Рисунок 2. Среднемесячное поле AT-500 в июле 2023г.

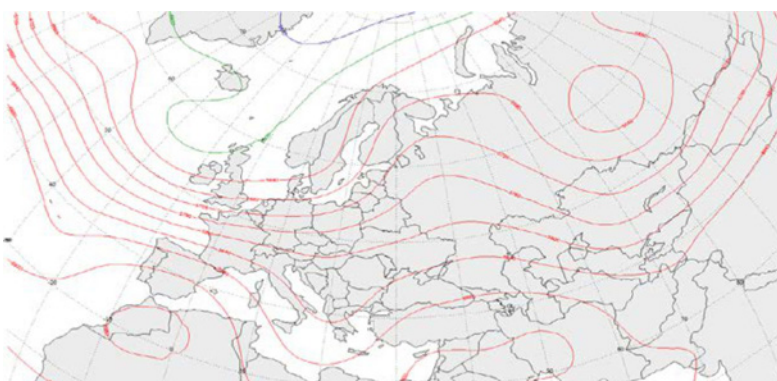
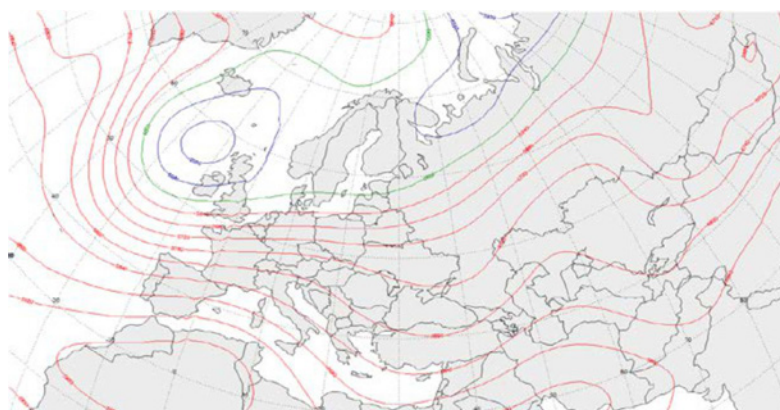


Рисунок 3. Среднемесячное поле AT-500 в августе 2023г.

В средней тропосфере над территорией Казахстана в течение августа преобладала высотная ложбина циклона, в приземном слое – обширный антициклон, сместившийся из районов Прибалтики (рис. 3). Поступление арктического воздуха по восточной периферии антициклона обусловило отрицательные аномалии температуры воздуха в восточной половине республики. Так, прохладная погода с первыми отголосками осени пришлось на середину месяца, когда температура воздуха на севере, в центре, на востоке, юго-востоке понижалась ночью до $+3+10^{\circ}\text{C}$, днем до $+12+20^{\circ}\text{C}$. Исключение составили западные регионы, где большую часть месяца по западной периферии антициклона происходил вынос теплого воздуха с районов Ирана и восточной части Средиземного моря. Столбики термометров днем достигали отметки $+35+42^{\circ}\text{C}$. На фоне преобладающего повышенного атмосферного давления на большей части Казахстана наблюдался дефицит осадков.

В августе периоды жаркой погоды наблюдались в г.Астане с 1 по 9 августа и с 18 по 23 августа с температурой $+29+35^{\circ}\text{C}$. Критерий ОЯ был достигнут 23 августа ($+35,4^{\circ}\text{C}$).

В г. Астана растёт частота, продолжительность и интенсивность волн тепла, когда, как минимум, 6 дней подряд наблюдается экстремально высокая для данного сезона суточная температура воздуха.

Аномально теплая погода летом 2023 года – следствие повышенной повторяемости блокирующих процессов (меридиональный тип циркуляции).

Полученные результаты могут быть дополнительными предикторами для долгосрочного прогнозирования высоких температур воздуха на территории Республики Казахстан.

Стоит отметить, что долгосрочный прогноз аномалий температуры воздуха на лето 2023 г, выпущенный Управлением долгосрочных прогнозов «Казгидромета» оказался успешным на 98%. На рисунке 4 приведены прогностические и фактические поля аномалий температуры воздуха за летний период 2023 г.

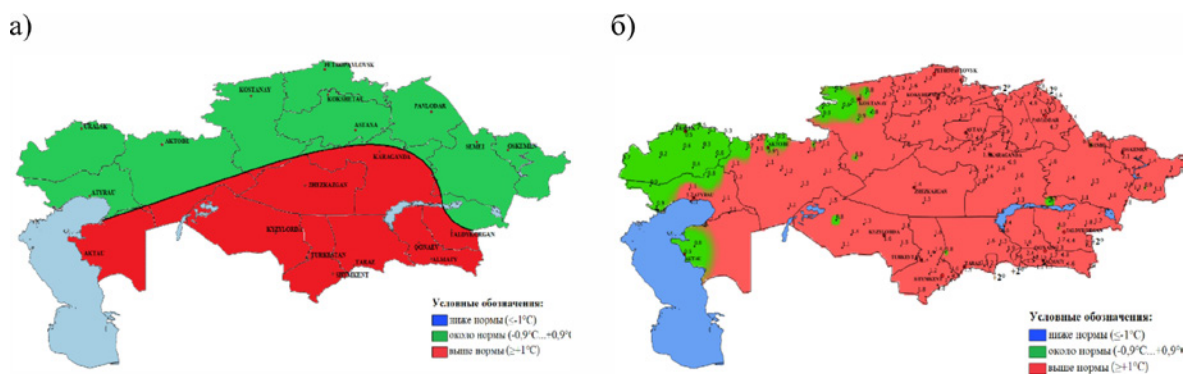


Рисунок 4. Прогностическое а) и фактическое б). поле аномалий температуры воздуха в летний сезон 2023 г.

Интересно, что следующие сезоны (осень-зима) были тоже необычными.

Сентябрь 2023 года запомнился дождливой погодой. Были отмечены рекорды по атмосферным осадкам, за сутки на некоторых метеорологических станциях выпадало две и более месячных норм. Кроме рекордов по атмосферным осадкам в конце месяца при понижении температуры воздуха мессами наблюдались заморозки.

Теплыми выдались первая и вторая декады октября. На большей части республики температура воздуха была выше климатической нормы на $1-3^{\circ}$. В северной половине страны в дневные часы столбики термометров достигали отметки $+15+25^{\circ}\text{C}$, в южной половине $+22+30^{\circ}\text{C}$. В этот период были отмечены температурные рекорды на некоторых станциях. Не обошлось и без холодных дней. В отдельные дни при прояснениях ночью в северных, центральных и восточных регионах температура воздуха опускалась до $-3-11^{\circ}\text{C}$. Такие температуры вполне свойственны октябрю.

Большую часть ноября при западном и юго-западном переносе теплых воздушных масс с районов Ирана и Средиземного моря температурный фон на территории Казахстана был выше нормы на $3-10^{\circ}\text{C}$. При таких высоких аномалиях были достигнуты и перекрыты рекорды максимальной температуры воздуха прошлых лет. За всю историю метеонаблюдений ноябрь 2023 года стал одним из экстремально теплых. Пик тепла наблюдался в период 17-18 ноября. В г. Астана норма среднемесячной температуры воздуха за ноябрь составляет $-5,2^{\circ}\text{C}$. Фактическая температура месяца по данным наблюдений была $+2,2^{\circ}\text{C}$, что выше нормы на $7,4^{\circ}\text{C}$. Это новый рекорд температуры.

Декабрь 2023 года был богат на погодные явления. Причиной такого разнообразия атмосферных явлений погоды и температурных «качелей» стала частая смена циклонов и антициклонов. Месяц условно разделился на две волны тепла и одну волну холода. При волнах тепла наблюдалась аномально теплая погода, со снегопадами и метелями, в отдельные дни наблюдался переход снега в дождь и гололед. При волне холода, напротив, погода отличалась «трескучими» 30-40-градусными морозами как на севере, так и на юге страны. Поэтому в декабре были обновлены рекорды по максимальным и минимальным суточным температурам воздуха.

В течение января 2024 года часто преобладала быстрая смена синоптических процессов, что и обусловило большие контрасты температурного фона. Теплые снежные дни часто сменялись ясными и морозными. Первая декада месяца выдалась экстремально теплой. Средняя аномалия температуры воздуха превысила норму на 1-13°C. На фоне высоких аномалий были зафиксированы новые температурные рекорды. Не обошлось и без морозных дней. Во второй декаде месяца с поступлением холодных воздушных масс с районов Западной Сибири и Арктических морей, температура воздуха в северной половине страны ночью понижалась до -25-40°C.

В первой декаде февраля практически на всей территории Казахстана отмечалось значительное потепление, были установлены рекорды как в температурном режиме, так и по количеству выпавших атмосферных осадков [5,6,7].

Таким образом, по итогам работы можно сказать, что на территории Республики Казахстан происходят заметные климатические изменения.

Литература:

1. Наставление по службе прогнозов. Терминология и оценка оправдываемости прогнозов погоды общего назначения, Алматы 2006г. - 24с.
2. Архив предупреждений. СЕАКЦ, Росгидромет. https://seakc.meteoinfo.ru/images/media/images-seakc/seakc/monitoring/climate-watch/clim_watch_trsf20240426.pdf
3. «Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения», Москва, ФГБУ «Гидрометцентр России», 2019 г.
4. М.Х. Байдал Долгосрочные прогнозы погоды и колебаний климата Казахстана. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1965г. – 362с.
5. Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана: 2022 год // НИЦ РГП «Казгидромет», Астана, 2023, 75 с.
6. Обзор об особенностях климата на территории Казахстана 2023 год // НИЦ РГП «Казгидромет», Астана, 2024, 65 с.
7. Обзор фактической погоды в августе 2023г. УДПП РГП «Казгидромет», Астана, 2023г.

Analysis of conditions of formation of the temperature regime of the summer season of 2023 in Kazakhstan

¹ Isabekova Zh.K., ¹ Vasyukova O.V., ² Ivanova I.A.

¹ RSE «Kazhydromet» GMC, Astana, Kazakhstan

² Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

The article presents the results of an analysis of the temperature regime and synoptic processes observed in Kazakhstan in the summer of 2023. According to the results of the study, the main atmospheric processes leading to the formation of abnormally hot weather are identified. The features of weather conditions in the following seasons (autumn 2023, December 2023, January 2024) are considered. The results of the study can be used to improve the quality of long-term forecasting in the region. Keywords. Anomaly, temperature, synoptic process, long-term forecasting.

Translating NEACOF 28 seasonal outlook to socio-economic impact forecasting

Srivastava S., Pronina E., Goodrazi L.S.

Economic and Social Commission for Asia and the Pacific of the United Nations, Bangkok, Thailand

The presentation explores the usage of NEACOF 28 seasonal outlook at ESCAP Risk&Resilience Portal for visualization of socio-economic impact forecasting. The presentation also explores the cooperation of ESCAP and NEACC.

Гипотеза: влияет ли приближения к территории России Северного Магнитного полюса на период работы автозимников на территориях Якутии, Красноярского края и Иркутской области

^{1,2,3} Филиппова Н.А., ⁴ Холопцев А.В., ⁴ Шубкин Р.Г.

¹ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия

² Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова

³ Якутский научный центр СО РАН

⁴ Сибирская Пожарно-Спасательная академия ГПС МЧС России, Красноярский край, Железногорск

Hypothesis: does the approach of the North Magnetic Pole to the territory of Russia affect the period of operation of winter roads in the territories of Yakutia, the Krasnoyarsk Territory and the Irkutsk region

^{1,2,3} Filippova N.A., ⁴ Kholoptsev A.V., ⁴ Shubkin R.G.

¹ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University

² M.K. Ammosov North-Eastern Federal University

³ Yakut Scientific Centre SB RAS

⁴ Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Krasnoyarsk Territory, Zheleznogorsk

Устойчивость развития социально-хозяйственных систем регионов России, расположенных в Сибири, в особенности относящихся к ее Арктической зоне, а также безопасность жизнедеятельности их населения во многом зависят от устойчивости функционирования их транспортных комплексов.

Наиболее сложные условия для функционирования автомобильного транспорта в таких регионах складываются в весенние месяцы, когда автозимники, успешно эксплуатировавшиеся зимой, протаивают и становятся небезопасными.

Одним из основных факторов, влияющих на сроки завершения эксплуатации автозимников, является термический режим территорий, по которым они проходят. Значимо влияет на безопасность работы водителей на автозимниках также изменения потоков биологически активной ультрафиолетовой радиации, способной поражать их зрение (вызывая саркому, меланому, катаракту и ожоги глаз).

Поэтому развитие существующих представлений о тенденциях дальнейшей динамики термического режима и потоков ультрафиолетовой радиации на территориях, по которым пролегают автозимники, а также причинах их вызывающих, является актуальной проблемой не только физической географии, метеорологии, климатологии, но также безопасности эксплуатации автомобильного транспорта.

Согласно существующим представлениям об источниках энергии, формирующих термический режим любых участков территории России, к числу основных относится поступающая на них суммарная солнечная радиация. Изменения ее потоков определяются сменой времен года, а также вариациями прозрачности расположенной над ними атмосферы, которые вызваны переменами характеристик тропосферной облачности (прежде всего ее оптической плотности).

Упомянутые перемены обусловлены не только вариациями влажности и температуры воздуха, в котором формируются облака, но и изменениями интенсивности его ионизации (ионы – наиболее активные атмосферные ядра конденсации).

Над территориями, расположенными в зоне влияния Стратосферного полярного вихря, изменения интенсивности ионизации стратосферного воздуха, значимо влияют также на вариации общего содержания озона, вызывающие динамику потоков ультрафиолетовой радиации, поступающей на них. Наиболее существенным этот фактор является в феврале и марте, - в месяцы, когда общее содержание озона над Сибирью является минимальным.

Главный агент, вызывающий ионизацию тропосферного и стратосферного воздуха над высокоширотными регионами нашей планеты – ливни вторичных частиц. Эти процессы возникают при входе в земную атмосферу из космоса заряженных частиц, которые обладают высокой кинетической энергией. Как правило, такими частицами являются протоны, входящие в состав Галактических и Внегалактических космических лучей, которые обладают энергией достаточной для преодоления «защитного экрана», созданного геомагнитным полем. При наиболее мощных (протонных) вспышках на Солнце входить в атмосферу могут также заряженные частицы, образовавшиеся при этих вспышках.

Над Магнитным полюсом Северного полушария магнитное поле земную атмосферу практически не защищает, вследствие чего в нее могут входить заряженные частицы любой энергии, а их поток (при прочих равных условиях) максимален.

По мере увеличения углового расстояния до Магнитного полюса минимальная энергия частиц, позволяющая им входить в земную атмосферу, существенно возрастает (вследствие чего их поток много-

кратно снижается). Существенно влияют на рассматриваемые потоки также Магнитные бури, возникающие после вспышек на Солнце.

В период после 1903 года Магнитный полюс Северного полушария нашей планеты движется практически по прямой в направлении полуострова Таймыр и за это время приблизился уже более чем на 2400 км. При дальнейшем движении полюса тем же курсом, непосредственно над территорией Красноярского края он окажется к 2040 году.

Как следует из изложенного, одной из причин увеличения потоков космических лучей, входящих в атмосферу над Россией, является приближение к ее территории Магнитного полюса Северного полушария. Второй причиной изменений этих потоков являются вариации Солнечной активности, которые значимо и отрицательно коррелированы с ними вследствие эффекта Форбуша.

Поэтому значимыми причинами происходящих изменений интенсивности ионизации тропосферного и стратосферного воздуха над многими регионами нашей планеты, расположенными в высоких и умеренных широтах, являются как перемещение Магнитного полюса, так и вариации солнечной активности.

Значимость влияния солнечной активности на климат и состояние озонового слоя доказана в работах многих отечественных и зарубежных авторов. Вместе с тем значимость влияния на термический режим различных территорий Сибири в зимне-весенние месяцы и потоки поступающей на них ультрафиолетовой радиации, оказываемого перемещением Магнитного полюса Северного полушария, ныне изучены недостаточно.

Поэтому нами выдвинуто предположение, согласно которому значимым фактором изменений сроков безопасной эксплуатации автозимников на многих участках территории Сибири, значимой причиной происходящих перемен их термического режима в зимне-весенние месяцы, а также увеличения поступающих на них потоков ультрафиолетовой радиации, является приближение к ним Магнитного полюса Северного полушария.

Выдвинутая гипотеза не тривиальна, поскольку и изменения термического режима территорий, и вариации потоков поступающей на них биологически активной ультрафиолетовой радиации – процессы многофакторные, вследствие чего значимость влияния на них приближения Магнитного полюса не очевидна.

Целью данной работы является проверка справедливости выдвинутой гипотезы. Установлено, что межгодовые вариации потоков космических лучей, входящих в земную атмосферу, значимо влияют на изменения среднемесячных потоков суммарной солнечной радиации, поступающей в весенние и летние месяцы на территорию Якутии, Красноярского края, Ямало-Ненецкого, Ханты-Мансийского и Чукотского автономного округа, Иркутской и Магаданской области. Эти изменения вносят значимый вклад в потепление климата перечисленных регионов, ускоряют таяние их снежно-ледяного покрова и сокращают сроки безопасной эксплуатации автозимников.

В зимне-весенние и зимние месяцы тот же фактор значимо влияет и на изменения потоков ультрафиолетовой радиации, поступающей на перечисленные территории, и влияющей на здоровье людей.

При дальнейшем приближении полюса к Сибири влияние солнечной активности на изменения температурного режима ее территорий в весенне-летние месяцы, а также вариации потоков ультрафиолетовой радиации в зимне-весенние месяцы будет усиливаться.

Наиболее существенные последствия этого процесса будут возникать в годы минимумов солнечной активности, ближайшим из которых является 2030г. В указанном году следует ожидать завершения периода безопасной эксплуатации автозимников в наиболее ранние сроки, а также существенного увеличения потоков ультрафиолетовой радиации в феврале и марте.

Поэтому актуальной проблемой безопасного и устойчивого развития регионов России, расположенных в Сибири, является создание здесь системы мониторинга последствий приближения к ней Магнитного полюса Северного полушария, а также разработка мероприятий, направленных на защиту их населения, транспорта и других секторов экономики от этих последствий.

Изменения социо-климатических индексов за 1990-2024 гг.

¹ Ревина А.Д., ² Емелина С.В., ¹ Смоляницкий В.М., ² Хан В.М.

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

² Гидрометцентр России, Москва

E-mail: aaricoop@aaari.ru

Климатические изменения в арктической зоне оказывают сильное влияние на деятельность человека. В данной работе для Арктики в целом и отдельных ее регионов проанализированы средние значения и тренды по нескольким основным социо-климатическим индексам: индекс Бодмана, индекс эффективной температуры и индекс общей эффективной температуры за период 1990-2024 гг. Проведено сравнение индексов, вычисленных по данным реанализов ERA5 и NCEP. Выявлен переход к более мягким условиям в большей части районов Арктики за последние годы (2021-2024) в сравнении со стандартным 30-летним периодом 1990-2020 гг.

Changes in socio-climatic indices in 1990-2024

¹ Revina A., ² Emelina S., ¹ Smolyanitsky V., ² Khan V.

¹ Arctic and Antarctic Research Institute, St-Petersburg

² Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow

Climate change in the Arctic zone has a strong impact on human activities. In this work we analyze average values and trends for several key socio-climatic indices for the Arctic as a whole and its individual regions: the Bodman index, the effective temperature index, and the total effective temperature index for the period 1990-2024. A comparison of indices calculated using ERA5 and NCEP reanalysis data is carried out. A transition to milder conditions in most Arctic regions in recent years (2021-2024) was revealed compared to the standard 30-year period 1990-2020.

Оценка засушливых условий на территории Северной Евразии в интересах сельского хозяйства на базе сверхдолгосрочных прогнозов модели Земной системы ИВМ РАН

Емелина С.В., Тищенко В.А., Хан В.М.

Гидрометцентр России, Москва, Россия

E-mail: tkachukzn@gmail.com, hydrometcentr@gmail.com, valentina_khan2000@yahoo.com

Assessment of arid conditions in the territory of Northern Eurasia in a complex ecological economy based on decadal forecasts of the Earth system model of INM RAS

Emelina S.V., Tishchenko V.A., Khan V.M.

Hydrometcentre of Russia, Moscow, Russia

В связи с изменением климата и последствиями его изменений все больше внимания уделяется вопросам развития специализированного прогнозирования для различных секторов экономики. Все более значимую роль в цепочке специализированной информации для экономики начинают играть декадные прогнозы. В то время как в сельском хозяйстве субсезонные и сезонные прогнозы могут служить основой для принятия решений о лучших датах посадки и сбора урожая, выборе сельскохозяйственных культур, использовании удобрений и севооборотах, прогнозы на срок от года могут помочь в принятии решений вводе или выводе новых сортов сельскохозяйственных культур, создании новой инфраструктуры управления водными ресурсами и ирригацией. Исследования и новые технологии в области долгосрочных метеорологических прогнозов имеют важное прикладное значение, так как позволяют принимать своевременные решения и проводить необходимые мероприятия для адаптации к новым условиям. Данная работа посвящена оценке будущих изменений характеристик температурно-влажностного режима на территории России на временном интервале 5-10 лет и возможных последствий этих изменений для сельского хозяйства, и здоровья населения на базе экспериментальных сверхдолгосрочных прогнозов, выпускаемых в ФГБУ «Гидрометцентр России» по модели Земной системы ИВМ РАН. Для оценки засушливых условий в сельскохозяйственных районах Северной Евразии использован стандартизированный индекс эвапотранспирации осадков (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI), отрицательные/положительные значения которого характеризуют дефицит/избыток годового увлажнения с учетом осадков и испаряемости. Преимущество подхода, использованного при расчете SPEI, состоит в универсальности определения градиентов разности осадков и испаряемости в регионах с различным климатом в соответствии со свойствами функции нормального распределения. Целый ряд зарубежных и российских исследований [Spinoni et. al., 2017. Черенкова и др., 2016, Золотокрылин и др., 2022] подтверждают возможность использования данного индекса для оценки характеристик засух. В работе обсуждается успешность прогнозов с использованием стандартных критериев качества для долгосрочных прогнозов. Анализируются последствия возможного изменения характеристик увлажнения на территории Северной Евразии в ближайшие 5-10 лет на базе сверхдолгосрочных прогнозов модели Земной системы ИВМ РАН. Выявлены регионы, в которых эти изменения будут особенно ощутимыми для сельского хозяйства и жизнедеятельности населения. Представленные оценки возможных изменений на пятилетнем интервале позволяют получить более объективную картину ожидаемых климатических изменений и полезны для разработки оптимальных решений для развития экономики в условиях изменяющегося климата.

- Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда проект РНФ № 22-17-00247 в ИВМ РАН.

Динамика условий термического комфорта летнего сезона на территории Северной Евразии к концу XXI в.

^{1,2} **Маратканова В.С., ^{1,2} Константинов П.И.**

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

² Российский государственный гидрометеорологический университет, 192007, Воронежская улица, 79, г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: varvara.mar@yandex.ru, kostadini@mail.ru

The dynamic of summer thermal comfort conditions in Northern Eurasia by the end of the 21st century

^{1,2} **Maratkanova V.S., ^{1,2} Konstantinov P.I.**

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

² Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

Разработка стратегий адаптации территорий к глобальным изменениям климата с учётом влияния этой динамики на здоровья человека часто требует конкретных численных оценок. Одним из инструментом их проведения является расчёт биоклиматических индексов комфортности, которые демонстрируют воздействие совокупности метеорологических условий на организм человека. Для территории Северной Евразии, ограниченной с севера и юга параллелями 40 и 80° с. ш., а с запада и востока – 10° з. д. и 180° в. д. соответственно, подобные оценки приобретают дополнительную важность в связи с большими скоростями потепления в высоких широтах и концентрацией населения на территории Европы, ЕЧР, Северного Китая.

Для оценки комфортности летних месяцев использовался комплекс биоклиматических индексов. Два простых индекса – HI и HUM, – были рассчитаны с использованием эмпирических зависимостей между температурой и влажностью воздуха, приведённых в (Steadman, 1979; Masterton & Richardson, 1979). Значения индексов PET и UTCI были рассчитаны с помощью библиотеки biometeo языка программирования Python (Chen, 2023). В связи с необходимостью учёта суточного хода потоков радиации, были использованы данные моделей проекта CMIP6 с разрешением по времени 3 часа. В качестве базового был выбран период 1980–2009 гг., конец столетия определялся как 2080–2100 гг. Динамика характеристик термического комфорта в июне-августе определялось разностью повторяемости дней, в которые наблюдались условия холодового и тепловового стресса и термического комфорта, в двух сценариях изменения климата (SSP 2.4.5 и SSP 5.8.5) и историческом эксперименте.

Результаты демонстрируют тенденцию к росту повторяемости дней с условиями тепловового стресса к концу столетия, особенно на территории Центральной Азии и в Средиземноморском регионе. Для территорий за 65° с. ш. тенденции к росту выражены значительно слабее. Анализ дней, в который отсутствовали как тепловый, так и холодовый стресс, демонстрирует наличие в Северной Евразии двух районов. Один, в котором повторяемость уменьшается за счёт высоких значений температуры в дневные часы, охватывает южную часть территории исследования. Во втором районе (высокие широты) повторяемость дней с комфортными условиями в июне-августе наоборот растёт за счёт общего тренда на повышение температуры воздуха.

■ Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ №23-77-30008.

Литература:

1. Chen, YC. Thermal indices for human biometeorology based on Python. Sci Rep., 2023. 13. 20825 <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47388-y>
2. Masterton J M and Richardson F A. HUMIDEX, A Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity (Toronto: Environment Canada, Atmospheric Environment Service). 1979.
3. Steadman R G. The assessment of sultriness. Part I: a temperature-humidity index based on human physiology and clothing science J. Appl. Meteorol. Climatol., 1979, 18, 861–73.

Ожидаемые изменения климата на территории Казахстана в XXI веке по данным моделей CMIP6

¹ Гвоздева А.В., ² Аубакирова С.Г., ^{1,2} Гущина Д.Ю.

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

² Казахстанский филиал МГУ имени М.В.Ломоносова, Республика Казахстан, Астана

Projected climate changes in Kazakhstan in the 21st century based on CMIP6 model data

¹ Gvozdeva A.V., ² Aubakirova S., ^{1,2} Gushchina D.Yu.

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² MSU Branch in Kazakhstan, Kazakstan, Astana

Изменения климата являются одной из ключевых глобальных проблем XXI века, оказывая значительное влияние на экосистемы, экономику и общество. Казахстан, как часть Северной Евразии, отличается разнообразием климатических условий и повышенной уязвимостью к климатическим изменениям.

В рамках данной работы рассматриваются ожидаемые изменения климата на территории Казахстана в XXI веке на основе данных 34 климатических моделей CMIP6. Для анализа были использованы данные исторического сценария («historical»), а также прогнозные сценарии SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Рассматривались ключевые метеорологические параметры: температура воздуха на 2 м, осадки, атмосферное давление на уровне моря и ветер на высоте 10 м. Для оценки изменений в будущем климате проводилось осреднение данных по четырем временным периодам: 2021–2040 гг., 2041–2060 гг., 2061–2080 гг. и 2081–2100 гг. Анализ включал как среднегодовые характеристики, так и сезонные особенности, охватывающие зиму (декабрь–февраль), весну (март–май), лето (июнь–август) и осень (сентябрь–ноябрь). Кроме того, были выполнены оценки для пяти регионов Казахстана: Северного, Восточного, Южного, Западного и Центрального.

Проведенный анализ позволил оценить изменения ключевых метеорологических параметров на территории Казахстана по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5, выявить сезонные различия в ожидаемых климатических характеристиках и определить пространственную неоднородность этих изменений. Результаты показали, что к концу XXI века среднегодовая аномалия температуры воздуха составит до 3,2 °C по сценарию SSP2-4.5 и до 6,3 °C по сценарию SSP5-8.5. Наиболее выраженные аномалии температуры ожидаются в зимний период в Северном регионе Казахстана, где среднее значение по ансамблю моделей достигает +7,8 °C. В то же время Южный регион характеризуется наименьшими изменениями температуры воздуха, особенно в весенний и осенний сезоны. Среднегодовые суммы осадков, согласно прогнозам, увеличатся на 8,5% по сценарию SSP2-4.5 и на 11% по сценарию SSP5-8.5 относительно современного климата. При этом по сценарию SSP5-8.5 ансамблевые данные указывают на рост осадков до 29% в зимний период и их сокращение на 15% в летний период. Наибольшее уменьшение осадков прогнозируется для Западного региона Казахстана (до -19% летом), тогда как максимальное увеличение ожидается в Северном регионе (до 34% зимой). На фоне значительного роста температуры предполагается ослабление континентальности климата в северных районах Казахстана и ее усиление в южных, особенно вблизи Каспийского моря. Кроме того, в зимний сезон прогнозируется снижение влияния на погоду отрога Азиатского антициклона.

СЕКЦИЯ VII

СЕМИНАР ПО РАЗВИТИЮ НАЦИОНАЛЬНОЙ
КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИРазвитие блока пограничного слоя океана в рамках
климатической модели ИВМ РАН^{1,2,3,4} Ахтамьянов Р.А., ^{1,2,5} Гладских Д.С., ^{1,2,6} Мортиков Е.В.¹ Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ² Московский центр фундаментальной и прикладной математики³ Географический факультет МГУ⁴ Гидрометцентр РФ⁵ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН⁶ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАНE-mail: ramil.rgk@gmail.com, daria.gladskih@gmail.com, evgeny.mortikov@gmail.comDevelopment of the ocean boundary layer block within the framework
of the INM RAS climate model^{1,2,3,4} Ahtamyanov R.A., ^{1,2,5} Gladskih D.S., ^{1,2,6} Mortikov E.V.¹ Research Computing Center of Lomonosov Moscow State University² Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics³ Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University⁴ Hydrometeorological Center of the Russian Federation⁵ A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS⁶ Marchuk Institute of Numerical Mathematics

Пограничный слой океана является важным элементом климатической системы, поскольку он контролирует обмен импульсом и скалярами между атмосферой и океаном через механизмы турбулентного переноса [1-3]. Способность океанов определять процессы изменения климата в значительной степени зависит от обменных процессов в океаническом пограничном слое (ОПС). Вертикальное распределение температуры, солёности, импульса в верхнем слое океана формируется в основном турбулентным перемешиванием.

В рамках настоящего исследования представлен обновленный блок пограничного слоя океана, выделенный из модели Земной системы (МЗС) ИВМ РАН [4] и модифицированный с точки зрения как архитектуры, так и описания вертикального турбулентного перемешивания. В оригинальной версии блока используется схема первого порядка Пакановского и Филандера [5]. В модифицированный блок внедрены дополнительные замыкания, различающиеся детальностью описания и вычислительной сложностью: модифицированная («динамическая») схема Пакановского-Филандера, в которой коэффициент диффузии при нейтральной стратификации зависит от потока импульса на поверхности и толщины перемешанного слоя, схема первого порядка [6], обобщающая теорию подобия Мони́на-Обухова, и двухпараметрическая схема типа k-ε [7]. Обновленный блок ОПС сопряжен с новым блоком приземного слоя [8], где реализован расчет потоков на границе «океан-атмосфера».

Для оценки качества работы блока ОПС и отдельных его компонент разработана система тестирования, совмещающая технологии «оффлайн» (для автономной версии) и «онлайн» (тестирование блока в рамках МЗС ИВМ РАН). Система «оффлайн» тестов охватывает как идеализированные численные эксперименты, так и постановки, основанные на реальных данных, полученных в Мировом океане. База данных системы тестирования включает аналитические решения, натурные данные и результаты прямого и вихреразрешающего численного моделирования. Также модифицированный блок подключен к МЗС ИВМ РАН с помощью разработанного промежуточного интерфейса-адаптера. Проведены предварительные тесты, направленные на сравнение модифицированного блока с оригинальной версией ОПС. Исследовано влияние выбора различных турбулентных замыканий на воспроизведение термической структуры океана.

- Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ФНТП № 124042700008-6 «Исследование процессов в геофизических пограничных слоях и создание новых подходов для их параметризации в моделях Земной системы» в рамках программы «Совершенствование глобальной модели Земной системы мирового уровня для исследовательских целей и сценарного прогнозирования климатических изменений».

Литература:

1. Belcher S. E. et al. A global perspective on Langmuir turbulence in the ocean surface boundary layer // *Geophysical Research Letters*. – 2012. – Т. 39. – №. 18.
2. Moum J. N. et al. Deep cycle turbulence in Atlantic and Pacific cold tongues // *Geophysical Research Letters*. – 2022. – Т. 49. – №. 8. – С. e2021GL097345.
3. Forryan A. et al. A new observationally motivated Richardson number based mixing parametrization for oceanic mesoscale flow // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2013. – Т. 118. – №. 3. – С. 1405-1419.
4. Володин Е. М. Воспроизведение современного климата моделью климатической системы INMCM60 // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2023. – Т. 59, № 1. – С. 19–26.
5. Pacanowski R. C., Philander S. G. H. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // *J. phys. Oceanogr.* – 1981. – Т. 11. – №. 11. – С. 1443-1451.
6. Soloviev A., Lukas R., Hacker P. An approach to parameterization of the oceanic turbulent boundary layer in the western Pacific warm pool // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2001. – Т. 106. – №. C3. – С. 4421-4435.
7. Burchard H. *Applied turbulence modelling in marine waters*. – Springer, 2007. – Т. 100.
8. Суязова В. И. и др. Влияние параметризаций термической шероховатости на расчет турбулентных потоков моделью приземного слоя атмосферы // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. – 2025.

Модификация крупномасштабных мод атмосферной циркуляции умеренных широт к концу XXI века: прогнозы модели Земной системы INM-CM6-M

¹ Гвоздева А.В., ¹ Гущина Д.Ю., ² Володин Е.М.

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

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

Modification of large-scale atmospheric circulation modes in mid-latitudes by the end of the 21st century: projections from the INM-CM6-M Earth System Model

¹ Gvozdeva A.V., ¹ Gushchina D.Yu., ² Volodin E.M.

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

Крупномасштабные моды атмосферной циркуляции, такие как Арктическая осцилляция, Антарктическая осцилляция, Североатлантическое колебание и Тихоокеанское-Североамериканское колебание, являются определяющими факторами климатической изменчивости умеренных и полярных широт Северного и Южного полушарий. Данные циркуляционные моды существенно влияют на распределение температуры, осадков и частоту экстремальных явлений, что определяет необходимость изучения их изменений в современном и будущем климате. Несмотря на значительный прогресс в климатическом моделировании, точность прогнозов изменений крупномасштабной циркуляции в будущем во многом зависит от способности моделей достоверно воспроизводить текущие климатические условия.

В данном исследовании для оценки воспроизведения крупномасштабных циркуляционных мод умеренных широт в условиях современного климата были использованы данные реанализа ERA5 и результаты исторического эксперимента российской модели Земной системы INM-CM6-M за период с 1985 по 2014 гг. Для анализа их изменений в будущем климате применялись данные за период с 2071 по 2100 годы: пять ансамблевых реализаций для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и три реализации для сценария SSP5-8.5. Статистическая значимость выявленных изменений подтверждалась с использованием стандартных методов.

Отрицательная фаза Арктической осцилляции и положительная фаза Антарктической осцилляции корректно воспроизводятся моделью INM-CM6-M в современном климате (коэффициент пространственной корреляции составляет более 95 %). Положительная фаза Североатлантического колебания также корректно воспроизводится моделью как в поле давления на уровне моря, так и в поле температуры воздуха на 2 м. По данным сценариев SSP выявлены значительные изменения крупномасштабных мод атмосферной циркуляции к концу XXI века. Тихоокеанско-Североамериканское колебание демонстрирует ослабление, особенно заметное по сценариям SSP3-7.0 и SSP5-8.5, что свидетельствует о снижении роли длинных волн Россби в динамике нижней и средней тропосферы Северного полушария. Арктическая осцилляция по сценарию SSP5-8.5 к концу XXI века чаще характеризуется положительной фазой. Напротив, Антарктическая осцилляция в зимний период Южного полушария ослабевает по всем сценариям, указывая на менее интенсивный полярный вихрь. Североатлантическое колебание к концу XXI века претерпевает изменения, связанные с ослаблением Азорского максимума и его смещением на территорию Западной Европы, а также углублением и сдвигом Исландского минимума к востоку от Гренландии.

Среда для разработки океанической модели INMoscean (SINMOD)

^{1,2} Ежкова А.А., ¹ Оноприенко В.А., ¹ Благодатских Д.В., ¹ Яковлев Н.Г.

¹ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

² Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская обл., Россия

The Suite for the INM Ocean model Development (SINMOD)

^{1,2} Ezhkova A.A., ¹ Onoprienko V.A., ¹ Blagodatskikh D.V., ¹ Yakovlev N.G.

¹ G.I. Marchuk Institute of Numerical Mathematics, RAS, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russia

Цель данного исследования – интеграция блока тестирования в вычислительную модель океана Земной системы ИВМ РАН (INMCM) для повышения надежности и точности прогнозов. Внедрение этого блока позволяет проводить диагностику и отладку отдельных компонентов океанического блока модели, что значительно улучшает качество моделирования и ускоряет разработку.

Модель океана Земной системы ИВМ РАН (INMoscean) представляет собой сложную и многоуровневую систему, включающую множество взаимосвязанных модулей. Одной из ключевых особенностей архитектуры INMCM является поддержка параллельных вычислений. Отсутствие систематического тестирования в существующей модели приводит к неточностям в прогнозах и затрудняет выявление ошибок. Это особенно критично для моделирования океанов, где даже небольшие ошибки могут существенно исказить результаты.

Для решения этой проблемы был внедрен блок тестирования, который интегрирован в архитектуру модели и поддерживает подключение всего функционала модели. Это позволяет проводить комплексное тестирование отдельных компонентов модели внутри модели.

Внедрение блока тестирования позволило создавать упрощенную конфигурацию модели, где на вход подается упрощенная маска «земля-океан», упрощенный рельеф дна и упрощенные начальные условия (Рис 1). Это дает возможность задавать поля характеристик и отлаживать конкретные динамические блоки в идеализированных условиях. Среда для разработки океанической модели INMoscean (SINMOD) обеспечивает воспроизводимость, контроль корректности расчетов и ускоряет процесс разработки и верификации нового функционала модели.

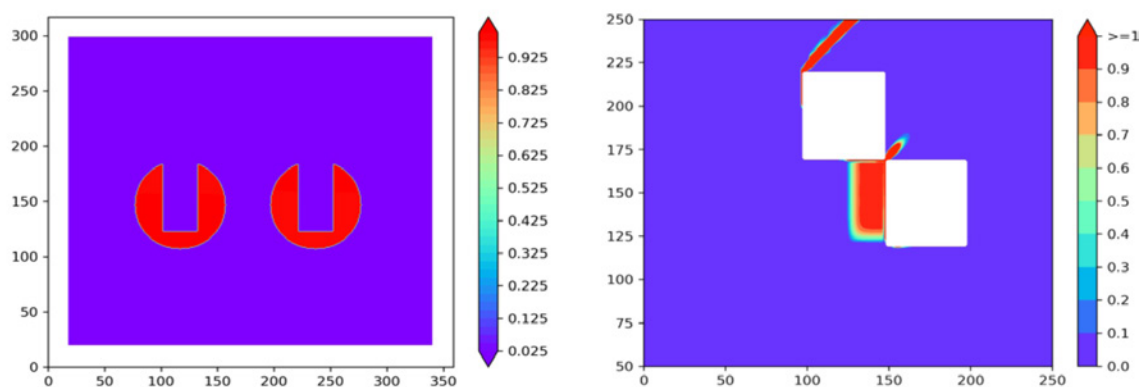


Рис. 1. Визуализация распределения пассивной примеси в модели океана Земной системы ИВМ РАН (INMCM). Белые области представляют сушу, синие – океан, а красный цвет обозначает пассивную примесь. Цветовая шкала справа показывает концентрацию примеси. Движение примеси (на рисунке справа) моделируется с использованием выбранной схемы переноса, под действием заданных постоянных скоростей

Литература:

1. Volodin E.M., Blagodatskikh D.V., Bragina V.V., Chernenkov A.Yu., Chernov I.A., Ezhkova A.A., Fadeev R.Yu., Gritsun A.S., Iakovlev N.G., Kostyrykin S.V., Onoprienko V.A., Petrov S.S., Tarasevich M.A., Tsybulin I.V. Computational framework for the Earth system modelling and the INM-CM6 climate model implemented on its base // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – <https://doi.org/10.1515/rnam-2024-0032>.

Новый модуль расчета скоростей фотолиза в Модели Земной Системы на основе Cloud-J v.8.0

Иманова А.С., Смышляев С.П.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

E-mail: imanova.an@mail.ru, smyshl@rshu.ru

New module for calculating photolysis rates Cloud-J v.8.0 in the Earth System Model

Imanova A.S., Smyshlyayev S.P.

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

При расчете скоростей фотолиза (фотодиссоциации) и солнечного нагрева атмосферы в ядре модели в Модели Земной Системы (МЗС) с блоком химии (Химико-Климатической Модели) значительное время расчетов уходит на вычисление поглощения и рассеяния солнечной радиации при прохождении ею атмосферы. В процессе независимого развития ядра модели и блока химии скорости фотодиссоциации и скорости нагрева атмосферы вычисляются отдельно друг от друга. Это приводит к дублированию вычислений прохождения потоков солнечной радиации через атмосферу. Кроме того, ослабление и поглощение солнечной радиации в атмосфере критически зависит от облачности и содержания аэрозолей, что требует корректного учета этих процессов как при вычислении скоростей фотолиза и нагрева атмосферы.

В данной работе анализируется широкополосный алгоритм Cloud-J v.8.0 с точки зрения обоснованности выбора широких спектральных интервалов для ускорения расчетов скоростей фотолиза и нагрева в нижней и средней атмосфере с учетом особенностей распространения солнечного излучения, а также для оценки влияния процессов отражения и рассеяния на молекулах, аэрозолях и облаках. Результаты показывают, что расчеты, выполненные с использованием Cloud-J v.8.0, согласуются с данными, полученными с использованием модели LibRadtran высокого разрешения, а учет факторов, влияющие на распространение солнечного потока через атмосферу в Cloud-J v.8.0 происходит в соответствии с теоретическими представлениями. Также в работе представлены результаты работы модуля расчета скоростей фотолиза Cloud-J v.8.0, установленного в МЗС (ХКМ ИВМ РАН – РГГМУ).

Оптимизация описания тропосферной химии в Модели Земной Системы: выбор и обоснование химического механизма

Окуличева А.А., Ткаченко М.А., Смышляев С.П.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: arina-okulichева@mail.ru, usa4eva.m@mail.ru, smyshl@rshu.ru

Optimization of Tropospheric Chemistry Description in an Earth System Model:
selection and justification of a chemical mechanism

Okulichева A.A., Tkachenko M.A., Smyshlyayev S.P.

Russian State Hydrometeorological University, St.-Petersburg, Russia

В Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ) с 90-х годов XX века проводятся систематические работы по развитию моделей атмосферной химии. На начальном этапе была разработана двумерная фотохимическая модель с учетом динамики атмосферы [Smyshlyayev et al., 1998], позволившая исследовать влияние различных факторов на газовый состав атмосферы. В дальнейшем, в сотрудничестве с Институтом вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН (ИВМ РАН), схема химических процессов была интегрирована в трехмерные модели, что привело к созданию химико-климатических моделей, учитывающей взаимосвязь между химическими и динамическими процессами в атмосфере [Галин и др., 2007, Dianskii et al., 2010, Smyshlyayev et al., 2024].

Целью текущей работы является оптимизация новой версии химико-климатической модели ИВМ РАН – РГГМУ, являющейся частью Модели Земной Системы (МЗС), в части описания химических процессов, протекающих в тропосфере. Внедрение усовершенствованного химического механизма позволит существенно повысить точность моделирования концентраций различных газовых компонентов и аэрозолей в тропосфере, а также учесть их влияние на динамику верхней атмосферы.

В рамках совершенствования модели был проведен сравнительный анализ широко используемых химических механизмов: Mainz Isoprene Mechanism (MIM1) [Geiger et al., 2003] – 16 соединений, 44 реакции; MIM2 – 69 соединений, 178 реакций [Taraborrelli et al., 2009]; Model for Ozone and Related chemical Tracers (MOZART) – 151 соединение, 287 реакций [Brasseur et al., 1998]; Regional Atmospheric Chemistry Mechanism (RACM) – более 100 соединений, 363 реакции [Stockwel et al., 1997].

Сравнительный теоретический анализ указанных химических механизмов выявил фундаментальные различия в подходах к параметризации тропосферных химических процессов и степени их детализации. Исследование показало общую тенденцию к усложнению механизмов с течением времени, что отражает стремление к более полному описанию химического состава атмосферы. Особый интерес для дальнейшей интеграции в модель МЗС представляет механизм MIM1, который при своей относительной компактности обеспечивает адекватное описание ключевых процессов тропосферной химии. Теоретическая оценка показывает, что данный механизм оптимально соответствует задачам глобального моделирования климатической системы, где критическое значение имеет баланс между детальностью химического описания и вычислительной эффективностью.

На основе проведенного теоретического анализа сформулирован ряд гипотез о влиянии различных аспектов химических механизмов на точность воспроизведения тропосферного состава атмосферы в МЗС, верифицированных в рамках последующих экспериментальных исследований на основе численных экспериментов с использованием химико-климатической модели ИВМ РАН – РГГМУ.

Применение рекуррентных нейронных сетей к анализу режимов динамики атмосферы средних широт

¹ Сафонов С.Е., ² Гаврилов А.С., ¹ Мухин Д.Н., ¹ Самойлов Р.С.

¹ Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

² Image and Signal Processing Group, University of Valencia, Spain

E-mail: s.safonov@ipfran.ru, andrei.gavrilov@uv.es, mukhin@ipfran.ru, samoilov@ipfran.ru

Application of recurrent neural networks to the analysis of mid-latitude atmospheric dynamics regimes

¹ Safonov S.E., ² Gavrilov A.S., ¹ Mukhin D.N., ¹ Samoilov R.S.

¹ A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

² Image and Signal Processing Group, University of Valencia, Spain

Сложная многомасштабная динамика атмосферы средних широт характеризуется наличием метастабильных режимов циркуляции, называемых также режимами погоды, продолжительность которых может достигать нескольких недель. Идентификация и моделирование таких режимов, понимание лежащих в их основе физических механизмов, а также анализ предсказуемости являются в настоящее время открытыми активно исследуемыми проблемами, продвижение в решении которых позволит существенно улучшить межсезонный прогноз погодных аномалий над обширными территориями.

В данном докладе представлена новая стохастическая эмпирическая модель, основанная на рекуррентных нейронных сетях, направленная на симуляцию циркуляции атмосферы в средних и полярных широтах с акцентом на детектировании и прогнозировании режимов. Модели, основанные на сетях такого типа, благодаря рекуррентному слою, способны эффективно параметризовать оператор эволюции систем с памятью без существенного увеличения числа параметров при росте глубины временной зависимости, что предотвращает переобучения при работе с ограниченными по длине временными рядами и является особенно актуальным при применении к атмосферным данным с широким спектром временных масштабов.

Предлагаемая модель связывает низкоразмерное пространство динамических переменных – главных компонент наблюдаемой динамики – с факторами, специально сконструированными для детектирования режимов циркуляции, для получения которых использовался метод нелинейных главных компонент, позволяющий получить переменные, в пространстве которых семейства похожих состояний атмосферы хорошо разделены. Использование рекуррентной нейронной сети позволяет одновременно прогнозировать эволюцию динамических переменных и отображать их в пространство факторов, что позволяет идентифицировать и предсказывать атмосферные режимы.

После симуляции временных рядов с помощью обученной рекуррентной сети к полученным данным применяется скрытая марковская модель [1], которая позволяет выявить метастабильные режимы, характеризующиеся высокой устойчивостью и длительным пребыванием системы в их окрестности, что даёт возможность проанализировать какие режимы воспроизводятся в динамике, сгенерированной моделью, и сопоставить их с аналогичными структурами, полученными на основе наблюдаемых атмосферных данных.

В докладе будут представлены результаты моделирования с помощью предложенного метода атмосферы средних и полярных широт в Северном полушарии по данным геопотенциальных высот уровня давления 100 гПа в зимние сезоны, направленного на симуляцию и прогноз динамики метастабильных режимов. Источниками анализируемых выборок служат трехслойная квазигеострофическая модель атмосферы, данные экспериментов моделей Земной системы ИВМ РАН (INMCM), MPI, а также данные реанализа атмосферы NCEP/NCAR с 1950 года по настоящее время.

■ Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 22-12-00388).

Литература:

1. Mukhin, D. Metastability, atmospheric midlatitude circulation regimes and large-scale teleconnection: a data-driven approach / D. Mukhin, R. Samoilov, A. Hannachi // arXiv preprint. 2024. arXiv:2412.06933.

Новый модуль приземного слоя для модели Земной системы INMCM

^{1,3} Суязова В.И., ^{1,3} Дебольский А.В., ^{1,2} Мортиков Е.В., ^{1,3} Шестакова А.А.

¹ Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

² Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

³ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

E-mail: er-riad@mail.ru

В докладе представлены результаты создания и внедрения нового блока приземного слоя в модель Земной системы ИВМ РАН. Блок приземного слоя обладает модульной архитектурой, может использоваться в программах на языках программирования Fortran/C++ и выполнять расчеты как на центральных процессорах, так и графических ускорителях. Создана возможность предписывать отдельные параметризации термической и динамической шероховатости в зависимости от типа поверхности. Детализация методов определения параметров шероховатости позволяет учесть различия в механизмах передачи тепла и импульса между различными типами поверхности. Для динамических поверхностей (поверхность внутренних водоемов, снег, океан) реализована возможность использования расчета параметра шероховатости как функции от динамической скорости.

В новом блоке приземного слоя реализована вариативность выбора функций устойчивости. Поддерживаются функции устойчивости Бузингера-Дайера [Businger et al., 1989], «SHEBA» [Grachev et al.] с двумя вариантами учета асимптотики свободной конвекции [Казаков, Лыков, 1982; Gryanik and Lupkes, 2023]. Модифицированы и внедрены новые компоненты модуля расчета турбулентных потоков: усовершенствовано описание механизма подъема и переноса снежных частиц над поверхностью и влияние этого процесса на степень устойчивости атмосферы [Суязова и др., 2024]; внедрен безытерационный алгоритм нахождения параметра устойчивости при устойчивой стратификации для функций «SHEBA»; реализовано расширение теории подобия Монина-Обухова применительно к слою шероховатости для поверхностей с высокими элементами неровностей для функций Бузингера-Дайера.

Блок приземного слоя был дополнен модулем вертикальной интерполяции метеорологических полей на стандартные уровни, необходимым для внедрения в МЗС ИВМ РАН. На основе сравнения с реанализами подобран оптимальный вариант алгоритма вертикальной интерполяции в приземном слое, который наилучшим образом воспроизводит приземные скорость ветра, температуру и влажность, обязательные для выдачи климатической модели. С различными конфигурациями блока приземного слоя в модели Земной системы произведено несколько серий экспериментов различной продолжительности (от года до 30 лет), эксперименты сравнивались как между собой, так и с данными реанализов R2 DOE и ERA5, предварительно интерполированными на сетку модели. Анализ результатов позволил оценить чувствительность модели Земной системы к изменениям отдельных компонент модуля а также выделить наиболее оптимальную конфигурацию блока приземного слоя. Наилучшую согласованность с данными реанализов показал эксперимент с использованием функции устойчивости «SHEBA» с учетом влияния снежных частиц на стратификацию атмосферы.

Оптимизация описания тропосферной химии в Модели Земной Системы: численные эксперименты и оценка механизмов тропосферной химии

Ткаченко М.А., Окуличева А.А., Смышляев С.П.

Российский государственный гидрометеорологический университет, С-Петербург, Россия

E-mail: usa4eva.m@mail.ru, arina-okulichева@mail.ru, smyshl@rshu.ru

Optimization of tropospheric chemistry description in the Model of the Earth System: numerical experiments and evaluation of tropospheric chemistry mechanisms

Tkachenko M.A., Okulichева A.A., Smyshlyaev S.P.

Russian State Hydrometeorological University, St.-Petersburg, Russia

Сравнительный теоретический анализ химических механизмов для тропосферной химии, включая Mainz Isoprene Mechanism (MIM1), MIM2, Model for Ozone and Related chemical Tracers (MOZART) и Regional Atmospheric Chemistry Mechanism (RACM), выявил фундаментальные различия в подходах к параметризации тропосферных химических процессов и степени их детализации, а также общую тенденцию к усложнению механизмов с течением времени. Особый интерес для интеграции в Модель Земной Системы с блоком химии (химико-климатическая модель ИВМ РАН – РГГМУ) представляет механизм MIM1, который при своей относительной компактности (16 соединений, 44 реакции) обеспечивает адекватное описание ключевых процессов тропосферной химии. Теоретическая оценка показала, что данный механизм оптимально соответствует задачам глобального моделирования климатической системы, где критическое значение имеет баланс между детальностью химического описания и вычислительной эффективностью.

Целью настоящей работы является оптимизация химико-климатической модели ИВМ РАН– РГГМУ (ХКМ ИВМ РАН – РГГМУ) в части описания химических процессов, протекающих в тропосфере. В продолжение теоретического анализа была проведена серия численных экспериментов для валидации модели с различными вариантами описания тропосферной химии. Основной задачей экспериментальной части стала оценка точности воспроизведения концентраций ключевых загрязнителей атмосферы (O_3 , NO_2 , CO) при использовании механизмов различной сложности и их сопоставление с данными наблюдений. Эксперименты проводились с горизонтальным разрешением $5^\circ \times 5^\circ$ и 39 вертикальными уровнями с использованием архива метеорологических данных и эмиссий из глобальных баз данных.

Ключевым компонентом исследования стал анализ вычислительной эффективности различных конфигураций химической схемы модели. Результаты сравнительного анализа времени расчета и требуемых вычислительных ресурсов для каждого химического механизма при моделировании на одинаковых временных интервалах позволили количественно оценить преимущества более компактных механизмов.

Проведенное исследование и численные эксперименты направлены на оптимизацию химической составляющей ХКМ ИВМ РАН– РГГМУ для повышения точности воспроизведения тропосферных процессов при сохранении высокой вычислительной эффективности. Полученные результаты создают надежную базу для дальнейших исследований взаимосвязи между химическими и динамическими процессами в атмосфере и будут способствовать развитию методов прогнозирования состава атмосферы и его влияния на региональные и глобальные климатические изменения.

Оценка качества сезонных прогнозов Колебаний Маддена-Джулиана в модели Института вычислительной математики (ИВМ) РАН

Умеренков И.А., Железнова И.В., Гущина Д.Ю.

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

Evaluation of the quality of seasonal forecasts of Moden-Julian oscillations in the model of the Institute of Computational Mathematics (ICM) RAS

Umerenkov I.A., Zheleznova I.V., Gushchina D.Yu.

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Колебания Маддена-Джулиана (КМД) – феномен внутрисезонного масштаба в тропических широтах, которое характеризуется интенсивными осадками и аномалиями скорости ветра на площади несколько тысяч квадратных километров. КМД зарождается над Индийским океаном и движется на восток к Тихому океану со скоростью порядка 430 км за сутки. Время существования одного события КМД составляет 30-90 дней. Так как КМД оказывает влияние на погоду на значительной площади в течение десятков дней, то его корректное прогнозирование является ключом к успешным среднесрочным прогнозам погоды. При этом современные модели Земной системы имеют достаточно низкое качества прогноза КМД, что обуславливает необходимость дальнейшего изучения причин неудачных прогнозов.

В данной работе производился анализ качества воспроизведения КМД в двух версиях модели ИВМ РАН (INM-CM5 и INM-CM6). Для сравнения модельных результатов с наблюдениями был использован реанализ ERA-5. Сезонные прогнозы рассчитывались на 40 дней от момента старта прогноза 22 числа каждого месяца. Для выделения событий КМД использованы индексы RMM, которые представляют собой временные коэффициенты при эмпирических ортогональных функциях (ЭОФ) комбинированных полей усредненного приэкваториального зонального ветра на поверхностях 850 и 200 гПа и уходящей длинноволновой радиации [1]. На основании индексов RMM рассчитывается амплитуда и фаза КМД. Каждый прогноз включал 10 членов ансамбля. Результаты и оценки прогнозов были выполнены по каждому из 10 членов ансамбля, потом осреднены по всему ансамблю. Для оценки качества прогнозов все анализируемые события были разделены на несколько групп по количеству дней от старта модельного прогноза до начала самого события КМД (календарь наиболее сильных КМД, использованных для анализа был составлен по данным реанализа, всего проанализировано 21 событие).

На основании анализа показано, что версия модели INM-CM6 лучше прогнозирует КМД, чем версия INM-CM5. Наиболее точный прогноз КМД отмечается для событий, которые уже существуют в течение 1-15 дней на момент старта модельного прогноза. Если событие КМД возникает в течение 0-10 дней после старта прогноза (по данным реанализа) в 66 % случаев в версии INM-CM6 это событие воспроизводится, однако его развитие (рост амплитуды и распространение из Индийского в Тихий океан) воспроизводится хуже, чем для уже существующих событий. В случае начала модельного прогноза за 10-20 дней до начала события КМД только в 37 % случаев это событие отмечается в INM-CM6. Если КМД появляется еще позже относительно начала прогноза (20-50 дней), то в модели оно не воспроизводится. Таким образом, выявлена явная зависимость качества сезонного прогноза КМД от момента возникновения события относительно момента старта прогноза в модели INM-CM.

Литература:

1. Wheeler M.C. and Hendon H.H. An All-Season Real-Time Multivariate MJO Index: Development of an Index for Monitoring and Prediction // Mon. Wea. Rev. 2004. Vol. 132. P. 1917–1932.

Усвоение данных в модели ионосферы INM-IM: нейросетевой и вариационный подходы

^{1,2} Хамикова М.А., ^{2,3} Останин П.А.

¹ ИПГ им. Е.К.Фёдорова РАН

² ИВМ им. Г.И.Марчука РАН

³ МФТИ (НИУ)

E-mail: khamikova.ma@phystech.edu

Data assimilation in INM-IM ionosphere model: neural network and variational approaches

^{1,2} Khamikova M.A., ^{2,3} Ostanin P.A.

¹ Fedorov Institute of Applied Geophysics

² Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS

³ Moscow Institute of Physics and Technology

В работе представлен новый подход к усвоению данных о полном электронном содержании для модели ионосферы INM-IM [1] на основе нейронных сетей, обученных на модельных расчетах. Метод восстанавливает ключевые характеристики ионосферы: широтное распределение максимума электронной концентрации и высотные профили в данной пространственной точке. Проведено сравнение предложенного нейросетевого метода с ранее разработанным вариационным подходом к усвоению данных [2], показана его эффективность.

Задача усвоения данных для двумерной диффузионной версии модели ионосферы INM-IM имеет следующую постановку. Динамическое уравнение модели представляет по существу уравнение неразрывности для электронной плотности и описывает процессы амбиполярной диффузии, плазмохимии, а также гравитационного оседания. В качестве данных наблюдения выступает информация о полном электронном содержании (TEC): считаются известными интегралы от электронной концентрации n по заданным траекториям Ω_k :

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial}{\partial t} - \nabla(K\nabla(\cdot)) - \frac{\partial}{\partial z}(u \cdot (\cdot)) - \frac{\partial}{\partial y}(v \cos \varphi \cdot (\cdot)) + k \right) n = P_0 + U, \\ \int_{\Omega_k} n(z, \varphi, t) a \cos \varphi d\varphi dz = Tec_k(t), \end{cases}$$

где z – высота, φ – широта, a – радиус Земли, P_0 – функция фотоионизации, U – неизвестное управление, k – коэффициент рекомбинации, K – матрица эффективных коэффициентов диффузии, u, v – эффективные скорости, связанные с процессами гравитационного оседания. В рамках вариационного подхода осуществляется минимизация регуляризованного по Тихонову функционала невязки с помощью итерационного процесса, на каждом шаге которого решается система прямых и сопряжённых уравнений с целью обновления U . В данной работе в рамках вариационного подхода применяется как усвоение по правой части, так и смешанный подход, с одновременным управлением по начальным данным.

Нейросетевой подход (MLP) вводится для ускорения работы усвоения данных о TEC. Построенная нейронная сеть принимает на вход данные о TEC и вычисляет основные характеристики поля электронной концентрации. Обучение проводится методом SGD с функцией потерь L_1 с весами. Проведены численные эксперименты по обучению нейронной сети на модельных данных, полученных с помощью модели INM-IM как в двумерной диффузионной постановке, так и в полной трехмерной версии модели, учитывающей перенос нейтральным ветром и электромагнитным дрейфом. Результаты расчётов показывают высокую точность восстановления широтного распределения максимума концентрации, вертикальных TEC и высотных профилей. Наибольшая точность достигается в дневные часы, когда фотоионизация максимальна, однако для ночного времени точность восстановления оказывается ниже для всех исследованных характеристик.

Литература:

1. Kulyamin D.V., Ostanin P.A., Dymnikov V.P. INM-IM: INM RAS Earth ionosphere F region dynamical model // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2022. – Т. 37. – №. 6. – С. 349-362.
2. Дымников В.П., Кулямин Д.В., Останин П.А., Шутяев В.П. Усвоение данных для двумерного уравнения амбиполярной диффузии в модели ионосферы земли // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2023. – Т. 63. – №5. – С. 803-826.

Настройка климатической модели ИВМ РАН для участия в CMIP7

Володин Е.М., Брагина В.В., Черненко А.Ю., Тарасевич М.А.

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

E-mail: volodinev@gmail.com, vvorobyeva@yandex.ru, chernenkoval97@gmail.com, mashatarasevich@gmail.com

Tuning of INM RAS climate model for participation in CMIP7

Volodin E.M., Bragina V.V., Chernenkov A.Yu., Tarasevich M.A.

Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

Рассматриваются некоторые изменения в настройке физических параметризаций модели климата ИВМ РАН, сделанные за последний год. В частности, настройка мелкой конвекции и облачности позволяет более реалистично воспроизводить явление Эль-Ниньо, что особенно важно для применения модели в сезонном прогнозе и прогнозе на 1-5 лет.

Рассматриваются численные эксперименты с интерактивным воспроизведением изменений климата и углеродного цикла. Изменения в расчете потока CO_2 в океан позволяет более реалистично воспроизводить накопление океаном антропогенного CO_2 .

Коррекция радиационных потоков на верхней границе атмосферы позволяет избежать нарушения баланса тепла вследствие наличия фиктивного нулевого слоя в атмосферной радиации и тем самым более корректно проводить численные эксперименты по вычислению эффективного радиационного форсинга.

Обсуждается также настройка параметров морского льда. Рассматриваются систематические ошибки новой версии модели климата.

Вычислительные технологии многомасштабного численного моделирования атмосферного пограничного слоя

^{1,3} Дебольский А.В., ^{1,2} Мортиков Е.В., ^{3,1} Шестакова А.А.

¹ Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ

² Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

³ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

E-mail: and.debol@srcc.msu.ru, emortikov@gmail.com, shestakova.aa@gmail.com

В работе рассматриваются локально-одномерная версия модели атмосферного пограничного слоя (АПС), используемые в новой версии климатической модели, ИВМ РАН (Volodin et al. 2017). В новой версии локально-одномерной модели добавлены алгоритмы диагностики АПС, реализованы новые варианты замыканий первого и второго порядка, добавлена параметризация противогradientного переноса, а также произведено ее согласование с облачной схемой. Также представлены предварительные тесты МЗС по воспроизведению современного климата с новой версией блока параметризаций пограничного слоя.

Развитие блока наземного углеродного цикла для Модели Земной системы ИВМ РАН

^{1,2} Черненко А.Ю., ^{1,2} Володин Е.М.

¹ Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, Москва, Россия

² Институт географии РАН, Москва, Россия

E-mail: chernenkoval97@gmail.com, volodinev@gmail.com

Development of terrestrial carbon cycle module for INM-CM

^{1,2} Chernenkov A.Yu., ^{1,2} Volodin E.M.

¹ Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

² Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

Неотъемлемым элементом моделей Земной системы (МЗС) является блок углеродного цикла [1]. Такие модели позволяют воспроизводить изменения климата с учетом возможных сценариев антропогенных воздействий. Модель Земной системы ИВМ РАН INM-CM [2,3] включает в себя модули, описывающие круговорот углерода на суше, в океане и атмосфере [4]. В течение последних лет велась активная работа по модернизации модуля наземного углеродного цикла ИВМ РАН, её результатам посвящена данная работа.

Во-первых, была подготовлена и подключена новая база динамического землепользования, а также внедрена параметризация, описывающая эффект от сбора урожая. Данные изменения позволили существенно уточнить оценки поглощенного углерода из атмосферы наземными экосистемами [5]. Во-вторых, был реализован модуль, описывающий наземный азотный цикл и его взаимодействие с циклом углерода [6]. Совместная модель наземных азотного и углеродного циклов была провалидирована в автономном режиме. На текущий момент получены первые результаты работы по подключению модели азотного цикла к МЗС ИВМ РАН.

Отметим, что в НИВЦ МГУ ведется работа над параметризацией, описывающей влияние лесных пожаров на запасы углерода на суше, а также над моделью углеродного цикла в болотных экосистемах [7]. Планируется, что в будущем соответствующие модули будут также подключены к модели наземного углеродного цикла ИВМ РАН.

Литература:

1. Gier B.K. et al. Representation of the terrestrial carbon cycle in CMIP6, Biogeosciences, 2024, v. 21, pp. 5321–5360.
2. Володин Е.М. Воспроизведение современного климата моделью климатической системы INMCM60. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2023, т. 59, № 1, с. 19–26.
3. Volodin E.M. et al. Computational framework for the Earth system modelling and the INM-CM6 climate model implemented on its base. Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, 2024, v. 39, no. 6, pp. 379–392.
4. Володин Е.М. Модель общей циркуляции атмосферы и океана с углеродным циклом. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2007, т. 43 № 3, с. 298–313.
5. Chernenkov A.Yu., Volodin E.M. New land use parameterization for INM-CM terrestrial carbon cycle module. Numerical Methods and Programming, 2024, v. 25(3), pp. 315–325.
6. Chernenkov A.Yu., Volodin E.M., Stepanenko V.M. Nitrogen cycle module for INM RAS climate model. Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, 2024, v. 39, no. 4, pp. 187–197.
7. Stepanenko V.M. et al. Land surface scheme TerM: the model formulation, code architecture and applications. Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, 2024, v. 39, no. 6, pp. 363–377.

Результаты создания и внедрения в модель Земной системы INMCM модуля расчета характеристик природных пожаров

^{1,2} Суязова В.И., ¹ Степаненко В.М., ^{3,4} Черненко А.Ю.

¹ Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

³ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

⁴ Институт географии РАН

E-mail: er-riad@mail.ru, vstepanenkodeister@gmail.com

Природные пожары являются неотъемлемой и естественной чертой существования земной системы, встречающейся во всех основных биомех мира вскоре после появления наземных растений более 400 миллионов лет назад [Scott and Glasspool, 2006]. Природные пожары играют важную роль в эволюции растительных ландшафтов, вызывая естественные нарушения, которые влияют как на состояние поверхности Земли, так и на климатическую систему. Увеличение численности населения, проникновение человека в пожароопасные регионы способствует увеличению очагов возгорания [Abatzoglou and Williams, 2016]. Около 3% растительности на планете сгорает ежегодно [Ding и др., 2020], генерируя выбросы углерода в атмосферу. Значительное воздействие пожаров на климатическую систему обуславливает необходимость и важность их учета в моделях Земной системы. Моделирование пожаров совместно с моделями динамической растительности началось в начале 2000-х годов и активно развивалось в течение последнего десятилетия [Hantson et al., 2016].

В докладе будут представлены результаты работы по созданию и внедрению в модель Земной системы INMCM «пожарного» модуля. Рассматриваются не торфяные пожары за пределами пахотных земель и тропических закрытых лесов. За основу блока расчета пожаров была использована модель CLM [Kloster, S., et al, 2010]. В качестве основных выходных параметров выступает выгоревшая площадь за единицу времени и количество сгоревшего углерода. При расчете «пожарных» характеристик в моделях Земной системы необходимо описывать количество источников возгорания и возможный эффект тушения. Количество очагов возгорания рассчитывается как сумма пожаров от естественных (молнии) и антропогенных причин (как функция от плотности населения). Эффект тушения зависит от социально-экономических условий (плотности населения и валового внутреннего продукта). Средняя выгоревшая площадь принимается эллиптической формы с направлением ветра по большей оси и точкой возгорания в одном из фокусов и зависит от доступности и горючести топлива. Модуль пожаров был успешно включен в модель Земной системы ИВМ РАН. Пожарный программный блок на каждом шаге по времени вызывается из модуля пограничного слоя для всех ячеек суши. На рис. 1. представлена средняя за 10 лет (1982-1991) площадь пожаров в км² построенная по данным эксперимента с моделью INMCM и по спутниковым измерениям [Chuviesco, E., et al., 2020]. Наибольшие расхождения с данными спутника наблюдаются в центральной Африке и на севере Австралии. Недооценка выгоревшей площади (по данным INMCM) может быть связана с увеличенным количеством очагов возгорания на пахотных землях Сахели. Характерные значения глобальной сжигаемая биомасса (около 2 PgC) согласуется со значениями приведенными в [Pan X. et al., Dalal R. C., Allen D. E., 2008;].

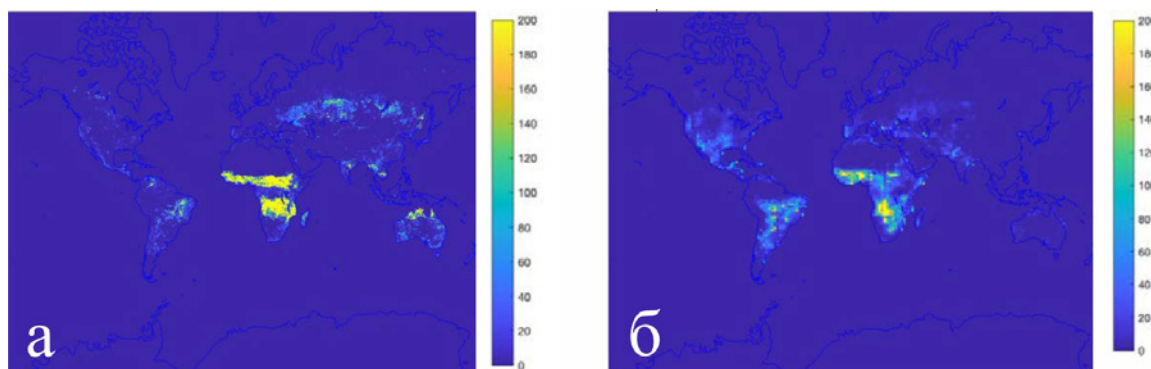


Рис. 1. Осредненная площадь (км²) пожаров за 10 лет построенная по данным а- глобального эксперимента с моделью INMCM, б- по данным спутника [Chuviesco, E., et al., 2020]

Параметризация процессов подсеточного масштаба в атмосфере, океане и на арктическом шельфе

Платов Г.А., Крупчатников В.Н., Малахова В.В.

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

E-mail: plat@ommfao.sccc.ru

Parameterization of subgrid-scale processes in the atmosphere, ocean and Arctic shelf

Platov G.A., Krupchatnikov V.N., Malakhova V.V.

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

Представляются результаты работы по теме «Параметризация процессов подсеточного масштаба в атмосфере, океане и на арктическом шельфе», состоящие в практическом применении разработанных подходов в рамках модели Земной системы и их апробации в ходе сравнительных численных экспериментов, а именно:

- Программный блок параметризации глубокой и мелкой конвекции в атмосфере.
- Процедура параметризации мезомасштабного переноса в модуле океана.
- Модель эволюции субаквальной мерзлоты и зоны стабильности метангидратов арктического шельфа, сформировавшихся в ледниковые циклы.

Для учета колебаний потока массы на нижней границе облаков, исходя из предположения о конвективном равновесии, был разработан ряд стохастических схем как для глубокой, так и для мелкой конвекции. Основная идея обеих схем заключается в том, чтобы рассматривать равновесный поток массы в основании облака, рассчитанный по детерминированной конвективной схеме, как среднюю оценку, к которой фактический конвективный отклик стремится только в среднем. Фактический поток массы в основании облака в каждой ячейке сетки определяется как сумма потоков массы отдельных облаков, которые случайным образом генерируются в каждой ячейке сетки со скоростью, соответствующей крупномасштабному однородному форсингу. Каждому сгенерированному облаку приписывается случайный поток массы, который выбирается из функции распределения вероятности, различной для разных схем. Механизм этих схем может быть сведен к решению двух обыкновенных стохастических дифференциальных уравнений для числа облаков и общего потока массы в нижней части облаков. Предположение о конвективном равновесии может быть справедливым только в том случае, если рассматривается достаточно большая область, где количество облаков в ячейке сетки достаточно велико, чтобы представлять ансамбль облаков для обеспечения равновесной реакции. В случае если размеры ячеек порядка 10 км, на наблюдаемый конвективный поток начинает влиять конечность числа облаков. Это означает, что общий поток массы, переносимый конечным числом облаков в сеточном поле этого масштаба, может колебаться вокруг своего равновесного значения, приближаясь к нему только в среднем за некоторый временной интервал и/или в некоторой окрестности по пространству.

Одной из задач крупномасштабного моделирования Мирового океана в рамках моделей климата является адекватное описание вихревого переноса скалярных величин – одного из подсеточных процессов, прямое описание которого в рамках океанического блока крупномасштабных моделей климата пока невозможно. Размеры мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей определяются радиусом деформации Россби и составляют от нескольких сотен метров до нескольких километров. Результат действия таких вихрей, а именно обмен свойствами участвующих в движении вод, требует поиска дополнительных возможностей их описания в крупномасштабных моделях посредством параметризации.

Газовые гидраты, представляющие собой льдоподобную смесь газа (в основном метана) и воды, встречаются в донных отложениях континентального шельфа океана, а также в слое вечной мерзлоты в интервале глубин, где выполняются термобарические условия стабильности гидрата определенного вида. Существование мерзлоты обеспечивает создание условий для формирования в донных отложениях зоны стабильности гидратов метана на небольших водных глубинах. В последние годы активно обсуждается вопрос о возможности относительно быстрого разрушения многолетнемерзлых пород (ММП) на Восточно-Сибирском шельфе ввиду существенного повышения летней температуры придонного слоя воды. Разрушение субаквальной мерзлоты может стать причиной нарушения условий существования метангидратов, залегающих в пределах и ниже слоя ММП, и соответствующей дополнительной эмиссии метана в атмосферу Арктики. Деградирующие ММП являются источником парниковых газов. Без знания распространения и строения криолитозоны невозможно оценить перспективы эффективного использования Северного морского пути, экологические последствия разведки и освоения нефтегазовых ресурсов арктического шельфа.

- Финансовая поддержка: Работа выполнена в рамках темы ФНТП ИВМиМГ СО РАН FWNM-2023-0001.

Применение схемы КАБАРЕ в климатической модели океана с сигма системой координат

Благодатских Д.В., Яковлев Н.Г., Ежкова А.А., Оноприенко В.А.

ИВМ РАН, Москва, Россия

E-mail: blago1958@mail.ru, nick_yakovlev@mail.ru, alisa.ezh@yandex.ru, vonopr@ya.ru

Implementation of CABARET scheme in a climate ocean model
with sigma vertical coordinate system

Blagodatskih D., Iakovlev N., Ezkova A., Onoprienko V.

Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

В докладе представлены результаты тестирования вычислительной схемы КАБАРЕ для переноса температуры и солёности в климатической модели океана ИВМ РАН. В модели океана ИВМ РАН в экспериментах СМІР для расчета адвекции скаляров применялась схема второго порядка с центральными разностями. Эта схема характеризуется наличием в решениях, получаемых по этой схеме, большого численного шума, который в свою очередь, может приводить к численной неустойчивости в модели океана. С целью устойчивого счета с применением данной схемы необходимо введение источника дополнительной численной диффузии.

В качестве возможной альтернативы схеме с центральными разностями для расчетов в предстоящем СМІР в модели ИВМ РАН реализована схема КАБАРЕ. Схема КАБАРЕ так же, как и схема второго порядка с центральными разностями определена на компактном вычислительном шаблоне, но при этом характеризуется высокой гладкостью получаемых численных решений. Проведено сравнение результатов расчетов по схеме КАБАРЕ и схеме второго порядка с центральными разностями. В качестве тестов применялись задачи как в идеализированной постановке, так и расчеты с предписанной атмосферой по протоколу CORE-II.

Сравнительный анализ численных схем переноса характеристик морского льда в модели Земной системы ИВМ РАН

^{1,2} Ежкова А.А., ¹ Оноприенко В.А., ¹ Благодатских Д.В., ¹ Яковлев Н.Г.

¹ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН,

² Московский физико-технический институт

Comparative Analysis of Numerical Schemes for Transporting Sea Ice Characteristics in the Earth System Model INM RAS

^{1,2} Ezhkova A.A., ¹ Onoprienko V.A., ¹ Blagodatskikh D.V., ¹ Yakovlev N.G.

¹ G.I. Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

Для успешного численного моделирования динамики льда важно правильно выбрать подходящую разностную схему переноса ледовых характеристик. Она должна допускать решения, содержащие большие значения градиентов, характерные для наблюдаемых в природе распределений сплоченности и толщины льда, поскольку они позволяют более точно воспроизводить его кромку. Должна сохранять положительность решения и при этом не создавать ложных экстремумов.

В модели Земной системы ИВМ РАН долгое время применялась схема против потока, обеспечивающая монотонное решение, но с высокой численной диффузией. Схема Залесака с коррекцией потока (FCT) повысила точность, но не гарантировала монотонность. Метод Бориса и Бука, добавленный к FCT, обеспечил монотонность решений, что важно для точного моделирования динамики льда. Была реализована схема КАБАРЕ, была реализована в этой работе для сравнения и анализа альтернативных методов численного переноса, в том числе не основанных на FCT-подходе. Тестирование производилось в среде разработки, встроенной в архитектуру модели Земной системы ИВМ РАН, и показало устранение ложных осцилляций и улучшение точности модели.

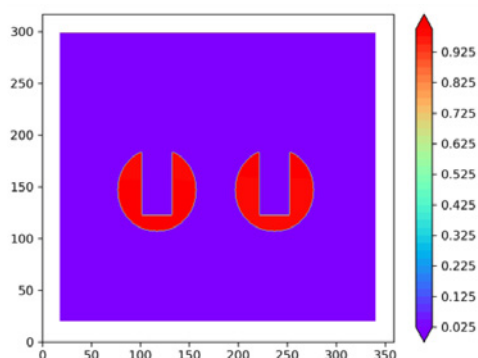


Рис. 1.

Производилось сравнение схем против потока, FCT, FCT с использованием прелимитра Бориса и Бука с разными подходами к взвешиванию потоков: безопасный и стандартный, а также схема КАБАРЕ. На основании результатов вычислительных экспериментов, делаются выводы о применимости данных подходов в задаче переноса льда в климатической модели Земли ИВМ РАН.

Был проведен ряд тестов из статьи Наира Р.Д. [3]: перенос пассивной примеси в форме двух дисков Залесака (Рис.1), расположенных симметрично, действующим на них полем дивергентных и бездивергентных скоростей.

1 случай (бездивергентный):

$$u(\lambda, \theta, t) = k \left(\frac{\lambda}{2} \right) \sin \sin (2\theta) \cos \cos \left(\frac{\pi t}{T} \right),$$
$$v(\lambda, \theta, t) = \frac{k}{2} \sin \sin (\lambda) \cos \cos (\theta) \cos \cos \left(\frac{\pi t}{T} \right),$$

2 случай (бездивергентный):

$$u(\lambda, \theta, t) = k(\lambda) \sin \sin (2\theta) \cos \cos \left(\frac{\pi t}{T} \right),$$
$$v(\lambda, \theta, t) = k \sin \sin (2\lambda) \cos \cos (\theta) \cos \cos \left(\frac{\pi t}{T} \right),$$

3 случай (дивергентный):

$$u(\lambda, \theta, t) = -k \left(\frac{\lambda}{2} \right) \sin \sin (2\theta) \cos \cos (\theta)^2 \cos \cos \left(\frac{\pi t}{T} \right)$$
$$v(\lambda, \theta, t) = \frac{k}{2} \sin \sin (\lambda) \cos \cos (\theta)^3 \cos \cos \left(\frac{\pi t}{T} \right),$$

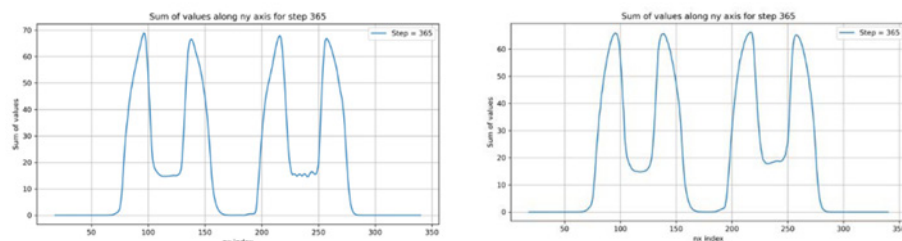


Рис 2. На графиках представлены профили распределений просуммированных по координате x в конце цикла. Перенос двух дисков Залесака с начальным распределением 1.0, со скоростью $V1$ и максимальным числом Куранта 0.1 схемой ZAL (FCT) слева и схемой ZAL_LIM_SAVE (медвед Бориса-Бука-Залесака с безопасным ограничителем) справа.

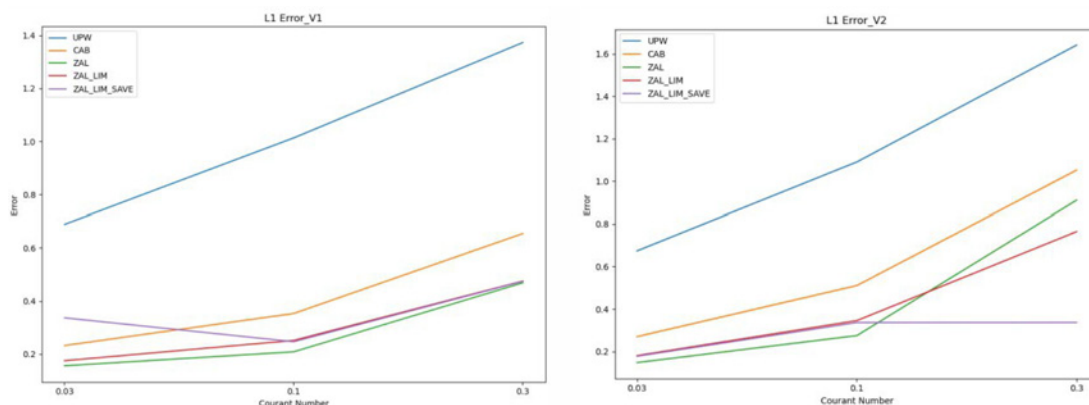


Рис 3. Перенос двух дисков Залесака с бездивергентной скоростью из случаев V1 и V2. На графиках показана зависимость нормы ошибки от максимального значения числа Куранта.

Литература:

1. Zalesak, S. T. (1979). Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids. *Journal of Computational Physics*, 31(3), 335–362.
2. Nair, R. D., & Lauritzen, P. H. (2010). A class of deformational flow test cases for linear transport problems on the sphere. *Journal of Computational Physics*, 229(14), 5108–5133. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2010.08.014>
3. DeVore, C. R. (1998). An Improved Limiter for Multidimensional Flux-Corrected Transport. Naval Research Laboratory Report NRL/MR/6440--98-8330.

Исследование динамики экваториальных волн в климатической модели ИВМ РАН на основе тестовой постановки бароклиной волны Мацуно

Оноприенко В.А., Гойман Г.С., Яковлев Н.Г.

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

Investigation of Equatorial Wave Dynamics in the INM RAS Climate Model based on the Matsuno Baroclinic Wave Test Case

Onoprienko V.A., Goyman G.S., Iakovlev N.G.

Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

В работе изучается воспроизведение собственных мод экваториальных волн блоком океана климатической модели ИВМ РАН в рамках тестовой конфигурации бароклиной волны Мацуно [1]. Особое внимание уделено анализу влияния структуры вычислительной сетки на точность численных решений.

Большинство современных климатических моделей океана избегают использования широтно-долготных сеток в глобальных расчетах из-за вычислительных сложностей, связанных с дискретизацией уравнений динамики в окрестностях полюсов. В приэкваториальных областях сетки как правило совпадают с широтно-долготными, так как их координатные линии параллельны или перпендикулярны экватору, что упрощает аппроксимацию уравнений. В отличие от них, сетка модели ИВМ РАН не содержит линии, совпадающей с экватором, а угол наклона координатных линий относительно него варьируется между узлами. Это приводит к анизотропным искажениям решений, что было выявлено с помощью метода анализа, предложенного в тесте бароклиной волны Мацуно.

Численные эксперименты показали, что использование широтно-долготной сетки в приэкваториальной зоне обеспечивает более высокую точность: структура численных решений ближе к структуре аналитических решений, а сходимость норм ошибок существенно улучшена. Для устранения проблемы в модели ИВМ РАН, реализован алгоритм генерации двухполюсных сеток [2], сохраняющих структуру широтно-долготных сеток вблизи экватора. Это позволило улучшить точность решения и скорость сходимости ошибок.

Для анализа фазовой точности численных решений предложена дополнительная диагностика, основанная на проекции решения на собственную моду, заданную начальными условиями. Этот подход упрощает оценку сходимости фазовых ошибок и повышает информативность сравнения с аналитическими решениями.

Работа демонстрирует важную роль структуры сетки в моделировании экваториальных волн и предлагает эффективное решение для повышения точности расчетов в приэкваториальной области для климатической модели ИВМ РАН.

Литература:

1. Shamir O. et al. The Matsuno baroclinic wave test case //Geoscientific Model Development. – 2019. – Т. 12. – №. 6. – С. 2181–2193.
2. Madec G., Imbard M. A global ocean mesh to overcome the North Pole singularity //Climate Dynamics. – 1996. – Т. 12. – С. 381–388.

Обратные связи между химическими, радиационными и динамическими процессами в Модели Земной Системы с блоком химии

**Смышляев С.П., Яковлев А.Р., Ткаченко М.А., Ромащенко Д.Д., Иманова А.С.,
Окуличева А.А.**

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: smyshl@rshu.ru, endrusrj@rambler.ru, usa4eva.m@mail.ru, r0mashenkodan@yandex.ru,
imanova.an@mail.ru, arina-okulichева@mail.ru

Feedbacks between chemical, radiative and dynamical processes in the Earth System Model with a chemistry module

**Smyshlyaev S.P., Jakovlev A.R., Tkachenko M.A., Romaschenko D.D., Imanova A.S.,
Okulichева A.A.**

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Voronezhskaya street, 79

В Модели Земной Системы (МЗС) с включенным блоком химии атмосферы существует несколько направлений взаимодействия между химическими, радиационными и динамическими процессами, определяющими потенциал для возникновения обратных связей между содержанием атмосферных газов, температурой атмосферы, ее влажностью, содержанием аэрозоля, динамикой атмосферы и океана.

В настоящей работе с помощью численных экспериментов с новой версией Химико-Климатической Модели ИВМ РАН – РГТМУ, построенной на базе климатической модели INMCM60, анализируются обратные связи между изменением содержания озона, метана и закиси азота и изменениями температуры и динамики атмосферы. Для этого сравниваются результаты расчетов по нескольким сценариям за период с 1980 до 2020 года с учитываемым и отключенным влиянием атмосферной химии на нагрев, температуру и циркуляцию атмосферы. По аналогичной методике анализируются и обратные связи между содержанием химически активных газов и аэрозолем, водяным паром и процессами на суше и в океане.

Трёхмерная модель ионосферы Земли INM-IM с системой вариационного усвоения данных наблюдений

^{1,2} Кулямин Д.В., ^{2,3} Останин П.А., ^{1,2} Дымников В.П.

¹ Институт вычислительной математики имени Г. И. Марчука РАН, Москва, Россия

² Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова, Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская область, Россия

INM-IM: three-dimensional model of the Earth's ionosphere with a variational data assimilation

^{1,2} Kulyamin D.V., ^{2,3} Ostanin P.A., ^{1,2} Dymnikov V.P.

¹ Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

² Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

В докладе представлены результаты работ по усовершенствованию модели ионосферы Земли INM-IM (для высот 100-500 км), совместимой с семействами моделей атмосферы и Земной системы ИВМ РАН и разработки системы усвоения данных наблюдений об ионосфере, построенной на ее основе. В ходе недавних исследований была создана и реализована в модели усовершенствованная параметризация формирования электрических полей в высоких широтах на основе магнитосферной конвекции, позволяющая учитывать разный уровень геомагнитной активности. Получены улучшения в воспроизведении глобальных климатических характеристик ионосферы моделью INM-IM. Разработана параллельная версия модели INM-IM в диффузионной версии, получено линейное ускорение эффективность распараллеливания составляет 60-80% от максимально возможной. Представлена недавно разработанная новая четырехмерная вариационная система усвоения данных наблюдений для глобальной трехмерной модели ионосферы INM-IM, с помощью которой успешно ассимилированы реальные данные наблюдений о наклонном полном электронном содержании получаемые со спутников GPS.

Модуль расчета атмосферных электрических параметров в национальной климатической модели

Сарафанов Ф.Г., Ильин Н.В., Слюняев Н.Н., Евтушенко А.А., Мареев Е.А.

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

Module for Calculating Atmospheric Electrical Parameters in the National Climate Model

Sarafanov F.G., Ilin N.V., Slyunyaev N.N., Evtushenko A.A., Mareev E.A.

A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

Одной из задач атмосферного электричества, вызывающей особый интерес в последние десятилетия в контексте климатических изменений, является задача о связи крупномасштабных процессов в системе глобальной электрической цепи (ГЭЦ) с собственной динамикой атмосферы. Глобальная электрическая цепь представляет собой распределённую систему токов в атмосфере Земли, порождаемых в электрически активных, в частности, грозовых, облаках – источниках тока в ГЭЦ. Цепь замыкается, с одной стороны, в хорошо проводящих верхних слоях атмосферы, с другой стороны – на хорошо проводящей поверхности Земли. При этом в области источников токи текут от поверхности Земли к ионосфере, а в области хорошей погоды – от ионосферы к Земле. Было обнаружено, что множество явлений погодных и климатических масштабов находят отклик в измеряемых значениях приземного электрического поля хорошей погоды, пропорционального значению универсального индекса ГЭЦ – ионосферного потенциала.

Авторами разработаны схемы учета различных параметров модельной атмосферы для параметризации источников ГЭЦ, реализованные в новом блоке национальной климатической модели (модуль «Еlec»). Основной целью разработки и усовершенствования блока атмосферного электричества является включение в модель расчета динамики ряда электрических параметров атмосферы, в том числе глобального сопротивления атмосферы, вклада отдельных столбцов атмосферы в формирование глобального значения ионосферного потенциала, среднего количества молниевых разрядов и т. д. Расчеты проводимости атмосферы в теле модуля основаны на физических представлениях о связи вертикальных профилей температуры, давления, влажности с коэффициентами рекомбинации ионов, их диффузии и прилипания, расчеты тока источников – на связи глубокой конвекции и количества конвективных осадков с формированием электрически активных облаков.

В докладе представлены последние результаты моделирования ГЭЦ с помощью национальной климатической модели, в частности, воспроизведение моделью суточной и сезонной динамики ионосферного потенциала, и обсуждаются перспективы развития блока атмосферного электричества, в частности, постановка модельных экспериментов для изучения прямых и обратных связей ГЭЦ и климата.

Параметризация глобальной молниевой активности для крупномасштабного моделирования погоды и климата

Ильин Н.В., Сарафанов Ф.Г., Слюняев Н.Н.

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

Parameterization of global lightning activity for large-scale weather and climate modeling

Ilin N.V., Sarafanov F.G., Slyunyaev N.N.

A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

Основным подходом в исследованиях атмосферного электричества последних лет является рассмотрение электрических процессов в рамках единой согласованной концепции глобальной электрической цепи (ГЭЦ). В качестве источников ГЭЦ переменного тока выступают молниевые разряды. При параметризации молниевой активности из первых принципов возникают значительные трудности как с использованием адекватных пространственно-временных масштабов, так и с необходимостью учета физических механизмов различной природы. При этом правильное понимание взаимосвязей грозовой активности и базовых параметров атмосферы является одной из ключевых задач, без учета которой невозможно продвинуться в решении одной из важнейших фундаментальных и прикладных проблем – климатологии молнии.

Значимой проблемой параметризации молниевой активности в глобальном масштабе является так называемый контраст «суша океан». Хорошо известно, что количество молниевых вспышек над сушей в 4 раза больше (в среднем), чем над океаном, при этом количество запасенной энергии (CAPE) в облаках над океаном, как правило, намного больше.

В рамках доклада представлено решение задачи параметризации источников ГЭЦ переменного тока (молниевых вспышек) на основе экспериментальных данных о распределении молниевых разрядов и техники машинного обучения. Выделены три основных параметра атмосферы, которые позволяют параметризовать глобальную молниевую активность из первых принципов, не прибегая к искусственному выделению регионов на сушу и океан. Крупномасштабная параметризация использует три параметра атмосферы: количество осадков за последний час (RAIN), конвективная доступная потенциальная энергия (CAPE) и влагосодержание выше нулевой изотермы (PWHI).

Проведено обучение и поиск оптимального классификатора для параметризации молниевой активности. Получено аналитическое выражение для бинарной классификации молний, которое может использоваться для оценки количества молний за временной период в 1 час.

■ Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект № FFUF-2025-0009).

Оценки качества исторических и оперативных сезонных прогнозов основных метеорологических полей по моделям земной системы ИВМ РАН INMCM5 и INMCM6M

Тищенко В.А., Хан В.М., Субботин А.В.

Гидрометцентр России, Москва, Россия

E-mail: hydrometcenter@gmail.com, valentina_khan2000@yahoo.com, subbotin@mail.org

Quality assessment of historical and operational seasonal forecasts of the main meteorological fields using the INMCM5 and INMCM6M earth system models of the Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences

Tishchenko V.A., Khan V.M., Subbotin A.V.

Hydrometcentre of Russia, Moscow, Russia

В ФГБУН «ИВМ РАН» совместно с ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана технология глобального ансамблевого сезонного прогноза на базе модели Земной системы INM-CM6M [1]. Приводятся оценки качества исторических (на ретроспективной выборке за период с 1991 по 2020 годы) и оперативных прогнозов основных метеорологических полей по моделям INMCM5 и INMCM6M. Расчеты прогнозов проводятся на высокопроизводительном вычислительном комплексе ФГБУ «ГВЦ Росгидромета» Cray XC40-LC.

Новая версия модели INM-CM6M отличается от предыдущей INM-CM5 пространственным разрешением, усовершенствованиями блоков подстилающей поверхности, облачности и параметризации конденсации, а также блока океана. В качестве объекта прогнозирования рассматриваются среднемесячные и среднесезонные аномалии (с нулевой и одномесечной заблаговременностью) для следующих метеорологических параметров: давление на уровне моря, высота геопотенциала на уровне 500 гПа, температура на уровне 850 гПа и у земной поверхности (T2м), а также количество осадков.

При проверке использовались следующие показатели для детерминистических прогнозов: *ACC* – коэффициент корреляции аномалий; *ρ* – показатель совпадения по знаку; *RMSE* – среднеквадратическая ошибка прогноза; *MSSS* – общий показатель качества (мера мастерства) для некатегориальных детерминистических прогнозов. Оценка вероятностных прогнозов осуществлялась с помощью показателя *ROC*.

Обобщенная проверка прогнозов проводилась по всем узлам регулярной географической сетки и с осреднением по крупным регионам: по территории Земного шара, внетропической части Северного полушария, внетропической части Южного полушария, тропической зоны и для Северной Евразии.

В период испытаний оперативных прогнозов производилось сравнение успешности ансамблевых прогнозов по модели INM-CM5 с успешностью ансамблевых прогнозов зарубежных метеоцентров.

В среднем качество прогнозов по модели ИВМ РАН рассматриваемых пяти параметров по Земному шару и по отдельно взятым регионам соответствует мировому уровню. При анализе оценок для всех рассматриваемых параметров следует отметить более медленное снижение качества прогнозов с увеличением заблаговременности по сравнению с большинством мировых и региональных центров по долгосрочным прогнозам.

Исследование динамики колебания Эль-Ниньо в меняющемся климате на основе байесовских стохастических моделей

Селезнев А.Ф., Мухин Д.Н.

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

E-mail: aseleznev@ipfran.ru, mukhin@ipfran.ru

Studying ENSO dynamics in a changing climate using Bayesian stochastic models

Seleznev A., Mukhin D.

A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

Одной из наиболее значимых составляющих климатической системы Земли, которая во многом определяет характер ее динамики на межгодовых масштабах является Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК или колебание Эль-Ниньо). В данной работе развивается новый подход к исследованию долгосрочных изменений характеристик Эль-Ниньо в меняющемся климате, в том числе возможных критических переходов, связанных с качественными изменениями климатической динамики. В основе предлагаемого подхода лежит построение и анализ динамики низкоразмерных стохастических моделей (аналогов) колебания Эль-Ниньо, построенных по временным рядам различных климатических характеристик. Структурная устойчивость стохастической модели и ее близость к критическому переходу понимается в вероятностном смысле на основе апостериорного распределения ее параметров, оцениваемого в рамках байесовского статистического формализма. Возможности подхода демонстрируются на примере реконструкции и анализа критических переходов межгодовой динамики колебания Эль-Ниньо по данным концептуальной модели и по ансамблям реализаций современных моделей Земной системы.

■ Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект FFUF-2025-0009).

Развитие подхода к идентификации и анализу режимов циркуляции атмосферы на основе скрытых марковских моделей

Мухин Д.Н., Самойлов Р.С., Сафонов С.Е.

Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

Development of an approach to identification and analysis of atmospheric circulation regimes based on hidden Markov models

Mukhin D.N., Samoilov R.S., Safonov S.E.

A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

В динамике атмосферы средних широт наблюдаются выделенные состояния – так называемые режимы погоды, -- которые проявляются как повторяющиеся долгоживущие структурами циркуляции атмосферы. Наличие режимов является свойством, присущим крупномасштабным геострофическим движениям атмосферы [1]. Так, в тропосфере средних и полярных широт режимам соответствуют структуры аномалий зонального переноса, задающие тип погоды в различных регионах [2,3]; в зимней стратосфере режимы определяют характерные моды полярного стратосферного вихря [4]. Можно сказать, что режимы образуют каркас изменчивости циркуляции атмосферы средних широт на масштабах, превышающих характерное время предсказуемости метеорологических процессов, поэтому идентификация и моделирование режимов важны как с точки зрения исследования долгосрочной предсказуемости погоды и климата, так и для оценки воспроизводимости атмосферной динамики моделями земной системы (МЗС).

В данной работе развивается подход к эмпирическому (по данным) моделированию режимов, использующий представление оператора эволюции системы в форме скрытой марковской модели (СММ) [2]. В основе подхода лежит понимание режима как метастабильной области фазового пространства системы, т.е. множества состояний, в котором система может пребывать аномально долго. Построение СММ позволяет не только алгоритмически эффективно находить такие множества, но и оценивать времена жизни режимов и вероятности переходов между ними, что может быть использовано для анализа предсказуемости исследуемого процесса. Кроме того, построение СММ для различных подсистем (например, стратосферы и тропосферы) позволяет математически просто выражать и оценивать меры причинных связей между процессами на основе аппарата передаточной энтропии.

В докладе демонстрируются результаты моделирования режимов циркуляции атмосферы средних широт в тропосфере и стратосфере Северного полушария по данным реанализа и моделей МЗС. Проводится сравнение свойств выделенных режимов в МЗС и реальном климате, включая структуру режимов, их устойчивость и предсказуемость, а также взаимное влияние мод полярного стратосферного вихря и режимов в тропосфере.

■ Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 22-12-00388).

Литература:

1. Hannachi, A., Straus, D. M., Franzke, C. L. E., Corti, S. & Woolling T. // Low-frequency nonlinearity and regime behavior in the northern hemisphere extratropical atmosphere. // Rev. Geophys. 55, 199–234
2. Mukhin, D. Metastability, atmospheric midlatitude circulation regimes and large-scale teleconnection: a data-driven approach / D. Mukhin, R. Samoilov, A. Hannachi // arXiv preprint. 2024. arXiv:2412.06933.
3. Mukhin, D., Hannachi, A., Braun, T. & Marwan, N. // Revealing recurrent regimes of mid-latitude atmospheric variability using novel machine learning method. // Chaos: An Interdiscip. J. Nonlinear Sci. 32, 113105
4. Hannachi, A., Lechner, M., Finke, K. and Mukhin D. // Stratospheric polar vortex, wave absorption/ reflection and effect on surface climate. // Clim Dyn 63, 126 (2025)

Режимы крупномасштабной атмосферной циркуляции в эксперименте INM-CM6-L с холодной Северной Атлантикой

¹ **Бабанов Б.А.,** ^{1,2} **Семенов В.А.**

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

² Институт географии РАН, Москва, Россия

E-mail: babanov@ifaran.ru, vasemenov@mail.ru

Atmospheric circulation regimes in an INM-CM6-L experiment with cold North Atlantic Ocean

¹ **Babanov B.A.,** ^{1,2} **Semenov V.A.**

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

² Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

Проведены два эксперимента с моделью INM-CM6-L – один со средней климатологии за 1979–2014 гг., второй с наложенной отрицательной аномалией температуры поверхности океана в области Северной Атлантики. По данным двух экспериментов получены режимы крупномасштабной атмосферной циркуляции (погодные режимы) в области Евро-Атлантики (от 80 з. д. до 40 в. д. и от 30 с.ш. до 80 с.ш.). Погодные режимы получены двумя способами – путем кластеризации модельных полей высоты геопотенциальной поверхности на уровне 500 гПа (z500) в собственном фазовом пространстве, а также путем проецирования модельных z500 на поля четырех традиционных погодных режимов (NAO+, NAO-, SB, AR), полученных по данным ERA5.

Для погодных режимов, полученных по результатам двух модельных экспериментов, сопоставлены их статистические характеристики – повторяемости, продолжительности, матрицы переходов. Кроме характеристик погодных режимов, для двух экспериментов сопоставлены значения температур, осадков, давления и высоты геопотенциальной поверхности (500 гПа), получены статистически значимые разницы.

Оценка качества воспроизведения трехмерной структуры зональной и региональной циркуляции ветра в модели INM-CM6M

Железнова И.В., Новикова А.А., Сорокин А.Д., Гущина Д.Ю.

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия
E-mail: ijeleznova@gmail.com, annannovikova20062003@mail.ru, alexdsorokin@mail.ru, dasha155@mail.ru

Assessing the reproduction of the 3D structure of zonal and regional wind circulation in the INM-CM6M model

Zheleznova I.V., Novikova A.A., Sorokin A.D., Gushchina D.Yu.

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

Происходящие в 21 веке климатические изменения проявляются в широком спектре явлений и процессов. В последние десятилетия увеличивается частота возникновения экстремальных явлений погоды, таких как волны жары, засухи и экстремальные осадки. Одним из механизмов, приводящих к росту числа неблагоприятных явлений погоды, может быть перестройка крупномасштабной циркуляции атмосферы, проявляющаяся в изменении локализации и интенсивности центров действия атмосферы и смещении районов активной циклонической деятельности. Для прогноза таких изменений необходимо качественное воспроизведение в климатических моделях трехмерной структуры атмосферной циркуляции. Хотя поля ветра являются одними из наиболее успешно воспроизводимых в моделях метеорологических параметров, некоторые расхождения с реально наблюдающейся циркуляцией могут сказаться на качестве прогноза ее изменения в будущем климате. Поэтому в настоящем исследовании проведена оценка воспроизведения климатической моделью Института вычислительной математики РАН INM-CM6M [1] трехмерной структуры зональной и региональной атмосферной циркуляции в тропосфере и нижней стратосфере.

В работе были использованы среднемесячные данные реанализа ERA5 за период 1985-2020 гг и данные климатической модели INM-CM6M для эксперимента historical за период 1985-2014 гг (10 членов модельного ансамбля). Для расчета зональной и региональной циркуляции скорости ветра использовались данные о зональной и меридиональной компонентах скорости ветра на изобарических поверхностях 200, 500, 850 и 1000 гПа, а для построения вертикальных разрезов зональной циркуляции ветра – данные о зональной компоненте скорости ветра на всех доступных в реанализе и модели геопотенциальных поверхностях от 1000 до 100 гПа.

Для оценки качества воспроизведения атмосферной циркуляции в модели INM-CM6M были рассчитаны зональный и региональный индексы циркуляции Петросянца-Гущиной [2,3]. Зональный индекс характеризует интенсивность циркуляции зональной компоненты скорости ветра на каждом круге широты. Региональный индекс представляет собой интеграл скорости ветра по замкнутому контуру, который был рассчитан для 18 различных центров действия атмосферы.

В целом модель INM-CM6M реалистично воспроизводит общую структуру зональной циркуляции ветра. Наиболее значительные ошибки в модели по сравнению с реанализом отмечаются в умеренных широтах обоих полушарий в холодное полугодие и выражаются в завышении интенсивности западных ветров практически во всей тропосфере. Кроме того, модель недооценивает интенсивность восточных ветров в летний период в зоне пассатной циркуляции в средней тропосфере.

Для большинства исследуемых центров действия атмосферы модель INM-CM6M верно воспроизводит годовой ход интенсивности циркуляции в депрессии или антициклоне, но склонна недооценивать абсолютные значения индекса региональной циркуляции ветра в нижней тропосфере и переоценивать в средней и верхней тропосфере. Наилучшие результаты модель показывает для областей экваториальных ложбин, района Индийского муссона и сезонных центров действия атмосферы над Северной Америкой. Наибольшие расхождения с данными реанализа отмечаются для районов циклонической активности в умеренных широтах южного полушария.

Несмотря на ряд недостатков, выявленных при анализе качества воспроизведения климатической моделью INM-CM6M годового хода зональной и региональной циркуляции, в целом модель достаточно успешно воспроизводит основные черты циркуляции, поэтому ее можно использовать для оценки изменения циркуляции в XXI веке.

Литература:

1. Volodin, E., Blagodatskikh, D., Bragina, V., Chernenkov, A., Chernov, I., Ezhkova, A., Fadeev, R., Gritsun, A., Iakovlev, N., Kostykin, S., Onoprienko, V., Petrov, S., Tarasevich, M. & Tsybulin, I. (2024). Computational framework for the Earth system modelling and the INM-CM6 climate model implemented on its base. Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, 39(6), 379-392. <https://doi.org/10.1515/rnam-2024-0032>
2. Гущина Д. Ю., Петросянц М. А., Соколихина Е. В. Интегральные характеристики глобального поля ветра. 2. Интенсивность западного и восточного переносов // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 5. – С. 5-16.
3. Петросянц, М. А., Гущина Д. Ю. Циркуляция скорости ветра в центрах действия атмосферы как показатель количества осадков и температуры в их пределах. I. Анализ взаимосвязей на сезонных масштабах // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 5. – С. 5-20.

СЕКЦИЯ VIII

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ В ЗАДАЧАХ НАУК О ЗЕМЛЕ

Влияния метеоусловий на прогноз концентрации приземного аэрозоля зимой в мегаполисе

Александров Г.Г., Виноградова А.А., Гинзбург А.С., Губанова Д.П.

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

E-mail: gleb@ifaran.ru, vinogradova@ifaran.ru, gin@ifaran.ru, gubanova@ifaran.ru

The influence of meteorological conditions on the forecast of ground-level aerosol concentration at winter period in a metropolis

Alexandrov G.G., Vinogradova A.A., Ginzburg A.S., Gubanova D.P.

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

В докладе представлены результаты исследования роли метеорологических факторов (температура, атмосферное давление, относительная влажность) при прогнозировании концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ зимой в Москве с помощью авторегрессионных и нейросетевых моделей. В качестве данных наблюдений используются результаты измерения уровня аэрозольного загрязнения приземного воздуха в Москве в зимние сезоны 2022-2024 гг., проанализированные в [1] и других работах сотрудников ИФА им. А.М. Обухова РАН и ГПБУ «Мосэкомониторинг».

В работе используются статистическая модель, основанная на методе регрессии и авторегрессии [2, 3], и нейросетевая модель, основанная на алгоритме с обратным распространением ошибки [4]. Показано, что основные эффекты учета метеоусловий при прогнозировании концентрации аэрозоля в Москве в зимний период по авторегрессионной и нейросетевой модели оказываются практически идентичными.

Для прогноза на февраль (последний зимний месяц) обучение авторегрессионной модели осуществлялось на данных за предыдущие два месяца (декабрь и январь). Для прогноза на следующую зиму (январь и февраль) обучение модели осуществлялось на данных за январь и февраль предыдущего года. Для оценки успешности прогноза использовался коэффициент корреляции между месячными массивами прогнозируемых концентраций аэрозоля и данных наблюдений.

Сравнение данных наблюдений с прогнозом концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ для зимних месяцев показало, что в ряде случаев (например, январь 2023 г.) наилучшие результаты дает авторегрессионная модель без учета метеорологических факторов, а в других случаях (например, февраль 2023 г.) учет температуры и давления заметно повышает уровень корреляции результата прогноза и данных наблюдений. Учет относительной влажности практически во всех случаях ухудшает корреляцию результатов прогноза и данных наблюдений. Исключение составляет январь 2024 г., когда наилучший результат дает учет всех трех факторов – температуры, давления и относительной влажности воздуха.

■ Работа выполнена в рамках Госзадания ИФА им. А.М. Обухова РАН №№ 125021001827-3 и 125020501413-6.

Литература:

1. Губанова Д.П., Виноградова А.А., Лезина Е.А. и др. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 6. С. 754-773.
2. Демченко П.Ф., Гинзбург А.С., Александров Г.Г. и др. Метеорология и гидрология. 2015. №. 10. С. 31-43.
3. Alexandrov G.G., Ginzburg A.S. Geography, environment, sustainability. 2024. V. 17. №. 3. P. 19-34.
4. Riedmiller M., Braun H. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm. San Francisco, 1993.

Машинное обучение для диагностики статистик пространственного распределения осадков в Московском регионе

^{1,2} Ярынич Ю.И., ^{1,2,3} Варенцов М.И., ^{4,5,1} Криницкий М.А., ^{1,2} Степаненко В.М.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

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

³ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

⁴ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

⁵ Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская область, Россия

E-mail: julia.yarinich@srcc.msu.ru; mikhail.varentsov@srcc.msu.ru; stepanen@srcc.msu.ru

В связи с наблюдаемыми изменениями климата учащающиеся экстремальные осадки оказывают влияние на различные регионы, включая Северную Евразию, и особенно разрушительны в крупных городах. Глобальные климатические изменения обычно оцениваются путем уменьшения масштаба крупномасштабных климатических характеристик, которые лучше разрешаются в климатических моделях, до мелкомасштабных переменных, которые не могут быть явно разрешены на сетке климатической модели. В предыдущих исследованиях изучались подходы машинного обучения для уменьшения масштаба осадков в нескольких регионах, но территория Московской агломерации, крупнейшей в России и Европе, осталась нетронутой, а ежегодный риск наводнений из-за экстремальных осадков в этом регионе остается очень высоким.

В данной работе методы машинного обучения в статистической детализации используются для получения характеристик пространственного распределения осадков (максимального значения, моментов распределения, квантилей) из полей гидродинамического моделирования с низким разрешением (реанализа ERA5). Для обучения статистических моделей (гребневой регрессии, градиентного бустинга, случайного леса) используются данные за 33 года наблюдений на метеостанциях Московского региона. В качестве признаков описания выступают физически обоснованные крупномасштабные предикторы осадков, рассчитанные с использованием данных реанализа ERA5. В их число входят как простые величины в толще атмосферы (температура, влажность и др.), так и сложные комплексные характеристики (CAPE, лапласиан приземного давления и др.). Наилучший результат по выбранным метрикам качества (RMSE, R2) достигается с использованием модели градиентного бустинга, при следующей конфигурации набора предикторов: осреднённые за сутки, стандартизованные, включая модельный предиктор осадков (среднее значение по площади). В работе показан рейтинг важности признаков крупномасштабных атмосферных предикторов для территории Московской области для различных конфигураций экспериментов и применённых моделей.

- Работа выполнена при поддержке Некоммерческого фонда содействия развитию науки и образования «ИНТЕЛЛЕКТ».

Machine learning for diagnostics of precipitation spatial distribution statistics in the Moscow region

^{1,2} Yarinich Y., ^{1,2,3} Varentsov M., ^{4,5,1} Krinitskiy M., ^{1,2} Stepanenko V.

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

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

³ Hydrometeorological Research Center of Russia, Moscow, Russia

⁴ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

⁵ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region

Due to observed climate change, increase in frequency of extreme precipitation events affect various regions, including Northern Eurasia, and remains especially destructive in large cities. Global climate change is usually assessed by downscaling large-scale climate features, which are better resolved in climate models, to fine-scale variables that cannot be explicitly resolved on the climate model grid. Previous studies have studied machine learning approaches to downscaling precipitation in several regions, but the Moscow agglomeration has remained untouched, while the annual flood risk due to extreme precipitation in this region remains very high.

In this paper, machine learning methods at statistical downscaling are used to extract characteristics of the spatial distribution of precipitation (maximum value, moments of the distribution, quantiles) from low-resolution hydrodynamic modeling fields (ERA5 reanalysis). To train statistical models (Ridge Regression, Gradient Boosting, Random Forest), 33 years of observation data from meteorological stations in the Moscow region are used as a target. The feature description is represented by physically based large-scale predictors of precipitation calculated using ERA5 reanalysis data. Predictor set include both simple values in the atmosphere (temperature, humidity, etc.) and complex characteristics (CAPE, surface pressure Laplacian, etc.). The best result for the selected quality metrics (RMSE, R2) is achieved using the gradient boosting model with the following configuration of the predictor set: daily averaged, standardized, including the model precipitation predictor (areal average). The paper shows the feature importance rating of large-scale atmospheric predictors for the Moscow region for various configurations of experiments and applied models.

- This work was supported by Non-commercial Foundation for the Advancement of Science and Education «INTELLECT».

Моделирование турбулентного переноса примесей в планетарном пограничном слое с применением методов крупных вихрей и методов машинного обучения

¹ Герасимов И.А., ^{1,2} Криницкий М.А., ^{3,4} Мортиков Е.В.

¹ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН

³ Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

⁴ Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Россия

Modeling of turbulent pollutants transport in planetary boundary layer exploiting large eddy simulation and machine learning

¹ Gerasimov I.A., ^{1,2} Krinitskiy M.A., ^{3,4} Mortikov E.V.

¹ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

² Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

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

⁴ Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

Планетарный пограничный слой атмосферы (ППС) играет ключевую роль в контексте переноса загрязняющих веществ, что непосредственно влияет на экологическое состояние атмосферы и подстилающей поверхности [1]. Поэтому моделирование распространения примесей в ППС является фундаментальной задачей, поскольку точное прогнозирование необходимо для оценки качества воздуха на различных масштабах.

Традиционно считается, что распространение газовых и аэрозольных примесей в ППС хорошо аппроксимируется с использованием функции плотности нормального распределения [2], как показано на рис. 1, однако существующие методы расчета ограничены вычислительными ресурсами из-за сложности моделирования турбулентных процессов, возникающих при взаимодействии воздушных масс с подстилающей поверхностью. Полуэмпирические подходы к прогнозированию переноса загрязнений, демонстрируют невысокую точность, особенно в условиях сложной орографии и неоднородной подстилающей поверхности [3]. Целью настоящего исследования является разработка методологии аппроксимации первых моментов пространственного распределения примесей в турбулентном ППС с применением методов машинного обучения (МО). Для получения референсной коллекции данных мы используем метод крупных вихрей для численного моделирования атмосферы с высоким разрешением.

В рамках исследования были проанализированы первые два центральных момента распределения примеси по вертикальной и горизонтальной осям, осредненные по времени, в условиях стационарного ППС. Для формирования коллекции обучающих данных было проведено численное моделирование распространения примесей методом крупных вихрей [4]. В качестве варьируемых входных параметров модели задавались внешние условия, такие как шероховатость подстилающей поверхности, градиент температуры над верхней границей ППС и т.д., одинаковые для всего домена. Также, для каждого источника задавались координаты и его мощность. Эти же параметры использовались для формирования признакового описания событий (вариантов распространения примесей в атмосфере при заданных внешних параметрах) при решении задачи в подходе машинного обучения. Полученные результаты численного моделирования сравнивались с аппроксимациями, рассчитанными при помощи трех различных подходов: традиционной теории на основе Гауссова распределения [3], классических алгоритмов

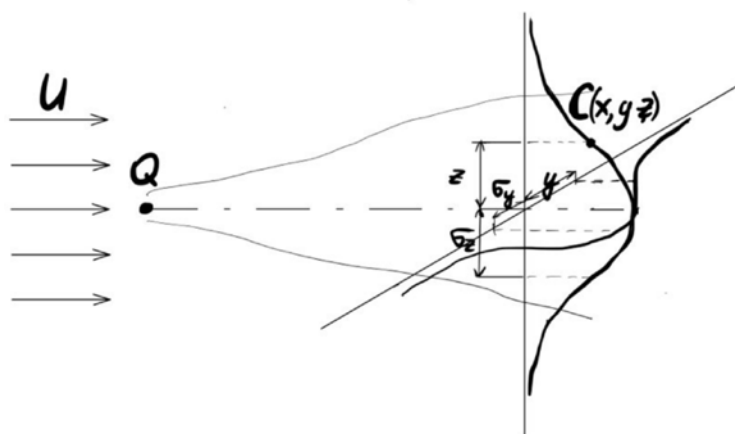


Рис. 1. Схематическое изображение распространения примеси. Q – источник, U – скорость ветра.

МО и искусственных нейронных сетей (ANN). В качестве классических алгоритмов МО были использованы: линейная модель, модель случайных лесов и модель градиентного бустинга Catboost. Количественные результаты сведены в табл. 1.

Сравнительный анализ результатов продемонстрировал превосходство методов машинного обучения в сравнении с традиционным полуэмпирическим подходом.

В перспективе планируется расширение методологии для учета большего количества атмосферных параметров и более разнообразных условий подстилающей поверхности. Также рассматривается возможность применения методов глубокого обучения для повышения точности прогнозирования на больших временных масштабах.

Таблица 1. Результаты аппроксимации центральных моментов. Метрика оценки RMSE.

	Среднее, z	Среднее, y	Среднеквадратическое отклонение, z	Среднеквадратическое отклонение, y
Эмпирика	48	30.1	47.1	56.3
Линейная модель	46.1	28.9	31.7	54
Модель случайных лесов	29.6	30.2	14.6	21.4
Модель градиентного бустинга	26.6	28.5	12.9	16.7
Полносвязная нейронная сеть	30.7	30.0	16.8	20.2

- Благодарности. Исследование проведено в рамках Соглашения № 075-03-2024-117 от 17.01.2024 Московского физико-технического института.

Литература:

1. Hendrik Tennekes; The atmospheric boundary layer. Physics Today 1 January 1974; 27 (1): 52-63. <https://doi.org/10.1063/1.3128397>
2. Sutton O. G., «A theory of eddy diffusion in the atmosphere», Proc. Roy. Soc. London, A, 135, 1932, pp.143-165.
3. Ražnjević, A., van Heerwaarden, C., and Krol, M.: Evaluation of two common source estimation measurement strategies using large-eddy simulation of plume dispersion under neutral atmospheric conditions, Atmos. Meas. Tech., 15, 3611–3628, <https://doi.org/10.5194/amt-15-3611-2022>, 2022.
4. Tkachenko, E.V., Debolskiy, A.V. & Mortikov, E.V. Intercomparison of Subgrid Scale Models in Large-Eddy Simulation of Sunset Atmospheric Boundary Layer Turbulence: Computational Aspects. Lobachevskii J Math 42, 1580–1595 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1995080221070234>

Обнаружение градоопасных состояний атмосферы с помощью глубокого обучения на полях метеовеличин

¹ Блинов П.Д., ² Чернокульский А.В., ³ Криницкий М.А., ⁴ Бугримов А.В.

¹ НИУ Высшая школа экономики, Москва, Россия

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

³ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Email: pdblinov@edu.hse.ru, a.chernokulsky@ifaran.ru, krinitsky@sail.msk.ru, alexceybug@gmail.com

Detection of hail-favored atmospheric condition using deep learning on meteorological fields

¹ Blinov P.D., ² Chernokulsky A.V., ³ Krinitsky M.A., ⁴ Bugrimov A.V.

¹ National Research University – Higher School of Economics, Moscow, Russia

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

³ P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

События выпадения крупного града наносят существенный экономический урон российским регионам. При этом исследование и прогнозирование градовых событий и оценка связанных с ними рисков затруднены вследствие неоднородности наблюдений за градом по времени и пространству, в том числе зависимости от плотности населения, наличия метеорологических станций. В связи с этим актуальным является вопрос обнаружения и исследования градоопасных состояний атмосферы.

Одним из стандартных методов выявления подобных состояний является ингредиентный подход, основанный на анализе различных индексов неустойчивости атмосферы (CAPE, CIN, WMAXSHEAR и т.д.) и их сравнения с пороговыми (критическими) значениями. Корректный расчет подобных индексов как правило требует высокого вертикального разрешения исходных данных. Реже анализируются характерные пространственные особенности основных метеорологических величин на стандартных изобарических поверхностях в определенном радиусе от точки наблюдения. Выявление подобных особенностей требует применения методов машинного обучения (МО).

В данной работе исследуется возможность использования метеовеличин на поверхности и стандартных изобарических поверхностях (850, 700 и 500 гПа) для диагностики градоопасных состояний в сравнении с пороговой методикой и разработка соответствующих моделей МО. Представлены модели МО, обученные на основе наблюдений за событиями града, проводимых на российских метеостанциях с 1996 по 2024 год и полей метеовеличин (скорость ветра, влажность и температура воздуха), за соответствующие периоды на основе данных реанализа ERA5. Выборка включает 11290 событий града.

Проведено сравнение точности различных архитектур моделей (градиентный бустинг, сверточная нейронная сеть), наборов входных переменных (разные наборы метеовеличин, индексов неустойчивости). Продемонстрировано, что диагностика градоопасных ситуаций на основе анализа полей ключевых метеовеличин на стандартных изобарических поверхностях с помощью методов МО позволяет получить точность, сопоставимую с применением ингредиентного подхода.

Исследование характеристик возвратной миграции нерки на основе интеграции океанических данных и глубокого обучения

¹ Борисов М.А., ^{1,2} Криницкий М.А.

¹ Московский физико-технический институт, Долгопрудный

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

E-mail: borisov.ma@phystech.edu, krinitsky@sail.msk.ru

Investigating Return Migration Characteristics of Salmon Based on Ocean Data Integration and Deep Learning

¹ Borisov M.A., ^{1,2} Krinitskiy M.A.

¹ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region

² Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow

В устье реки Фрейзер (Британская Колумбия) коммерческий промысел нерки ведётся канадскими и американскими предприятиями в условиях сложной системы проливов между островом Ванкувер и материком. Сезонность рыболовства и распределение уловов между странами напрямую зависят от особенностей возвратной миграции лосося через эти проливы. В рамках исследования предполагается, что химический состав воды, температура поверхности океана и динамика течений являются ключевыми факторами, влияющими на миграционное поведение нерки. Для анализа этих факторов предложен комбинированный подход, объединяющий методы контрастного обучения (Momentum Contrast, MoCo) и рекуррентные нейронные сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM), что позволяет эффективно снижать размерность многомерных океанографических данных. На последующем этапе обученные модели машинного обучения используются для прогноза доли северного отклонения и медианных дат возврата нерки в эстуарий.

Обучающие данные включают многолетние записи реанализа GLORYS12, содержащие параметры поверхностных течений, солёности, температуры. В отличие от предыдущих работ, где применялись авторегрессионные методы или статистическое моделирование с ограниченным набором предикторов, данное исследование интегрирует методы глубокого обучения, включая самообучение, с классическими алгоритмами машинного обучения. Особое внимание уделено процедурам предобработки данных, таким как нормализация и аугментация, а также оптимизации архитектур нейронных сетей для повышения устойчивости моделей к шумам и недостатку размеченных данных. Результаты демонстрируют, что комбинация самообучающихся методов и пространственно-временного анализа позволяет улучшить точность прогнозов, а также выявить скрытые взаимосвязи между океанографическими условиями.

Использование алгоритмов random forest в задаче картографирования заброшенных сельскохозяйственных земель и оценке запаса углерода в древостое на них по мультимасштабным данным дистанционного зондирования земли

^{1,2} Тихонов Д.Н., ¹ Белова Е.И., ¹ Ершов Д.В.

¹ ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

² Географический факультет, МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: dtikhonov66@gmail.com, belova@ifi.rssi.ru, ershov@ifi.rssi.ru

Application of random forest algorithms for mapping abandoned agricultural lands and estimating carbon stock in tree stands using multi-scale remote sensing data

^{1,2} Tikhonov D.N., ¹ Belova E.I., ¹ Ershov D.V.

¹ A.S. Isaev Center for forest ecology and productivity RAS, Moscow, Russia

² Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

В условиях климатических изменений и повышения значимости углеродного баланса в наземных экосистемах все большую важность набирают задачи, связанные с оценками запаса углерода. Так, лесные экосистемы играют ключевую роль в этом вопросе, выступая в качестве естественного хранилища углерода, что делает их мониторинг важной задачей. Для России особое место в данном контексте занимают заброшенные сельскохозяйственные земли, которые занимают до 70 млн га и которые благодаря естественному лесовосстановлению становятся значимыми поглотителями углерода. Актуальная информация об этих землях крайне ограничена, а полевых исследования требуют значительных финансовых и трудовых затрат, поэтому необходимо развивать дистанционные методы оценки состояния таких земель и древостоя на них.

Исследование велось на трёх пространственных уровнях: таксационные площадки на исследуемом поле; исследуемое поле целиком, на территорию которого была проведена беспилотная аэрофотосъемка и воздушное лазерное сканирование; заброшенные сельскохозяйственные земли Череповецкого района. На таксационных площадках определялись запасы углерода по полевым данным и конверсионным коэффициентам Министерства природных ресурсов. Затем для оценки запаса углерода в древостое на всём поле (площадью 91 га), строилась регрессионная модель Random Forest на основе 26 метрик, полученных из результатов беспилотной аэрофотосъёмки и воздушного лазерного сканирования (ВЛС), и данных о средних запасах углерода в пределах площадок, полученных из результатов полевых обследований; точность модели составила $R^2 = 0,81$, $RMSE = 9,9$ т/га. Общий запас углерода в древостое на территории поля составил 2690 т.

Для оценки запасов углерода на заросших сельскохозяйственных землях с древостоем того же возраста, что и на исследуемом поле, на уровне Череповецкого района была выполнена классификация земель с использованием композитов Landsat (2008–2012 и 2018–2022 гг). Точность классификации составила 0,95. Общая площадь выявленных неиспользуемых зарастающих с/х земель на территории района составила 579 км².

На основе результатов оценки запасов углерода в пределах исследуемого поля и разнотемных актуальных композитов спутниковых снимков Sentinel-2 была построена модель оценки углеродных запасов методом Random Forest ($R^2 = 0,78$, $RMSE = 9,5$ т/га) на территорию заброшенных с/х земель района. Средний запас углерода на этих землях составил 27,2 т/га, а суммарный – 1,577 млн тонн.

Таким образом, результаты подтверждают высокую эффективность интеграции полевых данных, беспилотных и спутниковых наблюдений с методами машинного обучения для оценки углеродных запасов в древостоях заброшенных с/х земель.

Моделирование нетто-обмена CO₂ в экосистемах острова Хоккайдо с использованием методов машинного обучения: оценка пространственно-временной динамики углеродного баланса

¹ Горбаренко А.В., ² Горбаренко Е.М.

¹ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; Москва, Россия

E-mail: gorbarenko.ar@gmail.com, lisan.sat@gmail.com

Modeling CO₂ Net Ecosystem Exchange in Hokkaido island Using Machine Learning Methods: Assessing Spatiotemporal Dynamics of Carbon Balance

¹ Gorbarenko A., ² Gorbarenko E.

¹ Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

² M.V. Lomonosov Moscow State University; A.N. Severtsov Institute of ecology and evolution RAS, Moscow

В контексте глобального изменения климата оценка углеродного баланса на региональном уровне становится ключевым аспектом понимания биогеохимических циклов и их взаимодействия с климатической системой. В представленном исследовании разработана модель на основе алгоритма градиентного бустинга CatBoost для комплексной оценки пространственно-временной изменчивости чистого экосистемного обмена углекислого газа (NEE) на примере острова Хоккайдо.

Использование методов машинного обучения для моделирования углеродных потоков представляет собой перспективное направление, позволяющее учесть сложные нелинейные взаимосвязи между факторами окружающей среды и обменом CO₂. Традиционные процессно-ориентированные модели, несмотря на их теоретическую обоснованность, часто сталкиваются с ограничениями в виде чувствительности к выбору параметров и высоких вычислительных затрат. В данной работе предложен подход на основе градиентного бустинга, учитывающий разнообразие экосистем и их особенности.

Для обучения модели использовались данные 131 станции измерения потоков методом вихревой ковариации из глобальных и региональных баз данных (FLUXNET, AmeriFlux, European Fluxes Database Cluster, AsiaFlux), представляющих различные типы экосистем согласно классификации IGBP. В качестве предикторов привлечены метеорологические параметры реанализа ERA5-Land и данные дистанционного зондирования MODIS, включая информацию о типах земного покрова, GPP, LAI и fPAR.

Особенностью методологии является разработка отдельных моделей для различных типов экосистем, что позволяет учесть специфические механизмы обмена углеродом в каждой из них. Для каждой экосистемной модели были отобраны наиболее релевантные предикторы и оптимизированы гиперпараметры с использованием фреймворка Optuna. Разработанные модели продемонстрировали высокую точность прогнозирования со средним коэффициентом детерминации (R^2) 0,76 для всех экосистем.

Пространственное моделирование NEE для острова Хоккайдо в 2024 году позволило получить детальные карты распределения потоков углерода с разрешением 500 м и выявить закономерности их сезонной динамики. Результаты наглядно демонстрируют существенную пространственную и временную изменчивость NEE в зависимости от типа экосистемы, климатических условий и фенологических фаз.

Методы оптимизации обработки больших данных в задаче классификации сельскохозяйственных культур по спутниковым снимкам

Богдан Е.В., Филь П.П., Цымбарович П.Р., Фомин Д.С.

ФГБНУ ФИЦ Почвенный институт им. В.В.Докучаева

Optimization methods of processing big data in crop classification approach using satellite images

Bogdan E.V., Phil P.P., Tsymbarovich P.R., Fomin D.S.

Dokuchaev Soil Science Institute

Задачи классификации поверхности Земли с использованием данных дистанционного зондирования довольно часто решаются с помощью алгоритмов машинного обучения. Методы машинного обучения основаны на выявлении статистических закономерностей обучающей выборки, поэтому требуют тщательного отбора данных для обучения. Для избежания переобучения моделей необходимо подобрать оптимальное количество входных данных, что, зачастую, является нетривиальной задачей. И, если задача требует использования больших данных, то для их использования могут потребоваться большие вычислительные ресурсы. Таким образом, задача получения модели машинного обучения сводится к обработке большого массива данных и отборе репрезентативной выборки для обучения модели.

Целью данной работы является разработка алгоритма классификации сельскохозяйственных культур.

Обработка данных производилась с помощью программной среды Python, для обработки картографических данных использовались библиотеки `gioxarray`, `rasterio`, `fiona`. Для загрузки данных спутниковых снимков использовалась платформа – Google Earth Engine.

В качестве входных данных были использованы открытые данные различных стран по местоположению сельскохозяйственных культур. Они представляли собой растровые и векторные данные разного генезиса: часть данных отражала фактическую структуру посевных полей, а часть была получена также с помощью алгоритмов машинного обучения (случайный лес, деревья решений). Прогнозные карты, полученные с помощью методов машинного обучения, подвергались дополнительной обработке на наличие некорректных результатов, а также по метрикам точности определения класса.

Следующий шаг – подбор признаков для обучения модели. Были использованы данные спутниковых снимков Landsat для расчета вегетационного индекса WRDVI. Однако использование сырых данных – каждое отдельное значение вегетационного индекса в течение года, не является отличительной особенностью каждой из культур, а также вызывает сложности при интерпретации модели. В нашей работе данная проблема была решена следующим способом: для описания годового хода кривой был выбран участок с максимальным различием между культурами – период с апреля по ноябрь, и аппроксимирован с помощью двойной логистической функции. Также по причине сильной зашумленности данных было выполнено lowess-преобразование для удаления выбросов.

Таким образом, в результате данной работы был сформирован датасет обучающей выборки, состоящий из 12ти классов-таргетов – пшеница озимая, пшеница яровая, овес, ячмень, кукуруза, соя, подсолнечник, свекла сахарная, рапс, сорго, картофель. Признаками обучающей выборки являются фенологические параметры, полученные в результате аппроксимации двойной логистической функции. Была получена модель классификации наиболее распространенных сельскохозяйственных культур, встречающихся на территории РФ. Оценка качества была оценена на данных сельскохозяйственных полей юга РФ.

Гибридный алгоритм идентификации источников выбросов на основе глубокого обучения и оператора чувствительности

^{1,2} Пененко А.В., ^{1,2,3} Емельянов М.К., ^{1,2} Русин Е.В.

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

² Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: aleks@ommgp.sccc.ru, m.emelyanov2@g.nsu.ru, rev@ooi.sccc.ru

Hybrid Deep Learning and Sensitivity Operator-Based Algorithm for Emission Sources Identification

^{1,2} Penenko A., ^{1,2,3} Emelyanov M., ^{1,2} Rusin E.

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

² Ugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

³ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

В работе рассматривается гибридный алгоритм идентификации источников выбросов в моделях переноса и трансформации примесей по данным типа изображений с линейными и нелинейными операторами измерений. Совмещение методов машинного обучения с более традиционными подходами к решению обратных задач представляется перспективным направлением развития методов обратного моделирования. Для определения по данным измерений функции источника общего вида сначала используются алгоритмы на основе оператора чувствительности, а затем решение уточняется методами машинного обучения за счет использования априорной информации о структуре функции источников и свойств оператора чувствительности обратной задачи, позволяющих оценить отображение «истинного» решения на результат его восстановления с соответствующей коррекцией артефактов такого восстановления [1]. Алгоритм протестирован на региональном сценарии идентификации источников загрязнений.

- Работа выполнена при поддержке темы Госзадания FWNM-2025-0003 ИВМиМГ СО РАН (в части базовых алгоритмов уточнения решений), темы Госзадания ЮГУ FENG-2023-0004 (в части нелинейных операторов измерений).

Литература:

1. Penenko A. et al. Hybrid Deep Learning and Sensitivity Operator-Based Algorithm for Identification of Localized Emission Sources // Mathematics. 2024. № 1 (12). С. 78. <https://doi.org/10.3390/math12010078>

Восстановление приповерхностной влажности атмосферы над океаном по данным сопутствующих метеорологических измерений с применением методов машинного обучения

¹ Вострикова С.А., ^{1,2} Криницкий М.А.

¹ Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская обл.

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

E-mail: vostrikova.sa@phystech.edu, krinitsky@sail.msk.ru

Reconstruction of atmospheric surface humidity over the ocean from relevant meteorological measurements using machine learning methods

¹ Vostrikova S.A., ^{1,2} Krinitsky M.A.

¹ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region

² Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow

Влажность воздуха в приповерхностном слое атмосферы над океаном является ключевым климатическим параметром, оказывающим значительное влияние на процессы переноса влаги и тепла между океаном и атмосферой, а также на динамику атмосферных процессов в целом. Анализ метеорологических данных, собранных в течение XX века, показывает разреженность рядов измерений влажности в пространстве и времени [1]. Международный массив данных о характеристиках океана и атмосферы (ICOADS [4]) указывает на недостаточную плотность измерений в начале XX века по сравнению с более поздними периодами [1], что создает сложности для адекватного анализа климатических тенденций относительной влажности.

Представленные в литературе методы восстановления временных рядов влажности [6, 7] зачастую демонстрируют ограниченную точность, основываясь преимущественно на статистических и эвристических подходах. Исследование направлено на повышение качества решения этой задачи за счет применения методов машинного обучения.

В качестве первого, наиболее простого подхода, мы решали задачу в формулировке аппроксимации относительной влажности по данным сопутствующих измерений атмосферного давления, температуры воздуха, скорости и направления ветра, температуры поверхности океана, а также наблюдений количества и типов облачности на трех ярусах. Кроме этого, в составе сопутствующих переменных используется код погоды по стандарту ВМО и расчетная высота солнца. В исследовании использованы модели машинного обучения следующих типов: линейная регрессия, дерево решений [3], случайный лес [2], градиентный бустинг [5] и полносвязная искусственная нейронная сеть [8]. Для повышения территориальной и временной специфичности разрабатываемых моделей мы провели исследование для каждого 2-градусного квадрата и каждого сезона по отдельности. Для обучения и применения моделей машинного обучения мы применяли библиотеку `scikit-learn` и пакет, реализующий модель `CatBoost` [5]. Для каждого вида модели мы оптимизировали гиперпараметры с применением библиотеки байесовской оптимизации `Optuna` [9]. На основе полученных результатов были построены карты пространственного распределения ошибок моделей, которые позволили выявить регионы с высокой и низкой точностью аппроксимации влажности.

Результаты работы подтверждают эффективность алгоритмов машинного обучения для восстановления данных относительной влажности по сопутствующим измерениям и наблюдениям и позволяют повысить точность восстановления климатических рядов по сравнению с тривиальными подходами, например, усреднением величины по регионам.

Анализ пространственных карт ошибок моделей показал, что наибольшие ошибки аппроксимации наблюдаются в сезоны и в регионах с высокой изменчивостью влажности (карты разброса значений относительной влажности показаны на рис. 1). Примененный в работе подход, основанный на разделении данных по квадратам и сезонам, позволил учесть региональные особенности и сезонные колебания влажности, а также снизил ошибки аппроксимации.

Анализ неопределенностей меры качества и целевой переменной, проведенный с использованием подхода бутстреп, позволил оценить надежность полученных результатов и выявить ключевые области для дальнейшего улучшения результатов. Неопределенность меры качества оказалась существенно низкой для всех моделей. Тривиальная модель, линейная регрессия и `Catboost` показали наименьшую неопределенность целевой переменной.

Сравнительный анализ моделей выявил, что `Catboost` и случайный лес продемонстрировали наилучшие результаты в данной работе, что делает их лучшими моделями для аппроксимации влажности. `Catboost` показал наивысшее среднее качество на отложенной выборке, а случайный лес показал наи-

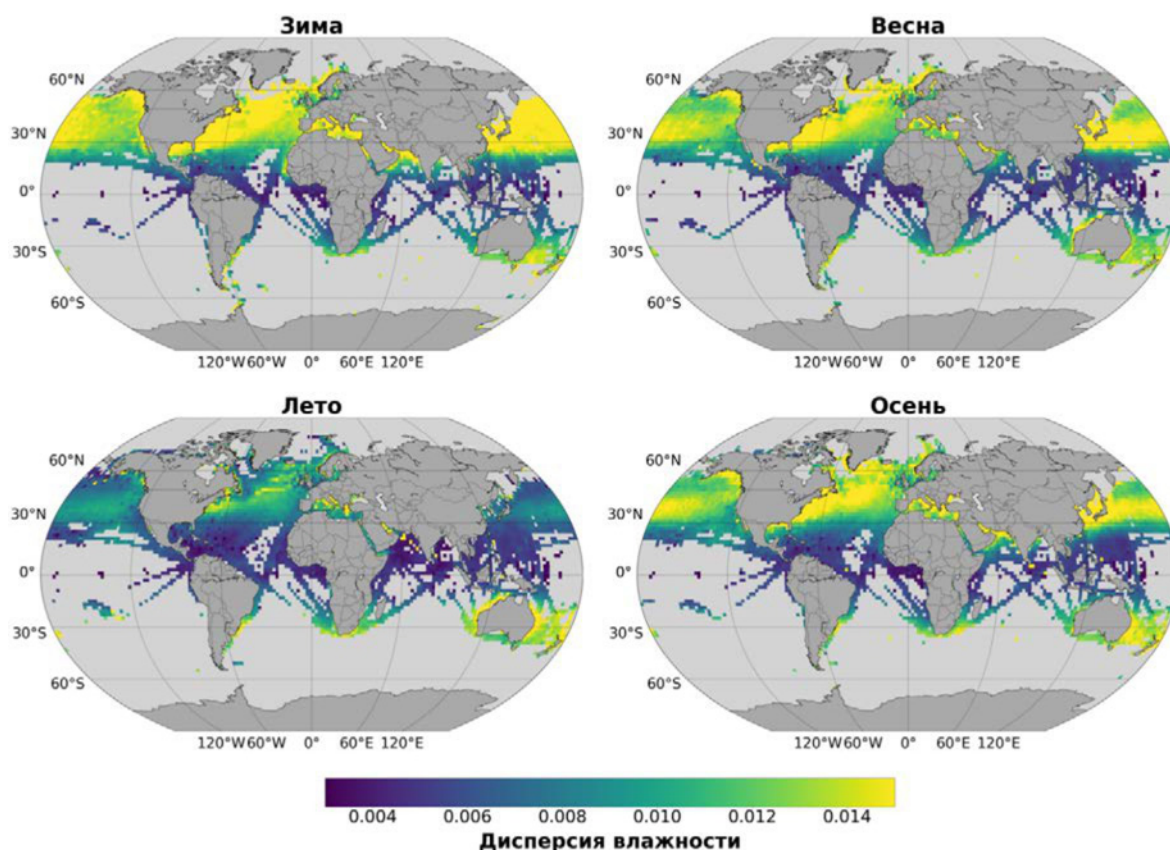


Рис. 1. Карты разброса значений относительной влажности по сезонам.

лучшее среднее качество по bootstrap-выборкам. Модели демонстрируют наиболее стабильные результаты, с низкими значениями неопределенности как меры качества, так и целевой переменной, что подтверждает их способность к точному восстановлению относительной влажности.

- Исследование выполнено в рамках Соглашения № 075-03-2024-117 от 17.01.2024 Московского физико-технического института.

Литература:

1. Александрова М. П., Гулев С. К. Реконструкция долгопериодной изменчивости облачности и радиационных потоков над мировым океаном: Дис. на канд. физико-математических наук: 1.6.17. М.: ИО РАН, 2023.
2. Adele Cutler, D. Richard Cutler John R. Stevens Random Forests // J. Springer. Ensemble Machine Learning. 2012. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9326-7_5.
3. Barry de Ville Decision trees // J. WIREs Computational Statistics: Volume 5, Issue 6. 2013. <https://doi.org/10.1002/wics.1278>.
- Eric Freeman, Scott D. Woodruff, Steven J. Worley, Sandra J. Lubker, Elizabeth C. Kent, William E. Angel, David I. Berry, Philip Brohan, Ryan Eastman, Lydia Gates, Wolfgang Gloeden, Zaihua Ji, Jay Lawrimore, Nick A. Rayner, Gudrun Rosenhagen, Shawn R. Smith ICOADS Release 3.0: a major update to the historical marine climate record International Journal of Climatology. 2017. № 5 (37). <https://doi.org/10.1002/joc.4775>.
4. Hancock, J.T., Khoshgoftaar, T.M. CatBoost for big data: an interdisciplinary review // J. Big Data 7. 2020. <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00369-8>.
- Jiajun Guo, Liang Zhang, Ruqiang Guo Relative humidity prediction with covariates and error correction based on SARIMA-EG-ECM model // J. Springer. Modeling Earth Systems and Environment. 2023. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01738-x>.
5. Luminda Niroshana Gunawardhana, Ghazi A. Al-Rawas, So Kazama An alternative method for predicting relative humidity for climate change studies // J. Meteorological application. 2017. <https://doi.org/10.1002/met.1641>.
6. Marvin Minsky, Seymour Papert Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry// The MIT Press. 1969.
- Takuya Akiba, Shotaro Sano, Toshihiko Yanase, Takeru Ohta, Masanori Kayama Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework // Conference: the 25th ACM SIGKDD International Conference. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.10902>.

Метод и алгоритмы обнаружения спорадических вариаций космических лучей на основе когнитивных правил выбора решений и нейронных сетей

Мандрикова Б.С., Мандрикова О.В.

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, с. Паратунка, Россия
E-mail: 555bs5@mail.ru; oksanam1@mail.ru

Method and algorithms for detecting sporadic variations of cosmic rays based on cognitive decision rules and neural networks

Mandrikova B.S., Mandrikova O.V.

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Far Eastern Branch RAS, Paratunka, Kamchatskiy Kray, Russia

Извлечение полезной информации из природных данных включает этапы построения моделей, методов и алгоритмов их анализа. Известными проблемами в этой области являются нестационарность данных, неполнота априорных знаний и отсутствие наборов данных достаточного объема. Особую актуальность в настоящее время имеют задачи обнаружения природных аномалий (землетрясений, магнитных и ионосферных бурь, цунами и т.д.). Объектом этого исследования являются данные мировой сети нейтронных мониторов (НМ), регистрирующих вариации интенсивности космических лучей (КЛ). Временные ряды данных НМ содержат регулярные циклические составляющие и спорадические изменения (аномалии) в виде Форбуш-эффектов и GLE-событий. Факторами генерации таких аномалий являются корональные выбросы массы и высокоскоростные потоки солнечного ветра из корональных дыр. Во время таких аномалий возрастает радиационная опасность для космонавтов, экипажей самолетов и пассажиров полярных маршрутов. Космические и наземные технологические системы также подвергаются негативным воздействиям, вплоть до катастрофического отказа. Поэтому обнаружение спорадических вариаций потока КЛ с удовлетворительной точностью в режиме, близком к реальному времени, является важным прикладным аспектом. Сложная структура данных НМ и высокий уровень шума не позволяют применять классические методы анализа временных рядов (спектральные методы, модели ARIMA, методы декомпозиции временных рядов и т.п.). В настоящее время для решения таких задач в различных прикладных областях активно применяются методы искусственного интеллекта и машинного обучения.

Учитывая указанные проблемы, авторами предложен новый метод анализа данных о вариациях КЛ, построенный путем синтеза элементов теории статистических решений с нейросетевыми методами и адаптивными нелинейными аппроксимирующими схемами (НАС) в вейвлет-базисах [1-5]. Основу метода составляют разработанные когнитивные правила выбора решений, позволяющие подавить шум (включая коррелированный) и путем минимизации погрешности аппроксимации данных (используются НАС в вейвлет-базисах и нейронные сети Autoencoder и KANs) оценить информационный сигнал. В докладе также будут представлены полученные на основе предлагаемого подхода цифровые модели временного хода данных НМ, позволяющие, в отличие от аналогов, описывать циклические регулярные вариации и аномальные изменения разной формы и продолжительности. Построенные численные алгоритмы обладают способностью адаптации к изменяющимся потокам данных и реализуемы в темпе поступления данных в систему обработки ($\Delta t = 1$ сек.), что повышает точность и эффективность решения задачи обнаружения аномалий в вариациях потока космических лучей.

■ Работа выполнена за счет Государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № темы 124012300245-2).

Литература:

1. Mandrikova O., Mandrikova B. Hybrid model of natural time series with neural network component and adaptive nonlinear scheme: application for anomaly detection // Mathematics. 2024. 12. 1079. <https://doi.org/10.3390/math12071079>.
2. Мандрикова Б.С. Метод анализа данных сложной структуры с элементами машинного обучения // Компьютерная оптика. 2022. Т. 6. № 3. С. 506-512. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1088>.
3. Геппенер В.В., Мандрикова Б.С. Обнаружение и идентификация аномалий в сложном сигнале // Автоматика и Телемеханика. 2021. № 10. С. 46-59. <https://doi.org/10.31857/S0005231021100056>.
4. Mandrikova O., Mandrikova B. Method of wavelet-decomposition to research cosmic ray variations: application in space weather // Symmetry. Special Issue Cosmic Rays: From Fundamental Symmetry Tests to Civil Applications. 2021. 13. 2313. <https://doi.org/10.3390/sym13122313>.
5. Mandrikova O., Mandrikova B. Hybrid method for detecting anomalies in cosmic ray variations using neural networks autoencoder // Symmetry. Special Issue Cosmic Rays: From Fundamental Symme-

Восстановление вертикальных распределений NO_2 и аэрозоля в нижней тропосфере по измерениям MAX-DOAS с использованием ИНС

Постыляков О.В., Шамсутдинов Д.Р., Боровский А.Н.

ИФА им.А.М. Обухова РАН

E-mail: oleg.postylyakov@gmail.com

Retrieval of vertical profiles of NO_2 and aerosol in the lower troposphere from MAX-DOAS measurements using ANN

Postylyakov O.V., Shamsutdinov D.R., Borovsky A.N.

A.M. Obukhov IAP RAS

Измерения спектра рассеянной солнечной радиации вблизи 450 нм с поверхности земли из нескольких специально выбранных направлений (MAX-DOAS) используются для определения вертикальных распределений концентрации NO_2 и экстинкции аэрозоля в тропосфере. Для решения задачи оценивания вертикального профиля примеси по таким измерениям используются методы линейного статистического оценивания [1] или линейного программирования с ограничением на ожидаемое количество максимумов в профиле. Мы рассмотрели применение для решения задачи методы искусственных нейронных сетей (ИНС).

В результате первого этапа обработки наблюдений MAX-DOAS получают набор измерений при углах визирования θ_i наклонных содержаний NO_2

$$\xi_{\text{NO}_2}(\theta_i) = \int_0^H m_{\text{aer}}(h, \theta_i) n_{\text{NO}_2}(h) dh + v_i^{\text{NO}_2} \quad (1)$$

и столкновительного комплекса O_4

$$\xi_{\text{O}_4}(\theta_i) = \int_0^H m_{\text{aer}}(h, \theta_i) n_{\text{O}_4}(h) dh + v_i^{\text{O}_4}, \quad (2)$$

искаженных случайным шумом $v_i^{\text{NO}_2}$ и $v_i^{\text{O}_4}$. Здесь H – толщина атмосферы, $n_{\text{O}_4}(h)$ – известная профиль концентрации O_4 . Неизвестными являются профиль концентрации NO_2 $n_{\text{NO}_2}(h)$ и вертикальное распределения аэрозоля $n_{\text{aer}}(h)$, от которого зависит $m_{\text{aer}}(h, \theta_i)$ – послойная эффективная воздушная масса слоя на высоте h [2]. Величина $m_{\text{aer}}(h, \theta_i)$ вычисляется по модели переноса излучения [2], а $n_{\text{aer}}(h)$ входит в вычисления как нелинейный параметр.

Для построения обучающей выборки ИНС были использованы результаты реанализа европейской региональной модели CAMS для области Звенигородской научной станции ИФА РАН. Часовые значения профилей концентраций PM_{10} и NO_2 модели CAMS за 2018–2023 гг. были использованы для расчета оптических свойств атмосферы, по которым с помощью модели переноса излучения MCC++ [2] рассчитывались $m_{\text{aer}}(h, \theta_i)$ и наклонные содержания примесей $\xi_{\text{NO}_2}(\theta_i)$ и $\xi_{\text{O}_4}(\theta_i)$. Полученные наборы данных использовались для обучения ИНС.

В докладе рассматриваются результаты применения построенных методов решения задачи, основанные как на ранее применявшихся подходах, так и первые результаты метода с применением ИНС.

Литература:

1. U. Friess et al. Intercomparison of MAX-DOAS vertical profile retrieval algorithms: studies using synthetic data, Atmos. Meas. Tech., 12, 2155–2181, <https://doi.org/10.5194/amt-12-2155-2019>, 2019.
2. О.В. Постыляков. Модель переноса радиации в сферической атмосфере с расчетом послойных воздушных масс и некоторые ее приложения. Известия РАН, ФАО, 2004, 40, №3, 314–329.
3. <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/datasets/cams-europe-air-quality-reanalyses>.

Применение алгоритмов машинного обучения для моделирования эвапотранспирации в агроэкосистемах

Доброхотов А.В., Козырева Л.В., Мухина Д.П.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: adobrokhотов@agrophys.ru

Application of machine learning algorithms for modeling evapotranspiration in agroecosystems

Dobrokhотов A.V., Kozyreva L.V., Mukhina D.P.

Agrophysical Research Institute, Saint-Petersburg, Russia

Эвапотранспирация (ЕТ) – ключевой процесс в круговороте воды и энергообмене агроэкосистем, влияющий на их продуктивность и водопотребление. Прямые измерения (лизиметры, метод турбулентных пульсаций) дороги и сложны, а традиционные методы (FAO-56, Hargreaves-Samani) ограничены эмпирическими допущениями. Энергобалансовые модели (SEBAL, TSEB) точны, но ресурсоемки, а имитационные (AquaCrop, DSSAT) требуют большого объема входных данных. Машинное обучение (ML) позволяет эффективно моделировать процессы в агроэкосистемах, выявляя сложные зависимости в данных (метеорология, почва, ДЗЗ). Однако остаются вопросы эффективности работы алгоритмов и интерпретируемости моделей. Цель работы – разработка ML-модели для оценки суточной ЕТ на основе данных пульсационных измерений, метеоданных, почвенных свойств и вегетационных индексов. Задачи: 1) предобработка и агрегация данных пульсационных измерений; 2) загрузка и интеграция климатических, почвенных и спутниковых данных; 3) обучение и сравнение ML-алгоритмов; 4) отбор ключевых предикторов; 5) оценка точности моделирования и сравнение с традиционными методами; 6) интерпретация модели. Для моделирования ЕТ в агроэкосистемах были использованы данные измерений методом турбулентных пульсаций со станций международных сетей FLUXNET, AmeriFlux, ICOS, EFDC и AsiaFlux. Суточные значения ЕТ рассчитывались из скрытого теплового потока (LE) с контролем качества. Климатические параметры получены из реанализа ERA5-Land с пространственным разрешением ~9 км, включая температуру, осадки, влажность и составляющие радиационного баланса. Почвенные характеристики загружены из глобальной базы SoilGrids250m с разрешением 250 м. Гармонизированные спутниковые данные Landsat 8-9 и Sentinel-2 обрабатывались с фильтрацией облачности, временной интерполяцией, сглаживанием и расчетом вегетационных индексов. Итоговый датасет содержит 134 725 суточных значений ЕТ для 102 станций. Для ML применялись алгоритмы ElasticNet (линейная регрессия с регуляризацией), SVR (регрессия опорных векторов) и CatBoost (градиентный бустинг), проводилось разделение датасета на обучающую (train) (70% случайных станций) и тестовую (test) (30% станций) выборки, настраивались гиперпараметры моделей, проводился отбор признаков с кросс-валидацией (RFECV). Качество моделей оценивалось по метрикам R^2 , RMSE, Bias и CCC, со сравнением с традиционными методами (FAO-56, Hargreaves-Samani). Интерпретация модели выполнена через анализ важности признаков, SHAP-значения и графики частичной зависимости. Для моделирования суточной эвапотранспирации агроэкосистем ML методами использован датасет из 156 предикторов, сокращенный до 114 после отбора по порогу корреляции на обучающей выборке ($|r| > 0,2$). Обучение проведено на 91 435 наблюдениях с 71 станции, тестирование – на 43 290 наблюдениях с 31 станции. Сравнение алгоритмов показало, что CatBoost обеспечивает наилучшее качество (R^2 test = 0,68; R^2 train = 0,70), SVR – сопоставимую точность (R^2 test = 0,67; R^2 train = 0,71), а ElasticNet (R^2 test = 0,57; R^2 train = 0,58) подтвердил значимость линейных зависимостей. Рекурсивный отбор признаков RFECV для CatBoost выявил 7 ключевых предикторов: суммарную радиацию, температуру и влажность почвы из ERA5-Land и вегетационные индексы MNLI, IAVI, ExGR и GLI. SHAP-анализ CatBoost продемонстрировал нелинейные зависимости: оптимум влажности почвы (37–42%) и логарифмическое влияние вегетационных индексов. ML модели превзошли традиционные методы: данные из ERA5-Land ($R^2 = 0,29$), потенциальную ЕТ по FAO-56 и Hargreaves-Samani (нулевой R^2 и завышенные оценки), а ЕТ по FAO-56 с учетом влажности и грансостава почвы показал отрицательный R^2 и занижение значений. Полученные результаты открывают перспективы для создания гибридных моделей, сочетающих ML с энергобалансовыми подходами, которые позволяют производить учет пространственной неоднородности ЕТ, а также с имитационными моделями агроэкосистем для более точной симуляции временного хода ЕТ.

■ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-77-00087).

Параметризация вихревых процессов в численных моделях океана с использованием методов машинного обучения

¹ Якшина Д.Ф., ¹ Платов Г.А., ² Демьяненко Д.В.

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

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: contacts@sscc.ru

Eddy Parameterization in Ocean Models Using Machine Learning Approaches

¹ Iakshina D.F., ¹ Platov G.A., ² Demyanenko D.V.

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

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

При крупномасштабном моделировании Мирового океана многие мезомасштабные процессы, такие как вихревые потоки, не могут быть явно разрешены из-за вычислительных ограничений. Для их описания используются параметризации, которые часто содержат неопределённые параметры. Традиционные методы настройки этих параметров не всегда эффективны, поэтому в данной работе предлагается применение методов машинного обучения: полносвязной нейронной сети и градиентного бустинга.

Исходные данные получены из вихреразрешающей модели SibPOM, которая обеспечивает высокую детализацию процессов. На их основе обучаются модели машинного обучения для предсказания параметров вихревых потоков. Проведён предварительный анализ, который показал, что градиентный бустинг демонстрирует более высокую точность по сравнению с полносвязной нейронной сетью. Дополнительно исследуется возможность кластеризации данных для улучшения предсказательной способности моделей.

Обученные модели машинного обучения интегрируются в крупномасштабную модель SibCIOM для замены традиционных параметризаций подсеточных процессов. Это позволяет: 1) повысить точность моделирования за счёт учёта нелинейных зависимостей, которые сложно описать аналитически; 2) автоматизировать настройку параметров на основе данных, что снижает субъективность и увеличивает воспроизводимость результатов; 3) улучшить прогнозирование климатических изменений, так как модель лучше воспроизводит взаимодействие между мезомасштабными и крупномасштабными процессами.

Результаты работы модели SibCIOM с интегрированными алгоритмами машинного обучения сравниваются с наблюдениями и результатами традиционных параметризаций. Тестирование проводится для Северной Атлантики и Арктического бассейна. Наблюдаемые различия в моделировании позволяют ожидать, что предложенный подход может повысить адекватность воспроизведения динамики океана, включая процессы переноса тепла и солёности.

Применение методов машинного обучения для определения параметров подсеточных процессов в численных моделях океана открывает новые возможности для повышения точности и эффективности климатических прогнозов. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию алгоритмов и их тестирование в других регионах Мирового океана.

- Финансовая поддержка: Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМиГ СО РАН FWNM-2025-0003

Литература:

Golubeva E.N., G.A. Platov. Numerical Modeling of the Arctic Ocean Ice System Response to Variations in the Atmospheric Circulation from 1948 to 2007. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 45 (2009), 137–151. <https://doi.org/10.1134/S0001433809010095>

Платов Г. А., Голубева Е. Н. Взаимодействие плотных шельфовых вод Баренцева и Карского морей с вихревыми структурами. *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 6. С. 549–571. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-6-549-571>

Восстановление высот зданий на основе базы пространственных данных Overture maps и цифровой модели поверхности ArcticDEM с использованием машинного обучения

¹ Окунева В.В., ^{1,2} Самсонов Т.Е.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

² ФГБУ «Гидрометцентр России»

E-mail: okuneva.12@list.ru, tsamsonov@geogr.msu.ru

Building height estimation from Overture maps spatial database and ArcticDEM digital surface model using machine learning

¹ Okuneva V.V., ^{1,2} Samsonov T.E.

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

Метеорологическое и климатическое моделирование в пределах крупных урбанизированных территорий требует детального описания городской подстилающей поверхности. Несмотря на появление все большего количества моделей городского климата в разных масштабах, на данный момент все еще отсутствует полный, глобальный и согласованный набор пространственных данных, содержащий свойства городской застройки. Стремительное преобразование урбанизированных территорий требует регулярного обновления необходимых для расчёта характеристик, что усложняет задачу составления необходимой базы данных. Именно поэтому важна интеграция существующих наборов данных и усовершенствование уже существующих баз, путем дополнения необходимых атрибутивных характеристик и заполнения недостающих данных. Целью исследовательской работы является восстановление высотности зданий, одного из ключевых параметров городской среды, определяющего наряду с шириной пропорции городского каньона, на основе разнообразных источников с использованием машинного обучения. Работа выполнена на примере города Санкт-Петербурга.

Разработанная модель восстановления высоты основывается на новейшей базе пространственных данных Overture Maps, содержащей детальные топографические данные, сопоставимые по детальности с городскими планами. Ее уникальность заключается в интеграции нескольких источников данных (основной из которых OpenStreetMap), регулярном выпуске обновлений и стандартизированном интерфейсе доступа. Несмотря на существенные достоинства, информация об этажности и высотности зданий в базе данных не является полной, особенно для территории России. В нашей модели восстановления высотности мы использовали в качестве эталонных высоты зданий, полученный по имеющиеся в Overture Maps значениям этажности, умноженным на высоту этажа (для жилых строений 3 м).

Первым источником данных для восстановления высот зданий послужила цифровая модель поверхности (ЦМП) ArcticDEM с разрешением в 2 м и покрывающая территорию севернее 60 градусов с.ш. На основе информации о дорожной сети, хранящейся в Overture Maps, была создана цифровая модель рельефа (ЦМР). Путем нахождения разности исходного набора данных и рассчитанной ЦМР были получены оценки высоты зданий, которые использовались в качестве одного из признаков (features).

Другими признаками послужили морфометрические параметры зданий, такие, как площадь здания, его компактность, пропорции минимального по площади ограничивающего прямоугольника, отношение площади здания к площади этого прямоугольника. Также в качестве признаков были вычислены средняя ширина прилегающих каньонов, и характеристики окружающей территории, а именно локальные климатические зоны по базе данных WUDAPT. Модель восстановления этажности реализована методом регрессионных деревьев с применением градиентного бустинга. Техническая реализация выполнена с помощью библиотеки CatBoost.

По результатам использования модели для тестового фрагмента территории центральной части Санкт-Петербурга площадью 6 км² вклад признаков распределился следующим образом. Определяющую роль играют такие факторы как медианная осредненная высота зданий, площадь здания, высота, рассчитанная по ArcticDEM. Эти три признака совокупно обеспечивают около 70% предсказательной силы регрессионной модели восстановления высотности зданий. Далее в равной степени идут медианная ширина каньона, пропорции минимального ограничивающего прямоугольника и отношение его площади к площади здания, компактность и тип здания. Меньший вклад внесли класс объекта и преобладающая климатическая зона. В докладе будут представлены результаты апробации модели для территории всего Санкт-Петербурга.

Моделирование городского острова тепла методами машинного обучения с использованием концепции «мезомасштабного футпринта»

^{1,2,3} Варенцов М.И., ^{2,4} Согачев А.Ф., ^{5,6,1} Криницкий М.А., ¹ Степаненко В.М.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

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

³ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

⁴ Высшая школа экономики (Национальный исследовательский университет), факультет географии и геоинформационных технологий, Москва, Россия

⁵ Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская область, Россия

⁶ Институт океанологии имени П.П. Шишова РАН, Москва, Россия

E-mail: mikhail.varentsov@srcc.msu.ru, asogachev@hse.ru, krinitsky@sail.msk.ru, stepanen@srcc.msu.ru

ML-based urban heat island modeling using a «mesoscale footprint» concept

^{1,2,3} Varentsov M., ^{2,4} Sogachev A., ^{5,6,1} Krinitskiy M., ¹ Stepanenko V.

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

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

³ Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

⁴ Higher school of economics (National Research University), Moscow, Russia

⁵ Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University, Dolgoprudny, Moscow oblast, Russia)

⁶ P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

Рассмотрена задача статистической аппроксимации городской аномалии температуры, известной как эффект городского острова тепла (ГОТ), и ее пространственно-временной изменчивости с помощью методов машинного обучения (МО) на примере Московского мегаполиса. Высокоразрешенное поле городской аномалии температуры аппроксимируется на основе предикторов, включающих низкоразрешенные метеорологические данные и высококоразрешенные свойства подстилающей поверхности. В качестве данных для оптимизации моделей МО использованы результаты гидродинамического моделирования метеорологического режима в Московском регионе с высоким пространственным разрешением, выполненные в рамках региональной модели атмосферы COSMO-CLM с городской параметризацией TERRA_URB с шагом сетки 1 км. В качестве модели МО использован метод градиентного бустинга в реализации CatBoost с поддержкой GPU. Для учета нелокальных зависимостей между ГОТ и свойствами поверхности предложен оригинальный квазилокальный подход к заданию признаков описания событий. Он заключается в локализации предикторов и целевой переменной в отдельных точках (узлах сетки модели COSMO), и генерации дополнительных признаков путем агрегирования значений предикторов в окрестностях данной точки с использованием различных сверточных фильтров, в том числе учитывающих скорость и направление ветра (Varentsov et al., 2024).

В качестве дальнейшего развития квазилокального подхода рассмотрено использование в рамках него популярной в микрометеорологии концепции футпринта – области, определяющей регистрируемый в конкретной точке измерений сигнал, например турбулентные потоки субстанций между атмосферой и поверхностью (Leclerc and Foken, 2014). Рассмотрен случай применения адаптированного «мезомасштабного футпринта» для определения размера, формы и весов сверточных фильтров, используемых для агрегирования свойств подстилающей поверхности, с учетом скорости и направления ветра, а также стратификации атмосферы. Для расчета футпринта использованы вычислительно-эффективные аналитические модели. Исследован эффект от внедрения такого подхода на примере случаев ярко выраженной адвекции ГОТ, т.е. его смещения к подветренной стороне города устойчивым ветром различных направлений.

■ Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект №24-17-00155.

Литература:

1. Varentsov M. I., Krinitskiy M. A., Stepanenko V. M. Approximation of spatial and temporal variability of the urban heat island in Moscow using machine learning // Moscow University Physics Bulletin. 2024. V. 79. P. 791–804. <http://doi.org/10.3103/S0027134924702254>
2. Leclerc M.Y., Foken T. Footprints in Micrometeorology and Ecology. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 2014. 239 p

Оценка динамики атмосферы по результатам нейросетевого масштабирования полей приповерхностного ветра над Баренцевым и Карским морями

^{1,2} Резвов В.Ю., ^{1,2} Криницкий М.А.

¹ Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская область

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

E-mail: rezvov.vyu@phystech.edu, krinitsky@sail.msk.ru

Estimation of atmospheric dynamics based on the results of ANN downscaling of surface wind over the Barents and Kara Seas

^{1,2} Rezvov V.Yu., ^{1,2} Krinitskiy M.A.

¹ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region

² Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow

Изучение климатических изменений тесно связано с анализом полей различных атмосферных переменных, включая приповерхностный ветер, который является одним из ключевых факторов в климатических исследованиях. Прогнозирование приповерхностного ветра с детализированным пространственным разрешением имеет критическое значение, в частности, для уточнения моделирования динамики океана и ветрового волнения, для развития возобновляемых источников энергии и предупреждения экстремальных погодных условий. Основой для численных прогнозов погоды на синоптическом уровне служат модели, размер ячеек сетки которых составляет несколько десятков километров, что затрудняет прогнозирование локальных особенностей региональной циркуляции. При этом повышение пространственного разрешения обычно требует значительных вычислительных ресурсов.

Один из подходов, позволяющий достичь требуемого пространственного разрешения при одновременном снижении вычислительных затрат, заключается в использовании различных методов статистического масштабирования. Такой подход предполагает аппроксимацию физических переменных с высоким пространственным разрешением посредством статистических моделей, которые оптимизируются на основе имеющихся данных.

В настоящем исследовании мы изучаем возможность применения искусственных нейронных сетей к задаче масштабирования приповерхностного ветра над Баренцевым и Карским морями. Мы используем различные конфигурации модели глубокого обучения с пропускными соединениями, способной к выявлению сложных нелинейных соотношений, соответствующих различным пространственным масштабам. В нашем исследовании в качестве входных данных низкого разрешения для такой модели используются результаты глобального атмосферного реанализа ERA5 с пространственным разрешением 0.25°, а опорные данные в высоком разрешении представлены результатами численного моделирования с применением модели Weather Research and Forecasting (WRF) с разрешением 6 км, за период с 2015 по 2023 гг. Мы применяем бикубическую интерполяцию данных реанализа как опорное решение, сравнивая с ней сверточную искусственную нейронную сеть с остаточными соединениями и с пропускными соединениями. В нашем исследовании мы сравниваем результаты масштабирования с точки зрения среднеквадратичной ошибки абсолютной скорости ветра, пикового отношения сигнала к шуму и индекса структурной схожести. Для оценки качества масштабирования с физической точки зрения мы демонстрируем валидацию статистического масштабирования с точки зрения феноменологической метрики качества, сфокусированной на воспроизведении атмосферных явлений на различных масштабах.

Использование искусственной нейронной сети для масштабирования метеорологических величин в городской застройке с высоким пространственным разрешением

^{1,2} Коспанов А.А., ^{3,4} Криницкий М.А., ⁵ Варенцов М.И., ^{1,5} Степаненко В.М.

¹ Географический факультет МГУ

² Гидрометцентр России

³ МФТИ

⁴ ИО РАН

⁵ НИВЦ МГУ

E-mail: kospanov.alen@gmail.com, krinitsky@sail.msk.ru, mvar91@gmail.com, vstepanenkomeister@gmail.com

Using an artificial neural network for a downscaling of meteorological parameters in an urban area with high resolution

^{1,2} Kospanov A.A., ^{3,4} Krinitskiy M.A., ⁵ Varentsov M.I., ^{1,5} Stepanenko V.M.

¹ MSU Faculty of Geography

² Hydrometcentre of Russia

³ MIPT

⁴ IO RAS

⁵ RCC MSU

По данным ООН, глобальное городское население превысило сельское в 2007 году, доля городского населения в 2024 году составила 56,5%. (Ritchie H., Roser M., 2018). Для города характерен особый микроклимат (Oke T. R. et al, 2017), качественное описание и моделирование которого – залог устойчивого развития городской среды.

Глобальные гидродинамические модели не могут явно воспроизводить процессы городской атмосферной динамики, что приводит к необходимости масштабирования, или увеличения разрешения данных. Динамическое масштабирование, проводимое с помощью региональных гидродинамических моделей, имеет высокие требования к вычислительным ресурсам, поэтому имеет ограничения на применение в климатических прогнозах.

Статистическое масштабирование, представленное машинным и глубоким обучением, позволяет решить проблему больших затрат вычислительных ресурсов. На основе данных мезомасштабного моделирования с применением моделей WRF-ARW (Skamarock W. C. et al., 2021) и COSMO для Московского региона были обучены нейросети с архитектурой U-Net (Ronneberger O., Fischer P., Brox T., 2015). Было рассмотрено влияние параметров нейросети на качество воспроизведения интересующих метеовеличин, а также оценена важность входных параметров.

В качестве входных данных нейросеть использует поля с низким пространственным разрешением, например, глобального атмосферного реанализа ERA5 (Hersbach H. et al., 2020) с пространственным разрешением 0,25 градуса и временной дискретностью 1 час, либо осредненные по пространству данные мезомасштабного моделирования. Используются статические географические данные о подстилающей поверхности с шагом 1 км.

Результатом работы нейросети является воспроизведение разности интересующих метеовеличин между данными с низким разрешением и данных с высоким разрешением. Данная разность может быть добавлена к крупномасштабному полю для получения исправленного значения метеорологической величины с учетом влияния города. (Ritchie H., Roser M. Urbanization //Our world in data. – 2018).

Литература:

1. Oke T. R. et al. Urban climates. – Cambridge University Press, 2017.
2. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation //Medical image computing and computer-assisted intervention–MICCAI 2015: 18th international conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, proceedings, part III 18. – Springer International Publishing, 2015. – С. 234-241.
3. Skamarock W. C. et al. (2021). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3 (No. NCAR/TN-556+STR). <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>
4. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2020. – Т. 146. – №. 730. – С. 1999-2049.

Состояние исследований по научной программе «Будущее Северной Евразии»

Гройсман П.Я.

Государственный Университет Штата Северная Каролина, США
E-mail: groismanp@bellsouth.net

Present status of Scientific Program «North Eurasian Future Initiative»

Groisman P.Ya.

NC State University, USA, 920 Rockhold Drive, Asheville, NC 28804, USA

Scientific Program «North Eurasian Future Initiative» (NEFI). was initiated in 2016 at the international Meeting in Prague, Czechia. That Meeting was devoted to the Final Report of the preceding NEESPI Research Initiative (NEESPI = North Eurasia Earth Science Partnership Initiative) and to planning of the future activities (i.e., NEFI). In the new Program (<https://nefi-neespi.org/NEFI-WhitePaper.pdf>). the studies were decided to strengthen towards the «human dimension» component of the research and to focus on the consequences that the regional environmental changes will cause to the societal development of the sub-continent and how these societies can withstand the detrimental impact of the projected environmental changes. My presentation will describe the intermediate results of these efforts.

Влияние водохранилищ на сток крупных рек России в средние по водности, экстремально маловодные и многоводные годы

¹ Георгиади А.Г., ¹ Милюкова И.П., ² Гройсман П.Я., ¹ Барабанова Е.А.

¹ Институт географии РАН, Москва, Россия

² Корпорация гидрологических наук и услуг, Эшвилл, Северная Каролина, 28804, США

³ Государственный университет Северной Каролины при Национальном центре экологической информации NOAA, Эшвилл, Северная Каролина, США

The influence of water reservoirs on the flow of large rivers in Russia in years with average flow, extremely low-water and high-water years

¹ Georgiadi A.G., ¹ Milyukova I.P., ² Groisman P.Ya., ¹ Barabanova E.A.

¹ Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

² Hydrology Science & Services Corporation, Asheville, NC 28804, USA

³ North Carolina State University at NOAA National Center for Environmental Information, Asheville, NC, USA

The features of the influence of reservoirs built in the 1950s-1990s on the Kama, Don, Yenisei and Vilyui rivers, which characterized by significantly different water regimes, on annual hydrographs of daily water discharges, as well as on annual and seasonal runoff in average, extremely low-water and high-water years, are studied. The estimates are based on a comparison of the characteristics of the naturalized and anthropogenic-modified runoff. To restore the flow hydrograph close to the conditions of the natural water regime, the authors used the method of G.P. Kalinin-P.I. Milyukov (1958), which is based on a linear model describing the relationship between water flow rates at the inlet and outlet of the calculated section of the river.

Сток рек России в условиях глобального потепления

¹ Георгиади А.Г., ¹ Милюкова И.П., ^{1,2} Бородин О.О., ¹ Барабанова Е.А.

¹ Институт географии РАН, Москва, Россия

² Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

Russian river water flow in the conditions of global warming

¹ Georgiadi A.G., ¹ Milyukova I.P., ^{1,2} Borodin O.O., ¹ Barabanova E.A.

¹ Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

² Institute of Water Problems RAS, Moscow, Russia

Приведены результаты сравнительного анализа изменений стока крупных рек Русской равнины (Волги, Дона, Северной Двины, Печоры, Невы), Сибири (Оби, Иртыша, Енисея, Ангары, Лены, Вилюя) и Дальнего Востока (Амура) в условиях современного глобального потепления и в период сценарных антропогенных изменений климата в XXI в. Он основан на сопоставлении годового и сезонного стока базового периода и периода современного глобального потепления; расчетах на модели месячного водного баланса, разработанной в Институте географии РАН; оценках изменений годового стока рек, полученных методом среднего многолетнего годового водного баланса и данных об атмосферных осадках и испарении, рассчитанных в рамках программы СМIP5 на ансамбле глобальных климатических моделей для периодов современного и сценарного глобального потепления. В период потепления по сравнению с предшествующим базовым периодом на Волге, Каме, Северной Двине, Печоре, Оби, Иртыше, Енисее, Ангаре, Лене и Вилюе наблюдалось повышение годового стока и стока основных гидрологических сезонов, особенно ощутимое в зимний, а также в летне-осенний гидрологические сезоны. Тогда как на Дону, наряду с самым значительным из всех рассмотренных рек относительным увеличением зимнего и заметным ростом летне-осеннего стока, выявлено наибольшее снижение стока половодья, а также годового стока. Установлено совпадение знака изменений годового стока Волги, Дона, Северной Двины, Печоры, Оби, Енисея, Лены и Вилюя в период современного глобального потепления, рассчитанных по данным наблюдений и по уравнению водного баланса с использованием данных об атмосферных осадках и испарении, полученных осреднением результатов расчетов на ансамбле глобальных климатических моделей программы СМIP5. Относительные сценарные изменения годового стока крупных рек в сравнении со стоком базового периода довольно тесно коррелируют с соответствующими изменениями годовых сумм атмосферных осадков, а сценарные изменения суммарного испарения с изменениями годовой температуры воздуха.

Мониторинг потоков углерода в болотных экосистемах Западной Сибири с помощью прототипа веб-ГИС

^{1,2} Гордов Е.П., ^{1,2} Турчановский И.Ю., ¹ Ахлестин А.Ю., ^{1,2} Богомолов В.Ю., ¹ Генина Е.Ю.,
¹ Гордова Ю.Е., ¹ Рязанова А.А., ^{1,2} Титов А.Г.

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

² Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия

Monitoring West Siberia wetlands carbon fluxes using web-GIS prototype

^{1,2} Gordov E.P., ^{1,2} Turchanovskii I.Yu., ¹ Akhlestin A.Yu., ^{1,2} Bogomolov V.Yu., ¹ Genina E.Yu.,
¹ Gordova Yu.E., ¹ Riazanova A.A., ^{1,2} Titov A.G.

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

² Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk, Russia

Запланированный на 2060 год переход России на низкоуглеродную экономику требует достоверной оценки антропогенных и естественных источников и стоков парниковых газов на ее территории. Болота Западной Сибири вносят существенный вклад в региональный цикл углерода. Для оценки потоков и прогнозирования их изменений в первую очередь необходимы надежные наборы измеренных и рассчитанных на основе модели поверхности суши данных, описывающих гидротермические характеристики атмосферы, почвы и потоки парниковых газов. Для хранения получаемых больших архивных и потоковых данных, анализа и предоставления заинтересованным сторонам его результатов создается информационно-вычислительная система «Углерод» (<https://carbon.imces.ru/>). Представлены предварительные результаты разработки и некоторые оценки соответствующих характеристик болотных экосистем Западной Сибири, полученные с помощью создаваемого прототипа тематической веб-ГИС.

- Работа выполнена при поддержке проекта ИМКЭС «Система мониторинга пулов и потоков углерода лесных и болотных экосистем южной таежной зоны Западной Сибири», являющегося частью ключевого инновационного проекта национального значения «Национальная система мониторинга динамики климатически активных веществ в наземных экосистемах Российской Федерации», а также программы фундаментальных исследований РАН ИМКЭС проект FWRG-2021-0004 и проекта FRC ICT GZ-0002.

Эмиссионные и обменные потоки CO₂ в подчиненном ярусе нарушенных таежных экосистем Центральной Сибири

^{1,2} Махныкина А.В., ¹ Кукавская Е.А., ¹ Панов А.В., ^{1,2} Прокушкин А.С.

¹ Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»

² ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,

Emission and exchange fluxes of CO₂ in the subordinate forest layer of disturbed taiga ecosystems of Central Siberia

^{1,2} Makhnykina A.V., ^{1,2} Kukavskaya E.A., ¹ Panov A.V., ^{1,2} Prokushkin A.S.

¹ Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center SB RAS»

² Siberian Federal University

Forest ecosystems of the boreal zone are one of the key regions in maintaining the carbon balance in the atmosphere. The subordinate forest layer in the boreal forests as this part of the ecosystem makes a huge contribution to the carbon balance. Wildfires and logging are the main factors destabilizing forest ecosystems, capable of radically changing the functional role of ecosystems from a sink to an additional source of CO₂. The main goal of this study is to estimate the effect of different types of forest disturbances (clear cutting, wildfires) to the CO₂ fluxes in the subordinate forest layer. Our study sites were located in the lichen pine forests. We analyzed soil respiration (SR) and net surface exchange (NSE) CO₂ fluxes data from June to September obtained by the direct chamber measurements. It was found that max SR rates observed at the site with combined effect two types of disturbances and min SR rates at the site after intense wildfire. Similar results were detected for NSE fluxes: min NSE was at the burned site, max NSE rates noticed at the site after clear culling. The results indirectly indicate what is the most destructive factor for boreal zone ecosystems.

■ This study has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 24-74-00159.

Природно-климатические решения как инструмент смягчения последствий современных климатических изменений

Ольчев А.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Natural climate solutions as a strategy to mitigate the effects of modern climate change

Olchev A.

Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: aoltche@yandex.ru

Современные изменения климата, проявляющиеся в резком росте глобальной температуры, изменении режима осадков и увеличении повторяемости и интенсивности экстремальных погодных явлений (волн жары, почвенных засух, и др.) связываются большинством экспертов по изменению климата с резким увеличением концентрации парниковых (климатически активных) газов (диоксида углерода, метана, закиси азота, гексофторида серы, фреонов и др.) в атмосфере, поступающих прежде всего от антропогенных источников. Природные экосистемы, обладают значительным потенциалом регулирования содержания парниковых газов в атмосфере, прежде всего, за счет способности растительности к поглощению диоксида углерода из атмосферы и его секвестрации в почвенном покрове. Кроме влияния на потоки парниковых газов природные экосистемы оказывают влияние на климатическую систему через радиационный, тепловой и водный баланс земной поверхности. Изменение альбедо (отражательной способности) поверхности может в отдельно взятой экосистеме существенно изменить ее среднемесячную или среднегодовую температуру в сторону как ее увеличения, так и ее уменьшения. Водяной пар, являясь основным парниковым газом в атмосфере, и поступающий в атмосферу как за счет испарения влаги с поверхности пресноводных водоемов, морей, океанов, так и за счет транспирации наземных растений и испарения с поверхности почвы, также может привести к существенным как положительным, так и отрицательным температурным изменениям в региональном и глобальном масштабе. Охлаждающий эффект водяного пара связан с образованием облачности, экранирующей поступление солнечной радиации к земной поверхности. Важную роль в формировании климата, и температурного режима оказывают аэрозоли.

Природно-климатические решения в настоящее время являются одним из важных направлений природоохранной деятельности, направленной на защиту, восстановление и улучшение управления лесами, водно-болотными угодьями, лугами, водоемами, сельскохозяйственными землями, антропогенно-измененными экосистемами с целью смягчения последствий изменения климата. Основная цель их реализации обеспечить уменьшение эмиссии парниковых газов природными экосистемами, и/или увеличение их поглотительной способности. Реализация природно-климатических проектов не должна привести к нарушению устойчивости экосистем, снижению естественного биоразнообразия, утрате экосистемных услуг, и др. При реализации природно-климатических проектов, стоит проанализировать не только баланс между эмиссией и поглощением парниковых газов, но также и вклад таких характеристик, как поверхностное альбедо, тепловой и водный баланс земной поверхности, аэрозольное загрязнение, и др., на региональный климат. Воздействие данных факторов на температурный режим земной поверхности может на порядки превышать влияние на радиационный баланс выбросов основных антропогенных парниковых газов (диоксид углерода, метан). При выполнении природно-климатических проектов важно перенести акценты от получения чисто экономической прибыли для компаний и организаций, реализующих подобные проекты, на целевую природоохранную деятельность, направленную не только на экономию средств и получение коммерческой выгоды бизнес структурам, а на деятельность, результатом которой может стать долговременное снижение эмиссии и увеличение поглощения парниковых газов природными экосистемами, и, как следствие, замедление темпов глобального потепления.

Выбросы прекратились, проблемы остались – медно-никелевый комбинат (Кольский полуостров)

¹ Sokolov A.V., ² Gashkina N.A., ² Moiseenko T.I.

¹ Kharkevich Institute of Information Transfer Problems RAS, Moscow, Russia

² Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia

E-mail: alexander.v.sokolov@gmail.com

Целью настоящего исследования является разработка моделей для анализа (в прошлом, настоящем и в будущем без выбросов от комбината Печенганикель) динамики загрязнения медью и никелем малых озер в зоне влияния комбината (до 100 км.)

Рассматриваются результаты моделирования динамики концентрации никеля и меди в воде, почвах и донных отложениях озер, вызванное выбросами в атмосферу комбината Печенганикель (Кольский полуостров) с 1946 по 2050 гг. Используемая модель построена на разнородных данных, полученных в ходе более чем 30-летних исследований (последствий загрязнения Кольского полуострова). До последнего времени (2020 г.) собранный материал отражал состояние озер, рек, почв, донных отложений и т.д. при значительных атмосферных выбросах загрязняющих веществ. Новый материал, собранный в 2023г. в условиях кардинального уменьшения выбросов комбинатом Печенганикель, привел к уточнению некоторых параметров и к модификации модели с целью более точного описания нового явления – явления восстановления природной среды региона.

Использование технологии сбалансированной идентификации позволило для имеющегося объема разнородных данных (более 10 источников) выбрать модель соответствующей сложности, провести идентификацию неизвестных параметров (числовых и функциональных) и получить и оформить результаты. Используемое в работе специальное ПО (<https://github.com/distcomp/SvF>), примеры программ расчетов различных задач (<https://github.com/distcomp/SvF/tree/main/Examples>) находятся в открытом доступе. В том числе и используемые в данной работе программы расчетов и соответствующие базы данных.

Построенная модель соответствует по сложности имеющимся экспериментальным данным и отражает новую реальность – медленное восстановление экосистем в условиях кардинального уменьшения выбросов. Полученный прогноз достаточно надежен. В отсутствии новых поступлений загрязнителей (сценарий нулевых выбросов), концентрацию в воде определяет поступление (переход в растворимые формы) Ni и Cu из запасов в почве и донных отложениях. Процесс очень медленный, что, с одной стороны, отражается в заметном уменьшении концентраций в воде, с другой – не позволяет надеяться на быстрое дальнейшее улучшение состояния. Период полувыведения («полураспада») запасов составляет порядка нескольких сотен лет.