

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

МЕЖДУНАРОДНОЙ МОЛОДЕЖНОЙ ШКОЛЫ
И КОНФЕРЕНЦИИ ПО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-ИНФОРМАЦИОННЫМ
ТЕХНОЛОГИЯМ ДЛЯ НАУК ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ
CITES-2023

ISBN 978-5-6050499-0-6



ИМКЭС СО РАН

Томск, 2023

© Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 2023

Тезисы международной молодежной школы и конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES-2023 / под ред. Е. П. Гордова. – Томск: ИМКЭС СО РАН, 2023. – 118 с. URL: http://www.scert.ru/f/668/MainPart/cites23abs2_net.pdf – Текст: электронный.

ISBN 978-5-6050499-0-6

DOI 10.5281/zenodo.8072746

В сборнике представлены тезисы докладов участников Международной конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES-2023, прошедшей в Президиуме РАН, Москва, 13 -16 июня 2023 года. Мероприятие проведено при поддержке проекта РНФ 21-71-30023.

Главный редактор сборника доктор физико-математических наук, профессор Гордов Е. П. – председатель оргкомитета конференции.

Ответственный редактор сборника Гордова Ю.Е.

Материалы конференции

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. 2023. Объем издания - 3 Мб.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения

Российской академии наук, 634055, г. Томск, Академический пр.,10/3,

<http://www.imces.ru>

ISBN 978-5-6050499-0-6

DOI 10.5281/zenodo.8072746

СЕКЦИЯ 1. ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ ПОГОДЫ И МЕТЕОРОЛОГИЯ

Многомасштабная система численного прогноза погоды ПЛАВ: дальнейшее развитие и результаты	
Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Травова С.В., Зарипов Р. Б., Гойман Г.С., Алипова К.А., Мизяк В.Г., Рогутов В.С.	10
Постпроцессинг численных прогнозов для метеорологического обеспечения авиации	
Иванова А.Р., Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Комасько Н.И., Завьялова А.А.	10
Система краткосрочного численного прогноза погоды Гидрометцентра России на базе негидростатических моделей	
Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Кирсанов А.А., Копейкин В.В., Коспанов А.А., Никитин М.А.	11
О некоторых усовершенствованиях в модели атмосферы ПЛАВ	
Фадеев Р.Ю.	12
Новый подход к учету несовершенства модели атмосферы в ансамблевом прогнозе: аддитивные возмущения, масштабируемые с использованием физических тенденций	
Астахова Е.Д., Цырульников М.Д., Гайфулин Д.Р.	12
Разработка динамического ядра для модели атмосферы нового поколения на сетке кубическая сфера	
Шашкин В., Гойман Г., Третьяк И.	13
Оценка значимости взаимодействия океана и атмосферы при орографических ветрах Новой Земли на основе результатов моделирования	
Шестакова А.А.	13
Разработка систем прогнозирования опасных метеорологических явлений различных пространственно-временных масштабов на территории России	
Калмыкова О.В., Спрыгин А.А., Козлов С.В., Вязилов А.Е., Петриченко С.А., Ингель Л.Х., Кулижникова Л.К.	14
Обзор качества данных прогностической модели GME/ICON для начальной заблаговременности по территории России за 2013-2022 гг.	
Блинов Д.В., Ревокатова А.П., Ривин Г.С., Розинкина И.А.	15
Исследование влияния городской параметризации TERRA-URB на прогноз температуры воздуха для городов Сибирского региона	
Газимов Т.Ф., Гочаков А.В.	16
Инициализация океана полными полями в ретроспективных сезонных прогнозах климатической модели ИВМ РАН	
Тарасевич М.А., Володин Е.М.	17
Стохастическая физика в новой системе ансамблевого прогноза погоды на основе модели ПЛАВ20	
Алипова К.А., Толстых М.А., Гойман Г.С., Мизяк В.Г., Рогутов В.С.	18
Оценка городского аэрозольного воздействия на радиационные и температурные характеристики атмосферы в Москве по данным численных экспериментов и измерений	
Андросова Е.Е., Чубарова Н.Е., Кирсанов А.А., Варенцов М.И., Ривин Г.С.	19
Прогнозирование опасных гидрологических явлений на территории Красноярского края	
Аникин М.Н., Тасейко О.В.	19
Система усвоения данных для прогностической системы COSMO-Ru	
Блинов Д.В., Ревокатова А.П., Ривин Г.С., Розинкина И.А.	20
Причины низкой водности рек на примере реки Енисей	
Бутина В.М., Хилук А.В.	21
Изучение чувствительности численного прогноза погоды к усвоению радарных данных по территории	
Гочаков А.В., Блинов Д.В., Газимов Т.Ф.	22
Повышение точности краткосрочных численных прогнозов погоды мезомасштабной модели WRF для территории Беларуси с использованием данных дистанционного зондирования Земли	
Лысенко С.А., Зайко П.О.	23

Оценка риска возникновения смерчей вблизи Черноморского побережья России: двухступенчатая стратегия прогноза	
Калмыкова О.В.	24
Использование пакета верификации METplus при проведении авторских испытаний системы прогноза погоды COSMO-Ru/icon	
Кирсанов А.А., Бундель А.Ю., Тарасова М.А., Астахова Е.Д., Шувалова Ю.О.	25
Исследование качества воспроизведения колебания Маддена-Джулиана в модели ПЛАВ	
Костин Л.А., Фадеев Р.Ю., Толстых М.А.	26
Исследование влияния параметризации аэродинамического сопротивления на прогноз поверхностного волнения под действием урагана	
Кузнецова А.М., Байдаков Г.А., Досаев А.С., Троицкая Ю.И.	27
Автоматизированная технология прогноза зарождения и перемещения полярных мезоциклонов для Арктического региона России	
Петриченко С.А., Калмыкова О.В., Козлов С.В., Кулижникова Л.К.	27
Экстремальная молниевая активность в арктическом регионе	
Попыкина А.П., Ильин Н.В., Сарафанов Ф.Г.	28
SBP-SAT метод горизонтальной аппроксимации уравнений динамики атмосферы на сетках с локальным повышением разрешения	
Третьяк И.Д., Гойман Г.С., Шашкин В.В.	29
Краткосрочный прогноз радиационных потоков у земной поверхности модели ICON-Ru с блоком esRad и схемой McICA	
Шувалова Ю.О., Чубарова Н.Е., Шатунова М.В., Кирсанов А.А., Бундель А.Ю., Тарасова М.А.	30

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

Исследование роли арктических шельфовых морей в формировании ледовых и гидрологических полей Северного Ледовитого океана в условиях меняющегося климата Земли	
Голубева Е.Н., Градова М.А., Крайнева М.В., Якшина Д.Ф.	31
Исследование влияния возможных климатических изменений на состояние гидрологических и ледовых полей морей Сибирского шельфа	
Крайнева М.В., Градова М.А.	32
Математическое моделирование критической динамики атмосферы при эмиссии газов с поверхности вечной мерзлоты	
Савенкова Е. Н., Вакуленко С.А., Судаков И.А.	33
Ретроспективный прогноз состояния Земной системы на срок до 5 лет с помощью модели климата INM-CM5	
Воробьева В.В., Володин Е.М., Грицун А.С.	33
Изменение динамики стратосферы Арктики в XXI веке по расчетам химико-климатической модели SOCOLv4	
Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Коваль А.В., Розанов Е.В., Егорова Т.А.,Цветкова Н.Д., Смышляев С.П.	35
Тенденции климатических изменений на территории Приволжского федерального округа в XIX-XXI веках и их последствия	
Переведенцев Ю.П., Мирсаева Н.А., Шанталинский К.М., Гурьянов В.В., Николаев А.А.	35
Колебательная система климата, резонансы, дальние асинхронные связи и прогнозы колебаний климата	
Шерстюков Б.Г.	36
Влияние изменений солнечной активности на Эль-Ниньо – Южное колебание и Южную кольцевую моду как элементов Глобальной атмосферной осцилляции	
Серых И.В., Сонечкин Д.М.	37
Исследование прогноза индекса Тихоокеанской декадной осцилляции с помощью модели ИВМ на срок от 1 до 5 лет	
Александров М.С., Володин Е.М.	38
Анализ изменений температуры воздуха на уровне пограничного слоя в различные периоды климатической изменчивости	
Алимпиева М.А.	38

Анализ воспроизведения траекторий полярных мезоциклонов в данных модельных архивов COSMO-CLM RAh и RAS-NAAD	
Ахтамьянов Р.А., Платонов В.С., Вереземская П.С.	39
Описание взаимодействия между океаном и морским льдом в численной модели SibCIOM	
Градова М.А.	40
Анализ тенденций изменения характеристик тропопавзы в условиях меняющегося климата Земли	
Козлова Л.Ф.	41
Исследование двух волн жары разного генезиса в Москве летом 2021 года (в июне и в июле) с помощью мезомасштабного моделирования посредством WRF-ARW	
Корженевская А.А., Коспанов А.А., Константинов П.И.	41
Климатические причины сокращения оледенения Камчатки	
Корнева И.А., Торопов П.А., Муравьев А.Я., Алешина М.А.	42
Особенности биоклиматического комфорта северных территорий СФО в условиях изменения климата	
Котов А.В., Тасейко О.В.	43
Исследование межгодовой изменчивости диоксида углерода в арктическом регионе	
Лоскутова М.А., Макштас А.П., Лаурила Т., Асми А.	44
Природно-климатические риски сельского хозяйства Красноярского края	
Овчинникова А.Е., Черкасова Н.Г.	45
Восстановление вертикальной структуры распределения NO₂ в нижней тропосфере по многоугловым спектральным измерениям рассеянной солнечной радиации (MAX DOAS)	
Постыляков О.В., Шамсутдинов Д.Р., Боровский А.Н., Чуличков А.И.	46
Динамика негауссовых аномалий климатических величин в Северном полушарии в конце XX – начале XXI века	
Харюткина Е.В., Логинов С.В., Морару Е.И.	47
Местный климат Арктического города и его влияние на окружающую среду	
Эзау И.Н.	48
 СЕКЦИЯ III. ПРОЦЕССЫ В ДЕЯТЕЛЬНОМ СЛОЕ СУШИ: МОДЕЛИ, НАБЛЮДЕНИЯ И УСВОЕНИЕ ДАННЫХ	
Подходы к параметризации горного оледенения в рамках Моделей Земной Системы	
Торопов П.А., Дебольский А.В., Шестакова А.А., Поповнин В.В.	49
Реконструкция баланса массы ледниковой системы Эльбруса с 1984 по 2022 с помощью физико-математической модели с распределенными параметрами	
Елагина Н.Э., Рец Е.П., Корнева И.А., Торопов П.А.	50
Метеорологические измерения в высокогорной зоне Эльбруса в период аккумуляции грунтовых вод в модели деятельного слоя суши	
Богомолов В.Ю., Степаненко В.М.	50
Аналитическое решение нелинейного уравнения теплопроводности с периодическим верхним граничным условием	
Лапина Л.Э.	52
Чувствительность атмосферной циркуляции модели ПЛАВ к гранулометрическому составу почвы	
Травова С.В., Толстых М.А., Тарасова Л.Л.	53
Временная вариабельность потоков углекислого газа и метана в грядово-мочажинном комплексе болота Мухрино	
Дюкарев Е.А., Дмитриченко А.А., Суворов Г.Г., Лапшина Е.Д.	53
Применение трёхмерной гидродинамической модели для описания потоков диоксида углерода и метана над неоднородной лесной поверхностью	
Гибадуллин Р.Р., Мухартова Ю.В., Дускаев М.З., Мамадиев Н.А., Махмудова Л.Ш., Керимов И.А., Ольчев А.В.	54
Микропластик в озере Байкал: гипотетические сценарии	
Цветова Е.А.	55
Влияние используемых метеорологических данных на качество моделирования термического режима озер	
Терешина М.А., Ерина О.Н., Соколов Д.И.	56

Калибровка одномерной термогидродинамической модели LAKE3.0 для оценки эмиссии метана из искусственных водоемов	
Ломов В.А., Романенко В.А., Степаненко В.М.	57
Чувствительность модели деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ к параметрам почвы и растительности на примере регионов юга Западной Сибири	
Рязанова А.А., Богомолов В.Ю., Степаненко В.М.	58
Динамика тепловлагоденоса в почве с мерзлыми грунтами на основе модели деятельного слоя ИВМ РАН в сравнении с данными измерений	
Логинов А.С., Богомолов В.Ю., Воропай Н.Н., Рязанова А.А.	59
Мониторинг температуры грунта в глубокой скважине на площадке МО МГУ	
Фролов Д.М.	59
Температурный мониторинг грунта на перевале Анзоб (Таджикистан)	
Фролов Д.М., Кошурников А.В., Гагарин В.Е., Набиев И.А., Додобоев Э.И.	60

СЕКЦИЯ IV. СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЁВ

Определение параметров конвективных вихрей в пограничном слое атмосферы из совместных сейсмических и метеорологических измерений	
Курганский М.В.	61
О спиральности пограничных слоев экмановского типа	
Ингель Л.Х.	61
Структура турбулентности в приводном/приземном слое атмосферы в прибрежных зонах	
Репина И.А., Барсков К.В., Пашкин А.Д., Артамонов А.Ю.	62
Влияние разрывов и наличия снега на льду на термический режим над морским льдом в Арктике	
Чечин Д.Г., Шестакова А.А., Махотина И.А.	63
Шквалы и пыльные бури над Европейской территорией России: диагностика и моделирование	
Вазеева Н.В., Чхетиани О.Г.	63
Особенности вертикального распределения пылевого аэрозоля при слабых и умеренных ветрах над аридными территориями	
Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г., Голицын Г.С., Лебедев В.А.	64
Numerical realisation of adaptive grids in large-eddy simulation models of the atmospheric boundary layer	
Tkachenko E.V., Debolskiy A.V., Mortikov E.V.	65
Оптимизация параметризаций турбулентного перемешивания в модели INMCM6	
Дебольский А.В., Мортиков Е.В., Глазунов А.В., Володин Е.М., Тарасова М.А.	66
Трёхмерное численное моделирование термогидродинамики и биогеохимии водоемов суши	
Гладских Д.С., Мортиков Е.В., Ломов В.А.	66
Аппроксимация временной динамики городского острова тепла методами машинного обучения	
Варенцов М.И., Криницкий М.А., Степаненко В.М.	67
Сравнение влияния зеленых и белых крыш на городской остров тепла на примере 3 волн жары в Москве	
Коспанов А.А., Константинов П.И.	68
Статистический анализ атмосферной турбулентности в условиях городской застройки	
Дрозд И.Д., Гавриков А.В., Степаненко В.М., Репина И.А., Артамонов А.Ю., Пашкин А.Д.	69
Реализация городской параметризации ТЕВ в региональной модели атмосферы COSMO: первые результаты	
Тарасова М.А., Варенцов М.И., Дебольский А.В., Степаненко В.М.	70
Вертикальное распределение PM2.5 и PM10 в предгорной городской зоне по данным измерений с помощью БПЛА и моделирования	
Полухов А.А., Кирсанов А.А., Сенник И.А., Глебов А.Ю., Гибадуллин Р.Р., Гвоздева А.В., Лаврентьева А.И., Леонова Д.С., Масляшова А.О., Нариманидзе А.А., Петров Н.А.	71
Aerosol transport in the urban boundary layer under different properties of stratification and urban environment	
Varentsov A.I., Stepanenko V.M., Mortikov E.V.	71
Анализ температуры поверхности Карского моря на основе спутниковых данных и данных экспедиции «Плавучий университет-2021»	
Марчук Е.А., Репина И.А., Козлов И.Е., Осадчиев А.А., Степанова Н.Б.	72

СЕКЦИЯ V. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НАУК О ЗЕМЛЕ

Принципы FAIR для наборов данных и требования TRUST к репозиториям данных Вязилов Е.Д., Мельников Д.А.	74
Климатические тренды приземной температуры на территории Российской Федерации, оцененные с использованием квантильной регрессии Стерин А.М., Лавров А.С.	75
Artificial Neural Network (ANN) Technique for Real-Time Forecasting of Urban Air Quality with Previous Time Pollutants and Meteorological Variables Soo-Min Choi, Hyo Choi.....	76
Алгоритмы обратного моделирования для построения цифровых двойников процессов переноса и трансформации примесей в атмосфере Пененко А.В., Русин Е.В., Емельянов М.К., Шаблыко В.К., Цыбенкова Э.В., Пененко В.В.	76
Коррекция численных прогнозов приземного озона нейросетевыми методами Борисов Д.В., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И.	77
Сравнение результатов кластеризации квантильных трендов приземной температуры на территории Российской Федерации с квази-однородными климатическими регионами России Лавров А.С., Стерин А.М.	78
Оценка качества моделирования загрязнения атмосферы в Казахстане моделью SILAM в зависимости от крупномасштабных синоптических процессов Глебов А.Ю., Гущина Д.Ю.....	79
Информационная система мониторинга радиоклимата Байкальской природной территории Базарова А.С., Базаров А.В., Атутов Е.Б., Гармаев Б.З., Сычев Р.С., Башкуев Ю.Б.	80
Система RANGES для оценки климатических ареалов видов Богданович А.Ю., Семенов С.М.....	80
Разработка NETCID- базы данных об условиях термического комфорта для Северной Евразии за период с 1979 по 2018 годы: современное состояние и перспективы Константинов П.И., Варенцов М.И., Шартова Н.В.	82
Применение локальных метеорологических моделей для воспроизведения городского микроклимата на примере Москвы Левищева Т.П., Константинов П.И.....	83
Применение вейвлет-анализа для поиска геомагнитных аномалий на обсерватории «Сурлари», сопутствующих землетрясениям в Турции 6 февраля 2023 г. Рябова С.А.	84
Натурные испытания многоэлементного пиранометра Зуев С.В.	84
Взаимодействие компонент климатической системы в модели INMCM-SibCIOM с помощью каплера SCM Градов В.С., Платов Г.А.	85
Оценка условий проведения мероприятий на свежем воздухе в г. Москва с использованием CTIS Маратканова В.С., Константинов П.И.	86
Общая архитектура прототипа распределенной информационной системы мониторинга и комплексного анализа потоков парниковых газов болотных экосистем Титов А.Г.	87
Estimation of hourly spatial temperature distribution in the Moscow metropolitan area based on geostationary satellite data Shishov A.....	88
Результаты мультифрактального детрендрованного флуктуационного анализа минимальной температуры на горе Цугшпитце Рябова С.А.	88

СЕКЦИЯ VI. 24-Я СЕССИЯ СЕВЕРО-ЕВРАЗИЙСКОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО ФОРУМА

Прогноз параметров морского льда климатической модели INM-CM5 в Арктике на летний сезон Воробьева В.В., Тарасевич М.А., Володин Е.М.....	89
The bulletin of seasonal multi-model forecasts for summer 2023 Kaverina E., Kulikova I., Krulova E., Tischenko V., Khan V.	90

Оценка практической предсказуемости колебания Маддена-Джулиана Набокова Е.В., Хан В.М., Куликова И.А.	91
СЕКЦИЯ VII. СЕМИНАР ПО РАЗВИТИЮ НАЦИОНАЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	
Воспроизведение изменений климата в 1850–2023 гг. версией модели климата INMCM6 Володин Е.М.	92
Оценки экспериментальных долгосрочных метеорологических прогнозов, выпускаемых в Гидрометцентре России на базе модели INM-CM Хан В.М., Тищенко В.А., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Емелина С.В., Набокова Е.В., Субботин А.В., Грицун А.С., Володин Е.М., Воробьева В.В., Тарасевич М.А.	92
Модернизация модели океана в составе совместной климатической модели Благодатских Д.В., Яковлев Н.Г., Володин Е.М.	93
Параметризация вихревого переноса в океане на основе результатов моделирования мезомасштабного вихревого поля Платов Г.А., Якшина Д.Ф.	93
Новая конечно-элементная модель динамики морского льда на треугольных A и CD сетках в локально-декартовом базисе Петров С.С.	94
Моделирование состояния зоны стабильности метангидратов арктического шельфа с учетом формирования многолетнемерзлых пород Малахова В.В.	95
Численное моделирование относительного вклада химических и физических процессов в изменения климата и газового состава атмосферы Усачева М.А., Смышляев С.П.	96
Моделирование глобальной атмосферной электрической цепи: результаты, перспективы, интеграция в национальную климатическую модель Ильин Н.В., Слюняев Н.Н., Мареев Е.А.	96
Стохастическая параметризация конвекции для модели климатической системы с высоким разрешением: мелкая конвекция Крупчатников В.Н., Градов В.С., Боровко И.В.	97
Параметризация возмущения проводимости атмосферы во время спрайта Евтушенко А.А., Ильин Н.В.	98
Модель снежного покрова в климатической модели ИВМ РАН Черненко А.Ю., Володин Е.М., Кострыкин С.В.	98
Сравнительный анализ различных параметризаций процесса накопления торфа в моделях климатической системы Александров Г.А., Елисеев А.В., Денисов С.Н.	99
Система совместного моделирования климатической модели Земной системы ИВМ РАН Онопrienко В.А., Благодатских Д.В., Черненко А.Ю., Гойман Г.С., Фадеев Р.Ю.	100
Система подготовки данных о параметрах поверхности суши для модели Земной системы ИВМ РАН Рязанова А.А., Богомоллов В.Ю., Варенцов М.И., Медведев А.И., Энтин А.Л., Степаненко В.М.	101
Optimization of data exchange on heterogeneous computing systems for Earth system models Gaschuk E.M., Imeev O.A., Debolsky A.V., Mortikov E.V.	102
Организация совместной разработки модели Земной системы ИВМ РАН Тарасевич М.А., Цыбулин И.В., Грицун А.С.	102
Новая параметризация землепользования в климатической модели ИВМ РАН Черненко А.Ю., Володин Е.М.	103
Развитие блока приземного слоя для климатической модели ИВМ РАН Бычкова В.И., Гашук Е.М., Гладских Д.С., Дебольский А.В., Медведев А.И., Мортиков Е.В., Ткаченко Е.В.	104
Блок динамики морского льда в перспективной модели Мирового океана: перенос характеристик Ежкова А.А., Оноприенко В.А., Яковлев Н.Г.	105
Оценка параллельной масштабируемости и вычислительной эффективности перспективной версии климатической модели ИВМ РАН Тарасевич М.А., Сахно А.В., Фадеев Р.Ю., Володин Е.М., Грицун А.С.	106

Режимы атмосферной циркуляции в Евро-Атлантическом секторе в моделях CMIP6 и реанализе ERA5	
Бабанов Б.А., Семенов В.А.	107
Воспроизведение внутрисезонной тропической изменчивости в модели ИВМ РАН	
Гущина Д.Ю., Железнова И.В.	107
Потенциальная предсказуемость динамики климатической системы на временных масштабах 1 – 10 лет в тропиках Тихого океана по данным климатических моделей CMIP6	
Грицун А.С.	108
Моделирование межгодовой изменчивости явления Эль-Ниньо-Южное Колебание	
Селезнев А.Ф., Мухин Д.Н.	109
Оценка воспроизведения фазы и амплитуды Колебания Маддена-Джулиана в моделях INM-CM5-0 и INM-CM6-L и других моделях проекта CMIP6	
Железнова И.В., Гущина Д.Ю., Котляревская А.Д.	109
Воспроизведение водного режима северных рек России в модели деятельного слоя суши ИВМ РАН – МГУ	
Медведев А.И., Степаненко В.М., Богомолов В.Ю., Черненко А.Ю.	110
Сравнение воспроизведения отклика циркуляции тропосферы полярных и умеренных широт на два типа Эль-Ниньо в модели INM-CM5-0 с другими моделями CMIP6	
Гвоздева А.В., Гущина Д.Ю.	111
Выделение глобальных мод климата по данным модели ИВМ РАН	
Буянова М., Гаврилов А., Мухин Д.	112
Оценка неопределенности потоков турбулентного тепла в Баренцевом море по данным ансамбля моделей CMIP6	
Романенко В.А., Семенов В.А.	112
Исследование влияния температуры поверхности океана на химический состав атмосферы с помощью химико-климатической модели ИВМ РАН - РГГМУ	
Яковлев А.Р., Смышляев С.П., Галин В.Я.	113

SESSION VIII. FUTURE EARTH PROGRAM AND NORTHERN EURASIA FUTURE INITIATIVE

Northern Eurasia Future Initiative (NEFI), Present Status and Perspectives	
Groisman P.Ya.	116
Assessment of the potential impact of climate change in Uzbekistan using the RCP and SSP scenarios	
Belikov D.A., Rakhmatova N., Nishonov B., Shardakova L., Rakhmatova V.	117
Extreme low flow during the long-lasting river runoff phases in the central part of the East-European plain	
Georgiadi A.G., Groisman P.Ya.	117
Cloud and radiation characteristics of the atmosphere in the Arctic based on expedition and satellite observations	
Narizhnaya A.I., Chernokulsky A.V., Repina I.A., Chechin D.G.	118

СЕКЦИЯ I ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ ПОГОДЫ И МЕТЕОРОЛОГИЯ

Многомасштабная система численного прогноза погоды ПЛАВ: дальнейшее развитие и результаты

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

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

²ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

³Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

Многомасштабная система прогноза на основе модели атмосферы ПЛАВ, разработанная в ИВМ РАН и Гидрометцентре России, применяется для оперативных среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды.

Недавно разработана новая версия модели ПЛАВ10 для среднесрочного прогноза, имеющая горизонтальное разрешение около 10 км в Северном полушарии, 104 уровня по вертикали, что соответствует сегодняшнему среднему мировому уровню. Данная версия проходит оперативные испытания в Гидрометцентре России. В докладе будут представлены некоторые результаты среднесрочных прогнозов новой модели, в сравнении с нынешней моделью ПЛАВ20, имеющей более грубое разрешение.

Также будут показаны результаты недавних исследований по повышению качества долгосрочного прогноза погоды.

- Исследования в области совершенствования долгосрочного прогноза выполнены в Гидрометцентре России за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00254, <https://rscf.ru/project/21-17-00254/>.

Постпроцессинг численных прогнозов для метеорологического обеспечения авиации

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

ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

Обеспечение безопасности полетов воздушных судов предъявляет высокие требования к качеству метеорологических прогнозов, основой которых являются численные прогнозы погоды (ЧПП). Требуемая для авиации точность последних гораздо выше той, что необходима для прогнозов общего назначения.

На основе выходных данных моделей численного прогноза погоды – полей метеоэлементов на стандартных и модельных уровнях – для целей метеобеспечения авиации реализуются различные алгоритмы постпроцессинга. В зависимости от типа необходимой прогностической продукции (прогнозы по маршруту/району полета или по аэродрому) могут быть использованы данные глобальной модели или модели по ограниченной территории.

Постпроцессинг для метеообеспечения авиации предусматривает использование прогностических полей метеоэлементов для генерации прогноза особых (significant weather) или опасных (hazardous weather) явлений для авиации. К первым относятся, например, характеристики струйных течений и тропопauses, ко вторым – турбулентность и обледенение умеренной и сильной интенсивности, горные волны, мощная конвективная облачность и грозы. Для прогнозов по аэродрому исключительно важно давать прогноз не только наличия, но и времени начала и окончания явлений, влияющих на взлет и посадку воздушных судов – тумана, пыльной бури, низкой облачности и пр. Здесь постпроцессинг с использованием данных модели ЧПП, как правило, должен комбинироваться с информацией учащенных наблюдений на основе технологий наукастинга.

Качество прогнозов для метеообеспечения авиации будет определяться не только выбранным алгоритмом постпроцессинга, который должен отражать особенности описываемого явления, но и адекватностью воспроизведения моделью физических процессов в атмосфере. Постпроцессинг для прогноза объектов и явлений в атмосфере позволяет выявить недостатки в описании динамических, радиационных и микрофизических процессов в моделях ЧПП и внести соответствующую коррекцию для учета сезонной динамики.

Система краткосрочного численного прогноза погоды Гидрометцентра России на базе негидростатических моделей

Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Кирсанов А.А., Копейкин В.В., Коспанов А.А., Никитин М.А.

ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия
E-mail: gdaly.rivin@mail.ru

Современный численный прогноз погоды основан на решении на суперкомпьютерах нелинейной практически исходной системы дифференциальных уравнений геофизической гидродинамики с использованием большого количества (миллионы в сутки) наблюдений за процессами в окружающей среде.

Основным компонентом оперативной системы детализированного краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-Ru Гидрометцентра России являются конфигурации COSMO-Ru6ENA и COSMO-RuBy2 негидростатической модели COSMO атмосферы и процессов в деятельном слое суши, которая позволяет давать детализированный прогноз для территории Северной Евразии (включая всю территорию Европы) с шагом сетки 6,6 км (40 уровней по вертикали, 2000×1000 узлов сетки на каждом уровне) и для всей Европейской части России с шагом сетки 2,2 км (50 уровней, 1200×1400 узлов на каждом).

В настоящее время в Гидрометцентре России проводится работа по подготовке и включению в систему COSMO-Ru еще более высококачественных конфигураций ICON-Ru бесшовной негидростатической глобальной модели атмосферы ICON (120 уровней по вертикали, верхний 75 км, шаг сетки 13 км) с двухсторонним вложением по горизонтали и вертикали для детализированного краткосрочного прогноза погоды с шагом сетки 6,5 км (74 уровня, верхний 23 км) для части Северного полушария, расположенной севернее параллели 29,5 град. с. ш. На данный момент подготовлен набор конфигураций ICON-Ru с шагами сетки 2,0 км, покрывающими в совокупности территорию России и ряда соседних стран, получены результаты численных экспериментов. Показана высокая эффективность применения гибридного метода распараллеливания, использованного в конфигурациях, что крайне важно для использования результатов моделирования в оперативной практике составления прогнозов погоды. Начата подготовка конфигураций ICON-Ru с шагами сетки 1 км и менее.

О некоторых усовершенствованиях в модели атмосферы ПЛАВ

Фадеев Р.Ю.

Институт вычислительной математики им. Г.И.Марчука РАН,
ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия
E-mail: rost.fadeev@gmail.com

В докладе обсуждаются несколько усовершенствований, которые позволили, в том числе, заметно уменьшить ошибку воспроизведения полей геопотенциала и температуры на уровнях 500 и 250 гПа. Особое внимание в докладе уделяется роли выпадающих осадков на коэффициенты турбулентного обмена. Выводы о статистической значимости влияния рассматриваемых изменений на точность воспроизведения атмосферной циркуляции сделаны на основе анализа качества ретроспективных долгосрочных прогнозов с заблаговременностью до четырех месяцев (для разных сезонов), а также на основе исследования осредненных характеристик модельной атмосферы в сравнении с реанализом ERA5.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Tolstykh M.A., Volodin E.M., Kostykin S.V., et al. Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model - Russian meteorology and hydrology, 2015, V. 40, pp. 374-382.
2. Fadeev R.Yu., Tolstykh M.A., Volodin E.M. Climate version of the global atmospheric model SL-AV: development and preliminary results - Russ. Meteor. and Hydrol., 2019, V. 1, pp. 22-35.

Новый подход к учету несовершенства модели атмосферы в ансамблевом прогнозе: аддитивные возмущения, масштабируемые с использованием физических тенденций

Астахова Е.Д., Цырульников М.Д., Гайфулин Д.Р.

ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия
E-mail: [elena_ast_hmc@mail](mailto:elena_ast_hmc@mail.ru)

Ансамблевые методы широко используются в задачах прогнозирования погоды. Их применение позволяет улучшить описание эволюции состояния атмосферы и подстилающей поверхности, а также, что особенно важно, получить информацию о неопределенности прогноза, обусловленной хаотической природой атмосферы и несовершенством наших знаний о состоянии окружающей среды и методов, используемых для прогнозирования. В идеале, ансамблевая система должна учитывать все возможные источники этой неопределенности, включая ошибки модели. Несмотря на долгую историю попыток объективно смоделировать ошибки (неопределенность) модели, эта задача далека от своего решения. Предложено много различных методов (SPPT, SKEB, SPP и т.д.), но все они имеют недостатки, как методические, так и практические.

В настоящей работе предложен новый метод учета несовершенства модели в численном прогнозе погоды, названный AMPT (Additive model Perturbations scaled by Physical Tendencies). Как и SPPT, метод основан на предположении, что основные неточности модели связаны с несовершенством схем параметризации подсеточных процессов, эффект от которых передается в динамические уравнения через так называемую физическую тенденцию. В отличие от SPPT, случайные возмущения AMPT являются аддитивными, четырехмерными, независимыми для различных переменных модели и масштабируемыми с использованием осредненного по пространству модуля физической тенденции. Новый подход дает возможность устранить ряд недостатков, присущих SPPT. Аддитивность возмущений позволяет использовать более реалистичные пространственные и временные масштабы поля случайных возмущений, а также получить ненулевые возмущения в точках, где суммарная физическая тенденция оказывается равной нулю. Кроме того, удастся избежать нефизических корреляций возмущений на различных высотах и для различных метеорологических полей.

Метод был внедрен в модель COSMO и протестирован на двухмесячном архиве с помощью ансамблевой системы COSMO-Ru2-EPS. Результаты показали, что применение AMPT позволяет существенно увеличить разброс в ансамбле без увеличения ошибки. Характеристики вероятностного прогноза

приземной температуры, такие как соотношение разброса прогнозов в ансамбле и среднеквадратичной ошибки среднего, оценки Брайера, CRPS, а также площадь под кривой ROC оказались статистически значимо лучшими для АМРТ по сравнению с результатами для SPPT. Использование АМРТ также привело к улучшению вероятностных прогнозов приземного ветра, однако эффект оказался более слабым, чем для температуры. Влияние АМРТ на прогноз осадков было неоднозначным и требует дальнейшего изучения на архиве, содержащем большее число дней с осадками по сравнению с архивом, на котором были проведены эксперименты в данной работе.

Разработка динамического ядра для модели атмосферы нового поколения на сетке кубическая сфера

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

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

²ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

³Национальный исследовательский университет Московский институт электронной техники, Москва, Россия

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

Характерное горизонтальное разрешение расчетных сеток современных моделей атмосферы - 7-10 км в прогнозе погоды и около 100 км в климате. Дальнейшее повышение разрешения требует пересмотра математических методов, применяемых для моделирования. Необходимо использовать сетку с квазиравномерным разрешением на сфере и отказаться от методов, использующих глобальные пересылки данных (например, разложение Фурье). Дальнейшее повышение разрешения фактически требует создания принципиально новых блоков решения системы уравнений гидротермодинамики атмосферы (динамических блоков).

В докладе представлены работы по созданию динамического блока для модели атмосферы нового поколения на сетке кубическая сфера, которые ведутся в ИВМ РАН и Гидрометцентре России. При разработке динамического блока планируется достичь следующих целей:

- 1) Гибкость выбора численных методов и даже решаемой системы уравнений, для достижения универсальности блока по отношению к типу задач (погода/климат);
- 2) Возможность включения регионов повышенного разрешения в модель в рамках одного программного комплекса;
- 3) Высокая параллельная и вычислительная эффективность.

В настоящее время, испытывается трехмерная негидростатическая версия динамического блока, на основе конечно-разностного метода пространственной аппроксимации высокого порядка и схемы интегрирования по времени с неявностью для слагаемых, отвечающих за вертикальное распространение акустических и гравитационных волн. Ведется разработка гидростатической версии и реализация методов интегрирования по времени с неявностью для слагаемых, ответственных за распространение акустических волн по горизонтали. Представлены результаты численных экспериментов в идеализированной атмосфере, которые хорошо согласуются с результатами зарубежных аналогов.

Оценка значимости взаимодействия океана и атмосферы при орографических ветрах Новой Земли на основе результатов моделирования

Шестакова А.А.

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

E-mail: shestakova@ifaran.ru

Энергообмен океана с атмосферой в полярных широтах и в особенности в Западной Арктике, в Баренцевом море, имеет большое значение для климатической системы. Вопросу энергообмена атмосферы и океана в Баренцевом море уделяется много внимания, однако влияние мезомасштабных циркуляций, в частности орографических ветров, пока изучено достаточно слабо. О значимости орографических ветров для процессов в океане, в том числе на климатических масштабах, свидетельствуют результаты исследований, которые проводились в других районах мира (Xie et al. 2005, Boldrin et al., 2009, Pickart et al. 2003 и др.). Отсутствие количественных оценок влияния орографических ветров на термодинамику океана в Западном секторе Арктики не позволяет ответить на вопрос, можно ли пренебречь этими мезомасштабными эффектами при климатических расчетах.

В данной работе для оценки энергообмена атмосферы с океаном и роли орографических ветров Новой Земли в теплотерях океана, формировании морских течений и водных масс используется метод совместного мезомасштабного моделирования атмосферы и океана с учетом морского волнения и морского льда (модифицированная версия модели COAWST (Warner et al. 2010)). Высокое пространственное разрешение модели (3 км) и учет интерактивного взаимодействия разных сред позволяет реалистично воспроизводить турбулентный энергообмен и основные мезомасштабные процессы в атмосфере и океане.

Анализ результатов моделирования выявил несколько потенциально климатически значимых эффектов орографических ветров Новой Земли. Во-первых, зимой при восточном ветре топография Новой Земли в среднем по области моделирования приводит к уменьшению турбулентных потоков тепла над Баренцевым морем и, соответственно, к более медленному охлаждению океана при холодных вторжениях. Однако оценки энергообмена океана и атмосферы существенно зависят от способа учета взаимодействия атмосферы и волнения, т.е. от параметризации шероховатости морской поверхности. Также было обнаружено, что процесс уплотнения прибрежных вод у западного побережья архипелага существенно усиливается за счет орографических ветров. Полученные результаты подтверждают предположения о значимой роли зимней боры в формировании плотных вод, которые являются источником арктических донной и промежуточной водных масс.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Boldrin A., Carniel S., Giani M., Marini M., Bernardi Aubry F., Campanelli A., Grilli F., Russo A. Effects of bora wind on physical and biogeochemical properties of stratified waters in the northern Adriatic. *J. Geophys. Res.-Oceans*, 2009, 114, C08S92, <https://doi.org/10.1029/2008JC004837>
2. Pickart R. S., Spall M. A., Ribergaard M. H., Moore G.W.K., and Milliff R. F. Deep convection in the Irminger Sea forced by the Greenland tip jet. *Nature*, 2003, 424, 152–156.
3. Warner J.C., Armstrong B., He R., and Zambon J.B. Development of a Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) modeling system. *Ocean Modeling*, 2010, 35(3), 230–244.
4. Xie S. P., Xu H., Kessler W. S., Nonaka M. Air-sea interaction over the eastern Pacific warm pool: Gap winds, thermocline dome, and atmospheric convection. *Journal of Climate*, 2005, 18(1), 5–20.

Разработка систем прогнозирования опасных метеорологических явлений различных пространственно-временных масштабов на территории России

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

ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск, Россия
E-mail: kov@feerc.ru

Опасные метеорологические явления (ОМЯ) могут нанести серьезный ущерб жизни и здоровью людей, их имуществу, а также различным объектам хозяйственной деятельности человека. В свете современных тенденций на ежегодное увеличение числа регистрируемых опасных явлений по всему земному шару и, несмотря на уже имеющиеся определенные успехи в их прогнозировании, не теряет своей актуальности задача разработки новых методов и технологий, нацеленных на повышение заблаговременности оповещения о возможных угрозах, связанных с ОМЯ, а также на снижение числа неспрогнозированных случаев их появления.

В последние годы в НПО «Тайфун» ведутся работы по созданию для территории России систем прогнозирования ОМЯ различных пространственно-временных масштабов с учетом мирового опыта функционирования соответствующих систем, а также собственных наработок, в том числе с применением современных подходов к машинному обучению и к ведению базы знаний. В ходе работ прорабатываются методические вопросы прогноза на Европейской территории России (ЕТР) опасных явлений конвективного происхождения (ОЯ), таких как смерчи, шквалы, град, интенсивные грозы и ливни, а также вопросы прогноза полярных мезоциклонов (ПМЦ) в Арктическом регионе России. Важная роль отводится разработке готовых технологических решений по формированию новой информационной продукции для поддержки принятия решений о выдаче предупреждений об угрозах, связанных с возникновением рассматриваемых ОМЯ.

В основу работы положен широко используемый во многих странах подход к мультиступенчатой стратегии комплексного прогноза ОМЯ с постоянным его уточнением (по времени и по пространству). В данной работе был сделан акцент на двух ступенях прогноза: краткосрочный прогноз угроз возникновения ОМЯ на базе продукции численного моделирования атмосферы с заблаговременностью до 48 ч с выявлением областей регионального масштаба (несколько сот километров) потенциального риска возникновения ОМЯ и прогноз на ближайшие часы (наукастинг, до 2 ч) риска возникновения и последующей эволюции систем глубокой конвекции с использованием данных наземных и дистанционных наблюдений. Прогноз первой ступени дает представление о потенциальной возможности реализации опасности возникновения ОМЯ, в то время как прогноз второй ступени детализирует эту опасность, указывая на конкретные системы облачности, с которыми могут быть связаны опасные явления. При этом используется весь комплекс доступных данных моделирования и мониторинга. Ввиду недостаточно развитой сети наблюдений в Арктическом регионе России, прогноз ПМЦ пока ограничивается рассмотрением первой ступени.

На данный момент в НПО «Тайфун» в тестовом режиме функционирует прототип системы прогноза зарождения и перемещения ПМЦ в Арктическом регионе России, оправдываемость прогноза по авторским оценкам доходит до 70%. Это первый действующий прототип технологической линии прогноза ПМЦ в России. Прошла независимые испытания и используется в консультативном статусе технология оценки смерчопасности вблизи Черноморского побережья России, ведутся работы по ее усовершенствованию, в том числе с применением машинного обучения. Разработанная технология реализует единственную известную на сегодняшний момент автоматизированную методику прогноза смерчей в прибрежной акватории Черного моря. Разработана схема идентификации и прослеживания конвективных систем по данным о радиолокационной отражаемости. Обоснована возможность наукастинга ОЯ на ЕТР на базе грозопеленгационных (алгоритм Lightning Jump) и спутниковых данных (сигнатуры Overshooting Top, cold-U/V/ring), заблаговременность прогноза по полученным оценкам может доходить до 60 минут. Ведутся работы по выбору оптимальной комбинации предикторов угроз возникновения ОЯ на ЕТР, пока без конкретизации ожидаемого вида опасного явления.

Обзор качества данных прогностической модели GME/ICON для начальной заблаговременности по территории России за 2013–2022 гг.

¹Блинов Д.В., ^{1,2}Ревакотова А.П., ^{1,2}Ривин Г.С., ^{1,2}Розинкина И.А.

¹ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

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

E-mail: denisblinov@ya.ru

Проведение регионального численного прогноза погоды (ЧПП) требует начальных и граничных условий, которые зачастую подготавливаются интерполяцией данных с более грубой сетки. Обычно такими данными являются анализы и прогнозы из глобальной системы прогноза погоды. В Гидрометцентре России для численного краткосрочного прогноза с 2011 года оперативно используется система прогноза по ограниченной территории COSMO-Ru [1]. Ядром этой системы является модель COSMO одноименного консорциума. В качестве начальных и граничных условий используются данные глобальной модели немецкой службы погоды (DWD) [2,3,4].

Для понимания качества начальных данных авторами была проведена оценка данных нулевой заблаговременности глобальной модели DWD (GME до 2015 года, а потом ICON) за период 2013–2022 гг. При верификации использовались данные наблюдений с метеорологических и аэрологических станций на территории России.

Авторами проанализирована вариативность ошибок начальных данных по разным критериям. Выявлены зависимости точности начальных данных от времени года и времени суток инициализации прогноза для полей приземных температуры, точки росы, ветра. Также показана неоднородность ошибок по вертикали и для разных физико-географических районов. Выявлены существенные уменьшения ошибок для полей приземной температуры и точки росы из-за технологических изменений – при переходе от модели GME к ICON и последующем обновлении системы усвоения данных в 2015–2016 годах. Отмечено постепенное улучшение качества начальных данных для большинства метеоэлементов за период 2013–2022 гг.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ривин Г. С., Розинкина И. А., Астахова Е. Д. [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.
2. Majewski D., Liermann D., Prohl P., Ritter B., Buchhold M., Hanisch T., Paul G., Wergen W., 2002: The operational global icosahedral-hexagonal gridpoint model GME: Description and high-resolution tests. Mon. Wea. Rev. – 2002. – 130. – P.319–338.
3. ängl, G., D. Reinert, P. Ripodas, and M. Baldauf. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core. // Q. J. R. Meteorol. Soc. – 2015. №141. – P. 563–579.
4. Schraff, C., H. Reich, A. Rhodin, A. Schomburg, K. Stephan, A. Perianez, and R. Potthast, 2016: Kilo-metre-scale ensemble data assimilation for the COSMO model (KENDA). Q.J.R. Meteorol. Soc., 142, 1453–1472.

Исследование влияния городской параметризации TERRA-URB на прогноз температуры воздуха для городов Сибирского региона

^{1,2}Газимов Т.Ф., ¹Гочаков А.В.

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

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: tf.gazimov@gmail.com, gochakov@sibnigmi.ru

Исследование микро- и мезомасштабных климатических особенностей урбанизированных территорий является одной из актуальных задач на фоне глобальных климатических изменений, которой уделяется большое мировое внимание. Городской остров тепла (urban heat island – UHI) — одна из особенностей городского климата, возникающая вследствие антропогенного изменения естественных ландшафтов, в результате чего внутри города наблюдаются более высокие температуры (воздуха, поверхности земли, почвы) в сравнении с пригородными территориями [1].

В современных численных моделях прогноза погоды влияние городского полога параметризуется схемами различной вычислительной сложности и детальности, которые воспроизводят влияние специфики термодинамических и геометрических свойств городской поверхности на вышележащий слой атмосферы. Учет влияния городских особенностей является важной задачей, поскольку это позволяет не только скорректировать прогноз температуры для более корректного воспроизведения эффекта UHI, но также повысить качество прогноза других метеорологических явлений, в том числе и опасных, которые усиливаются в городах (например сильные осадки и грозы) [2].

В целях улучшения качества прогноза температуры воздуха для городов Сибири была использована схема параметризации городского полога TERRA-URB для региональной модели COSMO-RuSib с горизонтальным шагом сетки 2.2. км. Схема городского полога TERRA-URB в модели COSMO(CLM) позволяет учитывать особенности городской физики путем модификации начальных данных, почвенно-растительного модуля TERRA-ML и взаимодействий земля-атмосфера [3]. Обязательными параметрами для работы схемы являются: площадь непроницаемой поверхности (Impervious Surface Area – ISA) и среднегодовой антропогенный тепловой поток (Anthropogenic Heat Flux – AHF), которые могут быть получены с помощью программной системы EXTPAR (External Parameter for Numerical Weather Prediction and Climate Application). Также был подготовлен расширенный набор параметров с применением подхода, основанного на использовании локальных климатических зон (Local Climate Zones – LCZ), которые представляют собой области с однородными типами подстилающей поверхностью, сооружениями, материалами этих сооружений и видами деятельностью человека.

Для оценки влияния городской поверхности на местный климат городов сибирского региона был проведен ряд вычислительных экспериментов для июля 2022 года и января 2023 года. Расчеты проводились для доменной области, включающей в себя юг Западной Сибири, юг Красноярского края, а также территорию республик Хакасия и Тыва (50.49° с.ш., 71.56° в.д. – 56.65° с.ш., 96.87° в.д.) Использовались два набора параметров городского полога: полученные с помощью программной системы EXTPAR и сформированные с помощью локальных климатических зон. Были рассчитаны средняя (отклонение) и среднеквадратическая ошибка прогнозов температуры воздуха. Наиболее явный положительный эффект прослеживается зимой для крупных городов – Новосибирск и Красноярск. На основе полученных результатов сделан вывод о применимости схемы TERRA-URB для летнего и зимнего периодов на тер-

ритории Сибири. Требуется дальнейшие исследования по влиянию городских территорий на другие метеорологические параметры и расширение изучаемого периода.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Oke T.R, Mills G., Christen A., Voogt J.A. Urban climates. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 519 p.
2. Garbero V. et al. Evaluating the urban canopy scheme TERRA_URB in the COSMO model for selected European cities // Atmosphere. – 2021. – Т. 12. – №. 2. – С. 237.
3. Wouters H. et al. User guide for TERRA_URB v2. 2: The urban-canopy land-surface scheme of the COSMO model. – 2017.

Инициализация океана полными полями в ретроспективных сезонных прогнозах климатической модели ИВМ РАН

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

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

²ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

E-mail: mashatarasevich@gmail.com, volodinev@gmail.com

Изначально разработанная для моделирования климата на несколько десятков или сотен лет модель общей циркуляции атмосферы и океана ИВМ РАН (INMCM5) [1] недавно была применена для ретроспективных сезонных прогнозов. Для проведения экспериментов на сезонном временном масштабе для INMCM5 была разработана [2] схема подготовки начальных состояний в терминах аномалий: к модельной климатологии на дату старта прогноза прибавляется аномалия реанализа. Для построения начальных состояний атмосферы и деятельного слоя суши использовались данные реанализа ERA-Interim [3], океана — SODA3.4.2 [4], [5]. С использованием подготовленных таким образом начальных данных был посчитан [2] ансамбль ретроспективных прогнозов на зимние сезоны 1980/1981–2014/2015 годов. В работе [2] проведены интегральные оценки качества сделанных прогнозов. В [6] и [7] показано, что климатическая модель ИВМ РАН демонстрирует хорошую предсказуемость индексов северо-атлантического колебания (NAO) и тихоокеанско-североамериканского (PNA).

В рамках настоящей работы исследуется влияние способа задания начальных состояний океана на качество ретроспективных сезонных прогнозов INMCM5. Для выполнения настоящей работы в системе подготовки начальных состояний для климатической модели ИВМ РАН был реализован способ инициализации трёхмерных температуры и солёности океана полными полями. Для построения начальных состояний атмосферы и деятельного слоя суши используется реанализ ERA5 [8], океана и морского льда — SODA3.4.2. С подготовленных начальных данных выполнена серия ретроспективных прогнозов на зимние сезоны (ноябрь–февраль) 1993/1994–2009/2010 гг. Размер ансамбля составляет 20 членов.

Результаты ретроспективных сезонных прогнозов климатической модели ИВМ РАН, полученные с использованием инициализации полными полями, сравниваются с результатами расчётов, инициализированных в терминах аномалий, а также, мультимодельного ансамбля WMO, состоящего из 12 прогностических систем. Для верификации результатов серии ретроспективных прогнозов INMCM5 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. Коэффициенты корреляции вычисляются по средним за декабрь–февраль 1993/1994–2009/2010 гг значениям. Перед вычислением коэффициентов корреляции данные климатической модели 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 № 22-17-00247, инициализация океана полными полями) и Московского центра фундаментальной и прикладной математики в ИВМ РАН (соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2022-286, расчёт серии ретроспективных прогнозов на зимние сезоны). Расчёт серии ретроспективных сезонных прогнозов климатической модели ИВМ РАН выполнен на 1600 ядрах вычислительной системы Cray XC40-LC Главного вычислительного центра Гидрометцентра России.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Володин Е. М., Мортиков Е. В., Кострыкин С. В., Галин В. Я., Лыкосов В. Н., Грицун А. С., Дианский Н. А., Гусев А. В., Яковлев Н. Г. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН, Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2017, Т. 53, № 2, С. 164–178.
2. В. В. Воробьева, Е. М. Володин Экспериментальные исследования сезонной предсказуемости погоды, выполненные на основе климатической модели ИВМ РАН, Матем. Моделирование, 2020, Т. 32, № 11, С. 47–58.
3. Dee, D. P., et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, Quart. Journal. Roy. Meteorol. Soc., 2011, V. 137, pp. 553–597.
4. Carton, J. A., Chepurin, G. A., Chen, L. SODA3: A New Ocean Climate Reanalysis, Journal of Climate, 2018, V. 31, N. 17, pp. 6967–6983.
5. Carton, J. A., Penny, S. G., Kalnay, E. Temperature and Salinity Variability in the SODA3, ECCO4r3, and ORAS5 Ocean Reanalyses, 1993–2015, Journal of Climate, 2019, V. 32, N. 8, pp. 2277–2293.
6. Vasilisa Vorobyeva, Evgeny Volodin Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale, Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 2021, V. 73, N. 1, pp. 1–12.
7. Vorobyeva, V. V., Volodin, E. M. Analysis of the predictability of stratospheric variability and climate indices based on seasonal retrospective forecasts of the INM RAS climate model, Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, 2021, V. 36, N. 2, pp. 117–126.
8. 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.

Стохастическая физика в новой системе ансамблевого прогноза погоды на основе модели ПЛАВ20

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

¹ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

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

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

E-mail: ksusha_ast@mail.ru

Представлена новая система среднесрочного ансамблевого прогноза погоды, развиваемая 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. Вертикальное разрешение модели: 51 вертикальный уровень, верхняя граница модели - 5 гПа. Переход к ансамблевой системе на основе модели ПЛАВ20 обусловлен тем, что горизонтальное разрешение модели ПЛАВ20 гораздо ближе к разрешению детерминистской модели, в отличие от предыдущей версии ансамблевой системы на основе модели ПЛАВ с разрешением $0,9 \times 0,72$ градуса по долготе и широте соответственно.

Учет неопределенностей в начальном состоянии атмосферы производится путем введения аддитивной инфляции в ансамблевой системе усвоения данных. Для учета неопределенностей в блоке физических параметризаций в модели атмосферы ПЛАВ реализовано стохастическое возмущение параметров и тенденций параметризаций [3]. Также в модели подключен блок стохастического возмущения координат исходных точек полулагранжевых траекторий.

Планируется представить первые результаты работы новой ансамблевой системы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. М. А. Толстых, В. В. Шашкин, Р. Ю. Фадеев и др. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. 2017. 166 с.
2. Shlyaeva A., Tolstykh M., Mzyak 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. Mzyak, 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.

Оценка городского аэрозольного воздействия на радиационные и температурные характеристики атмосферы в Москве по данным численных экспериментов и измерений

^{1,2}Андросова Е.Е., ^{2,1}Чубарова Н.Е., ¹Кирсанов А.А., ^{3,1}Варенцов М.И., ^{1,2}Ривин Г.С.

¹ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

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

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

E-mail: elandrossova@gmail.com

Городское аэрозольное загрязнение оказывает значимое воздействие на радиационные процессы в атмосфере и ее температурно-влажностный режим, что в результате приводит к заметным климатическим эффектам.

Для оценки аэрозольных эффектов была использована конфигурация системы COSMO-Ru-ART с шагом сетки 2 км на примере условий мая 2019 года в Москве и прилегающих территориях. Начальные и граничные метеорологические условия получены из ICON-COSMO-Ru7 и ERA-5, граничные условия состава атмосферы – по данным реанализа CAMS, данные современных эмиссий загрязняющих веществ – из баз данных CAMS, ECLIPSE, EMEP с учетом их перераспределения по данным OpenStreetMap.

Для комплексной оценки антропогенного аэрозольного воздействия были проведены численные эксперименты с различным вкладом нескольких факторов: выбросов загрязняющих веществ, граничных условий химического состава атмосферы, а также параметров городской среды по схеме TERRA URB. Показано воздействие аэрозольного загрязнения на радиационные и метеорологические характеристики атмосферы в различных условиях. Качество оценки воспроизведения газово-аэрозольного состава у поверхности земли и в столбе атмосферы было проверено с использованием набора данных измерений ГПБУ «Мосэкомониторинг» и AERONET в Метеорологической Обсерватории МГУ (МО МГУ).

Показана согласованная тенденция роста приземных концентраций загрязняющих веществ вблизи автомагистралей. Проведены первичные оценки чувствительности солнечной радиации, температуры воздуха и городского острова тепла к аэрозолю с различными свойствами.

- Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, мегагрант № 075-15-2021-574 и в рамках научно-образовательной школы МГУ «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Прогнозирование опасных гидрологических явлений на территории Красноярского края

Аникин М.Н., Тасейко О.В.

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

E-mail: maxim.nikolaevich@icloud.com

Наводнения являются достаточно частыми гидрологическими явлениями, встречающимися на территории Красноярского края, представляющими угрозу жизни и здоровью людей и наносящими колоссальный материальный ущерб территориям. Территории края присущи сложные физико-географические и климатические условия, приводящие к возникновению и высокой повторяемости чрезвычайно опасных наводнений (ВНИИ ГОЧС, 2018).

По данным Енисейского бассейнового водного управления и государственным докладам на территории Красноярского края с 1967 по 2021 произошло более 1000 наводнений, в которых пострадало более 50 тыс. человек. На фоне снижения общего числа наводнений за рассматриваемый 50-летний период, значительно уменьшилось количество наводнений, вызываемых снеговыми паводками. В последние 20 лет наводнения связаны преимущественно сильными дождями и заторными явлениями. За исключением западных районов центральной части края, где основными причинами наводнений, по-прежнему, являются снеговой паводок и таяние снега. Также наблюдается увеличение общего количества наводнений в некоторых южных районах.

Применение статистических методов оценки рисков опасных гидрологических явлений позволило получить модель прогноза возникновения подобных явлений для разных категорий ущерба. Риск возникновения чрезвычайных ситуаций гидрологического характера очень высок в северных районах Красноярского края. Особая опасность связана с возможностью возникновения техногенных ЧС, вызванных затоплениями. Выполнено зонирование территории региона по гидрологической опасности для определения категорий хозяйственного использования с использованием геоинформационных систем.

Система усвоения данных для прогностической системы COSMO-Ru

¹Блинов Д.В., ^{1,2}Ревокатова А.П., ^{1,2}Ривин Г.С., ^{1,2}Розинкина И.А.

¹ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, Москва, Россия

В подавляющем большинстве национальных служб погоды используют результаты регионального гидродинамического моделирования как основной инструмент для краткосрочного прогноза погоды, включая опасные явления. В самом простом случае начальные условия моделирования для ограниченной территории получают с помощью интерполяции на нужную сетку данных из более грубой модели (Глобальной или региональной с более широким охватом территории). Процедура старта с начальных данных, не приспособленных под целевую модельную сетку и уравнения, называется «холодным стартом». По этой причине в первые часы прогноза могут наблюдаться эффекты несогласованности полей (спин-ап), а сами прогнозы в этот период предсказывают явления, характерные для более грубого разрешения.

Нивелировать эти эффекты возможно, если подготовить поля анализа для сетки, совпадающей с шагом модели. В таком случае имеется согласованность между разрешающей способностью модели и информацией начальных данных («теплый старт»). Для этого в региональной технологии необходимо использовать усвоение данных.

Для системы прогноза погоды COSMO-Ru [1] в Гидрометцентре России авторами была реализована система усвоения данных (СУД), позволяющая усваивать данные метеорологических наблюдений и формировать начальные данные на необходимой для моделирования сетке. В системе усвоения были использованы несколько методов. Во-первых, метод «подталкивания» (Nudging) [2], во-вторых, метод последовательной коррекции температуры подстилающей поверхности [1], и, в-третьих, «подталкивание скрытой теплоты» (Latent Heat Nudging, LHN) [3].

В докладе описываются результаты использования системы усвоения данных для COSMO-Ru с различными шагами сетки (7 и 2,2 км). Показывается их эффективность для разных метеоэлементов (значительнее всего уменьшились ошибки в поле приземной температуры) и возможности применения в оперативной технологии. Отмечено значительное уменьшение эффекта спинапа для полей облачности и осадков. Созданная система COSMO-Ru02 (горизонтальный шаг 2,2 км) с часовым обновлением данных наблюдений выступает в качестве прототипа разрабатываемой в настоящее время системы модельного наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза, аналогичного RUC (Rapid Update Cycle) в DWD и RUP (Rapid Refresh) в NCEP [4]. Она позволяет точнее предсказывать осадки и конвективные явления в первые 2-6 часов прогноза.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ривин Г. С., Розинкина И. А., Астахова Е. Д. [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.
2. Schraff C., Hess R. A. Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model Part III: Data Assimilation, Offenbach, 2012, www.cosmo-model.org.
3. Stephan K., Klink S., Schraff C. Assimilation of radar-derived rain rates into the convective-scale model COSMO-DE at DWD Q. J. R. Meteorol. Soc. 134: p. 1315–1326, 2008. <https://doi.org/10.1002/qj.269>
4. Stanley G. B. etc A North American Hourly Assimilation and Model Forecast Cycle: The Rapid Refresh. Amer. Meteor. Soc., p. 1669-1694, 2016. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0242.1>

Причины низкой водности рек на примере реки Енисей

Бутина В.М., Хиллюк А.В.

ФГБОУ ВО СибГУ им. академика М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия

E-mail: vichka.butinas@mail.ru

Несмотря на то, что объём выпадающих осадков в мире растёт год от года, а климат, в целом, становится более влажным - проблема обмеления рек становится все критичнее.

Обмеление — это целый комплекс причин: климатических, экологических, антропогенных, гидрологических, гидрогеологических и других.

Возможные причины обмеления реки Енисей:

- рост среднегодовых температур воздуха, зимой увеличивается продолжительность оттепелей и уменьшается глубина промерзания грунта. В результате талые воды уходят в почву, а тёплая затяжная весна приводит к тому, что влага испаряется и попадает в атмосферу, а не в водохранилища;
- сокращение площади лесов по берегам водных объектов. Леса сглаживают и паводки и засухи, передавая воду равномерно, - это стабилизирует уровень воды в реках;
- трубопроводы, которые пересекают реки, приводят к тому, что в этом месте образуется нанос песка и ила, тоже происходит обмеление.
- массовая застройка вдоль русла рек может приводить к тому, что из-за распашки полей талая вода уходит в почву и не доходит до водоема.

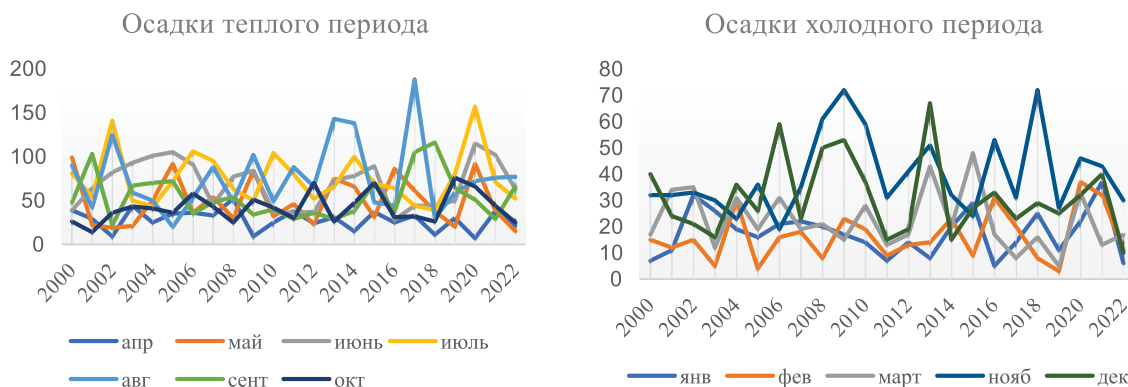


Рис. 1. Количество выпавших осадков в разные периоды года.

Проанализировав количество выпавших осадков за период 2000-2022 года, можно увидеть определенную закономерность в некоторых периодах. Маловодье — это сезонный либо многолетний период низкой водности. Данное опасное гидрологическое явление несёт очень много последствий — социальных, экономических, экологических. Наблюдаемый период маловодья встречается примерно один раз в 75-100 лет. Природе свойственна цикличность, но необходимость в развитии мониторинга, проведение специальных работ в руслах рек, изменение отношения к водоохранной зоне и к лесу в целом остается актуальным и требует повышенного внимания.

Изучение чувствительности численного прогноза погоды к усвоению радарных данных по территории

¹Гочаков А.В., ²Блинов Д.В., ^{1,3}Газимов Т.Ф.

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

²ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

³Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: gochakov@sibnigmi.ru, denisblinov@ya.ru, tf.gazimov@gmail.com

Основная область применения системы усвоения для численных моделей прогноза погоды - это подготовка наиболее точных начальных данных для прогноза. Помимо ошибок поля первого приближения, подготовленного из данных глобальных моделей, в региональных численных прогнозах погоды неточности в описании начальных данных могут быть связаны с использованием данных от более грубой модельной сетки, а также с отсутствием данных наблюдений. Для уменьшения ошибки начальных данных могут быть использованы измерения доплеровского метеорологического радиолокатора (ДМРЛ) в схеме усвоения скрытого тепла (latent heat nudging - LHN) для моделей COSMO и ICON. Основной принцип LHN состоит в том, чтобы скорректировать выделение скрытого тепла при интегрировании модели, что в свою очередь, приводит к изменению вертикальных скоростей и изменению количества осадков. Коррекция проводится на каждом временном шаге, используя отношение наблюдаемых и рассчитанных моделью осадков.

Различные схемы усвоения радарных данных используются во многих мировых прогностических центрах [1, 2]. Эффективность усвоения показана для первых часов прогноза осадков и сопутствующих конвективных явлений для региональных моделей с высоким пространственным разрешением (шагом горизонтальной сетки от 3-х километров) [3].

В работе рассматривается применение схемы LHN для «теплого» старта (начальное поле скорректировано работой системы усвоения при интегрировании модели на протяжении 6 часов модельного времени от интерполированного поля данных глобальной модели), реализованной для модели COSMO [4] с использованием двух радаров, расположенных на территории Западной Сибири. Внутри доменной области с горизонтальным шагом сетки 2.2 километра (50.49 СШ, 71.56 ВД, — 56.65 СШ, 96.87 ВД,) усваивались данные радиолокационного зондирования двух радаров, установленных в Барабинске (55.35 СШ, 78.3 ВД) и Новосибирске (55.01 СШ, 82.61 ВД). Использованы данные наблюдений радиолокационной отражаемости на уровне осадков (как правило, это 600 метров над уровнем антенны ДМРЛ), формируемые каждые 10 минут. Измерения конвертировались в значения интенсивности осадков по формуле Маршалла и Пальмера [5] на полярной сетке радарных данных и затем преобразовались на повернутую сетку COSMO с учетом геометрии радарных и модельных ячеек.

В работе исследуется чувствительность прогностических значений радиолокационной отражаемости (dbZ) и суммы накопленных осадков к количеству данных измерений, которые подаются на вход системы усвоения. Для этого выполнены модельные эксперименты для случаев, когда в системе усвоения используются данные двух радаров Новосибирск и Барабинск или данные каждого из радаров по отдельности, а также когда расчет выполняется без использования данных о радиолокационной отражаемости. Для анализа модельного отклика в этих сценариях сравниваются модельные поля накопленных осадков за период времени от 1 до 6 часов и поля накопленных осадков, передаваемое в виде обработанных данных ДМРЛ. Сравниваются поля прогностической и измеренной радиолокационной отражаемости. Оценивается отклик прогноза осадков в первые часы прогноза внутри и за пределами области усвоения по данным 12-часовых наблюдений на метеорологических станциях.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Jones C., B. Macpherson, A latent heat nudging scheme for the assimilation of precipitation data into an operational mesoscale model. Meteorol. Appl. 4, 1997, 269–277.
2. Jacques, D., D. Michelson, J. Caron, and L. Fillion, 2018: Latent Heat Nudging in the Canadian Regional Deterministic Prediction System. Mon. Wea. Rev., 146, 3995–4014, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0118.1>.
3. Stephan, K., S. Klink and C. Schraff, Assimilation of radar-derived rain rates into the convective-scale model COSMO-DE at DWD. Q.J.R. Meteorol. Soc., 134, 2008, 1315–1326. <https://doi.org/10.1002/qj.269>
4. 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 NTQCSO.
5. Marshall, J. S., and W. McK. Palmer. The distribution of raindrops with size. J. Meteor., 5, 1948, 165–166.

Повышение точности краткосрочных численных прогнозов погоды мезомасштабной модели WRF для территории Беларуси с использованием данных дистанционного зондирования Земли

Лысенко С.А., Зайко П.О.

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь
E-mail: lysenko.nature@gmail.com, pollyza24@gmail.com

Для повышения качества краткосрочного численного прогноза мезомасштабной модели WRF для территории Беларуси авторами были разработаны два основных подхода (*климатический и оперативный*) к актуализации геофизических характеристик подстилающей поверхности (землепользования, альbedo, индекса листовой поверхности (LAI), доли поглощенной фотосинтетически активной радиации (FAPAR)), используемых в качестве начальных для модели.

В *климатическом* подходе для инициализации модели WRF использовались обновленные среднемесячные данные более высокого пространственного разрешения, охватывающие большие временные периоды осреднения, отражающие направленность климатических изменений для территории Беларуси. Для актуализации классов землепользования использовалась цифровая модель Global Land Cover 2019 (GLC2019) [1, 2], являющаяся результатом обработки спутниковых наблюдений сканером высокого спектрального разрешения PROBA-V Европейского Космического Агентства, и имеющая достаточно высокое временное (1 год) и пространственное разрешение (100 м), отражающая современную пространственную структуру ландшафтов Беларуси. Авторами была произведена переклассификация исходных классов GLC2019 в категории землепользования USGS, по территории Европы. Для актуализации оригинальных среднемесячных геофизических характеристик подстилающей поверхности (альbedo, LAI, FAPAR) в модели WRF использовалась база данных GLASS (AVHRR, MODIS) Пекинского университета, содержащая данные с пространственным разрешением от 3 км до 500 м [3, 4]. Авторами были рассчитаны среднемесячные значения характеристик, а также 90-й и 5-й процентиля распределения для каждого пикселя, для каждого месяца, за период 2000–2020 гг., по всей территории Европы [5].

В *оперативном* подходе реализован учет ежедневных изменений параметров подстилающей поверхности, зачастую значительно отличающихся от среднемесячных климатических значений (установление снежного покрова, начало и конец вегетации и др.). В качестве исходных использовались спутниковые продукты высокого временного и пространственного разрешения спектрорадиометра MODIS (Terra/Aqua): альbedo (MCD43A3), с пространственным разрешением 500 м и 16-дневным осреднением, LAI и FAPAR MCD15A3H с 4-дневным осреднением и разрешением 500 м. Для ежедневной подготовки был разработан алгоритм выбора наилучшего пикселя, среди доступных во временном окне (10 дней) данных, позволяющий создавать спутниковый композитный продукт на основе оперативных и обновленных среднемесячных данных, применяемых для случаев пропусков спутниковых наблюдений.

Вычислительный эксперимент для оценки влияния описанных подходов к актуализации геофизических характеристик включал краткосрочный численный прогноз погодных условий (+48 ч) по модели WRF (более 180 случаев) за 2016–2022 года на территории Беларуси, включая дни с неблагоприятными явлениями в различные сезоны года, в двух пространственных разрешениях: 15 км – Европа, 3 км – Восточная Европа. В качестве начальных и боковых граничных условий применялись прогнозы глобальной модели GFS с шагом сетки $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ [6].

При использовании климатического подхода сокращение среднеквадратической (RMSE) ошибки численного прогноза температуры воздуха на 2 м для территории Беларуси составило 0,17 °C, 0,1 °C, 0,34 °C для заблаговременностей +12, +24, +36 ч соответственно. Наибольший эффект актуализация данных оказала на прогноз для ночных сроков холодного периода года: RMSE численного прогноза температуры воздуха на 2 м сократилась на 0,72 °C, 1,46 °C, 0,92 °C, 1,98 °C для сроков +12 ч, +24 ч, +36 ч и +48 ч соответственно. Максимальное сокращение абсолютной ошибки численного прогноза температуры воздуха на 2 м, относительно оригинального сценария модели WRF, отмечалось для конца января 2022 г. и составило 8,2 °C. Наиболее успешно данный подход проявил себя в численном прогнозе давления на уровне моря, где RMSE сократилась на 0,53 гПа, 0,78 гПа, 1,06 гПа, 1,42 гПа для тех же сроков.

С применением оперативного подхода к обновлению сокращение RMSE для приземной температуры воздуха составило 0,23 °C, 0,2 °C, 0,31 °C и 0,17 °C для сроков +12 ч, +24 ч, +36 ч, +48 ч соответственно. Для холодного периода года ошибка сократилась на 0,73 °C, 1,67 °C, 0,98 °C, 2,1 °C для обозначенных сроков прогноза. Для холодного периода года подход позволил сократить абсолютную ошибку численного прогноза приземной температуры, для станций с не оправдавшимися прогнозами, на 4,4 °C. Для 50

% промоделированных дней зимнего периода абсолютная ошибка прогноза температуры на 2 м уменьшилась на 5 °C и более, относительно оригинального сценария. Максимальное сокращение абсолютной ошибки численного прогноза температуры воздуха на 2 м, при оперативном подходе, составило 7,7 °C. В численном прогнозе осадков данный подход к актуализации позволил повысить общую оправдываемость на в среднем на 3 % (до 83 %) для текущего дня и ночи. Полученные значения ошибок говорят о перспективности использования предложенных подходов для численного прогнозирования по территории Беларуси в зимний период года.

Разработанные подходы прошли апробацию и адаптацию в Белгидромете Республики Беларусь (2022 г.), и рекомендованы для последующего внедрения и использования в холодный период года в технологическом процессе оперативного комплекса мезомасштабного моделирования атмосферных процессов по территории Беларуси на основе модели WRF.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Copernicus Global Land Operations «Vegetation and Energy»: Moderate Dynamic Land Cover 100 m, version 3 : algorithm theoretical basis document / M. Buchhorn, L. Bertels, B. Smets [et al.]. – [S. l. : s. n.], 2020. – URL: <https://zenodo.org/record/4723924#.Y4YJTXbP2Uk> (дата обращения 03.04.2021).
2. Do uncertainties in the reconstruction of land cover affect the simulation of air temperature and rainfall in the CORDEX region of East Asia? / J. Ge, A. Pitman, W. Guo [et al.] // J. of Geophys. Research Atmospheres. – 2019. – Vol. 124, iss. 7. – P. 3647–3670.
3. Use of general regression neural networks for generating the GLASS leaf area index product from time-series MODIS surface reflectance / Z. Xiao, S. Liang, J. Wang [et al.] // IEEE Trans. on Geoscience a. Remote Sensing. – 2014. – Vol. 52, iss. 1. – P. 209–223.
4. A long-term global land surface satellite (GLASS) data-set for environmental studies / S. Liang, X. Zhao, S. Liu [et al.] // Intern. J. of Digital Earth. – 2013. – Vol. 6, iss. suppl. 1. – P. 5–33.
5. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP) : 1. Model description and evaluation with local-scale measurements / G.-Y. Niu, Z.-L. Yang, K. E. Mitchell [et al.] // J. of Geophys. Research Atmospheres. – 2011. – Vol. 116, iss. 12. – Art. № D12109.
6. Global Forecast System (GFS). – URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast> (дата обращения: 07.02.2019).

Оценка риска возникновения смерчей вблизи Черноморского побережья России: двухступенчатая стратегия прогноза

Калмыкова О.В.

ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск, Россия
E-mail: kov@feerc.ru

По современным оценкам ежегодно в России регистрируют около 70 водяных смерчей. Основная масса случаев (порядка 50) приходится на Черноморское побережье России.

Смерчи над Черным морем наблюдаются в среднем 30 дней в году (с мая по октябрь). От одного до четырех смерчей в год выходят на сушу. Для прогноза черноморских смерчей автором была разработана специализированная методика, включающая в себя две ступени прогноза: краткосрочный прогноз смерчопасных областей на базе выходной продукции модели COSMO-Ru2 и прогноз в реальном времени угроз возникновения смерчей из диагностированных систем облачности (наукастинг). Для расчетов по методике была разработана технология выпуска прогнозов смерчопасности, в том числе по различным участкам побережья. Технология прошла независимые испытания и в части оценки областей вероятного возникновения смерчей была внедрена в работу региональных Гидрометцентров.

Основу краткосрочного прогноза в теплый конвективный период составляет специально разработанный региональный индекс смерчопасности WRI. Работа индекса базируется на выявлении ситуаций, при которых высока вероятность смерчегенеза над водной поверхностью. При этом рассматривается следующий набор индикаторов: наличие локальной завихренности (горизонтального сдвига ветра) в приводном слое, высокая влажность в нижнем слое атмосферы, интенсивная конвекция и небольшой вертикальный сдвиг ветра в нижнем слое атмосферы. В формулу расчета индекса входят шесть предикторов, для каждого из которых определены региональные пороговые значения. Индекс WRI в текущей версии его расчета обеспечивает распознавание угроз возникновения как «классических» водяных

смерчей, возникающих при больших значениях разности температуры воды и воздуха (за счет термической конвекции), так и в условиях вынужденной конвекции (на фронтах). Последние имеют большую вероятность выхода на сушу. Предупрежденность смерчей по индексу WRI доходит до 92%.

В более холодный и менее смерчопасный период с ноября по апрель свою эффективность в рассматриваемом регионе показал известный метод номограммы Szilagyi, изначально разработанный для прогноза водяных смерчей над Великими американскими озерами. В настоящий момент ведется работа по анализу условий формирования нетипичных «зимних» смерчей над Черным морем, по результатам которой предполагается выработать ряд методических рекомендаций по их прогнозу, в том числе построить региональную версию номограммы Szilagyi.

Краткосрочный прогноз смерчопасности дает общее представление о потенциальных угрозах образования смерчей. Для более детальной оценки возможности реализации этих угроз на второй ступени прогноза с использованием моделей машинного обучения выявляются облачные системы, из которых могут сформироваться смерчи. Модели были обучены на выборке данных о водяных смерчах над Черным морем за период с 2019 по 2021 гг. В качестве входных параметров в моделях используются значения радиолокационных характеристик конвективных облаков. Модели позволяют диагностировать облака с уже образовавшимися смерчами, а также заблаговременно (от 10 мин до нескольких часов) выявлять опасность смерчегенеза. Предупрежденность смерчей по композиции моделей доходит до 75%.

Использование пакета верификации METplus при проведении авторских испытаний системы прогноза погоды COSMO-Ru/icon

^{1,2}Кирсанов А.А., ¹Бундель А.Ю., ^{1,3,4}Тарасова М.А., ¹Астахова Е.Д., ¹Шувалова Ю.О.

¹ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

E-mail: heu3becteh@mail.ru

Пакет верификации MET (Model Evaluation Tools) [Newman, K. et al. 2022] с надстройкой METplus [McCabe, G. et al. 2022] – гибкий инструмент верификации с широким выбором статистических показателей успешности прогноза погоды, кандидат на мировой стандарт в качестве пакета верификации. METplus разрабатывается и поддерживается Developmental Testbed Center (DTC) (NCAR/Research Applications Laboratory (RAL), NOAA/Earth Systems Research Laboratories (ESRL), NOAA/Environmental Modeling Center, EMC), США. Разработка MET продолжается с 2008 года. С этого времени появилось много надстроек и дополнительных возможностей, дополнительных инструментов для работы с результатами MET и упрощающих их получение. Исходный код MET открытый, преимущественно на языке программирования C/C++, с отдельными библиотеками на Fortran, надстройками на Python и дополнительными инструментами, связанными с другими языками программирования.

Авторами установлен пакет верификации MET с надстройкой METplus на суперкомпьютере "CRAY XC40-LC" Главного вычислительного центра Росгидромета, также проведена установка пакета METviewer, который позволяет с использованием графического интерфейса выполнять агрегацию данных, выбирать различные способы их предоставления.

Были рассчитаны различные оценки успешности системы прогноза погоды COSMO-Ru/ICON-Ru по реальным данным в тестовом режиме. Были применены, в том числе, вероятностные и пространственные методы верификации. Рассматриваются полученные результаты.

Пробные запуски системы показали ее применимость для проведения как авторских, так и оперативных испытаний, оптимально в дополнение к основным инструментам MET, использовать также возможности пакета METviewer, который позволяет с использованием графического интерфейса выполнять агрегацию данных, выбирать различные способы их предоставления. Проводятся эксперименты по применению METplus для оценки долгосрочных прогнозов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Newman, K., J. Opatz, T. Jensen, J. Prestopnik, H. Soh, L. Goodrich, B. Brown, R. Bullock, J. Halley Gotway, 2022: The MET Version 10.1.2 User's Guide. Developmental Testbed Center. Available at: <https://github.com/dtcenter/MET/releases>

2. McCabe, G., J. Prestopnik, J. Opatz, J. Halley Gotway, T. Jensen, J. Vigh, M. Row, C. Kalb, H. Fisher, L. Goodrich, D. Adriaansen, M. Win-Gildenmeister, J. Frimel, L. Blank, T. Arbetter, 2022: The METplus Version 4.1.4 User's Guide. Developmental Testbed Center. Available at: <https://github.com/dt-center/METplus/releases>.

Исследование качества воспроизведения колебания Маддена-Джулиана в модели ПЛАВ

¹Костин Л.А., ^{2,3}Фадеев Р.Ю., ^{2,3}Толстых М.А.

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

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

³ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

E-mail: www.lenja5@mail.ru

Колебание Мэддена-Джулиана (КМД) является характерной чертой внутрисезонной изменчивости атмосферы. КМД модулирует тропические осадки и играет большое значение для прогноза погоды и моделирования изменений климата Земли. Зависящее от времени состояние КМД описывается индексами КМД, которые рассчитываются с помощью иногда сложных статистических подходов с использованием метеорологических переменных. Одним из таких индексов является RMM. Он определяется на основе нескольких величин: уходящего длинноволнового излучения и значений ветров на высотах, соответствующих 850 и 200 гПа. Данный индекс имеет большое значение для определения изменчивости осадков и ветра в значительной части тропиков и, следовательно, является одним из наиболее важных повторяющихся паттернов изменчивости в системе атмосфера-океан. Для вычисления данного индекса в реальном времени (прогнозирования) существует методология, описанная в [1]. Согласно ей, на первом этапе анализа из исходных данных, упомянутых выше, находятся аномалии, путем вычитания из исходных величин климатологии и первых 3-х гармоник годового цикла. Аномалия – отклонение от климатологии. Климатология – среднее значение каждой точки сетки каждого дня года за несколько лет. Этот сезонный цикл является плавно меняющейся функцией времени года. На втором этапе вычитается среднее значение предыдущих 120 дней аномалий для каждого поля. Так по данным прогноза одного из полей на 1-й день это будет среднее значение за последние 119 дней аномалий анализа плюс за 1-й день аномалии прогноза. Для прогноза на 15-й день это будет среднее значение аномалий за последние 105 дней анализа плюс аномалии прогноза за 15 дней. После этого находится среднее меридиональное значение каждого поля данных по широтам 15Ю-15С. Далее эти поля делятся на коэффициенты нормализации, которые соответствуют стандартным отклонениям от полей, полученных на предыдущем этапе. Последним шагом является использование этих нормализованных полей для нахождения основных компонент, которые и определяют искомые индексы RMM. Данные компоненты можно получить с помощью многомерного эмпирического анализа ортогональных функций.

В результате можно построить график первых двух основных компонент, описывающий амплитудное изменение КМД от времени рис.1.

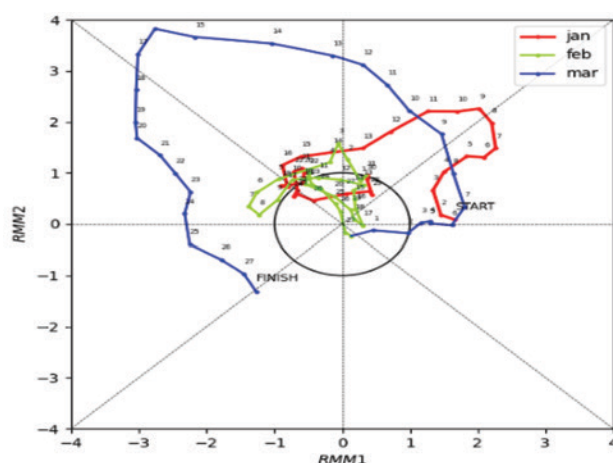


Рис. 1. The CAS/WCRP Working Group on Numerical Experimentation (WGNE) and WCRP/WWRP/THORPEX YOTC Madden-Julian Oscillation Task Force. January 2013.

Исследование влияния параметризации аэродинамического сопротивления на прогноз поверхностного волнения под действием урагана

Кузнецова А.М., Байдаков Г.А., Досаев А.С., Троицкая Ю.И.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН», Нижний Новгород, Россия

E-mail: alexandra@ipfran.ru

Исследовано влияние мелкомасштабных процессов в пограничном слое океан-атмосфера, таких как брызги и пена, на прогноз поверхностного волнения в условиях ураганного ветра на примере урагана Ирма. Приведены оценки влияния включения точного количества брызг типа «парашют» [1-3] на результирующий коэффициент аэродинамического сопротивления. Для оценок было выполнено численное моделирование в волновой модели WAVEWATCH III. Были протестированы параметризации ветроволнового взаимодействия ST4 и ST6 в волновой модели WAVEWATCH III. Кроме того, были исследованы параметризации ST1 и ST6, использованные совместно с предложенной параметризацией коэффициента аэродинамического сопротивления, учитывающие присутствие брызг и пены [4]. Эта параметризация была имплементирована в волновую модель WAVEWATCH III на основе модулей w3flx1md и w3flx4md для использования в параметризациях ST1 и ST6 соответственно. Полученные результаты сравнивались с данными буев NDBC. Показана важность учета мелкомасштабных процессов в пограничном слое океана и атмосферы, таких как брызги и пена, в численных моделях ветрового волнения.

■ Данная работа поддержана грантом РФФИ № 19-17-00209.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Troitskaya, Y. I.; Ermakova, O.; Kandaurov, A.; Kozlov, D.; Sergeev, D.; Zilitinkevich, S. Fragmentation of the “bag-breakup” type as a mechanism of the generation of sea spray at strong and hurricane winds Doklady Earth Sciences 2017, 1330-1335.
2. Troitskaya, Y. I.; Kandaurov, A.; Ermakova, O.; Kozlov, D.; Sergeev, D.; Zilitinkevich, S. Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds. Scientific reports 2017. v. 7. №1. p. 1614.
3. Troitskaya, Y.; Druzhinin, O.; Kozlov, D.; Zilitinkevich, S. The “Bag Breakup” Spume Droplet Generation Mechanism at High Winds. Part II: Contribution to Momentum and Enthalpy Transfer. Journal of Physical Oceanography 2018, v. 48, №9, pp. 2189-2207.
4. Troitskaya, Y.; Druzhinin, O.; Gladskikh, D.; Ermakova, O.; Soustova, I. Simulation of inertial droplet dispersion and the spray mediated fluxes in the atmospheric boundary layer above waved water surface: a Lagrangian stochastic model versus direct numerical simulation. Boundary Layer Meteorology 2022.

Автоматизированная технология прогноза зарождения и перемещения полярных мезоциклонов для Арктического региона России

Петриченко С.А., Калмыкова О.В., Козлов С.В., Кулижникова Л.К.

ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск, Россия

E-mail: psa@rpatyphoon.ru

Полярный мезомасштабный циклон (ПМЦ) – это интенсивный морской циклон с горизонтальными размерами в среднем 200 - 600 км, часто сопровождающийся опасными погодными явлениями. Полярные мезоциклоны развиваются во всех морских районах с открытой водой, примыкающих к морским льдам или холодным массивам суши. Максимальное количество ПМЦ в северном полушарии наблюдается в Гренландском, Норвежском и Баренцевом морях.

Прогноз ПМЦ до настоящего времени остается актуальной проблемой.

Полярные мезовихри могут иметь различные механизмы образования. Основные, по современной классификации, это бароклинные и конвективные типы мезоциклонов.

Нами было предложено использовать для прогноза ПМЦ индексы конвективной неустойчивости. Поля различных конвективных индексов могут иметь особенности в областях мезоциклонов, возникающих при различных синоптических ситуациях, поскольку связаны как с термическими, так и с динамическими характеристиками атмосферных процессов. Расчет полей конвективных индексов для уже идентифицированных ПМЦ и их сопоставление с наблюдаемыми характеристиками позволили выделить ограниченный перечень этих индексов в качестве предикторов. Для каждого используемого индекса были определены региональные пороговые значения. Суперпозиции их полей, по нашему мнению, дают возможность вероятностного прогнозирования зарождения и формирования прогностической траектории перемещения рассматриваемого ПМЦ.

На основе полученных результатов была разработана технологическая линия, в состав которой входит полярная версия модели WRF (PWRF) и комплекс программ (в том числе и программ запуска расчетов по расписанию), позволяющих в автоматическом режиме формировать вероятностные прогностические карты угроз возникновения и перемещения ПМЦ в заданном районе. Расчетная область включает в себя практически всю акваторию Баренцева и Карского морей, а также западную часть моря Лаптевых – это области, где сравнительно часто наблюдаются ПМЦ. В качестве начальных и граничных условий при проведении расчетов используются прогностические данные глобальной модели GFS с разрешением $0,5^\circ$ (счет от 00ч UTC).

Последовательность расчета прогноза зарождения и перемещения ПМЦ следующая. В процессе расчета по модели PWRF формируются выходные файлы, содержащие прогностические данные по стандартным метеозлементам в узлах заданной расчетной сетки. На их основе рассчитываются поля индексов конвективной неустойчивости атмосферы. На базе выбранной конфигурации индексов строится поле вероятности образования ПМЦ с учетом предположения о том, что чем больше индексов идентифицировали закритическую область, тем больше вероятность того, что в этой области может быть обнаружен ПМЦ. В выделенных зонах с 70% вероятностью возникновения ПМЦ на построенном пространственном распределении вероятностей рассчитываются геометрические центры масс предполагаемых ПМЦ. Расчеты проводятся для каждого момента времени исходного прогноза. По результатам сопоставления центров масс, рассчитанных за последовательные моменты времени, производится их объединение по принадлежности к одному и тому же ПМЦ. Таким образом, формируется прогностическая траектория перемещения рассматриваемого ПМЦ.

На заключительном этапе работы осуществляется построение карт прогностических траекторий перемещения центров областей с заданной вероятностью обнаружения ПМЦ. Эти траектории, по нашему мнению, в определенной степени отражают возможную картину перемещения реального мезоциклона. Проводится дополнительная оценка возможного влияния прогнозируемого ПМЦ на социально и экономически значимые зоны в пределах Арктического региона России, через которые в том числе проходит Северный морской путь.

Разработанная технологическая линия была запущена в работу в тестовом режиме последовательно: с ноября 2021 года – прогноз возникновения ПМЦ, с августа 2022 года – прогноз перемещения ПМЦ. Оправданность прогноза, по нашим текущим оценкам, доходит до 70%.

Экстремальная молниевая активность в арктическом регионе

Попыкина А.П., Ильин Н.В., Сарафанов Ф.Г.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН», Нижний Новгород, Россия

E-mail: ocealen@ipfran.ru, ilyin@ipfran.ru, fg.sarafanov@ipfran.ru

Потенциальная связь глобального потепления с общим ростом молниевой активности на Земле обсуждается во многих работах [1,2]. Поскольку молнии возникают в облаках с сильно развитой конвективной структурой, более сильный прогрев воздуха вблизи поверхности Земли, приводящий к усилению конвекции, может повлечь за собой рост молниевой активности. В последние годы наблюдается рост молниевой активности в полярных широтах (севернее 65° с.ш.), который коррелирует с температурной аномалией [3].

В данной работе рассматриваются три наиболее сильных грозовых события с количеством вспышек от 527 до 1007 севернее 80° с.ш. по данным грозопеленгационной сети WWLLN (10.08.2019, 01.07.2020, 29.07.2021). Граница 80° с.ш. выбрана, чтобы гарантировано определить экстремальную грозовую активность в приполярном регионе. Характерной особенностью выделенных крупных событий является накопление энергии грозы над сушей и распространение грозы с материка в сторону Северного полюса.

Предположительно, причиной аномальной грозовой активности может быть нехарактерно сильный прогрев поверхности Земли. Для выбранных дней максимальной грозовой активности было проведено погодное моделирование с помощью численной модели Weather Research and Forecasting (WRF) model. По данным моделирования, в областях грозовой активности (критерий по радиолокационной отражаемости: значение максимальной радиационной отражаемости в столбе превышает 45 дБЗ) температура поверхности достигает 32 градусов Цельсия.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Price, C.G. Lightning Applications in Weather and Climate Research. *Surv Geophys* 34, 755–767 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9218-7>
2. Price, C. (2009). Thunderstorms, Lightning and Climate Change. In: Betz, H.D., Schumann, U., Laroche, P. (eds) *Lightning: Principles, Instruments and Applications*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9079-0_24
3. Holworth, R. H., Brundell, J. B., McCarthy, M. P., Jacobson, A. R., Rodger, C. J., & Anderson, T. S. (2021). Lightning in the Arctic. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091366. <https://doi.org/10.1029/2020GL091366>

SBP-SAT метод горизонтальной аппроксимации уравнений динамики атмосферы на сетках с локальным повышением разрешения

¹Третьяк И.Д., ²Гойман Г.С., ²Шашкин В.В.

¹Национальный исследовательский университет Московский институт электронной техники, Москва, Россия

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

E-mail: Tretyak01D@gmail.com

Введение. Глобальное повышение разрешения расчетной сетки сопряжено с быстрым ростом требуемых вычислительных ресурсов. Одним из возможных вариантов решения этой проблемы является локальное повышение разрешения расчетной сетки в областях интереса. Мы исследуем метод локального повышения горизонтального разрешения на основе SBP-SAT подхода в рамках модели мелкой воды, что является общепринятой практикой для первичного тестирования новых численных методов.

SBP-SAT подход. Предлагаемый метод состоит в использовании аппроксимаций производных по пространству, для которых выполняется свойство суммирования по частям (или SBP-свойство), которое является дискретным аналогом формулы интегрирования по частям. На границах блоков формулируются условия неразрывности решения в слабой форме специальным образом, для обеспечения глобального выполнения SBP-свойства.

При таком методе аппроксимации можно доказать выполнение дискретных аналогов законов сохранения массы и энергии, теореме об устойчивости для линеаризованной системы, обеспечить высокие порядки аппроксимации при достаточно невысоких вычислительных затратах.

Тестирование SBP-SAT подхода. Для примера приводятся результаты теста, заключающегося в воспроизведении неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Задаются два струйных течения, находящихся в неустойчивом геострофическом равновесии, в них вносятся два возмущения малой амплитуды и наблюдается рост волн и развитие геострофической турбулентности.

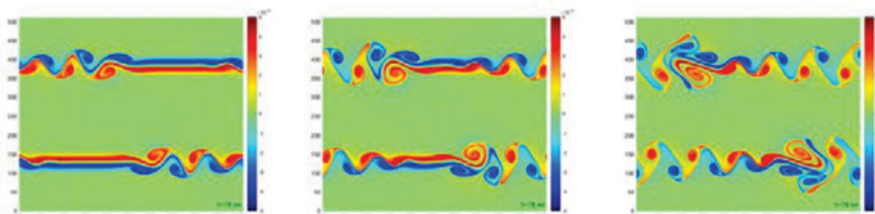
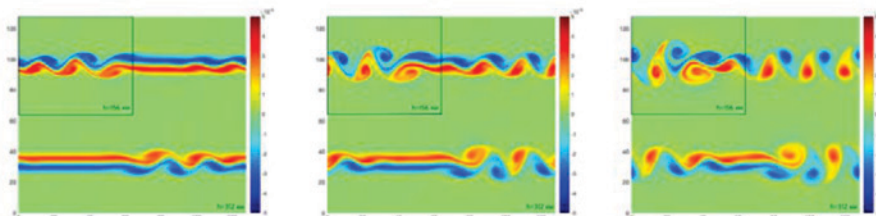


Рисунок 1. Поле относительной завихренности эталонного решения (512x512 точек, 10-12-15 суток).

Рисунок 2. Поле относительной завихренности численного решения с локальным сгущением (128x128 и 256x256 точек, 10-12-15 суток).



Можно отметить повышение эффективного разрешения в области со сгущением сетки. Кроме того, в верхней половине плоскости, наблюдается лучшее соответствие решения эталонному, чем в нижней половине и вне блока с повышенным разрешением.

Краткосрочный прогноз радиационных потоков у земной поверхности модели ICON-Ru с блоком ecRad и схемой McICA

¹Шувалова Ю.О., ^{2,1}Чубарова Н.Е., ¹Шатунова М.В., ¹Кирсанов А.А., ¹Бундель А.Ю.,
^{2,1}Тарасова М.А.

¹ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

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

E-mail: shuvalova@mecom.ru

В связи с ростом горизонтального разрешения моделей численного прогноза погоды возникает вопрос необходимости учета трехмерных радиационных эффектов. Это приводит к значительному росту вычислительных ресурсов, поэтому большее распространение получают схемы, способные описать неоднородность облачности внутри ячейки и связанные с этой неоднородностью эффекты облачно-радиационного взаимодействия (Hogan and Bozzo, 2016). С другой стороны, важным фактором точного прогноза радиационных потоков является прогноз облачности, ее оптических и микрофизических свойств (Шатунова и др., 2020).

В данной работе представлено исследование радиационных потоков у земной поверхности модели численного прогноза погоды ICON-Ru с применением блока ecRad и схемы радиационного переноса McICA. Для анализа облачных характеристик – водности и ледности облаков, водосодержания, эффективного радиуса облачных и капель и оптической толщины облаков мы использовали данные наземных измерений сети Cloudnet (Illingworth et al., 2007; <https://cloudnet.fmi.fi>) и спутниковые наблюдения MODIS (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>). Сравнение радиационных потоков выполнено с применением данных сети BSRN (<https://bsrn.awi.de>). Верификация проводилась с использованием системы верификации MET (Model Evaluation System). В исследовании показаны оптические и микрофизические характеристики облачности как один из наиболее важных факторов успешного прогноза радиационных потоков у земной поверхности и температуры воздуха на уровне 2 м.

- Исследование ICON-Ru с радиационной схемой ecRad и двухмоментной микрофизической схемой выполнено в рамках Научно-исследовательской Работы Росгидромета АААА-А20-120021490079-3. Анализ облачно-радиационных эффектов проведен при поддержке Правительства Российской Федерации (грант № 075-15-2021-574).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Шатунова М.В., Хлестова Ю.О., Чубарова Н.Е. Прогноз микрофизических и оптических характеристик крупномасштабной облачности и ее радиационного воздействия с помощью мезомасштабной модели численного прогноза погоды COSMO // Оптика атмосферы и океана. – Т.32. – №.10. – С.824-831.
2. Hogan R. J., Bozzo A. ECRAD: A new radiation scheme for the IFS. – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2016. 35 pp.
3. Illingworth A.J., Hogan R.J., O'Connor E.J., et al. Cloudnet: Continuous evaluation of cloud profiles in seven operational models using ground-based observations// Bulletin of the American Meteorological Society. – Vol.86. – №.6. – PP.883-898.

СЕКЦИЯ II

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

CITES'2023

МЕЖДУНАРОДНАЯ МОЛОДЕЖНАЯ ШКОЛА И КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-ИНФОРМАЦИОННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ ДЛЯ НАУК ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Исследование роли арктических шельфовых морей в формировании ледовых и гидрологических полей Северного Ледовитого океана в условиях меняющегося климата Земли

Голубева Е.Н., Градова М.А., Крайнева М.В., Якшина Д.Ф.

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

Более 45% дна Северного Ледовитого океана (СЛО) занимает шельф. В условиях резко сокращающегося ледяного покрова СЛО и увеличения продолжительности безледного периода арктических шельфовых морей естественно предполагать, что климатические изменения будут отражаться на характере процессов, определяющих взаимодействие вод шельфовых и глубоководных районов СЛО. В рамках этого предположения целью исследования является выявление физических процессов, протекающих в шельфовой области и оказывающих наибольшее влияние на формирование ледяного покрова и термохалинной структуры глубоководных районов СЛО. Исследование проводится на основе использования трехмерной численной модели океана и морского льда SibCIOM и данных атмосферного реанализа NCEP/NCAR.

Проведенное численное моделирование показывает, что раннее освобождение арктических морей ото льда повышает роль ветра в формировании течений в шельфовой области, что способствует переносу пресных вод арктических рек в глубоководную часть бассейна. Интенсивно поступающие в шельфовые моря в летний период пресные воды рек, распространяясь в северном направлении к материковому склону, способствуют формированию слоя холодного галоклина, поддерживающего устойчивую стратификацию вод СЛО. Анализ траекторий модельных трассеров, которые поступают в шельфовую зону в районах, соответствующих устьям арктических рек, демонстрирует, что среднее время нахождения трассеров сибирских рек в акватории моря в современный период (после 2000 г.) сократился примерно в 2 раза по сравнению со второй половиной 20 века.

Проанализировано влияние теплового стока сибирских рек на изменение гидрологических и ледовых полей СЛО в период 2000-2020 гг. Наиболее выражено влияние теплового стока рек в шельфовых районах, особенно вблизи устьев рек. В глубоководной части СЛО значение речного тепла в среднем за весь период не превышает 1.5%. Вместе с тем отмечено увеличение вклада речного тепла в процесс сокращения морского льда в арктическом бассейне в конце второго десятилетия настоящего столетия. В отличие от шельфовых районов, где влияние теплового стока рек на ледяной покров проявляется в весенне-летний период, в глубоководной части бассейна аномалии в толщине льда, обусловленные учетом речного тепла, возникают в осенне-зимний период.

В качестве основного метода определения наиболее значимых физических механизмов, формирующих изменчивость модельных полей, рассматривается постановка сценарных численных экспериментов, направленных на исследование чувствительности моделируемых гидрологических переменных к вариациям внешнего воздействия, в частности, к формированию блокирующих атмосферных процессов в арктических шельфовых морях и прилегающей акватории в течение 5-летнего периода 2016-2020 гг. Анализ результатов моделирования показывает, что вариации ветрового и термического воздействия над шельфовой областью приводят к изменениям характеристик прилегающей глубоководной части СЛО. Повышение среднегодовой температуры воздуха над морями Карским и Лаптевых на 2.5 °C в течение пяти модельных лет наиболее сильно влияет на состояние морского льда в шельфовой области. В прилегающей глубоководной акватории изменения в моделируемой толщине льда накаплива-



ются постепенно, не превышая в первый год 5-10 см. В последующие годы за счет сокращения льда происходит летний прогрев поверхностного слоя, что при близких к нулю температурах арктического бассейна может повышать плотность вод. Сокращение ледяного покрова также усиливает роль ветра в перемешивании водных масс. В конечном итоге в численной модели это приводит к увеличению глубины перемешивания и охлаждению промежуточного слоя вод. Понижение приземной температуры в морях Лаптевых и Карском, наоборот, способствует увеличению толщины льда, причем интенсивность и пространственный отклик этого процесса намного больше, чем случае повышения температуры атмосферы. Вместе с тем, наличие льда препятствует интенсивному осенне-зимнему перемешиванию верхнего слоя океана, что позволяет сохранить тепло распространяющихся вдоль материкового склона атлантических вод.

Исследование влияния возможных климатических изменений на состояние гидрологических и ледовых полей морей Сибирского шельфа

Крайнева М.В., Градова М.А.

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

E-mail: gradova.ma.22@gmail.com

В данной работе проанализированы сезонные и межгодовые изменения гидрологических и ледовых характеристик морей Сибирского шельфа на основе прогностических расчетов, выполненных с помощью региональной численной модели океана и морского льда SibCIOM (Siberian Coupled Ice-Ocean Model), разработанной в ИВМиМГ СО РАН. Расчеты проводились для периода 2015-2100 гг. В качестве атмосферного форсинга использовались имеющиеся в открытом доступе ежедневные данные архива моделей климатической системы, участвующих в проекте CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project). Выбраны следующие модели с наиболее полным набором представленных характеристик (как атмосферных, так и океанических): IPSL-CM6A-LR, ACCESS-ESM 1.5., MPI-ESM1-2HR, GFDL-CM4 и BCC-CSM2-MR. Расчетные поля моделей получены по социально-экономическому сценарию SSP5-8.5, считающемуся экстремальным и предполагающему интенсивную эксплуатацию ресурсов ископаемого топлива с высоким процентным содержанием угля и энергоемких технологий. Исследование акцентировалось на анализе изменчивости в шельфовой области сибирского сектора Арктики.

По результатам численных экспериментов модели SibCIOM изменения среднемесячного объема льда, просуммированного по акватории морей Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского, демонстрируют сокращение льда в Карском море и море Лаптевых, начиная с 30-40-х годов. Наиболее интенсивно процесс сокращения объема льда происходит с атмосферным форсингом модели IPSL-CM6A-LR. Численные результаты показали, что одним из основных механизмов, влияющих на толщину льда в моделях, является поток нисходящей длинноволновой радиации. Его коррекция (изменение в пределах 5-10%) приводит к существенному изменению объема ледяного покрова арктических морей и темпов его сокращения. Сравнение с аналогичными значениями, полученными по моделям климатической системы, показывают значительные различия в моделируемом объеме льда. Для установления соответствия между результатами климатических моделей и прогностическим расчетом на основе модели SibCIOM коррекция потока нисходящей длинноволновой радиации должна проходить индивидуально для каждого атмосферного форсинга.

Анализ аномалий температуры придонного слоя вод относительно периода 2015-2020 гг. для каждого из прогностических экспериментов модели SibCIOM позволил выявить тенденции накопления тепла в шельфовых морях до конца XXI века. Заметное потепление в придонном слое сибирских шельфовых морей начинает происходить после 2030-х годов в экспериментах с форсингом по данным IPSL-CM6A-LR и ACCESS-ESM 1.5. и после 2040-х годов в экспериментах с использованием данных трех других моделей. Наиболее медленно изменения в придонном слое происходят в Восточно-Сибирском море. Областями устойчивой положительной аномалии являются Карское море и континентальный склон моря Лаптевых, что обусловлено повышением влияния атлантических вод и, предположительно, усилением обмена между Карским морем и морем Лаптевых. Следует отметить, что эти области совпадают с областями наибольшего повышения придонной температуры океана по результатам самих климатических моделей.

- Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-11-20112). Численные расчеты проведены на базе ССКЦ СО РАН.

Математическое моделирование критической динамики атмосферы при эмиссии газов с поверхности вечной мерзлоты

^{1,2}Савенкова Е.Н., ^{1,3}Вакуленко С.А., ¹Судаков И.А.

¹ООО «Центр Научных Исследований и Разработок», Великий Новгород,

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

³Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: savenkova.en@mail.ru

Современный подход к моделированию климатической системы основан на теории динамических систем и теории бифуркаций [В.П. Дымников, 2005]. Одной из главных концепций является «концепция критического элемента» (критическим называется элемент климатической системы, который под воздействием малых возмущений может перейти в качественное иное состояние) введенная Т. Лентоном [T. Lenton, 2008]. Одним из наиболее актуальных для изучения критических элементов является криолитозона (или вечная мерзлота, многолетнемерзлые грунты), которая входит в подсистему «криосфера» климатической системы и достаточно тесно связана положительной обратной связью (за счет эмиссии парниковых газов) с подсистемой «атмосфера». Частичное или полное исчезновение вечной мерзлоты под воздействием глобальных климатических изменений может привести к серьезным экономическим и политическим проблемам в северных регионах планеты. Таяние вечной мерзлоты в условиях глобального потепления обуславливает дополнительную эмиссию парниковых газов (в особенности метана), которые до этого времени были законсервированы в мерзлотной толще. Мы представляем радиационно-конвективную модель атмосферы с учетом эмиссии метана из криолитозоны. Разработаны математические методы, позволяющие изучать критические точки (точки бифуркации) этой модели, связанные с эмиссией парниковых газов. Доказана возможность катастрофических бифуркаций в климатической системе, порожденных эмиссией метана из криолитозоны и получена явная формула для критического значения интенсивности такой эмиссии. В своей последней версии модель включает в себя уравнения, описывающие метаногенез с помощью учета влияния микроорганизмов, составляющих стабильные популяции. В таком виде модель описывает неустойчивости, ведущие к переходу между теплыми и холодными режимами климата.

■ Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-71-10052.

Ретроспективный прогноз состояния Земной системы на срок до 5 лет с помощью модели климата INM-CM5

^{1,2,3}Воробьева В.В., ^{1,3}Володин Е.М., ¹Грицун А.С.

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

²ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

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

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

Частью международной программы сравнения климатических моделей CMIP (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP6 [1]), координируемой международной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК/IPCC), является проект DCP (Decadal Climate Prediction Project, [2]), посвященный прогнозированию состояния Земной системы на временных интервалах до десятилетия с использованием данных о начальном состоянии системы. Проект предполагает выполнение нескольких фаз, в числе которых проведение исторического ансамблевого расчета по воспроизведению современного климата Земли (1850-2014 гг.) с продлением на первую половину XXI века с заданием внешних воздействий согласно сценариям IPCC, и прогностических ансамблевых расчетов на 5-10 лет для каждого года в интервале от 1960 до 2020 года, стартовых с реальных начальных условий.

Кроме того, для восполнения зазора между долгосрочными прогнозами климата и прогнозами с заблаговременностью до 1 года Всемирной метеорологической организацией (ВМО) в 2007 году был создан Ведущий центр по прогнозированию климата на период от года до десяти лет (WMO Lead Centre for Annual to Decadal Climate Prediction (ADCP)). Ежегодно данная организация представляет отчет (The Global Annual to Decadal Climate Update [3]), содержащий информацию о прогнозе глобальных полей и климатических индексов, полученную на основе инициализированных декадных прогнозов на следую-

щие 5 лет. Оценки качества прогноза выполняются на основе ретроспективных прогнозов (в последнем отчете рассматриваются ретроспективные прогнозы за 1960-2018 гг.). Наряду с этим приводятся оценки и для неинициализированных (исторических) экспериментов.

С целью уточнения источников долговременной предсказуемости в модели INM-CM5 [4], участвующей в проекте CMIP6, и сопоставления их с аналогами, полученными для моделей ведущих мировых научных центров, с моделью были проведены эксперименты на основе протоколов проектов DCP и ADCP. Начальные состояния атмосферы, океана и суши для декадных ретроспективных прогнозов задавались в терминах аномалий: «климатология модели + аномалия реанализа на момент старта прогноза» [5]. При этом использовались ежедневные данные реанализа атмосферы, почвы и суши ERA40 [6] для 1960-1980 гг., ERA-Interim [7] для 1980-2018 гг., ERA5 [8] для 2019-2020 гг., а также данные реанализа океана и морского льда ORAS5 для 1960-1980 гг. [9] и SODA3.4.2 [10] для 1980-2020 гг. С подготовленного набора начальных данных на 1 ноября каждого года из диапазона 1960-2020 гг. рассчитан ансамбль из 15 экспериментов продолжительностью 5 лет (и 10 лет для каждого 5-ого года, начиная с 1980 г.) Помимо этого для модели INM-CM5 имеется задел в виде проведенных в рамках проекта CMIP6 исторических экспериментов 1850-2014 гг. и экспериментов по расчету условий будущего климата с 2015 г. по 2100 г. по одному из вероятных сценариев (SSP3-7.0) увеличения радиационного воздействия.

В данном исследовании представлены интегральные оценки качества прогноза и результаты расчета глобальных климатических индексов для декадных ретроспективных прогнозов и исторических+сценарных экспериментов климатической модели ИВМ РАН. Произведен расчет индексов Атлантической мультideкадной изменчивости (AMV), относительного индекса Ниньо 3.4 (Relative Niño3.4), Тихоокеанской декадной изменчивости (PDV), Арктической (АО) и Антарктической (ААО) осцилляций, а также глобально осредненной температуры. Для каждого из временных рядов климатических индексов рассчитаны коэффициенты корреляции с индексами, вычисленными по данным реанализов ERA5 и HadSLP2r [11], для первых пяти лет расчета, а также для 5-летних средних. Производится расчет коэффициентов корреляции аномалий и ROC-показателя с использованием данных реанализов ERA5 и GPCP [12] для среднегодовых и 5-летних средних полей приземной температуры, давления на уровне моря и осадков (рассматриваются значения полей в среднем за периоды с мая по сентябрь, с ноября по март, а также среднегодовые значения).

- Работа выполнена в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 22-17-00247).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Eyring V., Bony S., Meehl G. A. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization — *Geosci. Model Dev.*, 2016, vol. 9, No. 5, pp. 1937—1958.
2. Boer G. J. et al. The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) contribution to CMIP6. — *Geosci. Model Dev.*, 2016, vol. 9, pp. 3751—3777.
3. WMO Global Annual to Decadal Climate Update — URL: https://hadleyserver.metoffice.gov.uk/wmolc/WMO_GADCU_2022-2026.pdf (online; accessed: 22.03.2023).
4. Volodin E. M., Mortikov E. V., Kostykin S. V., Galin V. Y., Lykossov V. N. et al. Simulation of the present day climate with the climate model INMCM5. — *Clim. Dyn.*, 2017, vol. 49, pp. 3715—3734.
5. Vorobyeva V., Volodin E. Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale. — *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2021, vol. 73, pp. 1—12.
6. Uppala S. M., Kållberg P. W., Simmons A. J. et al. The ERA-40 re-analysis. — *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2005, vol. 131, No. 612, pp. 2961—3012.
7. Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. — *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2011, vol. 137, pp. 553—597.
8. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S. The ERA5 global reanalysis. — *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 1999—2049.
9. Zuo H., Balmaseda M. A., Tietsche S., Mogensen K., and Mayer M. The ECMWF operational ensemble reanalysis-analysis system for ocean and sea ice: a description of the system and assessment. — *Ocean Sci.*, 2019, vol. 15, pp. 779—808.
10. Carton J.A., Chepurin G.A., Chen L.. SODA3: A New Ocean Climate Reanalysis // *J. Climate*, 2018, v.31, №17, p.6967-6983.
11. Allan, R. and T. Ansell, 2006: A New Globally Complete Monthly Historical Gridded Mean Sea Level Pressure Dataset (HadSLP2): 1850–2004. *J. Climate*, 19, 5816–5842.
12. Adler, R.F., G.J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, and P. Arkin, 2003: The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979–Present). *J. Hydrometeorol.*, 4, 1147–1167.

Изменение динамики стратосферы Арктики в XXI веке по расчетам химико-климатической модели SOCOLv4

^{1,2}Варгин П.Н., ^{3,4}Кострыкин С.В., ^{5,7}Коваль А.В., ^{7,8}Розанов Е.В., ⁸Егорова Т.А.,
¹Цветкова Н.Д., ⁶Смышляев С.П.

¹Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия

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

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

⁴Институт глобального климата и экологии им. Ю.А. Израэля, Москва, Россия

⁵Факультет физики атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁶Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

⁷Лаборатория исследования озонового слоя и верхней атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁸Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center (PMOD/WRC), Davos, Switzerland

Исследование изменений основных динамических процессов стратосферы Арктики, влияющих на состояние озонового слоя, выполнено на основе анализа среднемесячных данных двух ансамблевых расчетов ХКМ SOCOLv4 с 2015 г. по 2100 г., проведенных по умеренному (SSP2-4.5) и жесткому (SSP5-8.5) сценариям роста парниковых газов. Сравнение двадцатилетних периодов в конце и начале XXI века с 2080г. по 2099 г. и с 2015 г. по 2034 г. для марта (когда наблюдается наибольшее разрушение озонового слоя) показывает снижение температуры стратосферы на 5-10 градусов, увеличение от 5 % до 20% содержания водяного пара. При умеренном сценарии наблюдается рост амплитуды волны с зональным числом 1 в январе-феврале. Однако при жестком сценарии наблюдается сильно различие между членами ансамбля и, амплитуда этой волны, осредненная ансамблем, к концу века характеризуется лишь небольшим усилением. Среди всех расчетов выявлено во второй половине XXI века пять эпизодов с отрицательными аномалиями общего содержания озона равными или ниже 100 е.Д. в марте в полярном регионе, что сравнимо с мартом 2011 г. и 2020 г., когда в Арктике наблюдалось наибольшее разрушение озонового слоя. При расчетах по обоим сценариям выявлено усиление изолированности стратосферного полярного вихря в Арктике и рост объемов воздушных масс, с температурами достаточными для формирования необходимых для активации озоно-разрушающих соединений полярных стратосферных облаков первого типа (PSC NAT) в марте, что позволяет говорить об усилении стратосферного полярного вихря в конце зимнего сезона в нижней стратосфере Арктики к концу XXI века.

Тенденции климатических изменений на территории Приволжского федерального округа в XIX-XXI веках и их последствия

Переведенцев Ю.П., Мирсаева Н.А., Шанталинский К.М., Гурьянов В.В., Николаев А.А.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

E-mail: ypereved@kpfu.ru

Рассмотрены долгопериодные колебания температуры воздуха (ТВ) на территории Приволжского федерального округа (ПФО) на фоне климатических изменений происходящих в 1850-2020 гг. в Северном полушарии (СП). Показано, что до 1970-х годов эти колебания носили противофазный характер, сменившиеся затем однонаправленным ростом температуры в регионе и в целом на СП в середине 1970-х годов. При этом скорость роста региональной среднегодовой температуры превышает полушарную на 0,5°C. В зимний период ТВ на территории ПФО с 1970-х годов по 2020 г. повысилась на 3,5°C, а в летний на 1,6°C. С использованием данных наблюдений на 183 метеостанциях выявлены тенденции изменения ТВ и атмосферных осадков в 1966-2020 гг. Выявилось заметное повышение ТВ во всех месяцах года (в январе на всей территории ПФО значения КНЛТ ТВ меняются в пределах от 0,6 до 0,9°C/10 лет, в июле скорость потепления ниже ~0,2-0,39°C/10 лет).

Выявлена 40-летняя цикличность амплитуды годового хода ТВ, которая с 1880 г. уменьшилась на 2°C.

Годовая сумма осадков имеет на территории ПФО в основном положительный тренд за исключением юго-востока региона, где усиливается засушливость. Расчет индексов экстремальности зим выявил годы с экстремально холодными и экстремально теплыми зимами. В частности, в период 1997-2009 гг. наблюдалось увеличение суровости зим, а с 2010 по 2019 гг. потепление зим. Дан анализ экстремальных проявлений в изменениях современного климата с использованием 27 индексов экстремальности климата предложенных ВМО.

Установлена корреляционная зависимость между региональными изменениями ТВ и индексами атмосферной циркуляции (АО, NAO, EAWR, SCAND). Арктическая осцилляция и Североатлантическое колебание оказывают заметное воздействие на регион в зимний период (способствуют потеплению). Циркуляционные моды Восточная Атлантика – Западная Россия и SCAND способствуют охлаждению региона в летний период, особенно его восточной части.

Для оценки будущих изменений климата использовались результаты проекта СМIP6. Согласно которым в центре региона при наиболее вероятном сценарии ssp245 зимой температура к концу столетия с 2021-2040 гг. повысится от $-8,95$ до $-6,07^{\circ}\text{C}$, весной от $5,40$ до $7,77^{\circ}\text{C}$, летом от $19,75$ до $21,87^{\circ}\text{C}$, осенью от $6,19$ до $8,37^{\circ}\text{C}$, а в целом за год от $5,6$ до $8,0^{\circ}\text{C}$. При этом значения КНЛТ в среднем в период 2021-2100 гг. составят по сезонам соответственно: $0,48$; $0,39$; $0,35$; $0,36^{\circ}\text{C}/10$ лет и за год $0,40^{\circ}\text{C}/10$ лет. В случае «жесткого» сценария ssp585 ожидается наиболее значительное повышение температуры: зимой от $-9,07$ до $-2,50^{\circ}\text{C}$, весной от $5,68$ до $10,88^{\circ}\text{C}$, летом от $20,73$ до $25,93^{\circ}\text{C}$, осенью от $6,64$ до $11,65^{\circ}\text{C}$ и в целом за год от $6,0$ до $11,5^{\circ}\text{C}$.

Климатические изменения в регионе сказываются на динамике ее агроклиматических ресурсов. Показано, что наблюдаются тенденции увеличения продолжительности активной фазы вегетационного периода ($\text{ТВ} > 10^{\circ}\text{C}$) со скоростью от $0,6$ до $3,4$ суток/10 лет за счет ее более раннего наступления весной и более позднего завершения осенью, теплообеспеченности территории и ее засушливости в летний период, что необходимо учитывать в сельскохозяйственном производстве.

- Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ и Кабинета Министров Республики Татарстан в рамках научного проекта № 22-27-20080.

Колебательная система климата, резонансы, дальние асинхронные связи и прогнозы колебаний климата

Шерстюков Б.Г.

ОГБУ «Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных», Обнинск, Россия

E-mail: boris_sher@mail.ru

Приведены результаты, полученные из анализа глобальных данных метеорологических наблюдений в узлах географической сетки. Климатическая система рассматривается как многочастотная колебательная система, обладающая разными собственными частотами в разных её составляющих и в разных регионах Земли. Предполагается, что внешние повторяющиеся воздействия разных частот на Землю могут находить отклик в климатической системе в разных районах Земли только там, где сложатся благоприятные условия для резонансов частот космического воздействия и собственных частот места на Земле. Резонансный механизм работает на слабых взаимодействиях двух колебательных систем на равных, близких или соизмеримых частотах. В резонансном механизме воздействия одной колебательной системы на другую (космических циклических воздействий на колебательную систему климата) порог необходимых энергетических соотношений воздействия и конечного результата полностью снимается. Недостаток энергии одного внешнего воздействия для появления отклика в климатической системе компенсируется резонансным усилением отклика многократными повторяющимися воздействиями.

Мировой океан рассматривается как первое звено в передаче космических воздействий на климатическую систему, приводящих в последствии к изменениям (к многолетним колебаниям) климата атмосферы. Показана многолетняя инерционность климатической системы, ответственная за отклик параметров океана на внешние воздействия, на передачу первичных возмущений из одних районов океана в другие и из океана в атмосферу.

По данным наблюдений выявлены пространственно-временные особенности современных изменений климата, в которых проявляются предполагаемые внешние воздействия на состояние современного климата. Обнаружены связи изменений температуры поверхности Мирового океана в узлах сетки на основных течениях Большого океанического конвейера Брокера. Изменение температуры на течениях появляется с запаздыванием на 32 – 37 лет относительно изменений момента инерции барицентрического вращения Солнечной системы.

Обнаружены аналогичные проявления других циклических внешних воздействий на региональные изменения в океане и атмосфере. Предполагаемые механизмы обнаруженных связей должны пройти проверку методами математического моделирования.

На основе асинхронных межкомпонентных связей в климатической системе выполнена экстраполяция колебаний климата Северного полушария на два предстоящих десятилетия.

Влияние изменений солнечной активности на Эль-Ниньо – Южное колебание и Южную кольцевую моду как элементов Глобальной атмосферной осцилляции

Серых И.В., Сонечкин Д.М.

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

E-mail: iserykh@ocean.ru

В работах [1,2] показано, что Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК) является элементом Глобальной атмосферной осцилляции (ГАО). На ГАО оказывают влияние следующие внешние квазипериодические силы: годовой ход поступления тепла от Солнца, 14-месячное чандлеровское колебание полюсов Земли, 11-летнее изменение солнечной активности, 18.6-летняя лунно-солнечная нутация оси вращения Земли [3]. Из-за несоизмеримости периодов воздействия этих внешних сил есть основания полагать, что динамика ГАО является не хаотической, а может быть описана математической моделью Странного нехаотического аттрактора (СНА). Таким образом, динамика ГАО может быть прогнозируема статистическими методами с достаточно большой заблаговременностью. Благодаря этому и западно-восточному распространению пространственной структуры ГАО предложен индекс-предиктор ЭНЮК, позволяющий прогнозировать события Эль-Ниньо и Ла-Нинья с годовой заблаговременностью [4].

Данная работа посвящена поиску ответа на вопрос: существует ли в межгодовой климатической изменчивости, ассоциированной с ГАО, только одна мода, которой является ЭНЮК, или же ГАО включает в себя и другие моды. С помощью специально разработанной методики исследована межгодовая изменчивость полей аномалий атмосферного давления на уровне моря (ДУМ) ассоциированная с ГАО [5]. Показано, что исследуемая изменчивость содержит моду связанную с ЭНЮК и моду связанную с Антарктическим колебанием (ААК) – Южную кольцевую моду (ЮКМ). Обнаружено, что ГАО не включает в себя часть изменчивости ДУМ ассоциированную с событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья центрально-тихоокеанского типа. С помощью кросс-вейвлетного анализа исследованы связи между индексами ЭНЮК и ЮКМ. Найдены отрицательные связи между этими индексами на периодах колебаний около 11 лет. Выдвинута гипотеза о влиянии синхронизации и рассинхронизации квази-11-летних изменений солнечной активности и ЭНЮК на ослабление и усиление отрицательных связей между ЭНЮК и ЮКМ на периодах колебаний около 11 лет.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Serykh I.V., Sonechkin D.M., Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A. Global Atmospheric Oscillation: An Integrity of ENSO and Extratropical Teleconnections // Pure and Applied Geophysics. 2019. Vol. 176. No. 8. pp 3737–3755.
2. Serykh, I.V., Sonechkin D.M. El Niño–Global Atmospheric Oscillation as the main mode of interannual climate variability // Atmosphere. 2021. Vol. 12. 1443.
3. Serykh, I.V., Sonechkin, D.M. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin // Theoretical and Applied Climatology. 2019. Vol. 137. P. 2639–2656.
4. Serykh, I.V., Sonechkin, D.M. El Niño forecasting based on the global atmospheric oscillation // International Journal of Climatology. 2021. Vol. 41. P. 3781–3792.
5. Серых И.В., Сонечкин Д.М. Взаимосвязь Эль-Ниньо – Южного колебания и Южной кольцевой моды как элементов Глобальной атмосферной осцилляции // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2022. Т. 67. № 4. Принята в печать.

Исследование прогноза индекса Тихоокеанской декадной осцилляции с помощью модели IBM на срок от 1 до 5 лет

¹Александров М.С., ²Володин Е.М.

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

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

E-mail: aleksandrovm@my.msu.ru

Изучается точность прогноза индекса PDO с помощью модели климата IBM. Результаты прогностического ансамбля сравниваются с данными реанализа ERA5 за 1980-2022г. Модель климата представляет из себя модель циркуляции атмосферы, включая и состояние суши, и модель циркуляции океана, включая морской лед.

Стартовыми датами прогнозов является первое ноября каждого года, начиная с 1980. Начальное состояние атмосферы получено из данных реанализа ERA5, начальное состояние океана получено из реанализа SODA3.4.2. Прогностический ансамбль генерируется путем внесения небольших возмущений в начальное состояние атмосферы.

Количество членов прогностического ансамбля равно 10. Индекс PDO вычисляется общепринятым образом, как проекция аномалии в северном районе тихого океана на первую EOF этой температуры. Рассматриваются оценки прогноза индекса PDO за 1, 2, 3, 4, 5 года. Оценка прогноза показывает, что в течение первого года коэффициент корреляции уменьшается от значения близкого к 1 до 0.37 в конце года. Показано, насколько прогноз, данный моделью климата, соотносится с инерционным прогнозом.

Рассматривается соотношение сигнала величины индекса PDO среднего по ансамблю и шума, то есть среднеквадратического отклонения внутри прогностического ансамбля.

Проведено исследование потенциальной предсказуемости индекса PDO с помощью использованной модели климата.

Анализ изменений температуры воздуха на уровне пограничного слоя в различные периоды климатической изменчивости

Алимпиева М.А.

СГУ им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

E-mail: alimpiewa@rambler.ru

Изменения приземной температуры воздуха за доступный для статистической обработки временной интервал регулярно публикуются в Оценочных докладах [1]. Оценена скорость роста приземной температуры воздуха в различных широтных зонах и отдельных регионах [1]. Огромное число работ посвящено исследованию различных метеорологических параметров в тропосфере и нижней стратосфере. Однако многие исследования выполнялись за многолетние интервалы одинаковой продолжительности, без учета наблюдаемой климатической изменчивости, либо были привязаны к какой-то определенной фазе глобального потепления [2].

В настоящей работе представлен анализ климатических полей температуры на уровне изобарической поверхности АТ-850 гПа. Эта поверхность примерно совпадает с границей пограничного слоя атмосферы, где ослабляется влияние подстилающей поверхности. Эта поверхность важна для синоптического анализа, так как именно на этой поверхности хорошо выделяются главные температурные контрасты, в соответствии с которыми проводятся основные фронтальные разделы на приземных картах. Климатические поля строились за два естественных климатических периода – период стабилизации и вторую волну глобального потепления. Термин естественный климатический период предложен и обоснован С.В. Морозовой [3,4].

Климатические поля строились по данным реанализа ERA5. Необходимые данные переносились в узлы регулярной сетки $5^\circ \times 5^\circ$. После статистической процедуры осреднения цифровых полей проводилась их визуализация программным комплексом MAPINFO посредством векторной графики.

Анализ полученных полей позволил установить, что за два климатических периода структура поля температуры на уровне пограничного слоя существенно не изменилась. Обширные замкнутые очаги в

поле температуры расположены в субтропической зоне полушарий, за исключением пространства над Тихим океаном. Температуры во всех выделяющихся на картах очагах в период стабилизации были на $1,5^{\circ}$ – 2° °C ниже, чем во вторую волну глобального потепления. Очаги наибольшего роста температуры расположены над Средиземным морем, что может указывать на активизацию полярного фронта над этой территорией в июле.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2013. The physical science basis. - Cambridge: Cambridge University Press. 2013. - 1535 p.
2. Дурнева Е.А., Чхетиани О.Г. Планетарная высотная фронтальная зона в Атлантико-Европейском секторе в летние сезоны в 1990—2019 гг. – М.: Метеорология и гидрология. 2021. № 6. - С. 24–33.
3. Морозова С.В. Роль планетарных объектов циркуляции в глобальных климатических процессах. – Саратов.: Изд-во СГУ, 2019. - 132 с.
4. Морозова С.В., Полянская Е.А., Алимпиева М.А. Исследование синоптических процессов на юго-востоке Русской равнины в различные климатические периоды. – Балашиха: Гидрометеорология и образование. 2021. № 2. С. 47–55.

Анализ воспроизведения траекторий полярных мезоциклонов в данных модельных архивов COSMO-CLM RAh и RAS-NAAD

^{1,2}Ахтамьянов Р.А., ²Платонов В.С., ³Вереземская П.С.

¹ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

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

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

E-mail: ramil.rgk@gmail.com, vpatonov86@gmail.com, verezem@sail.msk.ru

Полярные мезоциклоны (ПМЦ) - мезомасштабные (до 1000 км) и короткоживущие (менее 48 часов) интенсивные (15 м/с и более) циклонические вихри, с которыми связаны многие опасные явления в Арктике и Антарктике. Из-за своего масштаба и удаленности от сети наземных наблюдений, их идентификация и прогнозирование является трудной задачей. Данных и разрешения глобальных реанализов может быть недостаточно для получения оценок ПМЦ и приземных скоростей ветра [Verezemskaya et al., 2017]. В данной работе проводится анализ качества воспроизведения траекторий ПМЦ в модельных архивах высокого разрешения с помощью определения ряда динамических характеристик, таких как локальные минимум давления и максимум завихренности, и гидродинамическая циркуляция.

Оценка воспроизведения траекторий проводилась на базе двух модельных архивов. Детализированный модельный архив COSMO-CLM Russian Arctic hindcast охватывает большую часть Российской Арктики и прилегающих с запада акваторий за период 1980–2016 гг. с горизонтальным шагом сетки ~ 12 км и временным - 1 час [Platonov, Varentsov, 2021]. RAS-NAAD - 40-летний (1979–2018) модельный атмосферный архив для Северной Атлантики [Gavrikov et al., 2020], охватывающий регион от 10° с.ш. до 80° с.ш. и от 90° з.д. до 18° в.д. с горизонтальным шагом 14 км и временным - 3 часа, созданный на основе модели WRF-ARW 3.8.1. Модельные архивы используют данные реанализа ERA-Interim в качестве боковых граничных условий. В данной работе использованы данные четырех календарей ПМЦ из статей [Rojo et al., 2019; Golubkin et al., 2021; Noer et al., 2011], охватывающих регионы Северной Атлантики и атлантического сектора Арктики за период 2000–2017 гг. В результате применения реализованных автором алгоритмов были отфильтрованы случаи повторений ПМЦ между разными календарями, а также включены случаи ПМЦ, для которых как минимум 50% траектории попадали внутрь областей модельных архивов. Для COSMO-CLM RAh количество таких случаев составило 436, для RAS-NAAD - 226 случаев.

Для определения положения кандидата на статус центра ПМЦ были выбраны пары локальных минимумов давления и локальных максимумов относительной завихренности, расположенных не далее чем в 1° друг от друга. Циркуляция для каждого кандидата рассчитывалась как сумма произведений относительной завихренности и площади для каждого узла сетки, входящего в область с диаметром ПМЦ, взятом из календарей. Метод был применен к тестовой выборке из 172 точек треков ПМЦ с января 2000 г. по январь 2004 г. Дальнейший отбор производился визуальным просмотром и отсевом кандидатов.

Анализ результатов расчётов на пробной выборке показал применимость алгоритма в качестве вспомогательного инструмента для визуального определения центров ПМЦ в модельных данных. Ме-

тод будет использоваться при визуальном трекинге ПМЦ в данных атмосферных моделей, исследований их трёхмерной структуры, механизмов формирования, траекторий перемещения, статистических оценок.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Gavrikov A. et al. RAS-NAAD: 40-yr High-Resolution North Atlantic atmospheric hindcast for multi-purpose applications (new dataset for the regional mesoscale studies in the atmosphere and the ocean) //J. of Appl. Met. and Clim. – 2020. – Т. 59. – №. 5. – С. 793-817.
2. Golubkin P., Smirnova J., Bobylev L. Satellite-derived spatio-temporal distribution and parameters of North Atlantic polar lows for 2015–2017 //Atm. – 2021. – Т. 12. – №. 2. – С. 224.
3. Noer G. et al. A climatological study of polar lows in the Nordic Seas //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2011. – Т. 137. – №. 660. – С. 1762-1772.
4. Platonov V., Varentsov M. Introducing a new detailed long-term COSMO-CLM hindcast for the Russian Arctic and the first results of its evaluation //Atm. – 2021. – Т. 12. – №. 3. – С. 350.
5. Rojo M. et al. In situ measurements of surface winds, waves, and sea state in polar lows over the North Atlantic //J. of Geoph. Res.: Atm. – 2019. – Т. 124. – №. 2. – С. 700-718.
6. Verezhenskaya P. et al. Southern Ocean mesocyclones and polar lows from manually tracked satellite mosaics //Geophysical Research Letters. – 2017. – Т. 44. – №. 15. – С. 7985-7993.

Описание взаимодействия между океаном и морским льдом в численной модели SibCIOM

Градова М.А.

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

E-mail: gradova.ma.22@gmail.com

Точность совместного моделирования океана и морского льда определяется выполнением законов сохранения тепла и соли в системе. Это особенно важно в полярных широтах, где обмен воды между компонентами модели относительно велик и отличается выраженной сезонной изменчивостью. Процессы формирования льда сопровождается интенсивным выбросом солевого раствора, в то время как таяние льда – поступлением пресной воды в океан. Как правило, каждый компонент модели строго обеспечивает сохранение, основанное на последовательном наборе приближений, однако при их объединении могут возникнуть ложные источники и стоки. В связи с этим необходимо тщательно определить границы в системе атмосфера-морской лед-океан и потоки через них.

Классическим подходом к описанию взаимодействия океана и льда в численной модели является случай плавающего на поверхности льда, который не погружается под воду и не меняет уровень океана под действием своего веса. Ввиду отсутствия массообмена между океаном и льдом, требуется вводить виртуальный поток соли, имитирующий процесс выпадения солевого раствора при формировании льда и процесс распреснения верхнего слоя океана при таянии льда. Однако численные эксперименты показывают, что при использовании в океанической модели фиксированной вертикальной координаты (без изменения верхнего уровня океана) происходит дополнительное накопление соли в океаническом слое. Таким образом, необходим учет изменения уровня моря в численной сетке в соответствии с толщиной льда для обеспечения сохранения интегральной солёности.

Современный и более реалистичный подход к организации взаимодействия океана и ледяного покрова описывает непосредственный переход некоторого объема воды между жидким и твердым состоянием в процессе образования и таяния льда. В отличие от постановки, где предполагается, что морской лед дрейфует по океанической поверхности, в этом случае рассматривается возможность погружения льда в поверхностный слой океана. При реализации такого подхода особого внимания требует ситуация, когда толщина льда превышает толщину верхнего расчетного слоя океана. Для решения этой проблемы вводится преобразование вертикальной координаты для нескольких поверхностных слоев океана.

Данный доклад посвящен описанию задач, возникающих при переходе от дрейфующего льда к погруженному в совместной модели океана и морского льда SibCIOM (Siberian coupled ice-ocean model), разрабатываемой в ИВМиМГ СО РАН, а так же первому опыту реализации нового подхода.

■ Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (проект 0251-2021-0003).

Анализ тенденций изменения характеристик тропопаузы в условиях меняющегося климата Земли

Козлова Л.Ф.

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации –
Мировой центр данных», Обнинск, Россия
E-mail: lida_mail@mail.ru

По данным исследований последних лет глобальные климатические изменения проявляются не только в приземном слое атмосферы, но и на границе перехода из тропосферы в стратосферу – уровне тропопаузы. По изменениям характеристик тропопаузы можно судить о происходящих климатических изменениях. Так, тропопауза чутко реагирует на вариации баланса энергии в атмосфере, может изменяться под воздействием барических образований и смены форм циркуляции.

Радиозондовые данные являются одним из основных источников информации о тропопаузе и об изменениях ее характеристик. Настоящая работа основана на использовании массива АЭРОСТАС, содержащего текущие проконтролированные данные радиозондовых наблюдений, собираемые в ГУ «ВНИИГМИ-МЦД» по глобальной сети станций.

Выполнены расчёты годового хода климатических характеристик тропопаузы (температуры, высоты, давления на нижней границе) за период с 1978–2022 гг. для группы длиннорядных станций РФ, расположенных в разных широтах. В ходе анализа сезонной изменчивости характеристик тропопаузы выявлена обратная зависимость значений высоты и температуры на этом уровне.

Были получены оценки линейных трендов характеристик тропопаузы для каждой из рассмотренных длиннорядных станций территории РФ. Рассмотрены особенности годового хода трендов. Тренды высоты геопотенциала и температуры на нижней границе тропопаузы для большинства станций являются статистически значимыми положительными, что подтверждает существующие оценки скорости потепления в тропосфере.

Исследование двух волн жары разного генезиса в Москве летом 2021 года (в июне и в июле) с помощью мезомасштабного моделирования посредством WRF-ARW

Корженевская А.А., Коспанов А.А., Константинов П.И.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия
E-mail: asyakorj@gmail.com, kospanov.alen@gmail.com, kostadini@mail.ru

В последнее время на фоне глобальных изменений климата растет частота волн жары – длительных периодов аномально высоких температур. Многочисленными исследованиями подтверждено, что они оказывают интенсивное негативное влияние на население, приводя к росту заболеваемости и смертности. В крупных городах тепловой стресс, связанный с волнами жары, вызывает особое беспокойство, так как городские климатические эффекты могут приводить к еще большему повышению температуры.

Летом 2021 года в Москве произошли две волны жары: одна в июне, другая в июле. Предполагается, что они различны по своим характеристикам: в июле температуры воздуха в среднем выше, чем в июне, но в то же время в июне больше продолжительность светового дня. Целью исследования стало сравнение этих волн по метеорологическим параметрам и биоклиматической комфортности.

Для этого было проведено моделирование атмосферы с помощью мезомасштабной модели WRF. Период моделирования составил 61 день: июнь и июль. Область моделирования размерами 198×198 км с шагом сетки 1,8 км охватила Москву и окрестности. В качестве начальных и граничных условий использовались метеорологические данные глобальной базы данных реанализа ERA5. Для воспроизведения городской подстилающей поверхности использовалась параметризация BEM (Building Energy Model), учитывающая энергетический баланс зданий. В результате моделирования получено детальное распределение метеорологических полей для исследуемого региона. С помощью биоклиматической модели RayMan были также рассчитаны индексы теплового комфорта PET (Physiological Equivalent Temperature) и UTCI (Universal Thermal Comfort Index).

Границы волн жары определялись по следующему критерию (критерий ВМО): превышение на 5°C и более нормы максимальной суточной температуры за 1961–1990 гг. в течение от 5 дней и более. Июньская волна длилась 11 дней, а июльская – 13.

По данным модельных расчетов проанализирована временная изменчивость различных параметров за время обеих волн. В среднем для всей области моделирования за период первой волны среднесуточные температуры колебались от 21 до 28°C, а максимальные – от 26 до 33°C. Во вторую волну среднесуточные температуры составляли 23 – 27°C; максимальные 28 – 32°C. Таким образом, у июньской волны немного больше разброс значений и выше максимум, но эти различия не столь значимы. Ход индекса PET в целом повторяет ход температуры. По суммарной солнечной радиации и абсолютной влажности воздуха существенных различий так же не выявлено. Таким образом, по временному ходу основных метеорологических величин и биоклиматической комфортности эти две волны жары не сильно отличаются друг от друга.

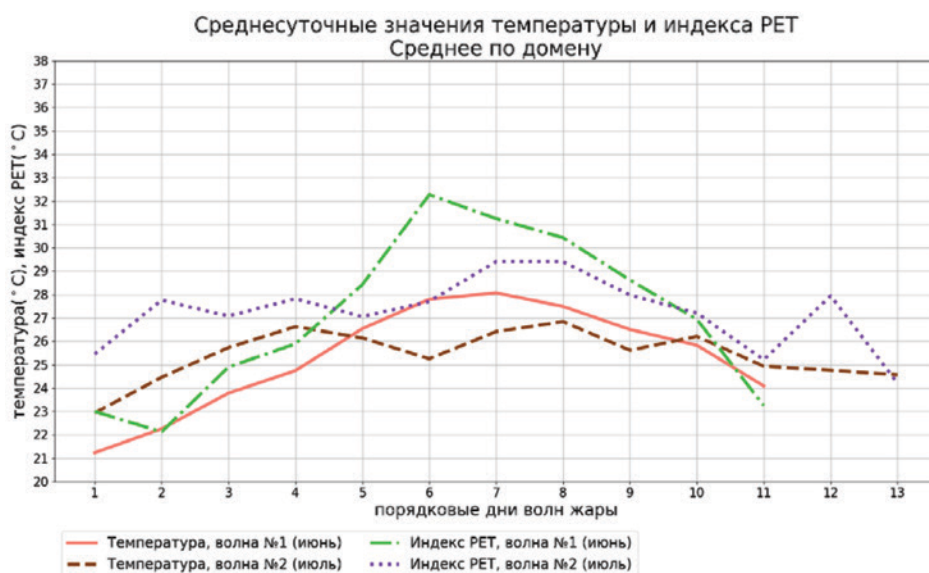


Рис. 1. Ход температуры и индекса PET за периоды волн жары.

Условия термического комфорта были неблагоприятными в течение обеих волн. Так, в среднем для всей области моделирования повторяемость экстремального теплового стресса ($PET > 41^\circ\text{C}$) составляла 10%, а для точки в центральном районе Москвы с плотной застройкой 25 – 26%. В таких районах максимальные значения PET достигали 56°C .

Анализ пространственной изменчивости показал, что во время обеих волн жары наблюдалась значительная разность температуры между центральной частью города и пригородом. Ночью интенсивность острова тепла достигала 11°C , а днем была заметно ниже: 2 – 4°C . В самые жаркие сутки июня наиболее неблагоприятными по тепловому комфорту оказались центральная и северная часть Москвы, а в июле – восточная и юго-восточная; особенно это заметно ночью. Осредненная за период каждой волны картина показывает такие же пространственные различия между двумя волнами, хотя и более сглаженные. Наиболее благоприятным в целом оказался юго-западный округ города.

Следует отметить, что сравнение двух волн жары, произошедших в течение одного сезона, может иметь важное значение. Эпидемиологическая обстановка в течение лета 2021 года оставалась неизменной. Следовательно, при получении доступа к демографическим данным, можно сравнить эти две волны по их влиянию на смертность и сделать вывод, какая из них оказалась опаснее. Дальнейшим направлением исследований может быть разработка типологии волн жары и применение ее к другим регионам.

Климатические причины сокращения оледенения Камчатки

¹Корнева И.А., ^{1,2}Торопов П.А., ¹Муравьев А.Я., ¹Алешина М.А.

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

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

В работе рассматриваются тенденции основных климатических характеристик, которые привели к сокращению оледенения полуострова Камчатка. В частности, показано, что ледники северной части Срединного хребта с 1950 по 2016-2017 гг. сократились на 125 км^2 или 35.6%. При этом средняя скорость их сокращения в период с 2002 по 2016-2017 гг. ($1,45\%/год$) увеличилась примерно в 4.3 раза по сравнению с периодом 1950–2002 гг. ($0,34\%/год$). Наибольшее сокращение наблюдается у

мелких ледников с площадью менее 0.1 км^2 и у ледников юго-восточной и южной экспозиций, а также в высотном поясе 1200–1800 м. На Кроноцком полуострове сокращение площади ледников за 1957–2019 гг. составило 32.1 км^2 (35.6%), причем скорости были практически одинаковы в периоды 1957–2000 гг. ($0.61\%/год$) и 2000–2019 ($0.67\%/год$) гг.

По данным метеостанций и данным реанализа ERA5 показано, что на территории полуострова происходит повышение температуры воздуха, однако в зимний и летний периоды скорость потепления минимальна – $0.3^\circ\text{C}/10$ лет. Значимых однонаправленных изменений в количестве осадков практически не выявлено. Вместе с тем, выявлен существенный рост радиационного баланса в летние месяцы на фоне тенденции к уменьшению облачного балла, а также в мае, на фоне сокращения площади снежного и ледового покрова и соответствующего уменьшения альбедо поверхности. Эти тенденции хорошо согласуются с ростом геопотенциала над северной частью Тихого океана в теплый сезон в XXI веке, а также с ростом дивергенции ветра в средней тропосфере и усилением нисходящих движений воздуха. Все это свидетельствует об увеличении повторяемости антициклонов над регионом в теплом полугодии, которое могло быть причиной положительной аномалии радиационного баланса и, следовательно, увеличения абляции ледников. Причины увеличения повторяемости антициклонов над регионом не очевидны. Это, с одной стороны, может быть следствием общего ослабления западного переноса из-за потепления Арктики и так называемой «экспансии тропиков» за счет расширения ячейки Хэдли к северу, которое в данном регионе может проявляться в усилении гавайского антициклона.

- Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 22-17-00159 и темы государственного задания Института географии РАН № FMGE-2019-0004.

Особенности биоклиматического комфорта северных территорий СФО в условиях изменения климата

Котов А.В., Тасейко О.В.

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
E-mail: Kotalekc2003@mail.ru, taseiko@gmail.com

Вопросы климатических изменений являются в настоящее время одними из наиболее актуальных. Средние темпы роста глобальной температуры приземного воздуха составили 0.8°C за период 1976–2020 гг., при этом отмечается, что особенно быстро температура повышалась в Северной полярной области, где за 30 лет (1991–2020 гг.) линейный рост среднегодовой температуры составил около 2.64°C (Росгидромет, 2021). Согласно результатам исследований для северных районов Красноярского края характерно повышение среднегодовой температуры, а также существенное потепление в субарктической и арктической зонах. Наибольшим ростом вероятности проявления жаркой погоды характеризуются Центральная Эвенкия и северо-восток Таймыра. На территории Енисейского, Мотыгинского и Казачинского районов Красноярского края, а также в Центральной Эвенкии согласно климатических моделей высока вероятность засухи.

Для корректной оценки влияния изменения окружающей среды, в том числе климата, на здоровье человека используются различные биоклиматические индексы, характеризующие особенности тепловой структуры среды. Целью исследования является прогнозирование изменения биоклиматической комфортности Северных и Арктических территорий СФО в связи с природными особенностями территории и колебаниями климата. Для изучения биоклиматической комфортности были выбраны северные и приравненные к северным районам территории Сибирского Федерального округа. В составе СФО всего три субъекта РФ имеют территории, относящиеся к арктическим, северным и приравненным к ним: Красноярский край, Томская и Иркутская области. Для оценки биоклиматических индексов анализировались данные метеонаблюдений 49 метеостанций государственной сети мониторинга, расположенные в 23 районах СФО, за период с 2005 по 2022 гг., включая суточные значения температуры, относительной влажности и скорости воздушных потоков. Оценивались биоклиматические индексы, учитывающие максимальное количество метеопараметров: эквивалентно-эффективная температура и нормальная эквивалентно-эффективная температура – комплексные показатели теплоощущения человека; биологически активная температура, определяющая воздействие на организм человека температуры воздуха, влажности воздуха, скорости ветра; сезонные индексы Бодмана и Сайпла, определяющие суровость зимы и влияние отрицательных температур в сочетании с сильным ветром.

Индекс суровости зимы по Бодману показал наибольшие значения до категории жёстко-суровая зима – для Таймырского Долгано-Ненецкого района. Наименьшая разовая эквивалентно-эффективная температура для всех станций Эвенкийского района характеризуется как угроза обморожения (-28.8 – -33.7). Наибольшая разовая эквивалентно-эффективная температура показала высокую тепловую на-

грузку в летний период в Туруханском и Таймырском Долгано-Ненецком районах. Биологически активная температура во всех районах находится в пределах зоны холодного комфорта в течение всего года. Индекс Сайпла показал, что наиболее неблагоприятные районы с категориями индекса жестко холодно и невыносимо холодно, относятся к Таймырскому Долгано-Ненецкому и Туруханскому районам. Получены вероятностные характеристики возникновения наиболее неблагоприятного сочетания метеорологических параметров. Для оценки их пространственного распределения были построены карты с использованием средств QGIS. Используемый для анализа период наблюдений 17 лет не является достаточным для получения значимых временных изменений рассматриваемых показателей.

Полученные результаты позволяют прогнозировать негативные изменения состояния здоровья населения, проживающего в условиях Крайнего Севера, формирующиеся под влиянием сочетанного действия климатических факторов. Теоретические положения и результаты исследования могут быть использованы при разработке нормативных экологических показателей для зонирования и нормирования территории по природно-климатической дискомфортности.

Исследование межгодовой изменчивости диоксида углерода в арктическом регионе

¹Лоскутова М.А., ¹Макштас А.П., ²Лаурила Т., ²Асми А.

¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт – Петербург, Россия

²Финский метеорологический институт, Хельсинки, Финляндия

E-mail: loskutova@aari.ru, maksh@aari.ru

Целью данной работы является изучение межгодовой и сезонной изменчивости углекислого газа на станциях арктического мониторинга посредством выделения фоновых значений, а также выявление возможных очагов повышенных концентраций этого газа на локальном и региональном уровне. Определение годового тренда CO₂ на станции Мыс Баранова (79°16' с. ш., 101°45' в. д.) по результатам измерений концентраций лазерным газоанализатором Picarro в 2015 – 2019 гг., а также выделение сезонной составляющей, её амплитуды и межгодового роста концентраций, было проведено с применением модели (Thoning K.W. et al., 1989). Согласно этому подходу, итоговый ряд значений концентраций углекислого газа представляет собой наложение трёх составляющих – линейного тренда, квази-синусоидального годового цикла и кратковременных вариаций, связанных с влиянием локальных и региональных источников и стоков. Полученные результаты были сопоставлены с данными трех других полярных станций, являющимися поставщиками данных Мирового Центра Данных по парниковым газам – Алерт, Барроу и Паллас.

Исследование зависимости величины концентраций газов от направления и скорости ветра может быть полезно для обнаружения локальных и региональных источников (стоков) газов (Ивахов, 2016 г.). В настоящем исследовании для этой цели использована модель, в основе которой лежит условная вероятность (Conditional probability function, CPF):

$$CPF = \frac{m_{i,j}}{n_{i,j}}, (1)$$

где $m_{i,j}$ – количество попаданий концентраций газа выше заданного порога (как правило, выше верхнего квартиля) в диапазон направлений ветра i и диапазон скоростей ветра j , в то время как $n_{i,j}$ – общее число прихода концентраций из того же интервала по скорости и направлению ветра. В данном исследовании был рассмотрен сезонный интервал за каждый год (поскольку оба газа имеют сезонную выраженность), а к «высоким» значениям концентраций относились те, что превосходили 80%-й квантиль.

Расчеты показали, что межгодовая изменчивость углекислого газа на станциях, его тренды и среднегодовой прирост очень близки. Сезонный ход соответствует типичной модели поведения в полярных широтах, со значительной годовой амплитудой и резким спадом концентрации CO₂ в летние месяцы. Основные результаты:

- на всех станциях наблюдается выраженный сезонный ход углекислого газа, находящийся в соответствии с описанными в литературе теоретическими представлениями;
- для углекислого газа за рассматриваемый промежуток времени характерны положительные тренды, среднегодовой прирост углекислого газа на ЛБ Мыс Баранова составил 2.41 ± 0.05 млн-1/год;
- годовой прирост углекислого газа на более высокоширотных станциях (ЛБ Мыс Баранова, Алерт и Барроу) в среднем несколько выше, чем в расположенном южнее Палласе;
- основные характеристики сезонного хода и годовой изменчивости (амплитуда годового хода, наступление годового минимума) углекислого газа на ЛБ Мыс Баранова сопоставимы с теми, что наблюдаются на других станциях. Амплитуда годового хода на всех станциях находится в

пределах 18 – 21 млн⁻¹. Годовой минимум углекислого газа на ЛБ Мыс Баранова, станциях Алерт и Барроу наблюдается в среднем на 230 сутки, в Палласе он наступает на 15-20 дней раньше;

- среднегодовые значения концентраций углекислого газа на полярных станциях во все годы выше, чем среднеглобальные значения, приведенные в Бюллетенях ВМО, показатели среднегодового прироста находятся в соответствии с теми, что заявлены в ежегодных Бюллетенях ВМО;
- применение вероятностной модели для анализа переноса повышенных концентраций углекислого газа в окрестностях НИС показало прямую зависимость с местной орографией в холодное время года, концентрации этих газов выше 80%-го квантиля в это время приходят только при сильных ветрах (от 15 м/с) юго-западного направления.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ивахов В.М. и др. Анализ данных непрерывный наблюдений атмосферных концентраций метана на арктической станции Тикси с 2010 по 2015 гг.// Труды Главной Геофизической Обсерватории им. А.И. Воейкова, 2016 г. Выпуск 582, стр. 261-280.
2. Thoning K.W., Tans P.P., and Komhyr W.D. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974 – 1985.// J. Geophys. Res. Atmospheres, 1989. Vol.94, No. D6, P. 8549 – 8565.

Природно-климатические риски сельского хозяйства Красноярского края

Овчинникова А.Е., Черкасова Н.Г.

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия
E-mail: anaovchinnickova@yandex.ru, 5hat@bk.ru

Представленная в работе методика оценки рядов метеорологических данных позволяет оценить и спрогнозировать урожайность и качество злаковых на территории Красноярского края. А также изучить влияние климата на посев и выживаемость злаковых в различные периоды календарного года с учётом дневного и ночного режимов.

Агропромышленный комплекс Красноярского края на 60 % представлен растениеводством. При этом, в 2021 году край занял 4 место по валовому сбору зерна среди субъектов СВО. Одним из главных факторов, влияющих на производительность зерновых культур являются природно-метеорологические риски на территории края (ливни и наводнения, град, ранние снегопад и осенние заморозки, сильный мороз/ жара, поздние весенние заморозки, сильный ветер).

В качестве оцениваемых параметров выбраны температура, влажность и скорость атмосферного воздуха в регионе. За отчётный период наблюдений принят период с 2020 по 2022 год в тёплый и холодный периоды года.

В работе применен такой метод агрометеорологических наблюдений как математическая статистика при обработке материалов массовых наблюдений и измерений. Основная цель, которая преследовалась при обработке рядов наблюдений, это получение агроклиматических величин основных изучаемых параметров, оценка их изменчивости, повторяемости, расчёт вероятности появления какого-либо события в исследуемом диапазоне данных с выявлением закономерности влияния одних исследуемых параметров на другие.

Первые результаты указывают на такую закономерность, как территориальная климатическая нестабильность отдельных сельскохозяйственных зон по отношению к среднепринятой на территории края. Особо разрушительным потенциалом повышения температуры обладают те территории, где почва склонна к термической и ветровой эрозии.

Отмечается тенденция к повышению температуры воздуха в среднем на 0,2 °С. Средняя температура воздуха за 2021г. равна -2,4 °С, что выше нормы на 1,3 °С. Повышение годовой температуры наиболее интенсивно происходит на Таймыре 1,08 °С, но при движении на юг до южных районов края уменьшается до 0,05-0,01 °С. Наиболее значимыми и масштабными рисками, при этом, становятся засуха и связанные с ней пожары, метели и ураганный ветер. В будущем засуха и пожары, в наибольшей степени, грозят центральным областям Красноярского края, ливни - южным, а восточные территории (Богучанский и Канский районы, часть Эвенкийского автономного округа) столкнутся с сильными заморозками. Усилится ветровое воздействие, сильные морозы и туманы (преимущественно в Ермаковском районе), что в совокупности влияет на состояние почв и выживаемость семян при посевах.

В условиях прогнозируемых изменений климата, с учетом созависимости температуры атмосферного воздуха и количества выпадающих осадков, возможна разработка и внедрение превентивных мер по исключению эрозий почв, потерь посевов в весенний период, снижение ущерба сельскому хозяйству региона от реализации чрезвычайных ситуаций природного характера на рассматриваемой территории.

Восстановление вертикальной структуры распределения NO₂ в нижней тропосфере по многоугловым спектральным измерениям рассеянной солнечной радиации (MAX DOAS)

¹Постыляков О.В., ^{1,2}Шамсутдинов Д.Р., ¹Боровский А.Н., ²Чуличков А.И.

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

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

E-mail: oleg.postylyakov@gmail.com

Двуокись азота NO₂ является одним из ключевых индикаторов антропогенного загрязнения воздуха городов и промышленных районов, поскольку её основным источником является высокотемпературное горение топлива. Наряду с приземными измерениями концентрации NO₂ получают распространение наблюдения содержания примеси в нижней тропосфере дистанционным методом многоугловой дифференциальной спектроскопии (MAX DOAS). Ранее при решении задачи оценивания вертикального профиля примеси по таким измерениям использовались методы байесовского оценивания [1]. Однако, в реальности достаточной информации для задания функции случайного распределения NO₂ экспериментаторы не располагают, что приводит к разбросу результатов, получаемых различными группами. Чтобы избежать этого в данной работе предлагается другой подход, состоящий в сужении класса возможных профилей, основанный на априорном предположении о количестве возможных экстремумов в восстанавливаемом вертикальном распределении NO₂. Так в утренние часы, при высокой вероятности температурных инверсий, можно предполагать наличие нескольких максимумов в распределении примеси. После установления конвективного перемешивания более вероятно распределение NO₂ с одним максимумом. При этом априорная информация об ожидаемом количестве слоев может корректироваться по данным, например, температурного профилера.

В результате первого этапа обработки наблюдений MAX DOAS получают набор измерений наклонных содержаний NO₂ при углах визирования θ_i

$$\xi(\theta_i) = \int_0^H m(h, \theta_i) n(h) dh + v_i, \quad (1)$$

искаженных шумом v_i . Здесь $m(h, \theta_i)$ – послойная эффективная воздушная масса слоя на высоте h (известная величина, которая вычисляется по модели переноса излучения [2]), H – высота слоя NO₂, $n(h)$ – концентрация NO₂ на высоте h .

После дискретизации схему (1) можно записать в виде $\xi = Mn + v$, где ξ , Mn , v – векторы размерности m , M – матрица $m \times n$, переводящая вектор n размерности N в вектор Mn . В данной работе предлагается подход, состоящий в существенном сужении класса возможных профилей $\{n\}$. Будем предполагать, что профиль концентрации представляет собой унимодальную функцию, неубывающую на интервале от 0 до h_c и невозрастающую на интервале от h_c до H , тогда для координат вектора n выполнены неравенства $n_1 \leq \dots \leq n_c$ и $n_c \geq \dots \geq n_N$. Для оценки вектора n решим задачу на минимум

$$\min_c \left\{ \min_{n_1 \leq \dots \leq n_c, n_c \geq \dots \geq n_N} \left\{ \max_i \xi_i - \sum_{k=1}^N M_{ik} n_k \right\} \right\}. \quad (2)$$

При фиксированном положении максимума концентрации c задача на минимум по координатам вектора n сводится к задаче линейного программирования. Минимизация по c производится перебором, $c = 1, \dots, N$.

Проверить согласие предположения об унимодальности профиля концентрации NO₂ с результатом измерения можно, если известны ограничения на координаты v_i погрешности измерения. Если $|v_i| \leq \epsilon$, то полученный минимизацией (2) профиль не противоречит результату измерения, если значение минимума (2) не больше, чем ϵ . Если же это условие не выполнено, можно усложнить модель, считая, что профиль концентрации имеет два максимума и один минимум.

В докладе приводятся примеры восстановления вертикального профиля концентрации двуокиси азота для ряда модельных и реальных профилей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Friess, U. 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.

Динамика негауссовых аномалий климатических величин в Северном полушарии в конце XX – начале XXI века

^{1,2}Харюткина Е.В., ¹Логинов С.В., ¹Морару Е.И.

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

²Центр научных исследований и разработок, Великий Новгород, Россия

E-mail: kh_ev@mail2000.ru, logSV13@gmail.com, moraruei@yandex.ru

На фоне глобального изменения температуры воздуха в конце XX – начале XXI вв. происходит увеличение аномалий метеорологических величин, а также рост частоты и интенсивности опасных и неблагоприятных природных явлений. К их формированию, как правило, приводят нестационарные геофизические процессы, протекающие с различной интенсивностью и имеющие свои временные и пространственные масштабы.

Целью работы является исследование пространственно-временной изменчивости аномалий синоптического масштаба климатических величин в Северном полушарии за период 1979–2018 гг., определение характеристик временных рядов, связанных с экстремальными нестационарными процессами и выявление тенденций их изменений.

Аномалии температуры воздуха (t), удельной влажности воздуха (q), компонент скорости ветра (зональной – u , меридиональной – v и вертикальной – ω) и геопотенциала (Φ) рассчитывались в тропосфере Северного полушария (1000 и 500 гПа) по 6-часовым данным реанализа Era Interim с пространственным разрешением $1,125^\circ \times 1,125^\circ$. Под аномалией понималась безразмерная величина, представляющая собой отклонение величины от среднего значения за сезон для каждого года на интервале 1979–2018 гг., и нормированное на среднеквадратическое отклонение. Расчёт проводился для исходных временных рядов, а также для рядов с изменчивостью синоптического масштаба. Выбирались аномалии, соответствующие значению плотности вероятности, превышающей распределение Гаусса.

Получено, что во временных рядах аномалий величин преимущественно преобладают три типа зонально усредненных эмпирических плотностей распределения нестационарных процессов: распределение, близкое к Гауссову (аномалии u и v); распределение с положительной/отрицательной асимметрией (аномалии Φ , t и q); распределение, в котором наблюдается превышение значений относительно Гаусса как в отрицательной, так и в положительной областях (ω). При этом последний является преобладающим для аномалий синоптического масштаба (до ~80% случаев).

Таким образом, получено, что в начале XXI века, по сравнению с концом XX века, в Северном полушарии повсеместно происходит увеличение количества аномалий скорости ветра, а также q в первой половине года. Количество аномалий t и Φ , напротив, в целом уменьшается, за исключением аномалий синоптического масштаба, количество которых растёт в низких широтах. Области максимальных значений аномалий климатических величин преимущественно расположены в континентальных районах: зимой – на севере Дальнего Востока, северной части Северной Америки, а также в Сибирском регионе; летом – в низких широтах. Исключение составляет аномалии ω , которые располагаются в основном над океанами (средние широты Тихого и Атлантического океанов вблизи течений Кюросио, Гольфстрим и субполярных круговоротов).

В работе к нестационарным временным рядам экстремальных величин в регионах Северного полушария применялись R/S и мультифрактальный анализы, что позволило определить характер устойчивости поведения системы (трендоустойчивы или антиперсистентны временные ряды аномалий).

Полученные результаты будут полезны при уточнении и тестировании климатических моделей, решающих в том числе прогностические задачи.

- Исследование пространственно-временной изменчивости аномалий выполнено в рамках госзадания ИМКЭС СО РАН (регистрационный номер проекта 121031300154-1), определение характеристик временных рядов (трендоустойчивость), связанных с экстремальными нестационарными процессами выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 21-71-10052, <https://rscf.ru/en/project/21-71-10052>.

Местный климат Арктического города и его влияние на окружающую среду

Эзау И.Н.

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
E-mail: i.n.ezau@utmn.ru

Многочисленные исследования надёжно выявили существенные отличия городского местного климата от местных климатов окружающих территорий. Отличия эти довольно универсальны для различных климатических зон от влажных тропиков до полярных областей, а именно, местный городской климат теплее, суше, и менее ветренный, чем климат окружающих местностей. И всё же местный климат Арктического города обнаруживает ряд важных особенностей. Аномально высокие температуры – городской остров тепла – формируются за счёт антропогенного теплового потока в холодные месяцы, причём чем ниже температура воздуха, тем более интенсивен остров тепла. Остров тепла в тёплые месяцы формируется сдвигом теплового баланса городской поверхности за счёт уменьшения затрат тепла на испарение и меньшего альбеда крыш и улиц (но не открытых городских пространств). Изучение особенностей городского климата в Арктике и их связи с островами тепла проводилось как по данным спутниковых наблюдений (данные MODIS за 2001-2021), которые охватывают 118 поселений, так и по данным специальных метеорологических измерений организованных в 5 городах Российского при- и заполярья (в основном между 2016 и 2022). Аналогичных по интенсивности и плотности измерений компаний в городах зарубежной Арктики не проводилось, за исключением Лонгирбюена на Шпицбергене. Дополнительные данные были собраны из научно-технической литературы; в основном они относятся к периоду 1980-1999. Комплексный анализ наземных и спутниковых данных позволяет предположить, что поверхностный остров тепла, среднегодовые аномалии температуры $+0.5$ - $+3.5$ градусов, оказывает большое влияние как на компоненты зелёной инфраструктуры (городские экосистемы), так и на геотехническую устойчивость городской поверхности. Таким образом, местный климат города оказывает влияние на окружающую среду, которое в значительной мере отлично от такового в городах более низких широт. Например, нельзя поддержать широко публикуемый вывод о том, что аномалии температуры поверхности, имеют меньшее значение, чем аномалии температуры воздуха. Скорее наоборот, именно климатические аномалии на самой поверхности наиболее значимы для городской деятельности, в частности в долгосрочной перспективе определяют устойчивость дорог, зданий и сооружений.

Подходы к параметризации горного оледенения в рамках Моделей Земной Системы

^{1,2}Торопов П.А., ^{3,4}Дебольский А.В., ⁴Шестакова А.А., ¹Поповнин В.В.

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

²Институт географии РАН, Москва, Россия

³Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

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

Для объема горных ледников от всего горного оледенения Земли ничтожна (порядка 1 %). Тем не менее, учет ее динамики важен для коррекции речного стока (особенно для рек, берущих начало в высокогорной зоне). Согласно прогностическим оценкам, к началу XXII века от горного оледенения Земли почти ничего не останется [Huss M., Hock R., 2018]. Для ряда государств и областей (Перу, Чили, Монголия, Киргизия, Таджикистан, и др.) это может обернуться острой нехваткой пресной воды и гуманитарной катастрофой. Стремительное уменьшение объемов горного оледенения приведет к росту уровня Мирового океана примерно на 0.15 м [Huss M., Hock R., 2015]. Изменение площади оледенения в крупных горно-ледниковых районах может оказывать ощутимое влияние на крупномасштабную динамику атмосферы [Jin L. et al., 2005]. Поэтому развитие методов физико-математического описания горного оледенения представляется актуальной задачей.

Описать динамику горных ледников можно с помощью простых моделей, основанных на регрессионных связях баланса массы ледника с температурой и осадками [Ohmura, 2001]). Однако такой подход не вполне корректно обоснован. С другой стороны можно использовать полные математические модели, включающие уравнения движения вязко-пластической неньютоновской жидкости и притока тепла [Рыбак, 2018], что сопряжено с вычислительной дороговизной и скрупулезной настройкой параметров для конкретного ледника. В последние 10-15 лет популярны так называемые Глобальные гляциологические модели (ELMER-ICE, GloGEMflow) (Постникова, Рыбак, 2022; Zekollari et al., 2019), которые отличаются упрощенной динамикой и опираются на спутниковые данные о геометрических характеристиках всех горных ледников мира (Zekollari et al. 2022). Однако эти алгоритмы не нацелены на включение в Модели земной системы в качестве параметризаций.

В итоге в качестве основы для параметризации горного оледенения была выбрана минимальная модели Урлеманса (Oerlemans, 2007). Предложенная схема основана на одномерном уравнении баланса массы ледника, причем компоненты баланса массы рассчитываются с использованием модели орографического добавка осадков (Торопов и др., 2022), алгоритма коррекции приходящей радиации на наклонную ледовую поверхность и схем расчета турбулентного тепло-влаги-обмена на основе теории Монина-Обухова. Модель реализована для ледника Джанкуат (Центральный Кавказ), по которому имеется внушительный ряд измеренного баланса массы. Предложенная параметризация продемонстрировала удачное воспроизведение динамики длины и объема ледника за период 1985–2020 на основе измеренных значений баланса массы: по результатам расчетов площадь ледника уменьшилась на 25%, а длина на 450 м, что неплохо согласуется с реально наблюдаемыми значениями.

Реконструкция баланса массы ледниковой системы Эльбруса с 1984 по 2022 с помощью физико-математической модели с распределенными параметрами

¹Елагина Н.Э., ²Рец Е.П., ¹Корнева И.А., ¹Торопов П.А.

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

E-mail: nelly.e.elagina@gmail.com

Оценка объема и баланса массы ледников и ледниковых систем важны для прогнозирования стока и понимания вклада в повышение уровня моря, а также различных опасностей, таких как угрозы прорывных паводков ледниковых озер. Баланс массы горных ледников напрямую зависит от метеорологических переменных и, следовательно, служит хорошим индикатором изменения климата.

В этой работе проводится реконструкция баланса массы ледниковой системы Эльбруса (5642 м н. у. м.) с 1984 по 2022 год с помощью физико-математической модели с распределенными параметрами A-Melt, разработанной Е. П. Рец (Рец и др., 2021). Модель основывается на уравнениях теплового баланса и позволяет рассчитать компоненты баланса массы в каждом узле заданной пространственной сетки. В работе также оценивается чувствительность баланса массы к изменению основных метеопараметров, таких как температура воздуха и количество осадков. Расчет проводился, как и для всей ледниковой системы, так и для каждого из 20 выделенных ледников. Результаты моделирования показали, что кумулятивный баланс массы ледниковой системы Эльбруса составил более 35 м в. э., причем с 2004 года баланс массы находится в стабильно отрицательном состоянии. Наибольшие потери массы демонстрируют ледники, ориентированных на восток и юг. Баланс массы ориентированного на восток ледника Джикиуганкез уменьшался с наибольшей средней скоростью ($-1,3$ м в.э. год⁻¹). По оценкам Кутузова и др. (2019) этот ледник содержит 28% всего объема льда ледниковой системы Эльбруса, большая часть которого сосредоточена ниже 4000 м над уровнем моря. Увеличение массы демонстрирует только один небольшой ледник на западном склоне. Результаты работы хорошо согласуются с многолетними прямыми измерениями баланса массы на леднике Гарабаши на Эльбрусе и оценками изменения объема Эльбруса, полученной Кутузовым и др. (2019).

- Подход к моделированию баланса массы был разработан в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН.

Метеорологические измерения в высокогорной зоне Эльбруса в период аккумуляции

^{1,3}Дроздов Е.Д., ²Артамонов А.Ю., ^{1,3}Торопов П.А.

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

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

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

E-mail: e.drozdov@igras.ru

В последние десятилетия климат и криосфера в высокогорных областях претерпевают значительные изменения. В то же время существенным ограничением для оценки этих изменений является отсутствие продолжительных метеонаблюдений. Так, в регионе Большого Кавказа, на поверхностях горных ледников регулярные измерения проводились лишь в периоды абляции: вдоль южного склона Эльбруса в рамках МГГ 1957–1959 гг. [1] и в зонах абляции ледников Джанкуат [3] и Гарабаши [2]. Однако в зонах аккумуляции горных ледников во всем мире проводятся лишь единичные измерения, как правило охватывающие отдельные сезоны.

Данные прямых наблюдений могут позволить оценить параметры современного климата и физических процессов на поверхности горных ледников в областях аккумуляции. Также могут быть верифицированы результаты атмосферных моделей (реанализов), которые, как правило, являются единственным источником данных для оценки погодных условий и климатических изысканий или используются в качестве входных данных для моделей ледника. Кроме того, наличие метеорологического измерительного комплекса в привершинной части Эльбруса актуально в связи с растущей туристической популярностью объекта. В наличии обновляемых сведений о погоде на высотах более 4500 м заинтересованы МЧС и Курорты Северного Кавказа.

В данной работе обсуждается первая измерительная кампания в зоне питания ледника Гарабаши на южном склоне вулкана Эльбрус, охватывающая весь сезон аккумуляции 2021-2022 гг. В ходе экспедиции в августе-сентябре 2021 года на скалах Пастухова на высоте около 4700 метров над уровнем моря был развернут измерительный комплекс из современного высокоточного оборудования. Проводились измерения температуры и влажности воздуха на высоте 2 метра над поверхностью с использованием термогигрометра Rotronic HCS3. Коротковолновые и длинноволновые компоненты радиационного баланса были получены по данным балансомера Hukseflux NR01, вынесенного над снежно-ледовой поверхностью на высоте около 2 м. Особый интерес представляют собой первые в России многомесячные высокогорные автоматические измерения интенсивности метелевого переноса, выполненные с помощью акустического метелемера ISAW FlowCapt FC4 7. Данный прибор позволяет получить данные о скорости ветра в метровом приземном слое, мгновенной и средней интенсивности потока ледяных кристаллов (величине метелевого переноса) в приповерхностном слое толщиной 1 метр. Приведенные выше измерения производились с дискретностью 1 минута. Кроме того, измерялись горизонтальные и вертикальная компонента скорости ветра с частотой 20 Гц с помощью акустического анемометра Gill Windmaster.

Измерительный комплекс функционировал в течение 9 месяцев с 01.09.2021 по 01.06.2022. Бесперебойность работы станции обеспечивалась аккумулятором емкостью 85 А·ч, заряжающегося от солнечной панели мощностью 100 Вт, а автономность - GSM-передачей данных наблюдений через мобильный роутер на сервер и на сайт Народный Мониторинг. Запись данных непрерывно производилась на логгер Campbell CR1000X.

На данном этапе исследования на основе данных наблюдений планируется определить зависимость между интенсивностью метелевого переноса и скоростью ветра, оценить основные компоненты теплового баланса поверхности ледника в области аккумуляции и скорость сублимации ледяных кристаллов, а также провести верификацию данных реанализа.

■ Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ 23-17-00247.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Волошина А.П. Радиационные условия в период абляции // Оледенение Эльбруса. М.: Изд-во МГУ, 1968. С. 158-168.
2. Ледники и климат Эльбруса : монография / В. Н. Михаленко, С. С. Кутузов, И. И. Лаврентьев, П.А. Торопов [и др.]. - Санкт-Петербург, 2020. – 372 с.
3. Rets, E. P., Popovnin, V. V., Toropov, P. A. et al. Djankuat glacier station in the North Caucasus, Russia: a database of glaciological, hydrological, and meteorological observations and stable isotope sampling results during 2007–2017 // Earth Syst. Sci. Data, 11, 2019. p. 1463–1481, <https://doi.org/10.5194/essd-11-1463-2019>, 2019.

Численная схема воспроизведения уровня грунтовых вод в модели деятельного слоя суши

^{1,2,3,4,5}Богомолов В.Ю., ^{2,4,5,6}Степаненко В.М.

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

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

³Томский государственный университет, Геолого-географический факультет, Томск, Россия

⁴Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

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

⁶Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

E-mail: verminrus@mail.ru

Грунтовые воды представляют собой безнапорные воды зоны насыщения почвогрунтов. Они составляют важнейший компонент климатической системы: формируют подземное питание водных объектов (в частности, речной сток), влияют на температурный режим почвы, определяют режим функционирования растительности, определяют характер химических реакций углеродного цикла.

На данный момент в модели деятельного слоя суши ИВМ-НИВЦ МГУ описывается тепломассоперенос в почве в постановке не нулевых потоков на нижней границе и с не максимальным водонасыщением в этих слоях. При данном подходе не возможно явно воспроизводить уровни с максимальным водонасыщением и как следствие уровень грунтовых вод.

В рамках данного подхода становится сложно правильно описать горизонтальный сток как движение влаги по поверхности насыщенного слоя. Так же невозможно воспроизвести уровень грунтовых

вод в крупнопористых почвах, такие как болотные почвы, в которых от его существования зависят все процессы, связанные с эмиссией углерода. Да и правильность временных масштабов движения влаги в почве ставится под сомнение.

В рамках предложенной схемы предлагаться: изменить граничные условия на нижней границе; диагностически определять высоту уровня грунтовых вод, его распределение по численным ячейкам модели, включая определение его границы внутри ячейки с помощью функциональной зависимости; в зависимости от размещения уровня грунтовых вод в слоях определять скорость диффузии и потоки, отвечающие за гравитационное просачивание.

Как следствие использования данной схемы предполагается явное воспроизведение уровня грунтовых вод в модели деятельного слоя суши.

- Работа выполнена в рамках реализации ВИП ГЗ "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

Аналитическое решение нелинейного уравнения теплопроводности с периодическим верхним граничным условием

Лапина Л.Э.

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

При анализе данных измерений температуры почвы в некоторых объектах отношение амплитуды суточных колебаний к среднесуточной температуре на поверхности почвы представляет собой малый параметр. В таких случаях можно использовать метод малого параметра для получения решения нелинейного уравнения теплопроводности. Это позволяет оценить влияние амплитуды колебаний на температурный режим до глубины распространения суточных колебаний.

Рассматривается уравнение:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(F(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

С граничными условиями

$$T|_{z=0} = A \sin(\omega t + \varphi) + B, \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=L} = 0. \quad (3)$$

Здесь: T – температура почвы ($^{\circ}\text{C}$), ось z направлена вертикально вниз, $z = 0$ – поверхность почвы, L – глубина затухания колебаний температуры, A – амплитуда колебаний на поверхности, ω – частота колебаний, B – среднее значение температуры почвы там же. Граничное условие (3) означает отсутствие тепла через границу.

Уравнение (1), например, рассматривается в работе [1]. Пусть отношение амплитуды колебаний к среднему значению мал. Обозначим через $\varepsilon = A/B$.

Решение уравнения (1) ищется в виде асимптотического ряда по ε :

$$T = T_0 + \varepsilon T_1.$$

В качестве функции $F(T)$ используется полином третьей степени.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Зырянов В.Н. Нелинейный пампинг-эффект в колебательных процессах в геофизике // Водные ресурсы, 2013, т.40, N3, с.227-239

Чувствительность атмосферной циркуляции модели ПЛАВ к гранулометрическому составу почвы

¹Травова С.В., ^{2,1}Толстых М.А., ¹Тарасова Л.Л.

¹ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

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

Модели, описывающие состояние внутри почвы и на ее поверхности, применяются в агрометеорологических, гидрологических задачах и численном прогнозе погоды для задания нижнего граничного условия моделей атмосферы.

Согласно многочисленным исследованиям, влажность почвы, одна из прогностических переменных моделей подстилающей поверхности, является критически важной характеристикой для прогноза волн тепла на временных масштабах от нескольких недель до нескольких месяцев.

В модели ПЛАВ для долгосрочного прогноза погоды используется многослойная модель почвы ИВМ – РАН МГУ. Модель имеет 9 уровней. В ней решаются уравнения теплопроводности и диффузии влаги. Теплопроводность и теплоемкость почвы являются функциями ее влагосодержания. А количество влаги, в свою очередь, через влагопроводность и другие элементы прогностического уравнения зависит от гранулометрического состава почвы. В нашем случае, от процентных содержаний песка и глины.

Для оценки степени влияния задания состава почвы на прогноз атмосферной циркуляции в глобальной модели ПЛАВ был проведен следующий эксперимент. Поля процентного содержания песка и глины из базы данных ECOCLIMAP были заменены на аналогичные из более современной базы Global Soil Dataset for use in Earth System Models (GSDE). Затем были вычислены 2 серии ансамблевых долгосрочных прогнозов погоды моделью ПЛАВ с обоих наборов данных по 10 членов ансамбля каждый. Состав почвы влияет на ее влажность, а влажность является одним из основных предикторов волн аномального тепла, поэтому прежде всего оценивались изменения в прогнозе именно этого явления. Для анализа было выбрано несколько эпизодов.

Использование новых почвенных полей позволило правильно спрогнозировать знак аномалий полей температуры на высоте 850 гПа. Однако по данным модели ПЛАВ полученные аномалии, имея схожую структуру, оказались существенно меньше по величине по сравнению с данными реанализа ERA5. Кроме того, применение нового состава почвы позволило получить положительные среднемесячные аномалии геопотенциала, в то время как при старом составе этого добиться не удавалось.

Временная вариабельность потоков углекислого газа и метана в грядово-мочажинном комплексе болота Мухрино

^{1,2,3}Дюкарев Е.А., ¹Дмитриченко А.А., ^{1,4}Суворов Г.Г., ¹Лапшина Е.Д.

¹Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

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

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

⁴Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

E-mail: dekot@mail.ru

В докладе представлены результаты наблюдений за потоками парниковых газов на научно-полевой станции Мухрино (Ханты-Мансийский Автономный округ - Югра). Полевая станция "Мухрино" расположена в центральной части Западной Сибири в биоклиматической зоне средней тайги, в 20 км к юго-западу от города Ханты-Мансийска, на второй террасе левого берега реки Иртыш (недалеко от слияния с рекой Обь). Исследована суточная и годовая динамика характеристик микроклимата, составляющих теплового и радиационного баланса, уровней болотных вод и температуры почвы грядово-мочажинного болотного комплекса Мухрино.

Суммарный экосистемный обмен с 1 октября 2021 г. по 30 сентября 2022 г. оценен в -82.8 гС м^{-2} . Значимое поглощение углерода в болотной экосистеме зарегистрировано с мая по август. Всего за теплый период экосистемный обмен составил -114.8 гС м^{-2} . В октябре при снижении интенсивности фотосинтеза, но еще больших значениях экосистемного дыхания, суммарный экосистемный обмен становится положительным. С октября по апрель болото является источником углерода с интенсивностью от 3.5 до 5.9 гС м^{-2} в месяц.

В период с 1 октября 2021 г. по 30 сентября 2022 г. суммарное испарение оценено в 304 мм, что составило 40 % от Р (507 мм). За теплый период 2022 г (май-август) выпало 172 мм или 34 % от годовой суммы осадков. Испарение за теплый период 2022 г (249 мм) вносит основной вклад (82%) в годовое испарение.

Применение трёхмерной гидродинамической модели для описания потоков диоксида углерода и метана над неоднородной лесной поверхностью

¹Гибадуллин Р.Р., ¹Мухартова Ю.В., ²Дускаев М.З., ²Мамадиев Н.А., ²Махмудова Л.Ш., Керимов И.А., ¹Ольчев А.В.

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

²Грозненский государственный нефтяной технический университет им. академика М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

E-mail: ravil00121@mail.ru

Лесные экосистемы играют одну из ключевых ролей в формировании глобального обмена парниковыми газами между землей и атмосферой (Bonan, 2008). Наиболее популярный современный метод измерения экосистемных потоков парниковых газов, метод турбулентных пульсаций (eddy covariance), оказывается неприменимым в случаях с сильной неоднородностью рельефа и растительности (Бурба и др., 2016). Так же, над неоднородными поверхностями сильно ограничено использование одномерных моделей, которые основаны на предположении об однородности подстилающей поверхности (Sellers et al. 1997; Olchev et al., 2002; Гусев и др., 2010). Эффективным методом для оценки экосистемных потоков в данном случае служат трехмерные математические модели переноса, основанные на уравнениях термо-гидродинамики (Mukhartova et al., 2019; Sogachev et al. 2002).

В работе использована трёхмерная математическая модель, основанная на решении системы уравнений Навье-Стокса, с осреднением Рейнольдса (RANS) и гипотезой Буссинеска, для расчета полей скорости и коэффициента турбулентного обмена (Mukhartova et al. 2023, Sogachev et al. 2006). В модели в качестве входных параметров используются результаты наблюдений на участке Рошни-Чу карбонового полигона в Чеченской республике: метеорологические данные; результаты камерных измерений потоков с поверхности почвы в летний и осенний сезоны, скорректированные с поправкой на зависимость эмиссионного потока CO₂ с поверхности почвы от приземной скорости ветра (Смагин и др., 2021); результаты измерений параметров фотосинтеза; данные спутниковой и лидарной съемки рельефа и растительности.

В результате модельных экспериментов получено, что в летний период с солнечной погодой исследуемая территория характеризуется значительной неоднородностью потоков, изменяющихся над растительным покровом от 14 до -24 мкмоль/м²с, со средним потоком выше крон около -20 мкмоль/м²с. Так же результаты были сравнены с расчётами моделирования потока CO₂ в случае плоского рельефа. Выяснено, что разница на наиболее крутых наветренных склонах достигает 30 мкмоль/м²с, что показывает значительное влияние неоднородности рельефа на распределение потоков. В осенний период при отсутствии листвы территория является источником CO₂, со средним потоком, направленным к атмосфере, 1 мкмоль/м²с. Поток метана как летом, так и осенью направлен из атмосферы к земле и в среднем по территории равен 0.7 и 0.6 нмоль/м²с соответственно.

Пространственная неоднородность потоков в основном связана с неоднородностью распределения коэффициента турбулентного обмена. Максимумы потоков приурочены преимущественно к участкам с наибольшим турбулентным обменом, то есть к наветренным склонам или наиболее высоким точкам. Выявлено, что даже при отсутствии стока возможны локальные участки, с потоком направленным к земле, из-за сильных вертикальных движений при обтекании препятствий.

- Работа выполнена в рамках госзадания FZNU-2021-0012 «Комплексная интерпретация геофизических и геоэкологических данных с целью изучения баланса парниковых газов (на примере Чеченской Республики)».

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авилов В.К., Мамкин В.В. Метод турбулентных пульсаций Краткое практическое руководство // LI-COR Biosciences - ИПЭЭ РАН: Москва, 2016. 223 с.
2. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 326 с.
3. Смагин А. В., Карелин Д. В. О влиянии ветра на газообмен почвы и атмосферы // Почвоведение. — 2021. — № 3. — С. 327–337.
4. Bonan, G.B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. Science 2008, 320, p. 1444–1449.
5. Mukhartova Y. V., Dyachenko M. S., Mangura P. A. et al. Application of a three-dimensional model to assess the effect of clear-cutting on carbon dioxide exchange at the soil - vegetation - atmosphere interface // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 368

6. Mukhartova Y. V., Kurbatova J. A. et al. Modeling Tool for Estimating Carbon Dioxide Fluxes over a Non-Uniform Boreal Peatland // Atmosphere. 2023. V. 14. P. 625.
7. Oltchev A., Cermak J., Nadezhdina N. et al. Transpiration of a mixed forest stand: field measurements and simulation using SVAT models. Boreal Env. Res. 2002. V. 7(4). P. 389-397.
8. Sellers P., Dickinson R.E., Randall D.A. et al. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere // Science. 1997. V. 275. P. 502-509.
9. Sogachev A., Panferov O. Modification of two-equation models to account for plant drag. Boundary-Layer Meteorol. 2006. V. 121(2). P. 229-266.
10. Sogachev, A., Menzhulin, G.V., et al. A simple three-dimensional canopy planetary boundary layer simulation model for scalar concentrations and fluxes. Tellus 2002, 54B, 784-819.

Микропластик в озере Байкал: гипотетические сценарии

Цветова Е.А.

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

Пластисфера – это сравнительно новый термин, который стал все чаще употребляться в обиходе в связи с распространением пластика в нашей жизни. Этот материал искусственного происхождения стал незаменимым во многих сферах, благодаря таким его свойствам, как прочность и химическая инертность. Производство пластика растет во всем мире, однако плавающие острова пластика в океане заставляют задуматься о дальнейшей судьбе планеты. В последнее время особое внимание стали обращать также на микро- и нанопластики. Они невидимы невооруженным глазом, но имеют возможность распространяться в экосистемах различного уровня, достигая, в конечном счете, человека.

Чтобы иметь представление о реальном состоянии проблемы микропластика (МП) в озере Байкал, безусловно нужны натурные исследования. По немногочисленным данным мониторинга в озере, известно, что наш объект Всемирного наследия загрязнен ничуть не меньше, чем другие водные объекты с более длинной историей поступления МП [1,2]. В случае с МП, получение данных – это набор нетривиальных действий, при проведении которых необходимо соблюдать правила сбора образцов, а их дальнейший анализ требует работы в лаборатории с соответствующим оборудованием, поскольку от разрешения последнего зависит точность определения данных [2]. Понятно, что таких исследований не может быть много, да и ответы не поступают в реальном времени. Поэтому математическое моделирование призвано сыграть здесь важную роль.

Круг проблем, возникающих при математическом моделировании природных объектов весьма широк. Концентрированная их суть выражается в большом числе неопределенностей, возникающих на разных этапах моделирования, начиная с недостатка знаний о самих процессах и заканчивая постановками конкретных задач. Среди этих неопределенностей для решения прямых задач существенно необходимо задание, в числе основных параметров, источников эмиссии, из которых МП поступает в озеро.

Численная модель гидротермодинамики вод в негидростатическом приближении и новая версия модели распространения примесей, учитывающая цели исследований, используются для воспроизведения поведения МП озере [2]. Для придания общности выводам, при получении результатов мы используем сценарный подход, который позволяет получить вариантную оценку в зависимости от задаваемых параметров. В докладе приводятся результаты сценарных расчетов с различными вариантами задания источников загрязнений, связанных с распространением МП, и параметров, участвующих в моделях.

■ Работа выполнена в рамках бюджетного проекта ИВМиМГ СО РАН 0251-2021-0003.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ильина О.В., Колобов М.Ю., Ильинский В.В. Пластиковое загрязнение прибрежных поверхностных вод среднего и южного Байкала // Водные ресурсы, 2021, т. 48, № 1, с. 42-51
2. M. V. Moore, M. Yamamuro, O. A. Timoshkin, A. A. Shirokaya, Y. Kameda Lake-wide assessment of microplastics in the surface waters of Lake Baikal, Siberia, //Limnology, 2022, v.231 P.265-274.
3. Tsvetova E. Transport model: microplastic in Lake Baikal // Proc. SPIE V. 12341, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics; 12341 65 (2022).

Влияние используемых метеорологических данных на качество моделирования термического режима озер

Терешина М.А., Ерина О.Н., Соколов Д.И.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия
E-mail: martereshina@yandex.ru

Моделирование температуры воды и динамического режима озер является основой любых лимнологических расчетов и прогнозов, включая оценку возможного влияния климатических изменений на экологическое состояние озер. При этом важным вопросом является выбор источника метеорологических данных в качестве форсинга для озерной модели, так как данные натурных измерений, результаты климатического моделирования и реанализы сильно различаются и по доступности информации, и по степени репрезентативности по отношению к погодным условиям над малыми и средними водоемами.

В данной работе проведена оценка различий в качестве воспроизведения хода температуры воды в подмосковном оз. Глубокое при использовании различных входных данных: измерений автоматической станции на берегу озера, государственной метеорологической станции (г. Можайск, 40 км от озера) и двух реанализов – NCEP/DOE Reanalysis II (пространственное разрешение $1,905^\circ \times 1,875^\circ$) и 20CRv3-ERA5 (пространственное разрешение $0,6^\circ \times 0,6^\circ$).

Озеро Глубокое имеет площадь поверхности $0,6 \text{ км}^2$ и максимальную глубину около 30 м, не имеет русловых притоков, внутригодовые колебания уровня воды не превышают обычно 0,5 м. В течение периода с мая 2018 г. по июнь 2019 г. в наиболее глубоководной части озера был установлен буй с логгерами, фиксирующими температуру воды с шагом 2 м по вертикали.

Для воспроизведения термического режима озера использовалась одномерная модель GLM. К входным метеорологическим данным модели относятся температура и относительная влажность воздуха, скорость ветра, количество атмосферных осадков, а также данные о приходящей солнечной радиации. При отсутствии актинометрических наблюдений возможен внутримодельный расчет хода радиации по данным об общей облачности. Автоматическая метеостанция из актинометрических наблюдений записывает только приходящую коротковолновую радиацию. На метеостанции в г. Можайск измеряется только величина общей и нижней облачности, актинометрические наблюдения не проводятся. Реанализы NCEP/DOE и 20CRv3-ERA5 предоставляют все необходимые показатели, включая приходящую коротковолновую и длинноволновую радиацию.

Для каждого варианта метеоданных была выполнена процедура калибровки модели, после чего оценивалась среднеквадратическая ошибка расчета (RMSE) по отношению к зафиксированной логгерами температуре воды. Использование исключительно данных автоматической метеостанции не позволило достичь высокого качества моделирования: величина RMSE после калибровки составила $3,7^\circ \text{C}$. Значительно лучший результат был достигнут при использовании данных метеостанции Можайск – $2,3^\circ \text{C}$. Использование данных реанализов позволило достичь еще лучшей сходимости: использование форсинга NCEP/DOE позволило достичь ошибки в $1,9^\circ \text{C}$, форсинга 20CRv3-ERA5 – $1,5^\circ \text{C}$.

Наилучшее качество воспроизведения термического режима наблюдается при комбинировании данных наземных наблюдений с радиационным форсингом реанализов: так, при дополнении данных метеостанции Можайск потоками радиации из массива данных 20CRv3-ERA5 величина RMSE снижается до $1,3^\circ \text{C}$, при дополнении измерений автоматической метеостанции рядами приходящей длинноволновой радиации из реанализа 20CRv3-ERA5 – до $1,6^\circ \text{C}$.

Таким образом, критическое значение при расчете теплового баланса озера играет наличие данных по приходящей коротковолновой и длинноволновой радиации. В связи с этим, измерения стационарных метеостанций, оснащенных актинометрическими приборами, либо дополненные информацией о солнечной радиации, полученной из других источников, оказываются наилучшим вариантом форсинга даже при существенной удаленности их от объекта моделирования. В то же время даже при существенных расхождениях массивов данных реанализов с измеренными на метеостанциях величинами скорости ветра, влажности воздуха и количества осадков, использование их в качестве метеофорсинга позволяет достичь почти столь же высоких результатов. В случае же локальных автоматических метеостанций особенности их установки и обслуживания могут приводить к большому искажению результатов и непригодности получаемых данных для модельных расчетов.

Калибровка одномерной термогидродинамической модели LAKE3.0 для оценки эмиссии метана из искусственных водоемов

^{1,2,3} Ломов В.А., ^{1,2} Романенко В.А., ^{1,4} Степаненко В.М.

¹ Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

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

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

⁴ Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

В настоящее время оценки вклада искусственных водоемов в увеличение концентрации метана в атмосфере характеризуются большой неопределённостью. Метан является неотъемлемым элементом водной экосистемы – образуясь в донных отложениях при бескислородных условиях, он достигает поверхности воды в виде пузырьковой и диффузионной составляющих потока. Кроме того, для водохранилищ имеет место выброс метана в атмосферу при дегазации потока воды в нижних бьефах гидроузлов.

Наблюдения за потоками метана из водохранилищ проведены на большом числе объектов, имеют достаточно разрозненный пространственно-временной масштаб – на ряде искусственных водоемов проведены детальные съемки с пространственным охватом неоднородностей потока CH_4 , на других измерения проведены в единственной точке. Непрерывный мониторинг концентрации и потока метана с внутрисуточным разрешением продолжительностью более 1 года требует значительных ресурсов и проводится на небольшом числе водохранилищ. Поэтому оценки годового выброса метана из водохранилищ только по натурным наблюдениям обладают большой неопределённостью.

Сократить неопределённость возможно при помощи математических моделей. По имеющимся натурным данным модель можно откалибровать для конкретных временных отрезков, после чего рассчитать с ее помощью эволюцию потоков метана из водоема в течение года или нескольких лет, таким образом получив оценку эмиссии более достоверную (по крайней мере, с точки зрения физической обоснованности), чем путём формальной экстраполяции и/или интерполяции *in situ* данных.

Одна из таких моделей, с помощью которой можно решить данную задачу – одномерная термогидродинамическая модель LAKE3.0, разработанная в НИВЦ МГУ. В модели реализован блок биохимических процессов, позволяющий рассчитывать цикл метана в водном объекте. В модели рассчитывается генерация метана в донных отложениях, диффузионный и пузырьковый перенос метана, окисление его в водной толще, процессы растворения пузырьков в воде, дегазация через плотину и другие процессы, влияющие на метановый цикл. С помощью данной модели разработан алгоритм калибровки по данным натурных наблюдений за температурным, кислородным и метановым режимом водохранилища и оценена годовая эмиссия с поверхности Рыбинского и Бурейского водохранилищ. Продемонстрированная на примере этих двух разнотипных водохранилищ методика оценки годовой эмиссии может быть применена для уточнения оценок эмиссии метана с разных водохранилищ мира.

■ Работа выполнена при поддержке ПАО “РусГидро” (договор №1010-416-2021 от 26.04.2021).

Чувствительность модели деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ к параметрам почвы и растительности на примере регионов юга Западной Сибири

^{1,2}Рязанова А.А., ^{1,2,3,4,5}Богомолов В.Ю., ^{2,4,5,6}Степаненко В.М.

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

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

³Томский государственный университет, Геолого-географический факультет, Томск, Россия

⁴Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

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

⁶Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

E-mail: r.ann.1194@gmail.com

В данной работе проводится ряд экспериментов для определения чувствительности модели деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ [1, 2] к новым входным данным о параметрах почвы и растительности и к возможному варьированию пространственного разрешения на примере региональных расчетов для территории юга Западной Сибири.

С учетом этого в данной работе выполняются следующие эксперименты:

1. Запуск модели деятельного слоя суши для юга Западной Сибири с исходными данными и пространственным разрешением 0.5x0.5;
2. Запуск модели деятельного слоя суши с использованием глобального набора данных о составе почв и их гидрофизических характеристик с пространственным разрешением 0.5x0.5 [3].
3. Запуск модели деятельного слоя суши с использованием глобального набора данных о составе почв и их гидрофизических характеристик, а также с использованием данных о типах подстилающей поверхности из продуктов, основанных на спутниковых данных с пространственным разрешением 0.5x0.5.
4. Запуск модели деятельного слоя суши с использованием глобального набора данных о составе почв и их гидрофизических характеристик, а также с использованием данных о типах подстилающей поверхности из продуктов, основанных на спутниковых данных с меньшим пространственным разрешением.

Результатом каждого эксперимента является набор гидротермодинамических характеристик почв (температура, влажность и др.), на основе которых проводится анализ и оценивается чувствительность модели деятельного слоя суши к новым входным параметрам почвы и растительности, а также к возможному варьированию пространственного разрешения для территории юга Западной Сибири.

Все региональные расчеты проводятся с помощью оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М.В. Ломоносова [4].

- Работа выполнена в рамках реализации ВПГ ГЗ «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лыков В.Н., Палагин Э.Г. Динамика взаимосвязанного переноса тепла и влаги в системе атмосфера-почва. // Метеорология и гидрология. 1978. №8. С. 48–56.
2. Травова С.В., Степаненко В.М., Медведев А.И., Толстых М.А., Богомолов В.Ю. Качество воспроизведения состояния почвы моделью деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ в составе модели прогноза погоды ПЛАВ. // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 5–24. <http://dx.doi.org/10.52002/0130-2906-2022-3-5-24>.
3. Dai, Y., Xin, Q., Wei, N., Zhang, Y., Shangguan, W., Yuan, H., et al. A global high-resolution data set of soil hydraulic and thermal properties for land surface modeling. // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2019. 11. <https://doi.org/10.1029/2019MS001784>.
4. Vl. Voevodin, A. Antonov, D. Nikitenko, P. Shvets, S. Sobolev, I. Sidorov, K. Stefanov, Vad. Voevodin, S. Zhumatiy: Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community. // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2016. Vol.6. No.2. pp.4–11. DOI:10.14529/jsf190201.

Динамика тепловлагоденоса в почве с мерзлыми грунтами на основе модели деятельного слоя ИВМ РАН в сравнении с данными измерений

Логинов А.С., Богомолов В.Ю., Воропай Н.Н., Рязанова А.А.

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

E-mail: loginovasim@gmail.com

В силу глобального изменения климата в конце XX – начале XXI вв. происходят изменения в тепловом балансе поверхности суши. Эти изменения приводят к таянию мерзлотных грунтов, и, как следствие, увлечению доли углеродных соединений в атмосфере.

Целью работы является моделирование одномерного тепловлагоденоса и процессов таяния и образования льда в сравнении с данными натурных измерений. Численное решение уравнений тепловлагоденоса осуществляется в рамках модели деятельного слоя НИВЦ-ИВМ РАН.

Задачи исследования заключаются в определении чувствительности модели к различным начальным условиям, так же верификации модели данными измерений. В качестве таких данных используются данные измерений со станции Тунка (р.Бурятия).

Полученные результаты могут определить интервал чувствительности модели к начальным условиям, и оценить правильность воспроизведения динамики мерзлых грунтов для очагового комплекса вечной мерзлоты расположенной значительно южнее большей части вечной мерзлоты северной Евразии.

Мониторинг температуры грунта в глубокой скважине на площадке МО МГУ

Фролов Д.М.

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

E-mail: denisfrolov@mail.ru

Согласно недавним постановлениям президента и правительства РФ в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (АНИИ) создано новое оперативно-производственное подразделение - Центр мониторинга состояния многолетней мерзлоты. Новое подразделение нацелено управлять инфраструктурой государственной системы мониторинга многолетнемерзлых пород, создание которой должно начаться в 2023 году. Центр будет обеспечивать организацию и функционирование сети пунктов наблюдений, приём, анализ и хранение данных, подготовку справочной и отчетной информации и передачу сведений в Единый государственный фонд данных о состоянии окружающей среды и ее загрязнений. Всего концепцией системы мониторинга предусмотрено оборудование 140 пунктов наблюдений за изменениями многолетнемерзлых пород, которые расположатся от крайнего севера до Тувы и Алтайского края. Пункты разместят на базе станций Росгидромета, что позволит существенно снизить затраты на реализацию проекта. Новая наблюдательная система позволит

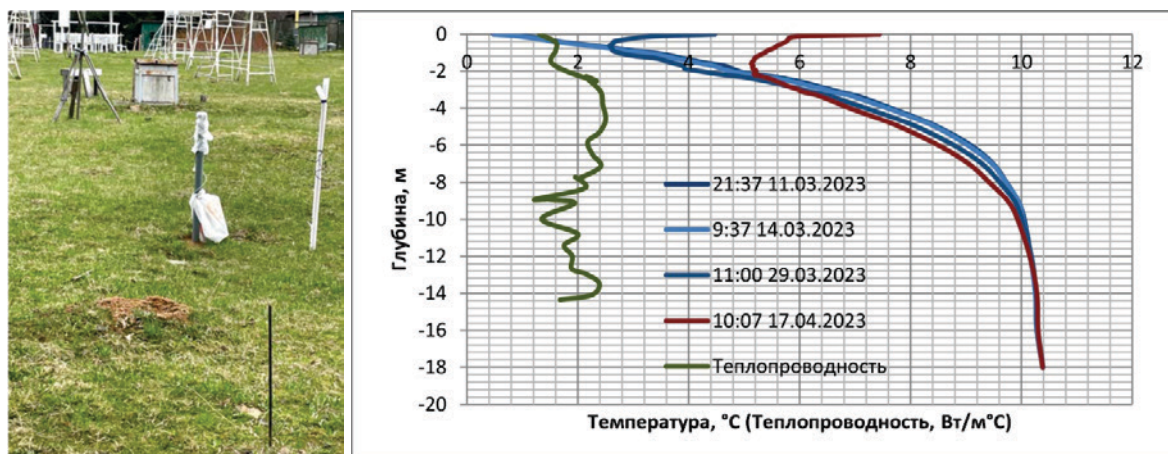


Рис. 1. Внешний вид скважины и изменение температуры по глубине (по вертикали метры, по горизонтали температура) на площадке МО МГУ в начале 2023 года.

вести полномасштабный мониторинг многолетней мерзлоты, которая занимает две трети территории России. Первые 20 пунктов мониторинга планируется развернуть уже в этом году. Полностью развернуть систему наблюдений планируется к концу 2025-го года. В свете этого на площадке МО МГУ была пробурена термоскважина и установлены логгеры для измерения температуры до глубины 18 метров. На рисунке 1 показано изменение температуры по глубине (по вертикали метры, по горизонтали температура) на площадке МО МГУ в начале 2023 года.

На приведённом рисунке 1 изображено изменение температуры по глубине (по вертикали метры, по горизонтали температура) на площадке МО МГУ в начале 2023 года. Можно заметить, что точка нулевых колебаний находится на глубине чуть ниже 10 м. Далее идёт изменение температуры за счёт геотермического потока.

- Работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой Географического факультета МГУ «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (121051100164-0) и «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4).

Температурный мониторинг грунта на перевале Анзоб (Таджикистан)

Фролов Д.М., Кошурников А.В., Гагарин В.Е., Набиев И.А., Додобоев Э.И.

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

E-mail: denisfrolov@mail.ru

Одним из факторов определяющих устойчивость селе- и лавиноудерживающих сооружений в горных территориях на склонах является динамика деятельного слоя, подстилающего основания. В пределах Гиссарского хребта сезонно-мёрзлый слой представляет собой весьма динамичную систему, как в инженерно-геологическом плане (развитие солифлюкции и других склоновых процессов), так и геокриологическом аспекте (мощность его в разные года меняется почти в 2 раза в зависимости от условий снегонакопления). Проведение режимных наблюдений на стационарных площадках за состоянием и динамикой развития мерзлых пород даёт возможность показать достаточно полную картину геокриологических условий исследуемой территории. Для этого на северном и южном макросклоне перевала Анзоб (Гиссарский хребет) были пробурены термоскважины и установлены логгеры для измерения температуры до глубины 3 метра. На рисунке 1 показано изменение температуры по глубине (по вертикали, метры) и по времени (по горизонтали, декады) на перевале Анзоб (Гиссарский хребет) за сезон наблюдений 2019-2020 года на северном и южном макросклоне.

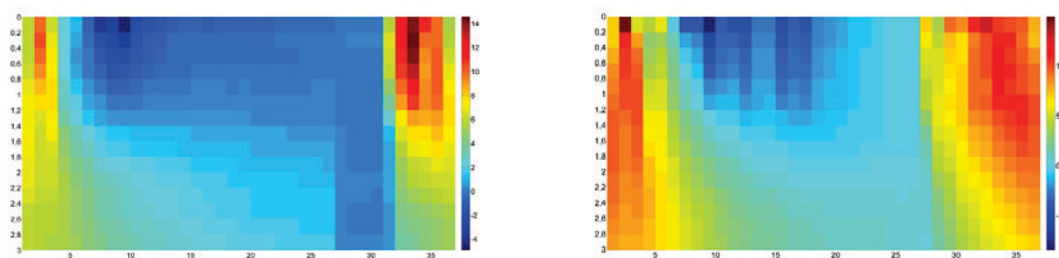


Рис. 1. Изменение температуры по глубине (по вертикали, метры) и по времени (по горизонтали, декады) на перевале Анзоб (Гиссарский хребет) за сезон наблюдений 2019-2020 года на северном и южном макросклоне.

На приведённом рисунке 1 изображено изменение температуры по глубине (по вертикали, метры) и по времени (по горизонтали, декады) на перевале Анзоб (Гиссарский хребет) за сезон наблюдений 2019-2020 года для северного и южного макросклона по результатам наблюдения в скважинах. Можно заметить, что для северного макросклона преобладают более низкие температуры грунта и более длительный период промерзания грунта.

- Работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой Географического факультета МГУ «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (121051100164-0) и «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4).

Определение параметров конвективных вихрей в пограничном слое атмосферы из совместных сейсмических и метеорологических измерений

Курганский М.В.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
E-mail: kurgansk@ifaran.ru

Предложена теоретическая модель для определения угла наклона земной поверхности при прохождении конвективного вихря, в частности пыльного вихря, вблизи чувствительного сейсмографа. Для лоренцевского профиля падения давления в вихре показано, что в этом случае совместные сейсмические и метеорологические (в том числе барометрические) измерения позволяют определить упругие свойства грунта при наличии дополнительных сведений о максимальном приближении вихря к измерительным приборам. Наоборот, если заранее известны упругие свойства грунта, то совместные сейсмические и метеорологические измерения позволяют определить все основные параметры вихря, а также его максимальное приближение к измерительным приборам. Это иллюстрируется примерами конвективных вихрей, зарегистрированных во время миссии InSight на Марс.

О спиральности пограничных слоев экмановского типа

Ингель Л.Х.

ФГУБ «Научно-производственное объединение «Тайфун», Россия
E-mail: lev.ingel@gmail.com

Фактор спиральности атмосферных течений в последние десятилетия привлекает все большее внимание. Анализ спиральности активно применяется для диагноза и прогноза атмосферных процессов. В частности, анализируется спиральность течений в пограничном слое атмосферы (ПСА). Например, в ряде недавних работ интегральная спиральность пограничного слоя рассматривается как важная характеристика, существенная для зарождения и динамики полярных мезоциклонов. В простейшей стационарной экмановской модели погранслоя с постоянным коэффициентом вязкости проинтегрированная по высоте спиральность, как известно, равна половине квадрата модуля геострофического ветра. Представляет интерес вопрос: насколько чувствительны относящиеся сюда результаты к идеализациям модели ПСА. Например, погранслоем в полярных мезоциклонах должен, как правило, быть существенно нестационарным, поскольку среднее время их существования составляет лишь порядка 15 час. Это время бывает недостаточным для геострофической адаптации и динамика ПСА не успевает выйти на стационарный режим. Существенно влиять на результаты могут также различные гипотезы о турбулентном обмене. В настоящей работе исследуется влияние некоторых модельных допущений на расчетную спиральность пограничных слоев экмановского типа.

1. Фактор нестационарности. Экмановская модель пограничного слоя обобщена на случай нестационарного поля давления. Найдено аналитическое решение для простейшей (экспоненциальной) зависимости от времени. Показано, что, с учетом нестационарности, спиральность ПСА может быть значительно меньше, чем в стационарной экмановской модели. Безразмерным критерием является произведение характерного времени развития погранслоя и параметра Кориолиса.

2. Уточнение параметризации турбулентного обмена. В классической экмановской модели ПСА коэффициент турбулентного обмена предполагается постоянным. Это обычно приводит к завышенным углам поворота ветра. При этом завышается и спиральность течения. Нами выполнены численные расчеты для более реальной модели, в которой учтена вертикальная неоднородность коэффициента турбулентного обмена, особенно вблизи подстилающей поверхности. Показано, что значения спиральности при этом могут быть значительно меньше, чем в классической модели.

3. Модель с квадратичным трением на нижней границе. Рассмотрена также модель с альтернативной параметризацией турбулентного обмена. Вариациями коэффициента турбулентного обмена в ней пренебрегается, но на нижней границе задается условие квадратичного трения. В такого типа моделях предполагается, что нижняя граница соответствует не подстилающей поверхности, а, например, верхней границе приземного (приводного) слоя или уровню стандартных метеорологических наблюдений, так что на этом уровне допускается некоторое «проскальзывание». Такого типа модели в какой-то мере апробированы в литературе. Допущение "проскальзывания" приводит к уменьшению поворотов ветра в пограничном слое и уменьшению спиральности. Показано, что этот эффект может быть значительным.

Структура турбулентности в приводном/приземном слое атмосферы в прибрежных зонах

^{1,2}Репина И.А., ¹Барсков К.В., ¹Пашкин А.Д., ¹Артамонов А.Ю.

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

²Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Разработка параметризаций потоков тепла, массы, импульса и вещества в системе атмосфера-море/суша имеет очевидное значение для моделирования процессов в системе атмосфера-океан/суша, включая моделирование погоды и климата, прогноз опасных явлений, а также другие приложения, например, оценки эффективности береговых ветряных электростанций и прогнозирования существования приводных волноводов для распространения электромагнитных сигналов.

В докладе представляются результаты измерений атмосферной турбулентности в слое от 1- 21 м над уровнем моря и сопротивления морской поверхности и суши при ветрах различного направления, в том числе с горного склона в прибрежной зоне Черного моря. Были рассчитаны параметры поверхностного слоя: динамическая скорость (u^*), масштаб Обухова (L), турбулентный поток тепла (H), кинетическая энергия турбулентности (ТКЭ), турбулентные статистические моменты.

Показано, что профили средней скорости ветра и интенсивность турбулентности существенно отличаются от характеристик пограничного слоя, типичного для условий открытого моря или прибрежных зон с ровным рельефом береговой линии. Экспериментальные данные позволяют оценить развитие внутреннего пограничного слоя, адаптированного к морской поверхности. В случае берегового бриза воздушный поток подобен струйному течению устойчиво стратифицированного холодного воздуха над теплым морем с максимумом скорости на высоте около 6 м. Для этого течения характерны постоянные по высоте скорость диссипации энергии турбулентности и коэффициент турбулентной вязкости, а также низкочастотные флуктуации скорости, связанные с гравитационными волнами и адвекцией турбулентности с берега. Зависимость коэффициента сопротивления от скорости ветра или от возраста волн более устойчива по сравнению с данными для открытого моря, но при этом возраст волн не является универсальным параметром на больших и коротких разгонах.

Коэффициент аэродинамического сопротивления над поверхностью суши на порядок выше, чем над поверхностью моря. Внутренний пограничный слой в прибрежной зоне может быть как устойчивым, так и неустойчивым и резко меняется на границе раздела суша-поверхность. Статистическая зависимость вертикальных градиентов масштабированной скорости ветра и температуры от параметра устойчивости Монина–Обухова в прибрежной зоне слабая, или вообще отсутствует. Анализ высших турбулентных моментов показывает наличие когерентных структур в поле ветра при береговых ветрах.

■ Работа выполнена при поддержке РФН, проект 21-17-00249.

Влияние разводий и наличия снега на льду на термический режим над морским льдом в Арктике

¹Чечин Д.Г., ¹Шестакова А.А., ²Махотина И.А.

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

²Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: chechin@ifaran.ru, makhotina@aari.ru

Для площади, занимаемая разводьями в Арктике, а также толщина снега на льду восстанавливаются по спутниковым данным с большой неопределенностью. Более того, во многих атмосферных реанализах снежный покров над морским льдом отсутствует. Вместе с тем, эти параметры могут существенно влиять на термический режим над льдом и тепловой баланс на его поверхности. В данной работе, влияние разводий и толщины снега на термический режим над морским льдом оценивается по результатам экспериментов с трехмерной моделью WRF и простой аналитической модели пограничного слоя и морского льда. С помощью модели WRF воспроизведены три случая выхолаживания над морским льдом в Арктике во время полярной ночи с использованием полей сплоченности морского льда с разрешением 1 км и заданием толщины снега по данным микроволнового радиометра AMSR-E. Верификация результатов моделирования проведена на основе сравнения с наблюдениями на дрейфующей станции «Северный Полюс – 35». Показано, что моделируемая температура воздуха над морским льдом, а также составляющие теплового баланса, осредненные по району Центральной Арктики радиусом порядка 100 км вокруг дрейфующей станции, сильно чувствительны к доле площади разводий, а также толщине снега. Чувствительность, полученная в результате реалистичных экспериментов, находится в хорошем согласии с аналитическими оценками на основе простой энергобалансовой модели. Результаты указывают на необходимость дальнейшего развития методов восстановления сплоченности льда и толщины снега по спутниковым данным, а также методов учета наличия разводий в численных моделях атмосферы.

Шквалы и пыльные бури над Европейской территорией России: диагностика и моделирование

^{1,2}Вазаева Н.В., ¹Чхетиани О.Г.

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

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

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

Опасность шквалов и сложность их прогнозирования связана с внезапностью их формирования. Кроме того, долгоживущая линия шквала может вызвать сильную пыльную бурю над аридными регионами. Так, в конце сентября-октябре 2020 года пыль от мощной пыльной бури, развившейся над Калмыкией, для которой характерна засушливая подстилающая поверхность, была зафиксирована на две с лишним тысячи км от места зарождения бури.

Проанализированы характеристики шквалов и нескольких пыльных бурь над Европейской территорией и югом России с использованием мезомасштабной негидростатической атмосферной модели WRF-ARW, в частности с использованием WRF-LES, WRF-Chem, а также экспериментальных данных, полученных в экспедициях ИФА им. А.М. Обухова РАН в южной части Европейской территории России 2002-2021 гг. и данных анемометров с высотной мачты Обнинска за последние несколько лет.

Динамику шквалов и интенсивность пыльных бурь в значительной степени определяют циркуляционные структуры различного пространственного и временного масштабов: мезомасштабная и субмезомасштабная валиковая циркуляция. Моделирование конкретных случаев шквалов и пыльных бурь на адаптированной модели WRF, способной разрешать когерентные структуры различного масштаба и ориентации, а также учитывать влияние на динамику шквалов, в то же время позволило сделать вывод об интенсификации эмиссии аэрозоля когерентными структурами.

Результаты анализа экспериментальных данных и адаптация модели WRF под конкретную территорию с учетом параметризации конвекции и эмиссии пыли и с включением в анализ вторичных вихревых структур повысили точность описания АПС, что может быть использовано для улучшения прогноза экстремальных явлений.

■ Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 22-77-00098).

Особенности вертикального распределения пылевого аэрозоля при слабых и умеренных ветрах над аридными территориями

Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г., Голицын Г.С., Лебедев В.А.

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

E-mail: elen_am@inbox.ru

Аридные и субаридные территории [Maher, 2010] - основной источник пылевого аэрозоля [Shao, 2009], влияющего на процессы конденсации влаги (облакообразования) и радиационный баланс Земли.

Изменения концентрации пылевого аэрозоля в летнее время года связываются с усилением ветра [Ishizuka et al., 2008], с конвективными движениями (до 20–40%), связанными со спонтанным формированием термиков [Ju et al., 2018], а также с термоконвективным выносом при значительном прогреве поверхности и подъемом микрочастиц пыли из верхнего пористого слоя [Chkhetiani et al., 2012].

При многоуровневых дневных измерениях в аридных условиях в 2020–2022 г. (0.2, 0.4, 0.8, 1.6 и 3.2 м) выявлена степенная зависимость от высоты для массовой концентрации пылевого аэрозоля. Можно выделить три основных типа изменений концентрации с высотой: а) при слабом ветре (степени близки к -0.5); б) всплесковое изменение концентрации при усилении ветра (степени достигают и превышают значение -1); в) инверсии (рост концентрации с высотой на двух-трех нижних уровнях измерений). Степенная зависимость -0.5 обусловлена возникающим эффектом близко расположенных пузырьков прогретого вокруг пылинок воздуха [Малиновская Е. А. и др., 2023]. Всплесковые изменения концентрации связываются с возникновением турбулентных структур. Инверсии усиливаются с увеличением скорости ветра, отмечаются при резких изменениях температуры воздуха, достигают разности массовой концентрации на двух уровнях порядка 200 мкг/см³. Движущиеся у поверхности турбулентные структуры различного масштаба могут отрываться, что сопровождается выносом пылевого аэрозоля, находящегося внутри них вертикально вверх. Это создает всплеск изменений концентрации на разных высотах.

■ Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект 20-17-00214).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Maher, B. A., Prospero, J. M., Mackie, D., Gaiero, D., Hesse, P. P., & Balkanski, Y. Global Connections between Aeolian Dust, Climate and Ocean Biogeochemistry at the Present Day and at the Last Glacial Maximum // *Earth–Science Reviews*. 2010, Vol. 99, 1–2, P. 61–97.
2. Shao Y. *Physics and Modeling of Wind Erosion*. Springer, 2008. 452 с.
3. Ishizuka, M., Mikami, M., Leys, J., Yamada, Y., Heidenreich, S., Shao, Y., & McTainsh, G. H. Effects of soil moisture and dried raindrop crust on saltation and dust emission // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, Vol. 113, P. D24.
4. Ju, T., Li, X., Zhang, H., Cai, X., & Song, Y. Parameterization of dust flux emitted by convective turbulent dust emission (CTDE) over the Horqin Sandy Land area // *Atmospheric Environment*, 2018, Vol. 187. P. 62–69.
5. Chkhetiani, O. G., Gledzer, E. B., Artamonova, M. S., & Iordanskii, M. A. Dust Resuspension under Weak Wind Conditions: Direct Observations and Model // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, Vol. 12(11), P. 5147–5162.
6. Малиновская Е. А., Чхетиани О. Г., Голицын Г. С., Лебедев В. А. О вертикальном распределении пылевого аэрозоля в условиях слабых и умеренных ветров // *Доклады Российской Академии Наук. Научи о земле*, 2023, том 509, № 2, с. 250–258.

Numerical realisation of adaptive grids in large-eddy simulation models of the atmospheric boundary layer

^{1,2}Tkachenko E.V., ^{1,2,3}Debol'skiy A.V., ^{1,2,4}Mortikov E.V.

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

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

³Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

⁴Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: evtkachenko@hotmail.com

Studying turbulent processes of atmospheric boundary layer (ABL) includes taking the intradiurnal dynamics into account. Comprehensive modeling of this kind of dynamics requires sufficiently high resolution within the ABL itself. However, the presence of the diurnal cycle facilitates the alternation between the daytime convective boundary layer (CBL) and the nighttime stably stratified boundary layer (SBL), which differ in height very significantly. Moreover, the evolution from one state of ABL to another happens through transitional periods, which are non-stationary in nature and thus are even more sensitive to the choice of resolution (Tkachenko et al, 2021). Thus, there is a demand for implementation of adaptive grids, which allow for adaptation of the resolution locally to improve modeling accuracy while driving down the cost of computation.

In this study we inspect the feasibility of using adaptive grids for modeling intradiurnal processes in ABL using the large-eddy simulation (LES) model developed in collaboration between MSU and INM RAS (Tkachenko et al, 2022). A method chosen for implementation is based on the r-refinement (where the number of computational nodes is constant, but their coordinates change according to the resolution requirement) and is described in (Hyman & Li, 2004). A CBL test setup was chosen as a quasistationary state of ABL which features relatively straightforward dynamics and thus allows for preliminary verification of the algorithm. Then, we evaluated adaptive grids for other stages of the diurnal cycle. The results were compared with those obtained with a uniform grid. It is shown that the correct choice of the monitoring function, which controls the distribution of resolution throughout the domain, is paramount for successful modeling the selected process, as it can otherwise lead not only to inefficient change of resolution, but also to inaccuracies in modeling results. Also, one must choose carefully the magnitude of grid adaptation, as the slow change may lead to stagnation. On the other hand, fast change in grid resolution might result in instability of numerical solution. Further research will focus on finding the more optimal monitoring function for modeling the intradiurnal dynamics of ABL, as well as looking into uses of adaptive grid methods in other types of numerical models.

- This work is supported by Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the program of the Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics under the agreement № 075-15-2022-284».

REFERENCES:

1. Tkachenko E., Debol'skiy A., Mortikov E. Intercomparison of subgrid scale models in large-eddy simulation of sunset atmospheric boundary layer turbulence: computational aspects // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2021. V. 42. No. 7. P. 1580--1595.
2. Tkachenko E. V. et al. Large-Eddy Simulation and Parameterization of Decaying Turbulence in the Evening Transition of the Atmospheric Boundary Layer // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2022. T. 58. No. 3. P. 219-236.
3. Hyman J. M., Li S. An Adaptive Moving Mesh Method with Locally Refined Nested Grids for Partial Differential Equations. // Los Alamos National Laboratory. 2004. No. LA-UR-98-5460.

Оптимизация параметризаций турбулентного перемешивания в модели INMCM6

^{1,3}Дебольский А.В., ^{1,2}Мортиков Е.В., ^{2,1}Глазунов А.В., ²Володин Е.М., ^{1,4,5}Тарасова М.А.

¹Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

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

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

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

⁵ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

E-mail: and.debol@srcc.msu.ru

В работе рассматриваются локально-одномерной модели атмосферного пограничного слоя (АПС), использующиеся в новой версии климатической модели ИВМ РАН [1], а также более перспективные турбулентные замыкания. Анализируются результаты валидации и попытки оптимизации замыканий первого порядка и двухпараметрических замыканий для различных условий устойчивости в АПС, по сценариям, использовавшимся ранее для численных экспериментов с вихререзающими (LES) моделями [2-5]. Для условий устойчивой стратификации, на значительном наборе LES экспериментов, проведены попытки улучшения воспроизведения АПС с помощью оптимизации констант замыканий. Показано, что оптимизация замыканий первого порядка с помощью эволюционных алгоритмов дает удовлетворительные результаты. Для двухпараметрических замыканий, оптимизация осложнена наличием значительного количества локальных минимумов функционала ошибки. Предварительные климатические расчеты с улучшенными замыканиями первого порядка показали незначительное улучшение воспроизведения современного климата моделью при валидации по данными реанализа.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Volodin, E. M., Mortikov, E. V., Kostykin, S. V., Galin, V. Y., Lykossov, V. N., Gritsun, A. S., ... and Iakovlev, N. G. (2017). Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // Climate dynamics, 49(11), 3715-3734.
2. Beare R.J., Macvean M.K., Holtslag A.A.M., Cuxart J., Esau I., Golaz J.C., Jimenez M.A. et al. An intercomparison of large-eddy simulations of the stable boundary layer // Bound.-Layer Meteorol. 2006. V. 118, N 2. P. 247-272.
3. van der Linden S.J.A., Edwards J.M., van Heerwaarden C.C., Vignon E., Genthon C., Petenko I., Baas P., Jonker H.J.J., van de Wiel B.J.H. Large-Eddy Simulations of the Steady Wintertime Antarctic Boundary Layer // Bound.-Layer Meteorol. 2019. V. 173. P. 165-192.
4. Siebesma, A. P., Bretherton, C. S., Brown, A., Chlond, A., Cuxart, J., Duynkerke, P. G., ... & Stevens, D. E. A large eddy simulation intercomparison study of shallow cumulus convection // Journal of the Atmospheric Sciences 2003, V. 60 N. 10, P. 1201-1219.

Трехмерное численное моделирование термогидродинамики и биогеохимии водоемов суши

^{1,2,3}Гладских Д.С., ^{2,3,4}Мортиков Е.В., ^{2,5,6}Ломов В.А.

¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

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

³Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

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

⁵Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, Москва, Россия

⁶Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

E-mail: daria.gladskikh@gmail.com, evgeny.mortikov@gmail.com, lomson620@mail.ru

В настоящей работе предложена, разработана и реализована трехмерная модель генерации, переноса и стока биогеохимических примесей (растворенных газов и твердого углерода) во внутреннем водоеме, дополняющая модель термогидродинамики, в основе которой лежит RANS-подход (Gladskikh et al., 2019). Реализована возможность задания карты глубин реального водоема и усвоения данных атмосферного форсинга.

Ввиду объединения блоков динамики и биогеохимии обеспечивается воспроизведение моделью двусторонних связей, таких как вклад биопродуктивности за счет фотосинтеза в коэффициент экстинкции проникающей радиации. Для описания газообмена использована т.н. «модель обновления поверхности», учитывающая турбулентные процессы, которые влияют на перемешивание около раздела воздух-вода. Входящий в нее член, отвечающий за диссипацию турбулентной кинетической энергии, рассчитывается из предложенного при участии авторов модифицированного замыкания, учитывающего двустороннюю трансформацию кинетической и потенциальной энергий турбулентных пульсаций (Gladskih et al., 2023).

С использованием модели проведены расчеты циркуляции (температуры, скорости) и распределения концентрация биогеохимических веществ для Рыбинского водохранилища, а также озера Куйвьярви (Финляндия) на масштабе сезона. Показано, что модель корректно описывает протекающие в водном объекте физические и биогеохимические процессы, а полученные численные результаты согласуются с наблюдаемыми натурными характеристиками.

- Работа выполнена при поддержке Московского Центра Фундаментальной и Прикладной Математики (договор с Министерством науки и высшего образования 075-15-2022-284).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Gladskih D.S., Stepanenko V.M., Mortikov E.V. The effect of the horizontal dimensions of inland water bodies on the thickness of the upper mixed layer // *Water Resour.* 2021. V. 48, N 2. P. 226–234. lling. 2019. V. 34, N 2. P.1–14.
2. Gladskih, D.; Ostrovsky, L.; Troitskaya, Y.; Soustova, I.; Mortikov, E. Turbulent Transport in a Stratified Shear Flow. *J. Mar. Sci. Eng.* 2023, 11, 136.

Аппроксимация временной динамики городского острова тепла методами машинного обучения

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

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

²ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

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

⁴Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

E-mail: mikhail.varentsov@srcc.msu.ru, krinitsky@sail.msk.ru, stepanen@srcc.msu.ru

Эффект городского острова тепла - яркий пример особенностей городского климата. Он оказывает влияние на термический комфорт населения, состояние городских экосистем, на развитие конвективных процессов и связанных с ними опасных явлений погоды [1]. Все это делает важным его учет в прикладных задачах, начиная с прогноза погоды и заканчивая адаптацией городов к изменениям климата. Ключевым инструментом для решения подобных задач являются численные гидродинамические модели атмосферы. Мезомасштабные модели с шагом сетки порядка первых километров, дополненные параметризациями городской поверхности, позволяют достаточно хорошо воспроизводить особенности метеорологического режима городов [1]. Однако их применение требует значительных вычислительных ресурсов и возможно, как правило, только с использованием суперкомпьютеров. В настоящее время основанные на методах машинного обучения (МО) статистические модели все чаще рассматриваются как дополнение или даже альтернатива гидродинамическим моделям [2]. Методы МО перспективны и для задач городской метеорологии, в т.ч. для даунскейлинга (детализации) более грубых метеорологических данных для территории города [3].

В докладе рассмотрен первый шаг к разработке основанной на методах МО технологии статистического даунскейлинга для городов, а именно задача аппроксимации наблюдаемой временной динамики интенсивности городского острова тепла Москвы (разности температуры между центром города и окружающими загородными территориями) методами МО с использованием в качестве предикторов характеристик крупномасштабных метеорологических процессов. Последние заданы по данным реанализа ERA5 и/или осредненных по Московскому региону данных наблюдений на загородных метеостанциях. В качестве моделей МО рассмотрены методы случайных лесов, градиентного бустинга, опорных векторов и многослойный перцептрон. Эти модели, обученные на 20-летнем ряде данных, смогли успешно воспроизвести наблюдаемую динамику на суточном, синоптическом и сезонном масштабах. Метрики качества при этом оказались значительно лучше, чем для статистической модели базового уровня сложности (линейная регрессия). Более того, в случае использования предикторов только из ре-

анализа, метрики качества для моделей МО оказались лучше, чем при динамическом даунскейлинге реанализа гидродинамической мезомасштабной моделью COSMO с параметризацией TERRA_URB [4]. Наилучшее качество моделей МО достигнуто при одновременном использовании в качестве предикторов данных реанализа и наблюдений, и использовании дополнительных признаков, характеризующих изменение этих предикторов во времени. Среди рассмотренных моделей МО лучшей оказалась модель градиентного бустинга CatBoost. Наиболее важными среди предикторов оказались высота пограничного слоя атмосферы по данным реанализа и “фактор погоды” (эмпирическая функция от облачности и скорости ветра согласно [5]) по данным наблюдений.

- Работа выполнена при поддержке некоммерческого фонда развития науки и образования «Интеллект».

ЛИТЕРАТУРА:

1. Masson V., Lemonsu A., Hidalgo J., Voogt J. Urban Climates and Climate Change // Annual Review of Environment and Resources. 2020. V. 45. P. 411–444 <https://doi.org/10.1146/annurev-envi-ron-012320-083623>
2. Chantry M., Christensen H., Dueben P., Palmer T. Opportunities and challenges for machine learning in weather and climate modelling: hard, medium and soft AI // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2021. V. 379. P. 20200083. <https://doi.org/10.1098/RSTA.2020.0083>
3. Yi C., Shin Y., Roh J. W. Development of an Urban High-Resolution Air Temperature Forecast System for Local Weather Information Services Based on Statistical Downscaling // Atmosphere. V. 9. P. 164. <https://doi.org/10.3390/atmos9050164>
4. Varentsov M., Samsonov, T., Demuzere, M. Impact of Urban Canopy Parameters on a Megacity's Modelled Thermal Environment // Atmosphere. 2020. V. 11. P.1349. <https://doi.org/10.3390/atmos11121349>
5. Oke T. R., Runnalls K. E. Dynamics and controls of the near-surface heat island of Vancouver, British Columbia // Physical Geography. 2000. V. 21. P. 283–304. <https://doi.org/10.3390/10.1080/02723646.2000.10642711>

Сравнение влияния зеленых и белых крыш на городской остров тепла на примере 3 волн жары в Москве

Коспанов А.А., Константинов П.И.

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

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

Московский мегаполис в 2021 и 2022 годах трижды испытывал метеорологические условия, соответствующие волне жары – более 5 последовательных дней с максимальной температурой, превышающей средний климатический максимум на 5 градусов и более. Экстремально высокие температуры приводят к увеличению смертности, так как увеличивается нагрузка на дыхательную и сердечно-сосудистую системы.

Городская застройка за счет увеличенной теплоемкости и переотражения солнечной и тепловой радиации в городских каньонах приводит к формированию так называемого городского острова тепла. Наиболее ярко он проявляется в ночное время, когда разность температуры между городом и пригородом может превышать 5 градусов. Из-за этого феномена в городе даже ночью могут наблюдаться неблагоприятные для здоровья человека температуры. Именно по этой причине необходимо исследовать пути снижения эффекта городского острова тепла.

Так как изменить уже существующую застройку не представляется возможным, стоит рассмотреть способы уменьшения температуры. Наиболее простых способа два – увеличить отражающую способность, либо снизить температуру за счет затрат тепла на испарение с растительности. В данной работе сравниваются подход так называемых зеленых крыш (крыш, занятых травянистой растительностью с поливом) и белых крыш

Для оценки влияния описанных выше подходов использовалась модель WRF-ARW версии 4.3.2. Была использована многоуровневая параметризация городской подстилающей поверхности ВЕР+ВЕМ, которая точно воспроизводит скорость ветра в условиях городской застройки. Эта параметризация учитывает как основные городские эффекты (изменение параметров турбулентности и трения), так и поток тепла между этажами и кондиционирование помещений, что позволяет воспроизводить особенности распределения полей метеорологических параметров в городе

Для экспериментов было выделено 3 периода, соответствующих критериям волны жары:

1. 17 – 29 июня 2021 года
2. 8 – 18 июля 2021 года
3. 2 – 29 августа 2022 года

Для каждого периода было проведено 4 эксперимента:

1. Моделирование с параметрами городской застройки, приближенными к реальным
2. Моделирование с заменой городской подстилающей поверхности на лесную
3. Моделирование с зелеными крышами
4. Моделирование с белыми крышами

Моделирование проводилось на 2 вложенных сетках с шагом 9000 метров и 1800 метров, охватывающих Москву и окрестности. Результаты моделирования показали снижение температуры воздуха на высоте 2 метра и изменение вертикального профиля как температуры воздуха, так и влажности.

При наличии зеленых крыш суточный ход температуры начинал запаздывать, что приводило к более низким температурам утром и более высоким температурам в вечерние часы, так как крыши медленнее остывали при наличии растительности. Стоит отметить увеличение влажности воздуха, что негативно сказывается на комфортности, так как уменьшается скорость испарения пота.

По результатам проведенного эксперимента, белые крыши привели к уменьшению температуры воздуха как днем, так и ночью. Интересным фактором для проверки влияния на температуру воздуха может быть увеличение альбедо стен. С одной стороны, это уменьшит поглощение солнечной радиации, с другой это увеличит количество переотражения внутри городского каньона.

- Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2021-574 по Проекту «Мегаполис как остров загрязнения и тепла: междисциплинарный гидроклиматический, геохимический и экологический анализ»).

Статистический анализ атмосферной турбулентности в условиях городской застройки

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

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

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

³Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

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

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

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

В работе используются данные, полученные с микрометеорологической мачты, установленной в метеорологической лаборатории МГУ в 2019 году, за период с января 2020 по январь 2022. 21-метровая мачта имеет три измерительных уровня 2.2, 11.1, 18.8 м, на которых акустические анемометры компании МЕТЕК измеряют три компонента скорости ветра и акустическую температуру с частотой 20 Гц и точностью 0.1 м/с и 0.1 С, соответственно. Также в работе использовались данные часовых наблюдений влажности и давления на высоте 2 м над поверхностью, предоставленные метеорологической обсерваторией МГУ. Для обработки высокочастотных данных мачты и расчёта статистических характеристик турбулентности был разработан и реализован комплекс программ. В том числе внедрен новый алгоритм заполнения пробелов в рядах данных на основе гауссова распределения заполняемой величины до и после пропуска с учетом корреляции с другими величинами.

В рамках работы был зафиксирован рост потоков явного тепла и импульса с высотой в условиях города, выявлена устойчивая квадратичная зависимость ТКЭ от модуля скорости ветра, были оценены коэффициенты сопротивления для урбанизированной и парковой территории, проанализирована суточная и межсезонная изменчивость потоков тепла на городской поверхности. Центральное место в работе занимает анализ третьих моментов $\overline{W'W'T'}$, $\overline{W'T'T'}$, $\overline{W'U'U'}$, $\overline{W'V'V'}$ и их связи со вторыми моментами, описанной в работах (Abdella et. al. 1997, Zilitinkevich et. al. 1999). Основным результатом исследования стало подтверждение гипотезы, описанной в данных работах как по натурным, так и по данным прямого численного моделирования

- Работа частично поддержана Министерством науки и высшего образования России, контракт № 14.W0331.0006. Статистическая обработка данных поддержана грантом РФФИ 21-17-00249.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Abdella K., McFarlane N. A new second-order turbulence closure scheme for the planetary boundary layer // *Journal of the atmospheric sciences*. – 1997. – Т. 54. – №. 14. – С. 1850–1867.
2. Zilitinkevich S.S., Gryanik V.M., Lykossov V.N., Mironov D.V. Third-order transport and nonlocal turbulence closures for convective boundary layers. – *J. Atmos. Sci.*, 1999. – V. 56. – P. 3463–3477.

Реализация городской параметризации ТЕВ в региональной модели атмосферы COSMO: первые результаты

^{1,2,3}Тарасова М.А., ^{1,2,3,4}Варенцов М.И., ^{3,4}Дебольский А.В., ^{1,3}Степаненко В.М.

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

²ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

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

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

E-mail: mkolennikova@mail.ru

Города оказывают значительное влияние на метеорологические процессы и местный климат. Хорошо известен эффект городского острова тепла – превышение температуры воздуха в городе на несколько °С относительно пригородов. Также города могут способствовать усилению опасных конвективных процессов, включая интенсивные ливневые осадки, грозы, шквалистый ветер.

В настоящее время ключевым инструментом как для прогноза, так и для научных исследований метеорологического режима городов являются численные модели атмосферы. За исключением отдельной группы микромасштабных моделей, позволяющих явно разрешать отдельные здания, описание городской поверхности в моделях атмосферы требует использования блоков упрощенного описания процессов взаимодействия атмосферы с городской поверхностью – городских параметризаций. В рамках таких параметризаций сложная структура городской поверхности представляется в виде упрощенной геометрии городского каньона – улицы с вытянутыми вдоль нее зданиями. Выделяют различные типы городских параметризаций, различающихся между собой по сложности и полноте описываемых физических процессов [1].

Численная модель атмосферы COSMO – региональная негидростатическая модель, используемая в Гидрометцентре России как для оперативного прогноза погоды, так и для исследовательских задач. На настоящий момент в оперативной версии модели доступна только городская параметризация TERRA_URB [2], относящаяся к категории наиболее простых балк-параметризаций. Целью нашего исследования является включение в модель COSMO параметризации более высокого уровня сложности ТЕВ (Town Energy Balance) [3], которая представляется наиболее сбалансированной среди подобных параметризаций по сложности и полноте описываемых процессов [1].

В текущей работе представлены первые результаты апробации модели COSMO с параметризацией ТЕВ на примере Московской агломерации. Представлены результаты тестовых расчетов для трех экспериментов: 1) без задания городской поверхности, 2) с параметризацией TERRA_URB и 3) с новой параметризацией городской поверхности ТЕВ. Период интегрирования составляет 16 дней с 1 по 16 мая 2019 года, когда наблюдались благоприятные метеорологические условия для формирования городского острова тепла. Рассмотрены временные ряды основных метеорологических параметров таких, как потоки явного и скрытого тепла, температура воздуха на высоте 2 м; построены вертикальные разрезы для температуры воздуха. Тестовые расчеты с двумя параметризациями городской поверхности показали, что интегрированная в численную модель атмосферы COSMO городская параметризация ТЕВ адекватно воспроизводит основные метеорологические характеристики. В дальнейшем планируется более детальная верификация результатов по данным наблюдений и анализ «добавочной ценности» включения в модель более сложной городской параметризации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тарасова М.А., Варенцов М.И., Степаненко В.М. Параметризации взаимодействия атмосферы с городской поверхностью: обзор и перспективы развития // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2023. Т. 59, № 2. С. 127–148.

2. Garbero V., Milelli M., Bucchignani E., Mercogliano P., Varentsov M., Rozinkina I., Rivin G., Blinov D., Wouters H., Schulz J.-P., Schättler U., Bassani F., Demuzere M., Repola F. Evaluating the urban canopy scheme TERRA_URB in the COSMO model for selected European cities // Atmosphere. 2021. V. 12 № 2.
3. Masson V. A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models // Bound.-Lay. Meteorol. 2000. V. 94. P. 357–397.

Вертикальное распределение PM_{2.5} и PM₁₀ в предгорной городской зоне по данным измерений с помощью БПЛА и моделирования

^{1,2}Полюхов А.А., ²Кирсанов А.А., ³Сеник И.А., ¹Глебов А.Ю., ¹Гибадуллин Р.Р., ¹Гвоздева А.В., ¹Лаврентьева А.И., ¹Леонова Д.С., ¹Масляшова А.О., ¹Нариманидзе А.А., ¹Петров Н.А.

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

²ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

³Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Москва, Россия

E-mail: aeromsu@gmail.com

В данной работе представлено исследование влияния рельефа и метеорологического режима на перенос и накопление PM_{2.5} и PM₁₀ в городских условиях в межгорной котловине. В работе используются данные измерений PM_{2.5} и PM₁₀ с помощью БПЛА в городе Кисловодск. Он является важным рекреационным городом на юге России в предгорьях Кавказа. Измерения проводились с 26 января по 2 февраля 2023 года в 5 точках: одна за городом на высоте 1300 м и 4 городских в разных районах. Также велись однократные измерения на плато Шаджатмаз (Скалистый Хребет, Большой Кавказ) высота 2070 м. Для анализа суточного хода аэрозолей выполнялись ежедневные измерения с помощью дрона в черте города на территории Кисловодской Базы ИФА им. А.М. Обухова РАН. Для изучения ослабления радиационного переноса аэрозолями параллельно проводились измерения суммарной солнечной радиации с помощью балансомера Kipp&Zonnen и аэрозольной оптической толщины.

Данные измерений сравнивались с данными MAIAC/MODIS и результатами расчетов химико-транспортной моделью COSMO-ART. Использовались данные об эмиссиях CAMS, суточных ход эмиссий был скорректирован по данным многолетних измерений кисловодской высокогорной станции. Для оценки влияния рельефа, были проведены также расчет с плоским рельефом. Получены оценки радиационных и температурных эффектов вертикальных профилей PM_{2.5} при различных синоптических условиях. По данным измерений было получено, что в антициклональных наблюдается накопление частиц под инверсией оседания. При этом в ночные часы данные максимум значений PM_{2.5} наблюдаются на высотах 200–250 метров.

- Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (# 075-15-2021-574).

Aerosol transport in the urban boundary layer under different properties of stratification and urban environment

^{1,3,2,4}Varentsov A.I., ^{3,1,2,4}Stepanenko V.M., ^{3,2,5}Mortikov E.V.

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Moscow, Russia

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

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

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

⁵Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: aivarentsov98@gmail.com

This paper presents the results of the development and application of a numerical model of Lagrangian transport of aerosol particles in the urban boundary layer of the atmosphere. The work is aimed at investigating the influence of atmospheric stratification and urban canopy properties on the transport and accumulation of particulate matter.

The developed model makes it possible to estimate spreading and deposition of particles of different genesis taking into account their mass, size, and lifetime, and also to take into account interaction, firstly, with

solid surfaces by the example of buildings or ground surface, and secondly, with porous media by the example of tree foliage. On the basis of stochastic Lagrangian models the influence of turbulence on particle motion is also taken into account. The simulation can be performed either offline based on input meteorological data or as a module coupled to the RANS/LES/DNS model in real time. The model is verified using idealized analytical solutions for light and heavy particles as well as from in-situ measurements of dust and sand particle concentrations.

In this paper, experiments were conducted using the developed model to simulate particle transport in an idealized urban environment. The experiments were conducted for configurations with different building parameters and for different atmospheric boundary layer stratification conditions.

The conducted experiments allow conclusions to be drawn not only about the influence of these factors separately, but also about their cumulative impact in various combinations.

- This study was conducted with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the program of the Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics under the agreement № 075-15-2022-284 and by grant RSF 21-17-00249.

Анализ температуры поверхности Карского моря на основе спутниковых данных и данных экспедиции «Плавучий университет-2021»

¹Марчук Е.А., ¹Репина И.А., ²Козлов И.Е., ³Осадчиев А.А., ³Степанова Н.Б.

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

²Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова, Москва, Россия

E-mail: murchuk-ekaterin@mail.ru

В августе 2021 года в рамках Плавучего университета Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН был организован рейс в Карское море. В ходе экспедиции, помимо основных работ, производился дистанционный мониторинг температуры поверхности океана (ТПО) ИК-радиометром, установленным на борту судна. Использование ИК-датчиков температуры для идентификации процессов внутри океана даёт возможность получить информацию с относительно больших акваторий с малыми затратами времени. Подобные данные помогают в исследовании волн и вихрей, а также служат материалом для дальнейшей верификации спутниковой ТПО. Таким образом, подобные комплексные измерения показывают полную картину явлений и позволяют количественно связать процессы в толще и на поверхности.

Результаты

Наблюдения за состоянием морской поверхности проводились круглосуточно. В результате чего, в течение всей экспедиции было получено 26 суток непрерывной записи ТПО с частотой 1 секунда и 26 суток непрерывной фото записи состояния морской поверхности.

Помимо непосредственных измерений ТПО, одной из задач экспедиции было изучение мезомасштабных вихрей, которые проявляются на поверхности океана. Под воздействием океанической циркуляции и атмосферных явлений в Карском море имеет места целый спектр мезомасштабных явлений, к которым относятся вихри. Мезомасштабные вихри в теплое время года наблюдаются на всей территории Карского моря. В работе [1] с помощью спутниковых РСА изображений была посчитана статистика вихрей за теплый период 2007 года. Наибольшее количество вихрей наблюдалось в августе (480 вихрей). 90% вихрей были циклонами. Средний диаметр всех вихрей (циклоны + антициклоны) составлял 2.7 км. Наибольший диаметр составляет 40 км.

Помимо спутниковых данных, субмезомасштабные вихри хорошо отражаются в данных ТПО, что неоднократно доказывалось в литературе [2,3]. Большая удача экспедиции состояла в том, что 13 августа наш корабль прошёл через мезомасштабный вихрь, который был одновременно зафиксирован на РСА снимке спутника Sentinel — 1А и в данных бортового ИК-радиометра. В результате наложения ТПО на трек судна за 13 августа, была получена следующая картина (рисунок 1). В центре снимка отчетливо виден грибовидный вихрь, выделяемый из-за наличия на поверхности моря плёнки ПАВ (поверхностно-активных веществ). Вероятнее всего вихрь образовался в результате огибания течением, направленным из Баренцева моря в Карское море, препятствие в виде северной оконечности острова Вайгач или подводного рельефа [4,5]. Средний диаметр вихря составляет 30 км. Данный случай требует дальнейшего анализа.

Помимо анализа субмезомасштабного вихря, одной из основных задач, поставленных в рамках экспедиции Плавучий университет, была валидация данных измеренной ТПО по спутникам.

В качестве спутниковых данных был, в первую очередь, рассмотрен массив данных ТПО с высоким разрешением (GHR SST) уровня 4. Данные ежедневные, предоставляемые оперативно Австралийским бюро метеорологии (BoM) с использованием оптимальной интерполяции (OI) на глобальной сетке с шагом 0,25 градуса.

Сравнение измеренного ТПО со спутниками показало (график не представлен), что в центральной части Карского моря разница температур за выбранный период варьируется от -2 до 2 °С. В среднем она составляет 0 °С. Тогда как в северной части Карского моря различия между спутниковыми и измеренными данными варьируются более широко. Разница составляет от -4 до 5,8 °С. В среднем около 2-х °С.

Визуальные наблюдения за состоянием морской поверхности также проводились в точности с описанной выше методикой. На фотографиях запечатлено большое количество снимков разной природы. В дальнейшем планируется более детальная обработка фотографий и привязка их к колебаниям температуры протоки и ТПО.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Атаджанова, О.А. Наблюдение малых вихрей в Белом, Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых радиолокационных измерений/ О. А. Атаджанова, А. В. Зимин, Д. А. Романенков, И. Е. Козлов // Морской гидрофизический журнал. – 2017г. – №2. – С. 80–90.
2. Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование / под ред. В.И. Таланова и Е.Н. Пелиновского. Т. 2. Н. Новгород, 1999.
3. Степанюк И.А. Методы измерений характеристик морских внутренних волн. СПб: изд-во РГГМУ, 2002.
4. Гинзбург А.И., Федоров К.Н. Некоторые закономерности развития грибовидных течений в океане, выявленные путем анализа спутниковых изображений // Исследование Земли из космоса. 1984. № 6. С. 3–13.
5. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Изучение гидродинамических процессов в шельфовой зоне на основе спутниковой информации и данных подспутниковых измерений Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, Т. 12. № 5. С. 98–129 (год публикации – 2015).
6. Johannessen, J. A., R. A. Shuchman, G. Digranes, D. R. Lyzenga, C. Wackerman, O. M. Johannessen, and P. W. Vachon (1996), Coastal ocean fronts and eddies imaged with ERS 1 synthetic aperture radar, J. Geophys. Res., 101, 6651–6668.
7. Marmorino, G. O., Holt B., Molemaker M.J., DiGiacomo P.M. and Sletten M.A.(2010) , Airborne synthetic aperture radar observations of 'spiral eddy' slick in the Southern California Bight, J. Geophys. Res., 115, C05010

СЕКЦИЯ V ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НАУК О ЗЕМЛЕ

Принципы FAIR для наборов данных и требования TRUST к репозиториям данных

Вязилов Е.Д., Мельников Д.А.

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных
(ВНИИГМИ-МЦД), Обнинск, Россия
E-mail: vjaz@meteo.ru

В последнее десятилетие открытые данные становятся значимой частью сообщества ИТ-разработчиков из разных отраслей. Глобальное изменение климата требует высококачественных данных из междисциплинарных источников. Поиск и доступ к таким данным имеет существенные барьеры. Многие ученые тратят больше времени на поиск и обработку данных, чем на проведение исследований на их основе, что уменьшает преимущества совместного использования открытых данных. Из-за отсутствия полной документации и метаданных на них, их недостаточной полноты, данные иногда становятся непригодными для использования. Необходимо предпринять шаги для улучшения использования и обмена данными. Авторы наборов данных должны гарантировать, что открытые данные соответствуют простым форматам получения данных. Для повышения интероперабельности и гармонизации наборов данных из различных источников открытые данные должны соответствовать принципам FAIR (находимость, доступность, интероперабельность и повторное использование данных).

Произошло также существенное усложнение имеющихся у организаций инфраструктур и используемых информационных систем (ИС). В тоже время необходимо обеспечить надежный, беспрепятственный, безопасный доступ к информационным ресурсам. Контентный хаос («островки» информации, недостаточная актуальность и полнота данных, т.п.). дефицит времени – наиболее очевидные проблемы, связанные с аспектами повышения эффективности повторного использования данных. Репозитории с открытыми данными должны удовлетворять требованиям TRUST (прозрачность в отношении услуг репозитория, ответственность организации, ориентация на пользователя, устойчивость в сохранении данных, технология – безопасные и надежные сервисы).

В докладе представлен анализ существующих метрик и показателей для оценки функционирования аппаратно-программных комплексов, ИС, наборов данных. На основе имеющегося опыта оценки функционирования центров Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО, <http://esimo.ru>) впервые предложена методика оценки сравнения наборов данных (получения их рейтинга) с помощью показателей состояния метаданных и данных. По разработанной методике проведен экспериментальный расчет показателей оценки принципов FAIR для 3000 наборов данных, ЕСИМО. Методика может использоваться в крупных ИС для автоматизированной оценки наборов данных, уточняться как по составу показателей, так и по коэффициентам вклада каждого из них.

Офис Мировой системы данных выдвинул требования TRUST к репозиториям хранящим открытые данные. Методика сертификации репозиторий построена на анализе ответов репозиторий на 16 вопросов анкеты, связанных с анализом соответствия требованиям TRUST, обеспечения норм управления данными и ожиданиям пользователей. Мировой центр данных Б «Океанография» получил сертификат соответствия TRUST.

Выполнение принципов FAIR и требований TRUST позволит значительно облегчить получение данных. Рассчитываемый рейтинг наборов данных дает поставщикам данных сравнить оценки и улучшить показатели отдельных наборов данных.

Климатические тренды приземной температуры на территории Российской Федерации, оцененные с использованием квантильной регрессии

Стерин А.М., Лавров А.С.

ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», Обнинск, Россия

E-mail: sterin@meteo.ru, florcid@yandex.ru

Использование квантильной регрессии [1] для оценки климатических трендов [2, 3] дает возможность оценивать параметры регрессии для каждого квантиля значений предиктора от нуля до единицы. В результате, имеется более детальная, по сравнению с методом наименьших квадратов, картина климатических трендов, демонстрирующая, в частности, тренды значений, близких к экстремальным. Такая картина хорошо может быть представлена с помощью графика, называемого процесс-диаграммой. Процесс-диаграмма показывает зависимость значений климатических трендов от квантилей метеовеличин в интервале квантилей значений этих метеовеличин от нуля до единицы

В ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» квантильная регрессия используется для анализа климатических трендов как температуры в свободной атмосфере [4] (по радиозондовым данным), так и приземной температуры [5].

В докладе представлен краткий обзор результатов использования квантильной регрессии для анализа трендов температуры по радиозондовым данным. Основное внимание уделено результатам использования квантильной регрессии для анализа трендов приземной температуры. При этом получены и исследованы тренды температуры для отдельных пунктов наблюдений, а затем исследуются особенности географического распределения характеристик трендов приземной температуры по территории РФ. Выполнены кластеризация пунктов наблюдений, в результате которой получены и описаны кластеры характеристик квантильных трендов приземной температуры, расположенных географически достаточно компактно. Исследуется также, насколько выявленные в результате кластеризации закономерности географического распределения трендов аномалий приземной температуры соответствуют известному разделению России на квази-однородные климатические регионы. Изложению последних результатов посвящен отдельный доклад авторов на CITES 2023.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Koenker R. and Bassett G. Jr., 1978. Regression Quantiles., *Econometrica*, vol. 46, No. 1, pp. 33-50
2. Тимофеев А.А., Стерин А.М. 2010. Применение метода квантильной регрессии для анализа изменений характеристик климата. – *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 27-41.
3. Стерин А.М., Тимофеев А.А. 2016. Об оценке трендов приземной температуры воздуха для территории России методом квантильной регрессии. – *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 17-30.
4. Sterin A M and Lavrov A S 2020. On long period trend estimates of upper-air extreme and sub-extreme temperatures by use of quantile regression. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 611 012043
5. Стерин А.М., Лавров А.С., 2022: Использование квантильной регрессии для оценки пространственных особенностей характеристик трендов приземной температуры на территории России. *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8 №2, стр. 92-111, doi: 10.21513/2410-8758-2022-2-92-111.

Artificial Neural Network (ANN) Technique for Real-Time Forecasting of Urban Air Quality with Previous Time Pollutants and Meteorological Variables

¹Soo-Min Choi, ²Hyo Choi

¹Department of Computer Engineering, Konkuk University, Chungju, Korea

²Atmospheric and Oceanic Disaster Research Institute, Gangneun, Korea

E-mail: fuledoc@daum.net, du8392@hanmail.net

A feed-forward artificial neural network model (ANN)-tanh activation function with a back-propagation training algorithm was adopted to predict real-time hourly urban air quality (PM₁₀, PM_{2.5}, and NO₂) at a Korean coastal city using 15 input independent variables (1 hour earlier PM, gas and meteorological data of the city affected by 2 days' earlier PM and gas data of Beijing city). Before the Yellow sand event at the city, root mean square error (RMSE) with the coefficient of determination (R²) evaluates the performance of the model between the predicted and measured values in 13 (15; 17) nodes in a single hidden layer were 2.2932 with 0.948 (3.1652 with 0.874; 2.4408 with 0.944) for PM₁₀, 1.4111 with 0.816 (0.9936 with 0.888; 0.5180 with 0.918) for PM_{2.5}, and 1.2834 with 0.908 (0.9536 with 0.855; 0.8170 with 0.850) for NO₂, respectively. During the event, they were 4.9425 with 0.943 (3.9091 with 0.890; 6.0457 with 0.910) for PM₁₀, 1.2224 with 0.967 (1.1225 with 0.938; 1.7508 with 0.942) for PM_{2.5}, and 1.0121 with 0.865 (4.7178 with 0.633; 2.7302 with 0.731) for NO₂. After the event, they were 1.4293 with 0.902 (1.3822 with 0.896; 1.4888 with 0.908) for PM₁₀, 0.8671 with 0.913 (1.0269 with 0.879; 0.4754 with 0.922) for PM_{2.5}, and 0.6207 with 0.920 (2.9292 with 0.616; 0.9613 with 0.882) for NO₂. The model prediction performance ability shows a very high Pearson r correlation coefficients with 0.855 to 0.974, except for 0.796 of NO₂ in 15 node during the event, and their comparison between the predicted and measured values was given by scatter plots and hourly distributions.

Алгоритмы обратного моделирования для построения цифровых двойников процессов переноса и трансформации примесей в атмосфере

Пененко А.В., Русин Е.В., Емельянов М.К., Шаблыко В.К., Цыбенкова Э.В., Пененко В.В.

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

E-mail: aleks@ommgp.sgcc.ru

Концепция цифрового двойника природного процесса предполагает разработку системы, включающей взаимосвязанные модели изучаемого процесса и двухсторонние информационные связи между моделями и прототипом. Процессы переноса и трансформации примесей в атмосфере рассматриваются в работе как прототип для цифрового двойника. Так как состояние этого объекта динамично меняется и не является в полной мере наблюдаемым, то актуальными становятся задачи уточнения параметров моделей по имеющимся разнородным данным мониторинга, в том числе и в режиме усвоения данных (т.е. в процессе получения данных). В качестве управляемых переменных цифрового двойника рассматриваются источники выбросов и конфигурация системы мониторинга.

В рамках разрабатываемой системы обратного моделирования Inverse Modeling Data Assimilation Framework (IMDAF) реализована иерархия алгоритмов идентификации параметров, включающих метаэвристические алгоритмы, вариационные алгоритмы, а также оригинальные алгоритмы на основе операторов чувствительности [1,2]. Ансамблевая конструкция операторов чувствительности позволяет естественно комбинировать разнородные типы данных измерений в одном квазилинейном операторном уравнении и распараллеливать его вычисление. Реализовано комбинированное использование данных измерений концентраций примесей типа изображений, интегрального типа, контактных измерений и данных типа временных рядов. Квазилинейная структура операторного уравнения позволяет анализировать информативность данных измерений без непосредственного решения обратной задачи [1]. Это важно, как при оптимизации системы мониторинга, так при обучении нейросетей, использующихся для коррекции артефактов алгоритмов идентификации параметров и апостериорного учета априорной информации. Для решения 3D (и 2D) обратных задач разработана кластерная MPI-версия алгоритма [2].

- Работа поддержана темой госзадания ИВМиМГ СО РАН 0251-2021-0003 в части разработки алгоритмов усвоения данных для трехмерных моделей и проектом РНФ 23-77-30008 в части совместного использования IMDAF с другими системами моделирования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Penenko, A. Penenko, V., Tsvetova, E., Gochakov, A., Pyanova, E., Konopleva, V. Sensitivity Operator Framework for Analyzing Heterogeneous Air Quality Monitoring Systems // Atmosphere. 2021. Vol. 12, No. 12. MDPI AG P. 1697. DOI: 10.3390/atmos12121697.
2. A. Penenko and E. Rusin, Parallel Implementation of a Sensitivity Operator-Based Source Identification Algorithm for Distributed Memory Computers // Mathematics, vol. 10, no. 23, p. 4522, Nov. 2022, doi: 10.3390/math10234522.

Коррекция численных прогнозов приземного озона нейросетевыми методами

Борисов Д.В., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И.

ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

E-mail: lbj23.98@mail.ru

Расчеты концентраций загрязняющих веществ на основе химических транспортных моделей (ХТМ) для прогнозирования качества воздуха являются широко применяемой в мире практикой. В списке загрязнителей воздуха, которые применяются для расчетов индекса качества воздуха, предназначенного для информирования общественности, по рекомендации ВОЗ первыми стоят приземный озон и мелкие твердые частицы. Этим определяются высокие требования к точности прогноза этих наиболее опасных для здоровья антропогенных примесей.

При значительных усилиях разработчиков по улучшению описания в ХТМ фотохимических процессов и переноса, пока численные прогнозы загрязнения отличаются от данных измерений. Одним из способов улучшения точности модельных прогнозов концентраций загрязняющих веществ является постпроцессинг, основанный на ансамблировании. Примером ансамблевого прогнозирования качества воздуха может служить система CAMS в Европейском союзе (<https://regional.atmosphere.copernicus.eu/>), в которой используются расчеты сегодня уже 11 региональных ХТМ.

В Гидрометцентре России разработана и реализована система численного прогнозирования качества воздуха на основе ХТМ CHIMERE. Модельные расчеты концентраций загрязняющих веществ проводятся на регулярной сетке с разрешением 2×2 км; в качестве входных метеорологических параметров используются прогностические данные модели COSMO, конфигурации COSMO-Ru2.2. Модельные прогнозы для территории московского региона верифицируются по данным непрерывных измерений концентраций загрязняющих веществ на станциях «Мосэкомониторинг» (<https://mosecom.mos.ru/>). Выявленные модельные отклонения служат основой для выработки способов их минимизации [1-4]. В данном исследовании предложен метод повышения точности модельного прогноза приземного озона с применением искусственной нейронной сети (ИНС). В последнее время стремительно растет число исследователей, применяющих ИНС для прогнозирования воздушного загрязнения, имеются подтверждения эффективности применения ИНС [5], в том числе, для постпроцессинга расчетов ХТМ [6].

Автором спроектирована система подготовки наборов данных модельных расчетов CHIMERE для обучения ИНС. Обучающий набор данных включает в себя 351440 записей модельных прогностических переменных, влияющих на генерацию приземного озона, для локаций 15 измерительных станций. В созданной системе в качестве целевой переменной ИНС принято отклонение (bias) модельного прогноза от соответствующего измерения. На основе библиотеки языка Python Keras спроектирован алгоритм конструирования, обучения и тестирования ИНС с различными параметрами для проведения экспериментов по поиску наилучшей для поставленной задачи конфигурации ИНС. Проведены первые эксперименты по обучению и тестированию ИНС с одним скрытым слоем. В качестве тестовых наборов использовались вырезанные из обучающего набора почасовые ряды данных за несколько дней подряд, в том числе периоды с эпизодами повышенных концентраций приземного озона.

Тестирование разработанной системы подтвердило эффективность применения коррекции прогнозов CHIMERE с использованием ИНС, в частности, наблюдается уменьшение среднего абсолютного отклонения прогнозов ХТМ CHIMERE, увеличение коэффициента корреляции часовых прогностических и наблюдаемых концентраций, что одновременно свидетельствует и о коррекции с помощью ИНС суточного хода концентраций. На ограниченной выборке тестирования также установлено, что в перио-

ды повышенных концентраций приземного озона ИНС, уменьшая первичные прогнозы ХТМ CHIMERE, еще более занижает прогностические величины по сравнению с измерениями, но при этом увеличиваются коэффициенты корреляции. Предполагается, что данную проблему можно будет решить введением в ИНС рекуррентного слоя, который будет накапливать и учитывать информацию предшествующих прогнозу ИНС временных шагов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кузнецова И. Н, Ривин Г.С., Борисов Д.В., Шалыгина И.Ю., Кирсанов А.А., Нахаев М.И. Моделирование загрязнения приземного воздуха с характерными в период COVID-19 сокращениями эмиссий в атмосферу с использованием моделей CHIMERE и COSMO-ART // Метеорология и Гидрология. 2022 № 3. с. 25-35. DOI:10.52002/0130-2906-2022-3-25-35.
2. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И. Н, Нахаев М.И., Борисов Д.В., Лезина Е.А. Эффективность коррекции эмиссий для расчетов химической транспортной модели CHIMERE в московском регионе. // Оптика атмосферы и океана 33 №6 2020. с. 441-447.
3. Борисов Д.В., И.Ю. Шалыгина. Уточнение данных о землепользовании для расчетов эмиссий в химической транспортной модели CHIMERE на примере нижегородского региона. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. №3 (381), с.150-161. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-77-94>.
4. И.Н. Кузнецова, М.И. Нахаев, А.А. Кирсанов, Д.В. Борисов, Ю.В. Ткачева, Г.С. Ривин, Е.А. Лезина. Тестирование и перспективы технологии прогнозирования загрязнения воздуха с применением химических транспортных моделей CHIMERE и COSMO-Ru2ART. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 147-170 . DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-4-147-170>
5. Masood, Adil & Ahmad, Kafeel. (2021). A review on emerging artificial intelligence (AI) techniques for air pollution forecasting: Fundamentals, application and performance. Journal of Cleaner Production. 322. 129072. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129072>.
6. Min Xu, Jianbing Jin, Guoqiang Wang, Arjo Segers, Tuo Deng, Hai Xiang Lin. Machine learning based bias correction for numerical chemical transport models // Atmospheric Environment. 2021. V. 248. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118022>.

Сравнение результатов кластеризации квантильных трендов приземной температуры на территории Российской Федерации с квази-однородными климатическими регионами России

Лавров А.С., Стерин А.М.

ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», Обнинск, Россия

E-mail: fliorcid@yandex.ru, sterin@meteo.ru

В отличие от традиционно применяющейся в климатологии методики оценки трендов с использованием регрессии на основе метода наименьших квадратов, квантильная регрессия [1] дает возможность оценки параметров регрессии для каждого квантиля значений предиката от нуля до единицы. Результатом применения квантильной регрессии является процесс-диаграмма, показывающая зависимость климатических трендов от диапазона изменений метеовеличин в интервале квантилей этих метеовеличин от нуля до единицы.

В предыдущих работах [2, 3] была проведена оценка трендов аномалий минимальной, максимальной и средней суточной приземной температуры на более чем 1400 станциях на территории России. В целях пространственного обобщения полученных результатов была выполнена кластеризация станций в многомерном пространстве, учитывающем сезонные характеристики процесс-диаграмм трендов аномалий минимальной, максимальной и средней суточной температур. Несмотря на отсутствие среди переменных многомерного пространства характеристик географического положения станций наблюдений, полученные кластеры располагаются географически компактно. То есть некие закономерности географического распределения трендов аномалий приземной температуры существуют и выявляются по всему диапазону квантилей от нуля до единицы.

В данной работе исследуется, насколько выявленные в результате кластеризации закономерности географического распределения трендов аномалий приземной температуры соответствуют известному разделению территории России на квази-однородные климатические регионы, а также проверяется,

насколько полученные квантильные оценки трендов аномалий температуры, а именно медианные оценки, соответствуют оценкам трендов, полученным методом наименьших квадратов. Продemonстрировано хорошее соответствие между кластерами и климатическими регионами, достигающее 82%, т.е. 82% станций из более чем 1400 станций располагаются в квази-однородном климатическом регионе, соответствующем их кластеру. Также выявлено качественное и количественное сходство оценок трендов, полученных методом квантильной регрессии и методом наименьших квадратов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Koenker R. and Bassett G. Jr., 1978. Regression Quantiles., *Econometrica*, vol. 46, No. 1, pp. 33-50
2. Стерин А.М., Лавров А.С., 2022: Использование квантильной регрессии для оценки пространственных особенностей характеристик трендов приземной температуры на территории России. *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8 №2, стр. 92-111, doi: 10.21513/2410-8758-2022-2-92-111.
3. Стерин А.М., Лавров А.С., 2022: Детализация климатических трендов, оцененных методом квантильной регрессии с использованием данных наблюдений. *Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды. ENVIROMIS 2022*. стр. 389-391.

Оценка качества моделирования загрязнения атмосферы в Казахстане моделью SILAM в зависимости от крупномасштабных синоптических процессов

Глебов А.Ю., Гущина Д.Ю.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
E-mail: tolyaglebov16@gmail.com, dasha155@mail.ru

Наблюдение за качеством атмосферного воздуха в Республике Казахстан осуществляется с помощью наземного мониторинга. Однако, данные, полученные таким образом, станций характеризуются большой пространственной и временной дискретностью. Использование химико-транспортных моделей позволяет восстановить поля концентраций загрязняющих веществ (ЗВ) с более высоким пространственным и временным разрешением. В настоящее время в Республике Казахстан для оперативного прогнозирования уровня загрязнения воздуха применяется модель SILAM, разработанная в Финском метеорологическом институте. Модель учитывает распространение радионуклидов, аэрозолей различных размеров и естественных аллергенов. Кроме того, она может быть использована для прогнозирования последствий аварийных ситуаций [1].

В настоящем исследовании проведена верификация химико-транспортной модели SILAM с учетом синоптических условий в городских условиях Республики Казахстана для 12 городов, расположенных в различных регионах Казахстана и имеющих разный уровень развития промышленности. Проведена оценка качества прогноза следующих ЗВ: $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , CO , NO_2 , NO за период с 12 сентября 2020 года по 31 августа 2021 года.

На основании проведенного анализа установлено, что на территории Казахстана качество прогноза ухудшается в направлении с запада на восток. Это обусловлено преобладанием на западе Казахстана компаний нефтяной промышленности, которые отличаются более высокими стандартами качества. Доля прогнозов с максимальной ошибкой (>90%) составляет более 30% от общего числа рассмотренных случаев.

Выявлено, что прогноз концентраций в теплый период года характеризуется лучшим качеством, чем в холодный; прогнозы заблаговременностью 24 и 48 часов имеют схожее качество. Наилучшее качество прогноза концентраций наблюдается в г. Нур-Султан, Алматы, Актау и Атырау. Прогнозирование концентраций монооксида углерода и оксида серы является наилучшим, а прогноз концентраций оксида азота наихудшим.

При анализе зависимости качества прогноза от синоптических условий для исследуемых загрязняющих веществ выявлено, что влияние синоптической ситуации сильно различается для исследованных ЗВ. Таким образом определить синоптические условия, оптимальные с точки зрения качества прогноза, не представляется возможным

Основными причинами значительных ошибок прогноза являются следующие:

- низкое пространственное разрешение модели (14 км): модельные концентрации представляют собой данные, осредненные по площади, а данные наземного мониторинга дают концентрацию ЗВ в

точке, которая может быть сильно выше, чем площадная, особенно если ПНЗ расположено вблизи промышленного предприятия.

- устаревшие или недостоверные базы данных об антропогенных выбросах.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Sofiev M. A dispersion modelling system SILAM and its evaluation against ETEX data / M. Sofiev, P. Siljamo, I. Valkama, M. Ilvonen, J. Kukkonen // Atmospheric Environment. – 2006. – № 40. – P. 674–685

Информационная система мониторинга радиоклимата Байкальской природной территории

Базарова А.С., Базаров А.В., Атутов Е.Б., Гармаев Б.З., Сычев Р.С., Башкуев Ю.Б

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия

E-mail: arunabas@mail.ru

Динамика неоднородности атмосферы сильно усложняет процесс распространения радиоволн, вызывая искривление траектории луча в атмосфере. Время распространения радиоволн между пунктами излучения и приема сигналов увеличивается, появляются изменения амплитуды, фазы и частоты волны. Указанные явления следует учитывать при анализе условий радиосвязи, кроме того они ответственны за внесение ошибок в радиолокационное измерение угла места, а также оказывают отрицательное влияние при определении радиолокационного расстояния до цели. Особенностью УКВ является тот факт, что на их распространение оказывают влияние метеорологические условия, то есть условия, характерные для данной местности в данное время. Сезоны годы определяют медленные сезонные замирания уровня сигнала, являясь причиной систематических ошибок. Знание закономерностей появления систематических ошибок позволяет их нивелировать разработкой и введением соответствующих поправок. Источником знаний особенностей сезонных климатических характеристик для той или иной местности являются данные метеорологических и аэрологических станций, а также спутниковые измерения. В настоящее время на территории Иркутской области и Республики Бурятия, вмещающей в совокупности преобладающую часть Байкальской природной территории, находится 131 метеорологических и 6 аэрологических станций. Расчет рефракции N и его высотного градиента производится по известным формулам. В работе представлена информационная система мониторинга радиоклимата Байкальской природной территории «Метео N», предназначенная для ретроспективного анализа и визуализации пространственно-временного распределения радиометеорологических параметров.

Система RANGES для оценки климатических ареалов видов

Богданович А.Ю., Семенов С.М.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт глобального климата и экологии

им. академика Ю.А. Изraelя», Москва, Россия

E-mail: bogda-anton@yandex.ru

Математическое моделирование климатических ареалов биологических видов с использованием климатических предикторов – важный аспект оценки последствий изменения климата для природных и хозяйственных систем, для здоровья населения. Под климатическим ареалом понимается область географического пространства, климатические условия которой допускают устойчивое существование вида. Климатические предикторы – климатические факторы, определяющие формирование ареала целевого объекта. Количественно такие факторы описываются прикладными климатическими индексами или же просто метеорологическими величинами, а климатический ареал – совокупностью требований к значениям таких переменных.

Климатические предикторы и их пороговые значения могут быть известны из специальной научной литературы. Если такая информация отсутствует, то климатические предикторы выбираются, исходя из результатов фундаментальных исследований биологии целевого объекта, а конкретные значения порогов для них оцениваются по фактическому ареалу [Попов, 2016].

Система RANGES на основе данных моделирования климата и значений климатических предикторов позволяет оценить климатический ареал для конкретного вида. В настоящий момент система, реализованная в программе, логика которой написана на языке программирования Fortran, имеет возможность оценки климатических ареалов видов, используя для них следующие климатические предикторы:

- среднемесячные (за периоды от одного до нескольких месяцев) и среднегодовые значения температуры воздуха в приповерхностном слое ($^{\circ}\text{C}$);
- сумма осадков за год или определенные периоды по месяцам (мм);
- сумма активных (САТ, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$), пассивных (СПТ, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$) и эффективных (СЭТ, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$) температур при определенном температурном пороге ($^{\circ}\text{C}$);
- число суток со среднесуточной температурой ($^{\circ}\text{C}$) выше определенного порогового значения;
- дополнительно учитывается гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) при пороговом значении среднесуточной температуры воздуха для смежных задач, связанных с засухами;

Рассчитанный по этим предикторам климатический ареал вида, соответствующий климату исходного периода времени (например, для отрезка времени 10-30 лет), с течением времени может измениться за счёт изменений климата. Такой подход к описанию климатического ареала был предложен в работе [Semenov, Gelfer, Yasyukevich, 2002] и подробно описан в монографии [Семенов, Ясюкевич, Гельвер, 2006]. В дальнейшем в статье [Семенов, Попов, Ясюкевич, 2020] этот подход был развит в направлении статистической оценки уверенности в том, что заданная точка географического пространства принадлежит климатическому ареалу вида. Для получения такой оценки выполнение ограничений на значения климатических предикторов проверяется не для их средних климатических значений, а для каждого года рассматриваемого периода времени.

Пусть для заданной точки географического пространства для отрезка времени в I последовательных лет при оценке обнаружилось k благоприятных лет из общего числа N . Если речь идет о данных мониторинга, то $N = I$. Если делается оценка для будущего климата, и имеются L его модельных реализаций, то $N = IL$. Климат рассматриваемого I -летия считается благоприятным для вида, если доля благоприятных лет p больше некоторого порогового значения p_0 . Значение p_0 задается экспертами-экологами, а при отсутствии информации принимается равным 0.5. Для оценки уверенности непосредственно используется вероятность того, что $\{p > p_0\}$. При этом функция $F(N, k; p)$ распределения p на отрезке $[0, 1]$ соответствует байесовскому подходу:

$$F(N, k; x) = \frac{B_x(k+1, N-k+1)}{B(k+1, N-k+1)},$$

$$B_x(a, b) = \int_0^x \theta^{(a-1)}(1-\theta)^{b-1} d\theta$$

Здесь $B_x(a, b)$ – неполная бета-функция Эйлера.

Исходя из чисел k и N , гипотезу о том, что доля благоприятных лет p не превосходит порогового значения p_0 , можно отвергнуть для определенных уровней значимости $\varepsilon > 0$. Таким образом определяется, в каком из полуинтервалов $(0, 0,33]$, $(0,33, 0,66]$, $(0,66, 0,90]$, $(0,90, 0,99]$, $(0,99, 1,00]$ находится доверительная вероятность $PR = 1 - \varepsilon$, т. е. “уверенность” в том, что значение p превосходит p_0 . Эти диапазоны, в соответствии с рекомендациями Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) словесно характеризуются следующим образом: “маловероятно”, “средне-вероятно”, “вероятно”, “весьма вероятно”, “практически достоверно” [Mastrandrea et al., 2010]. Таким образом определяется степень уверенности в том, что определенная точка географического пространства принадлежит климатическому ареалу.

В настоящий момент для системы RANGES было создано десктопное приложение, которое позволяет определить степень уверенности принадлежности точки географического пространства климатическому ареалу на основе расчета выбранных пользователем климатических предикторов. Помимо этого, пользователь вводит сведения о климатической модели, данные которой планируется использовать для расчета климатических предикторов, а также границы имеющейся области исследования, исходя из пространственных возможностей выбранной модели. В работах [Bogdanovich et al., 2023] и [Богданович и др., 2023] для региональных оценок климатических ареалов средиземноморской плодовой мухи (*Ceratitis capitata*) и непарного шелкопряда (*Lymantria dispar* (L.)) на территории России использовались климатические данные, рассчитанные с помощью региональной климатической модели (РКМ) Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) за периоды 1990—1999, 2030—2039 и 2050—2059 гг. Модельные оценки климата соответствуют сценариям RCP4.5 и RCP8.5, а расчетные данные по каждому периоду представлены 50 траекториями. К этим массивам данных были введены поправки, минимизирующие расхождения с данными мониторинга климата о среднемесячных значениях температуры и месячных суммах осадков за 1990—1999 гг. (массив CRU TS v. 4.04 [Harris et al., 2020]). Подробнее о климатических данных РКМ и поправках к ним см. [Богданович и др., 2021]. Также расчет климатического ареала для *L. dispar* [Богданович и др., 2023] был осуществлен для глобальных оценок по данным климатической модели Института вычислительной математики РАН (ИВМ). При

этом доступны модельные оценки в условиях сценария SSP2.6, SSP4.5, SSP7.0 и SSP8.5 [Семенов, Гладильщикова, 2022]. К данным была применена та же процедура поправок, что и к данным расчета РКМ.

Таким образом система RANGES, используя данные модельных климатических расчетов, позволяет оценить климатические ареалы биологических видов, что является весьма актуальной задачей, учитывая, что систематический мониторинг ареалов как на глобальном, так и на региональном уровнях пока не осуществляется. Однако важно учитывать необходимость серьезной проработки методологии выбора климатических предикторов, описывающих климатических ареал.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Богданович А.Ю., Добролюбов Н.Ю., Крыленко С.В., Баранчиков Ю.Н., Липка О.Н., Семенов С.М. (2023) Климатический ареал непарного шелкопряда на территории России, соответствующий климатам конца 20 века и 21 века. – *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 1, – в печати.
2. Богданович А.Ю., Павлова В.Н., Ранькова Э.Я., Семенов С.М. (2021) Влияние изменений засушливости в России в XXI веке на пригодность территорий для возделывания зерновых культур. – *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 1, с. 20-35.
3. Попов И.О. Климатически обусловленные изменения аутоэкологических ареалов иксодовых клещей *Ixodes ricinus* и *Ixodes persulcatus* на территории России и стран ближнего зарубежья: дис. ... канд. биол. наук. – М.: РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 2016. – 112. с.
4. Семенов С.М., Гладильщикова А.А. Сценарии антропогенных изменений климатической системы в XXI веке. — *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2022, т. 8, № 1, с. 75—106.
5. Семенов С.М., Попов И.О., Ясюкевич В.В. 2020. Статистическая модель для оценки формирования климатогенных угроз по данным мониторинга климата. *Метеорология и гидрология*. № 5. С. 59-65.
6. Семенов С.М., Ясюкевич В.В., Гельвер Е.С. 2006. Выявление климатогенных изменений. – М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология». – 324 с.
7. Bogdanovich A.Yu., Andreeva A.P., Dobrolyubov N.Yu., Krylenko S.V., Lipka O.N., Semenov S.M. Possible Expansion of the Climatic Range of the Mediterranean Fruit Fly Being a Dangerous Fruit Pest // *Russian Meteorology and Hydrology*. – 2023. – Vol. 48., No. 1 – pp. 72-78.
8. Harris I., Osborn T. J., Jones P. D., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. — *Scientific Data*, 2020, vol. 7, No. 1, pp. 1—18.
9. 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. Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties. IPCC Cross-Working Group Meeting on Consistent Treatment of Uncertainties. — Jasper Ridge, CA, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2010; <http://www.ipcc.ch>.
10. Semenov S.M., Gelver E.S., and Yasyukevich V.V. 2002. Temperature Conditions for Development of Two Species of Malaria Pathogens in the Vector Organism in Russia in the 20th Century. – *Doklady Biological Sciences*, Vol. 387, pp. 523–528. Translated from *Doklady Akademii Nauk*, Vol. 387, No. 1, 2002, pp. 131–136.

Разработка NETCID- базы данных об условиях термического комфорта для Северной Евразии за период с 1979 по 2018 годы: современное состояние и перспективы

¹Константинов П.И., ²Варенцов М.И., ³Шартова Н.В.

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

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

³НИУ Высшая Школа Экономики, Москва, Россия

E-mail: kostadini@mail.ru

Задачи определения влияния изменения климата на здоровье и качество жизни населения требуют введения в оперативную и исследовательскую практику новых метрик - показателей биоклиматической комфортности на разных пространственных масштабах.

В современной климатологии задача хранения таких данных решается с помощью баз данных «ре-анализа» - массива данных метеорологических переменных, особым образом спроецированных на узлы координатной сетки. Этот подход в полной мере актуален для территории Северной Евразии с ее

разнообразным климатом, быстрыми изменениями окружающей среды и часто разреженной сетью натурных наблюдений.

В данном докладе мы представляем концептуально новый набор данных для наиболее популярных индексов теплового комфорта, а именно «индекса жары – Heat Index (HI)», индекса жары и влажности – Humidex (HUM), индекса холодового дискомфорта (WCT), средней лучистой температуры (MRT), физиологически эквивалентной температуры (PET) и универсального индекса теплового комфорта (UTCI). Исходным материалом для расчета и моделирования данных индексов стали данные реанализа ERA-Interim для территории Северной Евразии (географическая область, ограниченная 40°N-80°N, 10°W-170°W).

Представляемый набор данных имеет горизонтальное разрешение 0,75° x 0,75° (до 79 км), временное разрешение 3 часа и охватывает период с 1979 по 2018 год (40 лет), что соответствует стандарту Всемирной метеорологической организации (ВМО) при определении параметров современного климата. Временные ряды индексов дополнены набором из 8092 предварительно рассчитанных статистических параметров, характеризующих климатологию условий тепловой/холодовой нагрузки.

Применение локальных метеорологических моделей для воспроизведения городского микроклимата на примере Москвы

Левищева Т.П., Константинов П.И.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия
E-mail: tatianapetrovna2020@gmail.com

С каждым годом возрастает роль крупнейших городов. Городская среда во всем мире характеризуется аномальными особенностями климата, увеличение температуры воздуха при значительном росте урбанизации оказывает влияние на здоровье населения. Понимание физических механизмов изменений микроклимата и их математическое описание является необходимым звеном в оценке влияния климатических изменений на здоровье населения. Отсутствие удобных современных моделей, пригодных для использования без продвинутых навыков программирования и обширных ресурсов препятствует исследованию городского климата.

В работе рассмотрены модели городского масштаба, которые способны имитировать тепловое воздействие на открытом воздухе. Модели, участвующий в исследовании: ADMS-Urban, advanced SkyHelios model, Ansys Fluent, ENVI-met, RayMan, SOLWEIG, TownScope, UMEP. [1]

Летом 2010 года в Москве зафиксирован один из самых больших по числу суточных рекордов температуры. В результате блокирующего антициклона установилась аномальная жара, длительностью 1,5 месяца. Во время длительной волны жары 2010 года смертность выросла по всем крупным причинам смертей на 11 тыс. случаев в сравнении с июлем-августом 2009 года. [2]

Для моделирования микроклиматических условий района было выбрано 13 июля 2010 года. Для эксперимента были использованы метеорологические данные архива погоды на метеостанции Балчуг, полученные с сайта <http://rp5.ru>. Самые высокие значения биоклиматических индексов, используемых для оценки температурного комфорта в открытых городских пространствах зафиксированы днем.

Для центра Москвы характерны высокая плотность застройки и большая численность населения. В исследовании на основе программного обеспечения Envi-met сравнивается эффективность охлаждения воздуха при различных вариантах озеленения городских территорий, а также результаты по влиянию различных вариантов озеленения городских территорий на тепловой комфорт городских жителей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. B. Jänicke et al. Review of user-friendly models to improve the urban micro-climate Atmosphere (2021).
2. Revich BA. Heat-wave, air quality and mortality in European Russia in summer 2010: preliminary assessment. Journal Human Ecology Russian 2011, 7: 3-9 (Ревич Б. А. Волны жары, качество атмосферного воздуха и смертность населения европейской части России летом 2010 года: результаты предварительной оценки. Экология человека 2011, 7: 3-9).

Применение вейвлет-анализа для поиска геомагнитных аномалий на обсерватории «Сурлари», сопутствующих землетрясениям в Турции 6 февраля 2023 г.

Рябова С.А.

ФГБУ учреждение науки «Институт динамики геосфер им. академика
М.А. Садовского» РАН,
ФГБУ науки «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта» РАН, Москва, Россия
E-mail: riabovasa@mail.ru

Землетрясения магнитудой 7.8 и 7.5 произошли 6 февраля 2023 года с интервалом в девять часов на юго-востоке Турции. Основной толчок первого мощного землетрясения зарегистрирован в 1:17 UT и произошел в турецком районе Шехиткамыш на глубине 17.9 км. Основной толчок второго землетрясения зарегистрирован в 10:24 UT и произошел в турецком районе Эльбинстан на глубине 10 км. Подземные толчки, за которыми последовали несколько тысяч афтершоков, ощущались в одиннадцати провинциях Турции и в соседних странах, главным образом, в Сирии. Отметим, что через небольшое время после обоих землетрясений были зафиксированы сильные афтершоки: через 11 минут после первого (1:28 UT) – сейсмическое событие с магнитудой 6.7; через 2 минут после второго (10:26 UT) – сейсмическое событие с магнитудой 6.0.

С целью поиска геомагнитных вариаций, связанных с сейсмическими событиями и получения информации об их частотном составе в настоящей работе выполнялся спектральный анализ на основе вейвлет-преобразования.

В ходе настоящих исследований привлекались данные регистрации компонент геомагнитного поля на магнитной обсерватории "Сурлари". Географические координаты: 44.68° с.ш., 26.25 в.д. Обсерватория "Сурлари" расположена в 1230 км от эпицентра первого землетрясения в Турции и в 1175 км от эпицентра второго землетрясения в Турции.

Натурные испытания многоэлементного пиранометра

Зуев С.В.

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

Приводятся первичные результаты натурных испытаний разрабатываемого многоэлементного пиранометра, реализующего запатентованный способ измерения прямой, рассеянной и суммарной радиации [1]. Пиранометр конструктивно состоит из измерительной и электронной частей, размещенных в герметичном корпусе с защитным колпаком из УФ-стабилизированного акрила (Рисунок 1). Измерительная часть содержит в себе семь датчиков теплового потока на основе термопарных гипербатареи медь-константановых пар [2], расположенных в форме ромашки под полусферическим теневым экраном специальной формы, и предназначена для формирования напряжений, пропорциональных измеряемой каждым из датчиков величине солнечной радиации. Электронная часть пиранометра предназначена для обработки, хранения и передачи сигналов с датчиков и состоит из платы управления на основе 32-битного микропроцессора STM32F103ZET6 с 8-входовым 12-разрядным АЦП и энергонезависимой флеш-памяти K9F1G08U0E емкостью 128 Мбайт.

Теневой экран сконструирован таким образом, что в любой момент времени как минимум



Рисунок 1.
Внешний вид многоэлементного пиранометра.

один датчик полностью открыт для Солнца и измеряет максимальную величину солнечной радиации $Q_{\max}$ и как минимум один датчик полностью закрыт от Солнца и измеряет минимальную величину солнечной радиации $Q_{\min}$. Определив пару значений $Q_{\max}$ и $Q_{\min}$ рассеянную, суммарную и прямую радиацию можно рассчитать как

$$\begin{cases} D = \frac{n}{n-1} \cdot Q_{\min}; \\ Q = Q_{\max} + \frac{1}{n-1} \cdot Q_{\min}; \\ S = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{\sin h}, \end{cases}$$

где n – отношение всей площади обзораемой полусферы небосвода к площади теневого экрана.

Основные характеристики пиранометра:

- виды измеряемой солнечной радиации – суммарная, рассеянная и прямая;
- спектральный диапазон измеряемой радиации 0,36-2,3 мкм;
- диапазон измерений 10-1500 Вт/м²;
- время установления выходного сигнала не более 10 с;
- погрешность измерения (инструментальная) не более 5%;
- количество каналов измерения – 7;
- количество хранимых усредненных значений - не менее 100000 на канал;
- длина последовательного канала связи RS-232 не менее 25 м;
- класс пылевлагозащиты не ниже IP65;
- питание от внешнего источника 5 В или от встроенного LiSOC12 элемента 3,6 В 2,3 А·ч.

- Разработка и изготовление многоэлементного пиранометра выполняются при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (грант № 74026); теоретические исследования способа измерения выполняются при финансовой поддержке РАН в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН (проект № 121031300155-8).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Патент РФ 2682590. Способ измерения характеристик солнечного излучения. Опубликовано: 19.03.2019, Бюл. № 8.
2. Российские датчики теплового потока - 30 лет опыта: [Электронный ресурс]. URL: <https://teplomer.msk.ru/>. (Дата обращения 14.03.2023).

Взаимодействие компонент климатической системы в модели INMCM-SibCIOM с помощью каплера SCM

Градов В.С., Платов Г.А.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: gradov.v.s@gmail.com, plat@ommfao.sccc.ru

Каплером называется программный комплекс, предназначенный для установления взаимодействия между различными компонентами, или блоками, модели климатической системы, такими как океан, атмосфера, лед, суша и биосфера. Основными функциями каплера являются организация синхронизированного обмена данными между всеми блоками модели и интерполяция данных с одной расчетной сетки на другую, поскольку каждый блок модели может иметь свою расчетную сетку и шаг интегрирования по времени. В каплере могут быть реализованы и прочие функции, будь то работа с файловой системой, управление блоками модели, расчет потоков между блоками и т.д. Каплер SCM был разработан вместе с совместной моделью океана и морского льда SibCIOM в ИВМиМГ СО РАН. В его основе лежит одна из ранних версий каплера CCSM(v5.0), разработанная в Национальном Центре Атмосферных Исследований (NCAR). Каплер SCM представляет собой отдельный программный модуль, к которому с помощью специальных интерфейсов могут быть подключены блоки суши, атмосферы, океана и льда. Одной из особенностей данного каплера является возможность присоединения блоков, имитирующих работу полноценной модели. Так, например, в модели SibCIOM в качестве атмосферного блока используется блок, передающий данные реанализа атмосферы и имитирующий работу атмосферной модели. В данном докладе описывается принцип работы каплера SCM, его функционал и

его применение при построении различных моделей климатической системы, в частности климатической модели INMCM-SibCIOM, которая состоит из блока общей циркуляции атмосферы модели INMCM48 и океанического и ледового блоков модели SibCIOM. Стоит отметить, что ранее аналогичным образом с помощью данного каплера была построена климатическая модель промежуточной сложности PlaSim-ICMMG1.0, которая в качестве атмосферного блока содержит блок PUMA модели PlaSim. При этом обе модели отличаются лишь набором обмениваемых полей между каплером и атмосферным блоком. К дополнительному функционалу SCM каплера можно отнести возможность расчета потоков между атмосферой и океаном, коррекцию потоков радиации для модели морского льда согласно различным сценариям и коррекцию динамики льда в ледовой модели с помощью модели приливов.

Оценка условий проведения мероприятий на свежем воздухе в г. Москва с использованием CTIS

Маратканова В.С., Константинов П.И.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия
E-mail: varvara.mar@yandex.ru, kostadini@mail.ru

Информация о погодно-климатических условиях, включая факторы, формирующие тепловую нагрузку на человеческий организм, востребована не только среди участников и посетителей спортивных мероприятий, но и среди людей, ответственных за принятие решений в этой сфере. Тщательный анализ таких данных позволяет выявить наиболее подходящий период проведения мероприятия, избежать негативных последствий для здоровья его участников. Следовательно, существует потребность в представлении интересующей научной информации доступном для неспециалистов виде. Одним из таких инструментов является CTIS (Climate-Tourism Information Scheme) [1,2]. CTIS представляет собой диаграмму повторяемости неблагоприятных или благоприятных погодных условий в зависимости от выбранных для региона исследования критериев отбора. Временное разрешение CTIS зависит от доступных метеорологических данных.

CTIS для г. Москвы была построена по срочным данным ст. Москва-ВДНХ за 1991–2021 гг. Динамика повторяемости неблагоприятных явлений прослеживалась путём сравнения с данными 1961–1990 гг. Индексы комфортности климата были рассчитаны с использованием модели RayMan. Для г. Москва были выбраны следующие пороговые критерии: термический комфорт ($9^{\circ}\text{C} < \text{UTCI} < 26^{\circ}\text{C}$), тепловой стресс ($\text{PET} > 35^{\circ}\text{C}$), холодовой стресс ($\text{UTCI} \leq 9^{\circ}\text{C}$), солнечные дни (облачность < 5 октантов между 6 и 18 ч.), туманные дни (относительная влажность $> 93\%$ между 6 и 18 ч.), дождливые дни (более 5 мм осадков за 24 ч.), сухие дни (менее 1 мм осадков за 24 ч.), душные дни (давление водяного пара > 18 гПа) и ветреные дни (скорость ветра > 8 м/с).

Наиболее благоприятные условия термического комфорта в Москве наблюдаются с мая по сентябрь, причем с 21.08 по 11.09 условия близки к идеальным (почти 80 %). Холодовой стресс очень часто наблюдается с октября по май, причём с 21.10 по 1.04 повторяемость таких дней близка к 100 %. Тепловой стресс, наоборот, наиболее часто встречается в июле и августе, но повторяемость не превышает 20 %. Солнечных дней больше летом (вторая и третья декады июля, первая и вторая декады августа), повторяемость достигает 45 %. Соответственно, дождливые и туманные дни летом встречаются крайне редко, а повторяемость сухих дней в этот сезон выше. Повторяемость душных дней в Москве наибольшая в июле, с 11.07 по 21.07 она достигает 39 %. Ветреные дни редки в течение всего года.

Оценивая изменения повторяемости неблагоприятных явлений за последние 30 лет по сравнению с 1961–1990 гг., можно отметить, что значительно уменьшилась (на 20–30 %) повторяемость холодowego стресса в последние декады апреля и сентября. Увеличилась в пределах 10 % повторяемость теплового стресса в июле. Соответственно, также увеличилась повторяемость условий термического комфорта в переходные сезоны, и уменьшилась в летние месяцы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Matzarakis A., Graw K. Human Bioclimate Analysis for the Paris Olympic Games. Atmosphere 2022, 13, 269.
2. Matzarakis A. Transfer of climate data for tourism applications – The Climate-Tourism/Transfer-Information-Scheme. Sustain. Environ. Res., 2014, 24(4), 273–280.

Общая архитектура прототипа распределенной информационной системы мониторинга и комплексного анализа потоков парниковых газов болотных экосистем

Титов А.Г.

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

E-mail: titov@scert.ru

В данной работе представлена общая архитектура прототипа распределенной информационной системы мониторинга и комплексного анализа потоков парниковых газов болотных экосистем. В качестве базиса данной архитектуры используется архитектура платформы "Климат" (<http://climate.scert.ru>). Ее уникальная особенность заключается в интеграции в нее цифрового двойника в качестве основного инструмента для анализа данных мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах южно-таежной подзоны Западной Сибири. Таким образом, она состоит из пяти ключевых аппаратных и программных компонент:

1. Структурированные архивы пространственно-привязанных геофизических данных, с соответствующими метаданными, хранящихся в рамках штатной файловой системы в виде наборов двоичных файлов формата NetCDF на системах хранения данных (СХД);
2. Вычислительное ядро на стороне сервера, представляющее собой независимый программный комплекс, включающий набор независимых модулей для доступа и обработки пространственных данных, и менеджер ядра, управляющий процессами ввода/вывода и выполнением модулей;
3. Геопортал на стороне сервера, реализующий логику веб-приложений, связь с картографическими веб-сервисами для работы с пространственными данными на основе OGC WMS, WFS, WCS, WPS, и обеспечивающий работу с хранилищем метаданных;
4. Графический интерфейс пользователя на стороне клиента, отображаемый в окне графического веб-браузера и отображающий интерфейс классической геоинформационной системы;
5. Цифровой двойник болотных экосистем в виде реляционных баз данных PostgreSQL, содержащих данные и метаданные потоков тепла, влаги, углекислого газа для болот юга таёжной зоны Западной Сибири, а также данные по термическому режиму почв этого региона. Кроме того, базы данных цифрового двойника содержат формализованные описания почв и видов растительности, что позволит в ходе дальнейшей реализации создать специализированные веб-приложения для научных сотрудников, интерфейс которых позволит корректно добавлять новые результаты полевых измерений онлайн. Также система хранения данных содержит релевантные спутниковые снимки рассматриваемой территории, и оцифрованные карты растительности.

Для работы с базами данных потоков углерода и термического режима почв используется соответствующий API. Кроме того, цифровой двойник болотных экосистем содержит следующие компоненты:

1. Сервис автоматического обновления баз данных потоков углерода, который позволяет регулярно проверять доступность новых исходных данных измерений, и корректно конвертировать их в соответствующие таблицы базы данных, с сохранением ее целостности.
2. Сервис расчета суммарных оценок потоков углерода. Получаемые оценки хранятся в соответствующей базе данных результатов вычислений.
3. Общий интерфейс доступа к цифровому двойнику, который возможен либо через соответствующий API, реализованный на языке PHP, либо через классический интерфейс командной строки и файл конфигурации.

- Работа выполнена в рамках реализации ВПГ ГЗ "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

Estimation of hourly spatial temperature distribution in the Moscow metropolitan area based on geostationary satellite data

Shishov A.

Hydrometcentre of Russia, Moscow, Russia
E-mail: shandruha@gmail.com

The impact of heat in cities is usually studied through the analysis of ground-based measurements. The heterogeneity of urban patches and related heat flow patterns have a negative effect on the accuracy of mesoscale numerical weather prediction (NWP) models, but this effect can be reduced by the assimilation of cloud cover and spatial temperature distribution data in urban and rural areas.

This study attempts to apply geostationary satellite data with high temporal resolution to the task of monitoring spatial temperature features in infrared spectral channels with wavelengths 3.9 and 10.8 μm . The spatial resolution of these measurements is between 5 and 8 km, which exceeds that of ground-based measurements and is therefore optimal for the task. It is noteworthy that polar-orbiting satellites can provide even higher resolution, but only at the cost of much lower temporal resolution.

This study is based on Meteosat-10 SEVIRI hourly measurements for the period of March 17-19 2023, when the sky was mostly clear, but the snow cover was still present. Average brightness temperatures in both infrared spectral channels were computed for two disjoint regions: 1) urban area defined as a disc with radius 25 km and the centre of Moscow as a central point; 2) rural area defined as a disc with the same central point, but with radius 80 km, excluding a disc with the same central point, but with radius 40 km. Thus, the number of cloud-free pixels for each timestamp ranged from 27 to 71 in the first region, and from 240 to 600 in the second region.

In addition to mean value and standard deviation, two-sample Student t-statistic was computed for each region, each spectral channel, and each timestamp in order to test whether average temperature in the urban area was higher than in the rural area. For most timestamps p-value of the one-sided test was much lower than the chosen critical value of 0.05. This implied that the null hypothesis (the means in two samples are equal) could be rejected in favour of the alternative one (the mean temperature in the urban area is higher). However, there were exceptional hours, when the null hypothesis could not be rejected. It is apparently related to the presence of clouds, which are significantly colder than the surface.

Furthermore, diurnal temperature variation in each infrared spectral channel as well as in the difference of these channels (temperature at 3.9 μm minus temperature at 10.8 μm) is considered. These data suggest that average temperature in the urban area is 0.9-2.5 $^{\circ}\text{C}$ higher than in the rural area.

In conclusion, the results of this study show that meteorological satellite data can be used to monitor the urban heat island, allowing to take cloud cover into account. But it is worth mentioning that this methodology also requires the automatic detection of cloud types, and the estimation of cloud optical density. RGB composite images can then be used for the efficient representation of collected satellite data.

Результаты мультифрактального детрендрованного флуктуационного анализа минимальной температуры на горе Цугшпитце

Рябова С.А.

ФГБУ науки «Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского» РАН,
ФГБУ науки «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта» РАН, Москва, Россия
E-mail: riabovasa@mail.ru

Климатическая система, характеризующаяся вариациями метеорологических параметров, является сложной динамической системой с нелинейным поведением. Недавно появившиеся методы из науки о сложных системах могут способствовать лучшему пониманию изменений климата и проверке климатических моделей. Одним из таких методов, нашедшим широкое применение при анализе разного рода данных, в том числе геофизических, является мультифрактальный детрендрованный флуктуационный анализ.

Цель настоящих исследований заключалась в изучении мультифрактальных особенностей минимальной суточной температуры воздуха на горе Цугшпитце.

Высокогорная метеостанция, расположенная на высоте 2574 м на горе Цугшпитце была открыта в 1900 году и выполняет регистрацию температуры воздуха до настоящего момента. Географические координаты: 47° 25' с.ш., 10° 58' 59" в.д.

Метод мультифрактального детрендрованного флуктуационного анализа применяется к временным рядам с удаленной из них сезонной и трендовой компонентой. В качестве параметров для мультифрактального детрендрованного флуктуационного анализа использовались флуктуационная функция, обобщенная показатель Херста и спектр сингулярности.

Прогноз параметров морского льда климатической модели INM-CM5 в Арктике на летний сезон

^{1,2,3}Воробьева В.В., ^{1,2,4}Тарасевич М.А., ^{1,2,3}Володин Е.М.

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

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр России, Москва, Россия

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

⁴Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

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

В течение нескольких последних лет на основе климатической модели INM-CM5 [1] развивается технология сезонного ансамблевого прогноза. Ранее для сезонных ретроспективных прогнозов модели была показана возможность сезонного прогноза таких крупномасштабных мод климатической изменчивости, как Северо-Атлантическое колебание, Тихоокеанско-Североамериканское колебание, Эль-Ниньо-Южное колебание, квазидвухлетнее колебание, внезапное стратосферное потепление [2]. Также показано, что качество результатов летних сезонных ретроспективных прогнозов климатической модели INM-CM5 соответствует уровню других мировых прогностических систем, используемых для создания сезонных прогнозов [3].

В рамках работ по внедрению сезонных прогнозов INM-CM5 в оперативную систему долгосрочных прогнозов Гидрометцентра России информационно-вычислительная система построения начального состояния для климатической модели ИВМ РАН была модифицирована и впоследствии автоматизирована с целью обеспечения возможности расчета сезонных прогнозов в оперативном режиме. Задание начального состояния для расчета сезонных прогнозов производится в терминах аномалий: к модельной климатологии для даты старта прогноза прибавляется аномалия реанализа. При этом в качестве данных наблюдений используются данные реанализа атмосферы и деятельного слоя суши ERA5 [4], а также данные реанализа океана и морского льда SODA3.4.2 [5] для прогнозов до 2019г. и анализа GODAS HMC [6] для прогнозов с 2020г. Климатология для ретроспективных прогнозов рассчитывается за период 1991-2019гг., а для оперативных прогнозов - за период 2007-2015гг., поскольку данный период является максимально возможным для использования данных океанского анализа GODAS HMC. Выбор анализа GODAS HMC для расчета оперативных прогнозов обусловлен доступностью его данных в оперативном режиме.

В данном исследовании проведена валидация ледовых параметров в Арктике для летних сезонов 1993-2009гг. с использованием спутниковых данных SMMR/SSM/I-SSMIS [7] (для площади морского льда) и реанализа SODA3.4.2 (для сплоченности и толщины морского льда). Представлены оценки качества прогноза ледовых параметров на зимний сезон 2022-2023гг.

Выполнен расчет ансамблевого прогноза погоды на летний сезон 2023г. Прогноз на 6 месяцев стартует с начального состояния на 1 мая 2023 года и состоит из 20 членов ансамбля. Рассматривается прогноз аномалии площади, сплоченности и толщины арктического морского льда относительно базового периода 1991-2020гг. в среднем за июнь-июль-август и отдельно за сентябрь. Отметим, что сентябрь наиболее интересен как месяц, для которого площадь морского льда принимает минимальные значения.

- Работа выполнена в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 20-17-00190, расчет сезонных ретроспективных прогнозов) и Московского центра фундаментальной и прикладной математики (соглашение с Минобрнауки России №075-15-2022-286, расчет прогноза на зимний сезон 2022гг. и летний сезон 2023 гг.).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Volodin E. M., Mortikov E. V., Kostykin S. V., Galin V. Y., Lykossov V. N. et al. Simulation of the present day climate with the climate model INMCM5. — *Clim. Dyn.*, 2017, vol. 49, pp. 3715—3734.
2. Vorobyeva V., Volodin E. Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale. — *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2021, vol. 73, pp. 1—12.
3. Воробьева В. В., Володин Е. М. Исследование качества летних сезонных ретроспективных прогнозов, выполненных на основе климатической модели ИВМ РАН // Сборник трудов CITES-2021. — 2021. — С. 10–14.
4. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S. The ERA5 global reanalysis. — *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 1999—2049.
5. Carton J.A., Chepurin G.A., Chen L.. SODA3: A New Ocean Climate Reanalysis // *J. Climate*, 2018, v. 31, № 17, p. 6967–6983.
6. Крупномасштабная циркуляция океана и характеристики ледового покрова по данным численных экспериментов с использованием модели NEMO / В.Н. Степанов, Ю.Д. Реснянский, Б.С. Струков, А.А. Зеленко // *Метеорология и гидрология*. — 2019. — № 1. — С. 50–66.
7. Summary of SMMR, SSM/I, and SSMIS Sensors — URL: https://nsidc.org/sites/default/files/smmr-ssmi-ssmis-sensors_0.pdf (online; accessed: 22.03.2023).

The bulletin of seasonal multi-model forecasts for summer 2023

Kaverina E., Kulikova I., Krulova E., Tischenko V., Khan V.

North Eurasia Climate Centre (NEACC)

E-mail: ringanieva@gmail.com, neacof@gmail.com

In this presentation, the climate outlook for forthcoming summer 2023 over the North Eurasia produced by NEACC has been presented. The state of atmospheric circulation conditions as an important factor in the formation of the temperature and precipitation anomalies on seasonal time intervals is discussed. Atmospheric circulation patterns are analysed by means of the monitoring and forecast information from 500 hPa height, mean sea level pressure fields. The current state of sea surface temperature is also reviewed with focus on the sea surface anomalies in the Atlantic, Indian and Pacific oceans. The current situation of sea ice extent changes in Arctic region in connection with polar weather conditions has been considered. To identify the leading modes of atmospheric variability in the upcoming season and teleconnection patterns, climate indices such as EA, WA, EU, WP and PNA were calculated from SL-AV model ensemble forecasts. Air temperature and precipitation forecasts over North Eurasia from different GPCs are compared and assessed. The special attention has been given to analysis of seasonal forecast for summer 2023 in North Eurasia from NEACC based on SL-AV and MGO models. In conclusion, brief summary for the up-coming summer 2023 from NEACC has been provided.

Оценка практической предсказуемости колебания Маддена-Джулиана

Набокова Е.В., Хан В.М., Куликова И.А.

ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

E-mail: nel83@mail.ru

Колебание Маддена-Джулиана (КМД) - одна из основных мод внутрисезонной тропической изменчивости, которая оказывает влияние на погоду и климат в глобальном масштабе. В многочисленных исследованиях показано, что КМД является одной из физических причин предсказуемости атмосферы, в том числе аномальных метеорологических явлений на длительных интервалах времени. В мировых метеорологических центрах вопросам мониторинга и прогнозирования КМД уделяется особое внимание. Колебание считается одним из важнейших показателей уровня гидродинамического моделирования на внутрисезонных масштабах времени. По этой причине воспроизведение колебания гидродинамическими моделями оценивается по единому протоколу в рамках международного проекта S2S. В России оперативные прогнозы КМД на данный момент пока не выпускаются. Тем не менее в Гидрометцентре России/СЕАКЦ уже разрабатывается технология долгосрочного прогнозирования КМД. В качестве основного показателя состояния КМД используется индекс RMM (Real-time Multivariate КМД index), предложенный Вилером и Хэнденом. С использованием результатов численных экспериментов, полученных на базе климатической модели ИВМ РАН (INM-CM5) в конфигурации для сезонного прогноза, дается оценка практической предсказуемости индекса RMM. Делается вывод, что уровень качества прогнозов КМД на интервалах времени порядка трех недель вполне удовлетворительный. На примере зимнего периода (с ноября по декабрь 2021 г.) продемонстрированы возможности прогноза КМД в режиме реального времени. Отмечается зависимость качества прогнозов от инициализации в модели амплитуды и фазы колебания. Полученные результаты предполагается использовать в рамках прогностической деятельности Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ).

СЕКЦИЯ VII

СЕМИНАР ПО РАЗВИТИЮ НАЦИОНАЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Воспроизведение изменений климата в 1850–2023 гг. версией модели климата INMCM6

Володин Е.М.

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

Рассматривается отличие данной версии модели от предшествующих, и связанные с этим изменения модельного климата. Рассматривается моделирование изменений климата в 1850–2023гг с помощью ансамбля численных экспериментов. Представлено изменение глобально осредненной температуры поверхности, изменение теплосодержания океана, изменение содержания углерода в океане и экосистемах суши, баланса тепла на поверхности, площади арктического и антарктического морского льда, меридиональной функции тока в океане. Представлено изменение показателей, характеризующих интенсивность турбулентности в атмосферном пограничном слое, интенсивность глубокой и мелкой конвекции, количество молниевых разрядов. Результаты, где возможно, сравниваются с аналогичными результатами для предыдущей версии модели, и, где возможно - с данными ансамбля климатических моделей CMIP6. Делаются выводы об успешности моделирования современных изменений климата и о возможных путях дальнейшего совершенствования модели климата.

Оценки экспериментальных долгосрочных метеорологических прогнозов, выпускаемых в Гидрометцентре России на базе модели INM-CM

¹Хан В.М., ¹Тищенко В.А., ¹Круглова Е.Н., ¹Куликова И.А., ¹Емелина С.В., ¹Набокова Е.В.,
¹Субботин А.В., ²Грицун А.С., ²Володин Е.М., ²Воробьева В.В., ²Тарасевич М.А.

¹ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

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

Обсуждаются результаты работ, выполненных в ФГБУ «Гидрометцентр России» в рамках реализации первого этапа важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ) в части разработки глобальной модели Земной системы мирового уровня для исследовательских целей и сценарного прогнозирования климатических изменений, повышения точности климатических моделей и надежности климатических прогнозов в соответствии с Планом мероприятий по реализации распоряжения Правительства Российской Федерации.

Модель Земной системы ИВМ РАН (INM-CM) успешно адаптирована в Гидрометцентре России на вычислительных ресурсах Росгидромета. Получены результаты сравнения контрольных данных из доступных источников с выходной продукцией модели INM-CM в части гидрометеорологических прогнозов на интервале от сезона и более. Подобраны объективные критерии качества прогнозов климатической изменчивости в рамках стандартизированного регламента ВМО для оценки ретроспективных и

квазиоперативных прогнозов по модели Земной системы. Проведенные авторские испытания демонстрируют качество прогнозов температуры воздуха на 2м., температуры воздуха на уровне 850 гПа, геопотенциала на уровне 500 гПа, рассчитанных на сезонных интервалах времени, соответствующее мировому уровню. Устойчиво хорошие оценки прогнозов по упомянутым выше параметрам отмечены для Северной Евразии по сравнению с большинством мировых и региональных центров по долгосрочным прогнозам.

В докладе также приводятся предварительные результаты анализа практической предсказуемости низкочастотной изменчивости атмосферных процессов. В частности, продемонстрированы ключевые структурные особенности колебания Маддена-Джулиана (КМД) на прогностических данных по модели INM-CM.

Модернизация модели океана в составе совместной климатической модели

Благодатских Д.В., Яковлев Н.Г., Володин Е.М.

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

E-mail: blago1958@mail.ru

Современные климатические модели требуют проведения вычислений на времена порядка нескольких тысяч лет на сетках с высоким пространственным разрешением, что приводит к требованию большого количества вычислительных ресурсов.

К сожалению, вычислительные мощности, доступные разработчикам совместной климатической модели, довольно ограничены. Одним из способов решения этой проблемы является модернизация модели океана в составе национальной климатической модели.

Одной из целей этой модернизации ставилась задача ускорения блока работы океана. В данном докладе представлены основные результаты по замене схем интегрирования по времени на более современные как с точки зрения уменьшения численной вязкости, так и уменьшения количества операций, требуемых для их выполнения.

Кроме того, представлены результаты работ по замене блоков изопикнической диффузии и численной диссипации скоростей на менее вычислительно затратные.

Параметризация вихревого переноса в океане на основе результатов моделирования мезомасштабного вихревого поля

Платов Г.А., Якшина Д.Ф.

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

E-mail: plat@ommfao.sccc.ru

Перенос массы и связанных с ним характеристик содержания тепла и солей мезомасштабными вихрями в океане играют важную роль в формировании термохалинной структуры океана. Однако, пространственные масштабы этих вихрей слишком малы для их непосредственного описания в рамках блока Мирового океана в климатических моделях. Особенно малы они в полярных широтах, составляя величину порядка нескольких километров. Для учета влияния мезомасштабного движения необходимо привлекать соответствующие параметризации.

Построение качественных параметризаций мезомасштабного переноса на основе натурных измерений затруднительно по нескольким причинам. Для получения детальной картины мезомасштабных движений наблюдения требуется проводить на обширных полигонах с использованием широкой сети измерителей различного спектра характеристик. Спутниковые наблюдения дают необходимый охват и позволяют более-менее достоверно идентифицировать вихревые образования, но не предоставляют исчерпывающего набора измеряемых характеристик. Контактные же наблюдения, проведенные в каком-либо регионе, не гарантируют возможность их применения в каком-либо другом районе Мирового океана. Это усугубляется тем, что полярные районы вообще труднодоступны для систематических наблюдений. То же самое относится и к глубинным процессам.

В качестве альтернативы можно предложить использование результатов численного моделирования с подробным пространственным разрешением, допускающим развитие мезомасштабных вихрей. Использование модельных результатов не дает гарантии достоверности делаемых выводов, поскольку

применимость модели имеет свои ограничения, заложенные при математической постановке задачи и в ходе ее численного решения. Поэтому построенные с их помощью параметризации требуют особенно-го тщательного тестирования.

Представляемые в докладе результаты получены с использованием данного подхода. В качестве модели с подробным разрешением используется региональная модель SibPOM, возможности которой были продемонстрированы ранее в ряде численных исследований. В данном случае рассматривается реализация, представленная серией арктических морей России в период 2007–2008 гг. Рассматривается вихревой перенос массы в направлении наклона поверхности дна. В рамках климатических моделей описываемые движения в основном следуют вдоль изобат, поэтому кросс-изобатные движения требуют параметризации. Поток массы в направлении $\vec{n}$ наклона дна параметризуется в форме диффузионного и каунтер-градиентного потоков, а именно

$$(\overline{\rho' \vec{u}'} \cdot \vec{n}) = -K \left(\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial n} + \gamma \right) = - \left(K \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial n} + q \right)$$

Величины вихревого коэффициента диффузии K и каунтер-градиентного потока q могут быть получены как коэффициенты линейной регрессии в окрестности δ любой точки при условии, что размер окрестности сопоставим с шагом крупномасштабной модели и в этой окрестности расположено статистически значимое количество расчетных точек подробной модели. Крупномасштабные характеристики потока также могут быть оценены путем осреднения мезомасштабных величин в той же окрестности. Таким образом, по результатам подробного моделирования можно построить статистическую выборку, каждый элемент которой предоставляет соответствие ряда значений крупномасштабных характеристик с величинами K и q . Анализируя данную выборку статистическими методами с использованием анализа чувствительности, получены некоторые зависимости характеристик вихревого переноса K и q от некоторых крупномасштабных характеристик. При этом из-за сложностей подобного анализа был сделан ряд допущений ограничивающих применение данных зависимостей. Тем не менее, полученная параметризация использовалась в ходе сравнительного численного эксперимента с совместной моделью океана и льда SibCIOM, результаты которого будут продемонстрированы.

Развитием данного подхода может быть построение на основе этой выборки статистического распределения, которое можно использовать стохастически. Другим возможным направлением может быть использование полученной выборки в качестве обучающей последовательности в рамках машинного обучения.

Новая конечно-элементная модель динамики морского льда на треугольных A и CD сетках в локально-декартовом базисе

Петров С.С.

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

E-mail: serg_petr97@mail.ru

Представляемая работа посвящена описанию вычислительных аспектов новой двумерной конечно-элементной модели динамики морского льда на треугольных сетках. Существенной особенностью модели является использование локально-декартового базиса вместо стандартного подхода сферической метрики, который реализован, например, в моделях CICE и FESIM. В плане реализации, разработанная модель похожа на блок морского льда океанической части модели ICON, однако отличается тем, что в вычислениях непосредственно не участвуют базисные векторы, поскольку уравнения решаются в отдельном базисе для каждого элемента сетки: вершина, ребро, треугольник. Предлагаемый подход хорошо согласуется с методом конечных элементов из-за его локальной структуры. Программный код модели универсален для любой геометрии поверхности: плоскость, сфера, геоид.

Доклад устроен следующим образом. Первая часть посвящена описанию процесса построения локально-треугольного декартового базиса и элементных матриц перехода. Далее формулируется система уравнений динамики морского льда с вязко-пластичной реологией Хиблера. Вторая часть доклада посвящена краткому описанию схем переноса: схемы типа Тейлора-Галеркина с применением технологии коррекции потоков на сетке типа A, и схемы против потока второго порядка типа MUST и MUSCL с монотонизатором на сетке типа CD. В третьей части обсуждаются особенности реализации численного решения уравнения баланса импульса: mEVP-метод. Явная дискретизация на сетке CD с помощью элементов Круэзе-Равиар приводит к неустойчивости, поэтому применяется специальный стабилизатор. Четвертая часть посвящена численным экспериментам, а также профилировке и масштабируемости

кода. Приводятся результаты четырех численных экспериментов. Первый тест реализует область с высокой деформацией в квадратной расчетной области. Второй тест аналогичен первому за исключением сферической расчетной области. В третьем тесте воспроизводятся линейные кинематические особенности на высоком разрешении в квадратной расчетной области. Четвертый тест является краткосрочным запуском модели в Арктическом регионе: начальное состояние и форсинг берутся из системы европейского прогноза TOPAZ4.

На примере четырех тестов сравнивается получаемое численное решение на двух сетках, делаются выводы об эффективности реализации и разрешающей способности линейных кинематических особенностей.

Моделирование состояния зоны стабильности метангидратов арктического шельфа с учетом формирования многолетнемерзлых пород

Малахова В.В.

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

E-mail: malax@sscc.ru

В донных отложениях арктического шельфа скрыты огромные запасы метана, которые связаны с наличием многолетнемерзлых пород и залежей газовых гидратов. Океанические источники метана в Арктическом регионе могут быть недооценены и играть значимую роль [1,2]. Количественная оценка эмиссии метана из донных осадков и его дальнейшего выхода в атмосферу - основные нерешенные вопросы, касающиеся цикла метана.

Субаквальная мерзлота формировалась во время оледенений плейстоцена в периоды океанической регрессии, когда шельф становился сушей. Существование многолетнемерзлых пород мощностью до нескольких сотен метров создавало условия для формирования газогидратных залежей [3]. Газовые гидраты представляют собой скопления газа в особом, связанном с водой состоянии. Один кубометр природного метангидрата в твердом состоянии содержит 140-180 м³ метана в газовой фазе и 0,87 м³ воды. Эти соединения образуются при низких температурах и высоком давлении и сохраняют в таких условиях состояние твердого кристаллического вещества. При потеплении климата в процессе постледниковой трансгрессии, начавшейся около 15 тысяч лет назад, мерзлые толщи уходят под воду и медленно разрушаются под воздействием относительно теплой и солёной морской воды, что приводит к нарушению термодинамических условий существования гидратов метана. В настоящее время существование подводной мерзлоты подтверждено бурением. Однако присутствие залежей газогидратов в многолетнемерзлых породах шельфа остается до сих пор под вопросом. Моделирование выступает как необходимая альтернатива нехватки данных.

Целью данного исследования является модельный анализ динамики подводной мерзлоты и зоны стабильности гидратов метана для условий, имитирующих климатические изменения на шельфе арктических морей на протяжении последнего ледникового цикла.

Для изучения динамики и современного состояния подводной мерзлоты в донных отложениях шельфа морей Арктики разработана численная модель процессов соле- и теплопереноса, позволяющая рассчитывать динамику термического состояния донных отложений в случаях чередования границ талых и мерзлых слоев. Динамика многолетнемерзлых пород определяется верхними и нижними граничными условиями в области моделирования, которая представляет собой геологический разрез толщиной 1500 м. Модель дополнена палеогеографическими сценариями изменения атмосферного воздействия и уровня океана для последних 120 тысяч лет. Расчеты термического состояния донных отложений сопровождаются оценками термодинамических границ зоны стабильности газогидратов метана. Оценка зоны гидратообразования проведена на основе блока по расчету термодинамической стабильности гидратов из модели HydrateResSym. Растворенные соли, такие как хлорид натрия, могут оказывать влияние на термодинамическую стабильность гидратов метана. Для учета влияния засоления донных отложений на состояние зоны стабильности метангидратов был введен сдвиг в равновесной температуре.

Получены оценки площади распространения и современного состояния многолетнемерзлых пород и зоны стабильности метангидратов арктического шельфа с учетом данных интенсивности теплового потока, солёности поровых вод и температуры придонной воды. Газовый гидрат может существовать внутри или ниже многолетнемерзлого слоя из-за условий температуры и давления, благоприятных для его стабильности, поддерживаемой присутствием мерзлоты.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ruppel C. Permafrost-associated gas hydrate: Is it really approximately 1 % of the global system? // J. Chem. Eng. Data. 2015. V. 60 (2). P. 429–436. doi:10.1021/je500770m
2. James R. H., Bousquet P., Bussmann I., Kipfer R., Haeckel M., Leifer I., Niemann H., Ostrovsky I., Piskozub J., Rehder G., Treude T., Vielstädte L., and Greinert J. Effects of climate change on methane emissions from seafloor sediments in the Arctic Ocean: A review // Limnology and Oceanography. 2016. V. 61 (S1). P. S283–S299.
3. Malakhova, V.V. The response of the Arctic Ocean gas hydrate associated with subsea permafrost to natural and anthropogenic climate changes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 606. 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012035>

Численное моделирование относительного вклада химических и физических процессов в изменения климата и газового состава атмосферы

Усачева М.А., Смышляев С.П.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

Обновленная версия химико-климатической модели ИВМ РАН – РГТМУ используется для оценки относительного вклада химических и физических процессов в наблюдаемую изменчивость климата и газового состава атмосферы в 1980–2020 годах. Динамическая часть модели приведена в соответствие с последней версией модели общей циркуляции атмосферы INMCM5.0. В химической части модели учтены последние рекомендации JPL2019 по параметрам химических реакций и сечений поглощения солнечной радиации атмосферными газами. Для определения относительной роли влияния изменения содержания парниковых и озоноразрушающих газов, температуры поверхности океана и площади его покрытия льдом, солнечной активности и содержания атмосферного аэрозоля проведены расчеты по сценариям с учетом каждого фактора по отдельности и всех вместе. Результаты расчетов сравнены с подобными экспериментами с химико-климатической моделью SOCOL-3.

Проанализирована изменчивость температуры тропосферы и нижней стратосферы, а также содержания озона за период с 1980 по 2020 годы по данным наземных и спутниковых измерений. Данные измерений сравнены с данными численного моделирования с использованием химико-климатических моделей (ХКМ) ИВМ РАН – РГТМУ и SOCOL-3. В каждой из ХКМ в базовом эксперименте учтено влияние изменения содержания парниковых и озоноразрушающих газов, температуры поверхности океана и площади его покрытия льдом, солнечной активности и содержания атмосферного аэрозоля. Для оценки относительной роли химических и физических факторов проведены дополнительные эксперименты с учетом каждого из этих факторов по отдельности. Анализ выполнен для нижней тропосферы и нижней стратосферы тропических, средних и полярных широт Северного и Южного полушарий.

Моделирование глобальной атмосферной электрической цепи: результаты, перспективы, интеграция в национальную климатическую модель

Ильин Н.В., Слюняев Н.Н., Мареев Е.А.

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

В исследованиях атмосферного электричества последних лет доминирующим подходом является рассмотрение различных электрических процессов, протекающих в атмосфере, в рамках единой согласованной концепции глобальной электрической цепи (ГЭЦ), в которой области грозы и хорошей погоды, а также нижняя ионосфера связываются в единый распределенный токовый контур. Актуальность исследований структуры, динамики и особенностей функционирования ГЭЦ подтверждается тем, что глобальный подход выглядит наиболее естественным при изучении электромагнитного окружения Земли и его возмущений под влиянием климатических изменений и космической погоды. В связи с этим особенно важной задачей представляется развитие численных моделей ГЭЦ и интегрирование их с моделями земной системы и данными наблюдений. Такая интеграция позволяет использо-

вать при моделировании ГЭЦ актуальные данные о распределении проводимости и о распределении грозовых облаков в атмосфере – именно эти два фактора в значительной степени определяют режим функционирования как ГЭЦ постоянного тока (квазистационарное распределение электрических полей и токов в атмосфере, поддерживаемое разделением зарядов в электрически активных, прежде всего в грозовых облаках), так и ГЭЦ переменного тока (колебания, возбуждаемые молниевыми разрядами в резонаторе Земля – ионосфера). Кроме того, такой подход позволяет согласованно учесть влияние возмущения проводимости мезосферы, вызываемого высотными разрядами, на ГЭЦ.

В рамках доклада представлены последние результаты численного моделирования глобальной электрической цепи, в частности, рассмотрены различные подходы к параметризации источников как ГЭЦ постоянного тока (токов зарядки в облаках), так и ГЭЦ переменного тока (молниевых вспышек). Обсуждаются новые результаты моделирования ГЭЦ на глобальных мелкомасштабных сетках. Предлагаются технические решения для вычислительных блоков параметризаций сторонних источников ГЭЦ и молниевых вспышек, интегрируемых в национальную климатическую модель.

■ Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект №FFUF-2022-0008).

Стохастическая параметризация конвекции для модели климатической системы с высоким разрешением: мелкая конвекция

Крупчатников В.Н., Градов В.С., Боровко И.В.

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

E-mail: vkрупчатnikov@yandex.ru

В большинстве схем параметризации конвекции, используемых в современных атмосферных моделях, используется предположение о конвективном равновесии, которое означает, что отклик конвективной модели всегда соответствует конвективному воздействию. Однако особенность конвективного отклика состоит в том, что он не является непрерывным в пространстве, времени и интенсивности. Он материализуется отдельными локализованными объектами — конвективными струями и их видимыми проявлениями — это конвективные облака. Следовательно, эта реакция дискретна по интенсивности, может быть задержана во времени, поскольку облакам нужно время, чтобы появиться/исчезнуть, и не является однородной в пространстве на малых масштабах из-за случайного расположения облаков даже при однородном крупномасштабном воздействии. Поэтому, предположение о конвективном равновесии может быть верным только в том случае, если рассматривается достаточно большая территория, где количество облаков в прямоугольнике сетки достаточно велико, чтобы представить ансамбль облаков, чтобы обеспечить равновесную реакцию. Это требование можно считать выполненным при относительно грубом разрешении пространственной модели, где шаг сетки порядка 50 км и более. В докладе рассматривается описание мелкой конвекции. Параметризация мелкой конвекции является версией параметризации мелкой конвекции [1]. Это общее представление конвекции, которое включает уравнения модели струи и замыкание общего потока массы, основанное на конвергенции влажной статической энергии во влажном пограничном слое, как описано в [2]. Возникновение мелкой конвекции в столбе сетки модели определяется восходящим потоком, обусловленным свойствами поверхности. Стохастическая процедура, которая планируется для использования в новой версии модели ИВМ, будет разработана на основе версии процедуры представленной в [3], где она была связана со схемой вихре-диффузионного потока массы (EDMF).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Tiedtke, M. (1989). A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Monthly Weather Review*, 117(8), 1779–1800
2. Bechtold, P., Semane, N., Lopez, P., Chaboureaud, J.-P., Beljaars, A., & Bormann, N. (2014). Representing equilibrium and nonequilibrium convection in large-scale models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(2), 734–753. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0163.1>
3. Sakradzija, M., Seifert, A., & Dipankar, A. (2016). A stochastic scale-aware parameterization of shallow cumulus convection across the convective gray zone. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8, 786–812. <https://doi.org/10.1002/2016MS000634>

Параметризация возмущения проводимости атмосферы во время спрайта

Евтушенко А.А., Ильин Н.В.

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

E-mail: a_evtushenko@inbox.ru

Одним из основных вопросов при исследовании высотных разрядов является вопрос об их влиянии на химический баланс атмосферы и параметризация возмущения проводимости. Спрайты являются одним из самых интересных объектов для исследования из всех типов высотных разрядов, так как, с одной стороны, инициируется достаточно часто, а с другой стороны занимает объем до 10^4 км³. Исследование проведено как для спрайтов в ночных условиях, так и для дневных спрайтов, само существование которых подтверждается лишь косвенными измерениями.

Предложена радиально-симметричная самосогласованная модель спрайта на высотах от 60 до 90 км в области радиусом 60 км для ночных условий. Химический блок модели состоит из 267 реакций для 61 химической компоненты. Проведен анализ возмущения концентрации ионов, электронов, нейтральных компонент и интенсивности эмиссий фотонов на высотах мезосферы для спрайта в ночных условиях. Вследствие быстрого вытеснения электрического поля в верхней части диффузной области спрайта на высотах 78-81 км излучение на оси разряда заканчивается ранее, чем во внешней области, что приводит к формированию тороидальной структуры электрического поля и излучения спрайта в первой и второй положительных полосах молекулярного азота. На высотах 83-87 км при развитии разряда наблюдается уменьшение концентрации электронов, связанное с возрастанием роли диссоциативного прилипания к молекулярному кислороду, что существенно уменьшает проводимость на этих высотах.

Предварительное изучение профиля проводимости невозмущенной атмосферы показало, что инициация спрайтов в дневных условиях невозможна на характерных высотах для ночного спрайта, так как фоновая проводимость очень высока. Для моделирования дневных условий в систему химических реакций добавлен фотохимический блок и использованы данные электромагнитных наблюдений. Показано, что инициация спрайта в дневных условиях происходит на высотах от 50 до 70 км при импульсном дипольном моменте нескомпенсированного заряда родительской вспышки в несколько тысяч Кл·км. Расчеты дневного спрайта выполнены для значения дипольного момента 3750 Кл·км, достаточного для инициации спрайта с резким ростом концентрации заряженных частиц и возмущением проводимости. Показано, что условия для инициации дневного спрайта создаются ниже примерно на 20 километров при условии увеличения импульсного дипольного момента в 5-10 раз, относительно спрайта в ночных условиях, а сам спрайт имеет меньший вертикальный размер.

В рамках доклада представлены последние результаты численного моделирования дневных и ночных спрайтов. Предложена параметризация возмущения проводимости во время высотного разряда в зависимости от параметров молниевых разряда облако-земля, которая может быть интегрирована в численные модели.

■ Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект №FFUF-2022-0008).

Модель снежного покрова в климатической модели ИВМ РАН

^{1,2}Черненко А.Ю., ¹Володин Е.М., ^{1,3}Кострыкин С.В.

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

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

³Институт глобального климата и экологии им. Ю.А. Израэля, Москва, Россия

E-mail: chernenkov.ayu@phystech.edu, volodinev@gmail.com, s_kostr@mail.ru

Одним из подходов к изучению и прогнозированию будущих изменений климата является построение глобальных климатических моделей. Их современные версии переставляют собой результат совместного моделирования динамики атмосферы и океана, дополненный параметризациями отдельных физических процессов, протекающих в земной системе. Для корректного воспроизведения моделью гидрологического цикла и радиационного баланса критически важно правильно описывать сезонный снежный покров. При этом, необходимо моделировать не только количество снега, но и его плотность, альбедо и другие характеристики. Помимо описания локальных свойств снежного по-

крова также важно их корректно связывать со средними по ячейке характеристиками и глобальными переменными.

В данной работе описывается модель снежного покрова, реализованная в климатической модели ИВМ РАН [1]. В ней предполагается, что слой снега может включать в себя 4 фракции: лежалый и свежеснег, фракцию жидкой талой воды, задержанной снежными порами, а также грубый перемерзший снег, образовавшийся из воды в порах в результате возможного похолодания. Уровень снежного покрова зависит от количества атмосферных осадков и их типа, а также от внешних условий, влияющих на процессы снегонакопления и таяния.

С течением времени после снегопада из-за изменений распределения температуры внутри снега, а также под действием давления, снежные кристаллы изменяют свою форму, увеличиваются в размерах, слипаясь, что приводит к увеличению плотности слоя. Кроме того, это влияет и на оптические свойства снега. Для учета данного явления используется модель снежного метаморфизма [2,3], основанная на понятии эффективного радиуса снежного кристалла и его эволюции, дополненная параметризацией возрастных изменений плотности снега из модели SWAP [4].

Выпадение на заснеженную поверхность атмосферных аэрозолей приводит к ее загрязнению и, как следствие, уменьшению ее отражающей способности. В модели реализована механика загрязнения снега на примере черного углерода — аэрозоля, оказывающего наибольшее влияние. Величина загрязнения снега оценивается как массовая доля примесей в слое [5].

Для учета влияния снега на радиационный баланс на поверхности внедрена модель снежного альбедо, построенная на основе одномерной радиационной модели SNICAR [6]. Результат данной параметризации, а также информация о типах растительности и значение площади ячейки, покрытой снегом, учитываются при вычислении среднего альбедо всей ячейки модельной сетки.

■ Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ №20-17-00190).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Volodin E., Mortikov E., Kostykin S., Galin V., Lykossov V., Gritsun A., Diansky N., Gusev A., Iakovlev N., Shestakova A., Emelina S. Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model. Russ. J. Num. An. Math. Mod. 2018, v.33, No.6, p.367–374.
2. Flanner Mark G., Zender Charles S. Linking snowpack microphysics and albedo evolution // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2006. — Vol. 111, no. D12.
3. Brun E. Investigation on wet-snow metamorphism in respect of liquid-water content // Annals of Glaciology. — 1989. — Vol. 13. — P. 22–26.6.
4. Gusev Y. M., Nasonova O. N., The simulation of heat and water exchange at the land–atmosphere interface for the boreal grassland by the land-surface model SWAP, Hydrological Processes., 2002, Vol. 16, no. 10, P. 1893–1919.
5. Chernenkov A. Yu., Kostykin S. V., Estimation of radiative forcing from snow darkening with black carbon using climate model data, Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2021, Vol. 57, No. 2, pp. 133–141., ISSN 0001-4338.
6. Flanner M. G., Zender C. S., Randerson J. T., Rasch P. J. Present-day climate forcing and response from black carbon in snow. Journal of Geophysical Research, 112(D11), 2007.

Сравнительный анализ различных параметризаций процесса накопления торфа в моделях климатической системы

¹Александров Г.А., ^{1,2}Елисеев А.В., ¹Денисов С.Н.

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

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

E-mail: g.alexandrov@ifaran.ru, eliseev@ifaran.ru, denisov@ifaran.ru

Экосистемы торфяных болот за последние десять тысяч лет вывели из атмосферы примерно столько же углерода, сколько его поступило в результате сжигания ископаемого топлива с 1850 по 2010 год. Будущее этих экосистем и их роль в климатической системе зависит от изменения климата. При неблагоприятных климатических условиях значительная часть углерода, захороненного в торфяных отложениях, может вернуться в атмосферу. Поэтому дальнейшее развитие моделей климатической системы предполагает параметризацию процесса накопления торфа, позволяющую исследовать обратные связи, связанные с возможной деградацией торфяных отложений. Сравнительный анализ различных параметризаций процесса накопления торфа [1-8] позволил выявить общие черты и принци-

альные отличия, которые необходимо принимать во внимание при развитии национальной климатической модели для того, чтобы обеспечить адекватное воспроизведение газообмена между экосистемами торфяных болот и атмосферой при различных сценариях изменения климата.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Alexandrov, G. A. et al. (2020). The capacity of northern peatlands for long-term carbon sequestration. *Biogeosciences*, 17(1), 47–54. <https://doi.org/10.5194/bg-17-47-2020>
2. Chadburn, S. E. et al. (2022). A new approach to simulate peat accumulation, degradation and stability in a global land surface scheme (JULES vn5.8 accumulate soil) for northern and temperate peatlands. *Geoscientific Model Development*, 15(4), 1633–1657. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-1633-2022>
3. Chaudhary, N. et al. (2020). Modelling past and future peatland carbon dynamics across the pan-Arctic. *Global Change Biology*, 26(7), 4119–4133.
4. Coppel, R. et al. (2019). A process-based Sphagnum plant-functional-type model for implementation in the TRIFFID Dynamic Global Vegetation Model. *Geoscientific Model Development Discussions*, 1–44.
5. Kleinen, T. et al. (2012). A dynamic model of wetland extent and peat accumulation: results for the Holocene. *Biogeosciences* 9, 235–248.
6. Qiu, C. et al. (2019). Modelling northern peatland area and carbon dynamics since the Holocene with the ORCHIDEE-PEAT land surface model (SVN r5488). *Geoscientific Model Development*, 12(7), 2961–2982.
7. Wania, R. et al. (2009). Integrating peatlands and permafrost into a dynamic global vegetation model: 2. Evaluation and sensitivity of vegetation and carbon cycle processes. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(3).
8. Wu, Y. et al. (2016). Integrating peatlands into the coupled Canadian Land Surface Scheme (CLASS) v3. 6 and the Canadian Terrestrial Ecosystem Model (CTEM) v2. 0. *Geoscientific Model Development*, 9(8), 2639–2663

Система совместного моделирования климатической модели Земной системы ИВМ РАН

Оноприенко В.А., Благодатских Д.В., Черненко А.Ю., Гойман Г.С., Фадеев Р.Ю.

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

Система совместного моделирования предназначена для эффективной организации взаимодействия между компонентами климатической модели. Для разных моделей такими компонентами могут являться блоки динамики атмосферы, океана, морского льда, деятельного слоя суши, биохимии и другие. В настоящее время существуют и развиваются различные программные пакеты для совместного моделирования, применяемые в различных климатических моделях: система FMS интегрирована в модель GFDL Climate model [1], [2]; система Jcup применяется в модели MIROC [3]; для модели ICON разработана система YAC [4]; системы OASIS[5] и ESMF[6] используются более чем одной моделью.

В настоящем докладе мы представляем систему совместного моделирования, предназначенную для организации эффективного взаимодействия между компонентами климатической модели Земной системы ИВМ РАН [7]. Основные задачи разрабатываемой системы следующие:

— синхронизация времени в компонентах климатической модели для организации обменов данными между ними;

— выполнение обменов данными между компонентами по заранее обозначенному принципу; — задание архитектуры и конфигурации климатической модели, в том числе возможность изменять число и тип объединяемых модулей, а также характер взаимосвязей между ними.

Программный код, реализующий систему совместного моделирования, написан на языке Фортран. Реализация обменов выполнена с помощью библиотеки MPI. Разрабатываемая система поддерживает интерполяцию между расчетными сетками компонентов с помощью самостоятельно реализованных алгоритмов, а также с помощью библиотеки SCRIP [8].

Межкомпонентные обмены были отделены от расчета динамики в программном коде модели для эффективной интеграции системы совместного моделирования. Данное решение упрощает применение системы совместного моделирования для существующих компонент, а так же подключение перспективных блоков динамики атмосферы и океана, разрабатываемых в ИВМ РАН.

- Работа выполнена в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской Академии Наук в рамках гранта молодежной лаборатории «Суперкомпьютерные технологии математического моделирования Земной системы» (соглашение с Минобрнауки России № 075-03-2023-509/1).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Modeling Framework: Flexible Modeling System (FMS) – 2022 – URL: <https://rem1776.github.io/FMS/rm.html> (дата обращения 25.11.2022).
2. Flexible Modeling System (FMS), code base – URL: <https://github.com/NOAA-GFDL/FMS> (дата обращения 25.11.2022).
3. Arakawa, T., Inoue, T., Yashiro, H. et al. Coupling library Jcup3: its philosophy and application // Prog Earth Planet Sci. 2020 – Vol.7, (6). – doi:10.1186/s40645-019-0320-z
4. Yet Another Coupler – URL: <https://dkrz-sw.gitlab-pages.dkrz.de/yac/> (дата обращения 25.11.2022).
5. Results of the Survey 2019 on OASIS3-MCT Coupled models – URL: <https://oasis.cerfacs.fr/en/results-of-the-survey-2019-on-oasis3-mct-coupled-models/> (дата обращения 25.11.2022).
6. Earth System Modeling Framework – URL: <https://earthsystemmodeling.org/> (дата обращения 15.11.2022).
7. Volodin, E. M., et al. "Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5." Climate dynamics 49 (2017): 3715-3734.
8. Jones, Philip W. "A user's guide for SCRIP: A spherical coordinate remapping and interpolation package." Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM (1998).

Система подготовки данных о параметрах поверхности суши для модели Земной системы ИВМ РАН

¹Рязанова А.А., ¹Богомолов В.Ю., ²Варенцов М.И., ²Медведев А.И., ^{3,2}Энтин А.Л.,
^{2,3}Степаненко В.М.

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

²Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

В докладе представлен рабочий прототип система подготовки данных о параметрах поверхности суши для модели Земной системы ИВМ РАН. Цель системы – возможность генерации внешних параметров как для модели Земной системы (МЗС), так и автономной модели деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ на произвольной равномерной широтно-долготной сетке. Параметры поверхности суши включают:

- гранулометрический состав, теплофизические и гидрофизические характеристики почвы (GSDE/SoilGrids);
- доли площади поверхности, занимаемые различными типами земельного покрова (GLCC, Карта ИКИ РАН), водоёмами (GLCC, GLDB), урбанизированной поверхностью (GLCC, WorldCover, Copernicus Global Land Cover);
- геометрические и теплофизические параметры городской застройки, определяемые на основе глобальной карты локальных климатических зон (ЛКЗ, англ. Local Climate Zones), среднегодовой антропогенный поток тепла;
- параметры растительности (например, листовой индекс (MODIS));
- параметры водоёмов (средняя глубина (GLDB), гипсометрическая кривая (ISIMIP3 Lake Sector)), направления речного стока (HydroSHEDS), уклоны русел;
- параметры рельефа (ETOPO1).

Изложены алгоритмы агрегирования исходных данных высокого разрешения на сетки с разрешением, характерным для современных МЗС. Продемонстрированы примеры выходной продукции системы на глобальном и региональном масштабах.

Работа выполнена при поддержке проекта Важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ».

Optimization of data exchange on heterogeneous computing systems for Earth system models

^{1,2,3}Gaschuk E.M., ^{4,2}Imeev O.A., ^{3,5}Debolsky A.V., ^{3,2}Mortikov E.V.

¹Lomonosov Moscow State University, Department of Mechanics and Mathematics, Moscow, Russia)

²Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

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

⁴Lomonosov Moscow State University, Department of Computational Mathematics and Cybernetics, Moscow, Russia

⁵Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

E-mail: elizaveta.gashchuk@math.msu.ru

Climate models are a powerful way to enhance predictability and our understanding of climate behavior. Simulations of this kind are a computationally intensive problem, with a significant part of the calculation time consumed by MPI exchanges. Here we present the software implementation of the Parlib data exchange library for Earth system models on parallel computing systems, developed at INM RAS. In general, we describe the functionality of the library and how it can be adapted to heterogeneous computing systems. The library itself is implemented in the C programming language with call-out support from the Fortran language. First refactoring step includes the use of C++, updating the code structure to allow for future extensions of the functionality, resetting data exchange functions configuration. In further developments, the library will be adapted to a hybrid MPI-OpenMP stack with support for computations on GPUs (Graphics Processing Units). In addition, a set of exchange optimization techniques can be applied. This includes the use of data compression methods. For the GPU calculations, the overhead of copying data between the CPU (Central Processing Unit) and the GPU can significantly increase the exchange time. For the latest NVIDIA graphics accelerator architectures it is possible to implement the data transfer directly from GPU to GPU using such technologies as NVLink, PCIe and GPU Direct Peer to Peer. Thus the another speed up approach that will be implemented is to exclude the CPU from the exchange processes for the computations on graphics accelerators.

Организация совместной разработки модели Земной системы ИВМ РАН

^{1,2,4}Тарасевич М.А., ³Цыбулин И.В., ^{1,2}Грицун А.С.

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

²ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

³«Яндекс.Технологии», Москва, Россия

⁴Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

E-mail: mashatarasevich@gmail.com, tsybulinhom@gmail.com, asgrit@mail.ru

Модель Земной системы ИВМ РАН (INMCM) объединяет в себе несколько математических моделей, разрабатываемых разными научными коллективами. Программный код INMCM состоит [1] из двух основных компонентов — модели атмосферы и модели океана [2], в рамках которых интегрированы все остальные модули: блок описания динамики аэрозолей [3], модель деятельного слоя суши [4], а также модель динамики и термодинамики морского льда [5], [6].

В рамках разработки новой версии INMCM [7] предполагается как существенное обновление уже использующихся модулей, так и добавления новых, например, модели описания химических процессов в атмосфере, модели биогеохимии океана.

В настоящее время ведётся разработка программной среды (цифровой платформы) для модели Земной системы ИВМ РАН с учетом гибкости ее применения с существующими и перспективными модулями, в частности, для упрощения процесса внедрения последних.

На первом этапе развития цифровой платформы требовалось организовать среду для эффективного взаимодействия разработчиков. Для этого программный комплекс модели INMCM и его отдельные компоненты были интегрированы в систему контроля версий на основе Git, налажена среда для разработчиков с возможностями рецензирования изменений и отслеживания задач. Настроена непрерывная интеграция, позволяющая автоматизированно проверять корректность работы модели Земной системы после внесенных в программный код изменений.

Для обеспечения возможности разработки модулей INMCM разными научными коллективами на базе программного обеспечения CMake [8] была разработана настраиваемая кроссплатформенная система автоматической сборки модели Земной системы и её компонентов из исходного программного кода.

- Работа выполнена в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской Академии Наук в рамках гранта молодежной лаборатории «Суперкомпьютерные технологии математического моделирования Земной системы» (соглашение с Минобрнауки России № 075-03-2023-509/1).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В., Галин В.Я., Лыкосов В.Н., Грицун А.С., Дианский Н.А., Гусев А.В., Яковлев Н.Г. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН // Известия РАН. Физика атмосферы и океана – 2017. Т. 53. – № 2. – С. 164–178.
2. Terekhov K. M., Volodin E. M., Gusev A. V. Methods and efficiency estimation of parallel implementation of the σ -model of general ocean circulation // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling – 2011. Т. 26. – № 2. – С. 189–208.
3. Volodin E. M., Kostykin S. V. The aerosol module in the INM RAS climate model // Russian Meteorology and Hydrology. – 2016. – Т. 41. – С. 519–528.
4. Volodin E. M., Lykosov V. N. Parametrization of heat and moisture transfer in the soil-vegetation system for use in atmospheric general circulation models: 1. Formulation and simulations based on local observational data // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics – 1998. – Т. 34. – No. 4. – С. 405–416.
5. Яковлев Н. Г. Воспроизведение крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948–2002 гг. Часть 1: Численная модель и среднее состояние // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 45. – No. 3. – С. 383–398.
6. Яковлев Н. Г. Восстановление крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948–2002 гг. Часть 2: Состояние ледового и снежного покрова // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана – 2009. – Т. 45. – № 4. – С. 513–530.
7. Володин Е.М. Воспроизведение современного климата моделью климатической системы INMCM60 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана – 2023. – Т. 59. – № 1. – С. 19–26.
8. K. Martin, B. Hoffman, Mastering CMake: A Cross-Platform Build System. // Kitware Inc., - 2003. - P. 706.

Новая параметризация землепользования в климатической модели ИВМ РАН

^{1,2}Черненко А.Ю., ¹Володин Е.М.

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

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

E-mail: chernenkov.ayu@phystech.edu, volodinev@gmail.com

Одно из применений глобальных моделей климата — это оценка антропогенных воздействий (землепользование, выбросы от сжигания ископаемого топлива) на климатическую систему Земли. Изменение характера землепользования, например, вырубка лесов, влияет на циклы воды, углерода и азота, поэтому является одним из ключевых факторов при моделировании климата.

В данной работе описывается обновление данных о площадях, покрытых различными типами растительности, используемых в расчетах климатической модели ИВМ РАН [1]. На основании базы данных о землепользовании проекта Land-Use Harmonization 2 (LUH2) [2] был сформирован новый набор из 19 типов растительности вместо 13, использовавшихся ранее. Возделываемые территории теперь разделены в зависимости от типов произрастающих культур (однолетние или многолетние, C_3 или C_4 , или азотофиксирующие), также теперь учитываются пастбища. Кроме того, были обновлены данные о занятых площадях для других типов растительности, сохранившихся из старого набора. База LUH2 предоставляет как исторические данные (850 – 2015 гг), так и сценарии будущего (до 2300 г). В данном исследовании рассматривается изменение характера землепользования с преиндустриальной эпохи (1850 г) до наших дней (2014 г).

Ожидается, что включение данных о землепользовании в модель земной системы позволит более точно воспроизводить изменение углеродного баланса наземных экосистем в прошлом и будущем, а также баланс тепла и влаги и эмиссию аэрозолей на поверхности суши, и, следовательно, делать более точные прогнозы изменения климата.

- Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ №20-17-00190).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Volodin E., Mortikov E., Kostykin S., Galin V., Lykossov V., Gritsun A., Diansky N., Gusev A., Iakovlev N., Shestakova A., Emelina S. Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model. Russ. J. Num. An. Math. Mod. 2018, v.33, No.6, p.367–374.
2. Hurtt G. C., Chini L., Sahajpal R., Frolking S., Bodirsky B. L., Calvin K., Doelman J. C., Fisk J., Fujimori S., Klein Goldewijk K., Hasegawa T., Havlik P., Heinemann A., Humpenöder F., Jungclaus J., Kaplan J. O., Kennedy J., Krisztin T., Lawrence D., Lawrence P., Ma L., Mertz O., Pongratz J., Popp A., Poulter B., Riahi K., Shevliakova E., Stehfest E., Thornton P., Tubiello F. N., van Vuuren D. P., and Zhang X.: Harmonization of global land use change and management for the period 850–2100 (LUN2) for CMIP6, Geosci. Model Dev., 13, 5425–5464, 2020.

Развитие блока приземного слоя для климатической модели ИВМ РАН

^{1,3,4}Бычкова В.И., ^{2,1}Гашук Е.М., ^{1,4,5}Гладских Д.С., ^{1,3,4}Дебольский А.В., ¹Медведев А.И.,
^{1,2,4}Мортиков Е.В., ¹Ткаченко Е.В.

¹Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

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

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

⁴Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

⁵Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

E-mail: Er-riad@mail.ru, evgeny.mortikov@gmail.com, debol@gmail.com

Климатические модели являются важными инструментами для исследования и определения предсказуемости климата различных временных масштабах. Климатическая модель представляет собой математическое представление основных компонентов климатической системы (атмосферы, поверхности суши, океана и морского льда) и их взаимодействий. Модель ИВМ РАН [Володин и др., 2016] является единственной отечественной моделью такого класса, поэтому ее развитие стратегически важно. Повышение точности климатической модели предполагает усовершенствование как отдельных компонентов системы (биохимические процессы, компоненты криосферы, описание приземного слоя) так и их взаимодействия. Эти компоненты могут сначала разрабатываться и тестироваться в автономном режиме, прежде чем они будут объединены в модель. В данной работе представлено описание развития блока приземного слоя для климатической модели, которое направлено на создание универсального модуля для расчета турбулентных потоков. Реализована возможность автономного использования и тестирования блока расчета турбулентных потоков. Проведено несколько серий тестов с использованием данных наблюдений о потоках явного тепла, потока импульса при разных условиях устойчивости для разных времен года. Реализована возможность использования дополнительных параметризаций параметра шероховатости [Xiong, K., 1990, Taylor, P. K., and M. J. Yelland, 2001] для водной поверхности. Планируется подключение блока приземного слоя к модели деятельного слоя. Планируется включение дополнительных функций расчета турбулентных потоков, включение параметризаций описывающих влияние снежных частиц на характеристики приземного слоя. В настоящий момент ведется работа по реализации и дальнейшей оптимизации блока приземного слоя на основе гибридного подхода MPI-OpenMP с возможностью проведения расчетов на GPU (Graphics Processing Unit). Также исследовательский опыт показывает, что использование методов машинного обучения в параметризации поверхностных потоков импульса, тепла и влажности позволяет повысить точность моделирования подобных процессов [McCandless et al, 2022; Leufen & Schädler, 2019; Wulfmeyer et al, 2023]. Поэтому в данной работе исследуются перспективы и возможности внедрения данных методов в модель ИВМ РАН.

a)

Блок динамики морского льда в перспективной модели Мирового океана: перенос характеристик

^{1,2}Ежкова А.А., ²Оноприенко В.А., ^{1,2}Яковлев Н.Г.

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

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

Исследуются схемы переноса полей массы и сплоченности в дивергентном и бездивергентном полях скорости для конечно-разностной модели динамики океана и морского льда по единому стандарту, принятому для перспективной климатической модели с учётом использования в модели Земной системы ИВМ РАН.

Исследование проводилось на основании пакета программных средств для расчёта гидродинамики, разрабатываемого в НИВЦ МГУ на языке C++. Схемы переноса реализовывались в двумерной области на сфере.

Использовались как гладкие, так и разрывные распределения плотности поля массы и сплоченности (Рис. 1) в начальный момент времени.

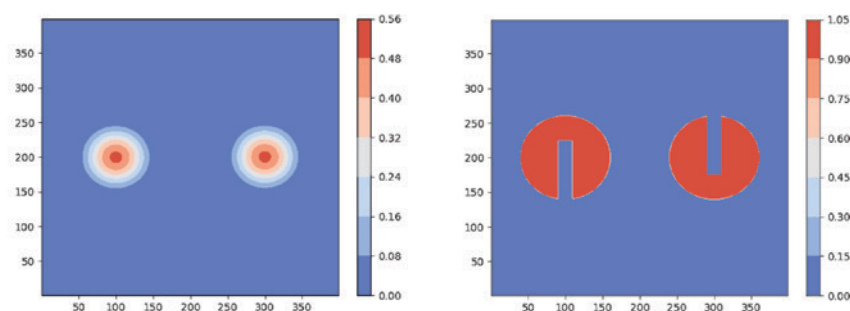


Рис 1. Начальное значение плотности льда с гладким профилем (слева), с разрывным профилем (справа).

Рассматриваются двумерные уравнения для переноса ϕ , обозначающей поля массы и сплоченности:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla_x(u\phi) + \nabla_y(v\phi) = 0,$$

где x, y - произвольные ортогональные координаты, u, v - компоненты вектора скорости потока.

Рассматриваются следующие схемы переноса: *против потока*, центральные разности второго порядка в дивергентной и адвективной формах и схема с коррекцией потоков.

Схема с коррекцией потоков включает в себя вычисление потоков высокого порядка, потоков низкого порядка и ограничитель, который их взвешивает. Для расчёта потока низкого порядка мы используем схему против потока первого порядка, а для потоков высокого порядка - схему центральной разности второго порядка в дивергентной форме. Взвешивание выполняется таким образом, что потоки высокого порядка используются в максимально возможной степени без внесения нефизических значений в решение.

Одной из проблем моделирования морского льда является согласованный перенос полей массы и сплоченности. Это связано с возможностью появления нефизических значений для толщины льда, которая по определению равна отношению массы к сплоченности. В данной работе рассматривается возможность решения данной проблемы.

Поскольку для описания льда используется несколько градаций по толщине, решено было рассмотреть совместный перенос двух градаций и на основании полученных результатов сделать вывод о возможности применения предложенного метода.

На основании результатов применения различных численных схем переноса, обсуждается возможность их применения в блоке динамики льда климатической модели ИВМ РАН.

■ Работа выполнена в Институте вычислительной математики им. Марчука РАН при поддержке РФФИ, грант № 21-71-3002.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Zalesak, S. T. (1979). Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids. *Journal of computational physics*, 31(3):335–362.
2. LeVeque, R. J. (1996). High-resolution conservative algorithms for advection in incompressible flow. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 33(2):627–665.
3. Williamson, D. L., Drake, J. B., Hack, J. J., Jakob, R., and Swarztrauber, P. N. (1992). A standard test set for numerical approximations to the shallow water equations in spherical geometry. *Journal of computational physics*, 102(1):211–224.



Оценка параллельной масштабируемости и вычислительной эффективности перспективной версии климатической модели ИВМ РАН

^{1,2,4}Тарасевич М.А., ^{4,3,1}Сахно А.В., ^{1,2,4}Фадеев Р.Ю., ^{1,2}Володин Е.М., ^{1,2}Грицун А.С.

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

²ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

³Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Россия

⁴Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

E-mail: mashatarasevich@gmail.com

Модель Земной системы ИВМ РАН (INMCM) представляет собой программный комплекс, объединяющий несколько математических моделей, разрабатываемых разными научными коллективами. Программный код INMCM включает [1] два основных компонента — модель атмосферы и модель океана [2], в рамках которых интегрированы все остальные модули: блок описания динамики аэрозолей [3], модель деятельного слоя суши [4], а также модель динамики и термодинамики морского льда [5].

В рамках разработки новой версии INMCM [6] предполагается как существенное обновление уже используемых модулей, так и добавления новых, например, модели описания химических процессов в атмосфере, модели биогеохимии океана.

В настоящее время ведётся разработка программной среды (цифровой платформы) для модели Земной системы ИВМ РАН с учетом гибкости ее применения с существующими и перспективными модулями, в частности, для упрощения процесса внедрения последних, и адаптации для использования на суперкомпьютерных вычислительных системах с массивно-параллельной гибридной архитектурой.

Одним из этапов развития цифровой платформы INMCM является предоставление разработчикам гибкого инструмента для оценки параллельной масштабируемости и вычислительной эффективности как модели Земной системы в целом, так и отдельных её модулей.

В данной работе рассматривается применение утилиты PerfTools-lite [7] для профилировки времени работы программного кода модели Земной системы INMCM с высоким пространственным разрешением на массивно-параллельной вычислительной системе Cray XC-40.

Для более прицельного по сравнению с программным обеспечением компании Cray анализа параллельных характеристик модели Земной системы ИВМ РАН был разработан и интегрирован в программный код актуальной версии INMCM новый инструментарий. Функционал разработанного ПО позволяет проводить анализ параллельных характеристик всей модели целиком и моделей, входящих в ее состав по отдельности.

Исследование выполнено в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской Академии Наук в рамках тематики «Создание расширенной версии модели Земной системы ИВМ РАН на базе новой вычислительной платформы» (шифр – FFMG-2023-0001) Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений.

Эксперименты проводились на вычислительной системе Cray XC-40 Главного вычислительного центра Гидрометцентра России и на вычислительном кластере Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской Академии Наук.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В., Галин В.Я., Лыкосов В.Н., Грицун А.С., Дианский Н.А., Гусев А.В., Яковлев Н.Г. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН // Известия РАН. Физика атмосферы и океана – 2017. Т. 53. – № 2. – С. 164–178.
2. Terekhov K. M., Volodin E. M., Gusev A. V. Methods and efficiency estimation of parallel implementation of the σ -model of general ocean circulation // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling – 2011. Т. 26. – № 2. – С. 189–208.
3. Volodin E. M., Kostyrykin S. V. The aerosol module in the INM RAS climate model // Russian Meteorology and Hydrology. – 2016. – Т. 41. – С. 519–528.
4. Volodin E. M., Lykosov V. N. Parametrization of heat and moisture transfer in the soil-vegetation system for use in atmospheric general circulation models: 1. Formulation and simulations based on local observational data // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics – 1998. – Т. 34. – No. 4. – С. 405–416.
5. Яковлев Н. Г. Восстановление крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948–2002 гг. Часть 2: Состояние ледового и снежного покрова //

Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана – 2009. – Т. 45. – №. 4. – С. 513–530.

6. Володин Е.М. Воспроизведение современного климата моделью климатической системы INMCM60 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана – 2023. – Т. 59. – № 1. – С. 19–26.
7. Cray Performance Measurement and Analysis Tools User Guide. — URL: https://support.hpe.com/hpesc/public/docDisplay?docId=a00113917en_us&docLocale=en_US&page=PerfTools-lite_old.html

Режимы атмосферной циркуляции в Евро-Атлантическом секторе в моделях CMIP6 и реанализе ERA5

¹Бабанов Б.А., ^{1,2}Семенов В.А.

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

²Институт географии РАН, Москва, Россия

E-mail: babanov@ifaran.ru

Одним из способов изучения низкочастотной динамики атмосферной циркуляции является режимный подход, идея которого основана на том, что непрерывно меняющиеся поля циркуляции атмосферы, например, давление на уровне моря или высоты геопотенциала, можно представить в виде ограниченного числа устойчивых и повторяющихся квазистационарных режимов, имеющих характерную повторяемость, продолжительность, и переходящих из одного в другой. Такой подход предоставляет новые возможности для исследования предсказуемости динамики атмосферной циркуляции на более длительных, чем синоптический, масштабах.

В докладе представлено сравнение погодных режимов в Евро-Атлантическом секторе, полученных по данным некоторых моделей проекта CMIP6 (INM-CM5-0, CESM2, EC-Earth3, MIROC6 и других) эксперимента historical, с режимами, полученными по данным реанализа ERA5. Режимы получены для летних и зимних месяцев путём кластеризации методом k-means суточных полей высоты геопотенциала на уровне 500 гПа. Режимы, полученные по модельным данным, и режимы, полученные по данным реанализа, сравниваются путем сопоставления их пространственных структур, относительной повторяемости, временных рядов сезонной повторяемости, средней продолжительности и матриц переходов между режимами.

Воспроизведение внутрисезонной тропической изменчивости в модели ИВМ РАН

Гущина Д.Ю., Железнова И.В.

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

E-mail: dasha155@mail.ru, ijeleznova@gmail.com

Проведена оценка воспроизведения моделью INM основных мод изменчивости климатической системы в тропиках на внутрисезонных масштабах (ВТИ): колебаний Маддена-Джулиана (МЖО) и экваториальных конвективных волн Россби и Кельвина на основании сравнения результатов, полученных по модели и по реанализу NCEP/NCAR. Также проведено сравнение модели INM-CM5-0 с другими моделями проекта CMIP6. Из всего ансамбля моделей CMIP6 выбраны те, которые в предыдущих исследованиях показали себя наиболее успешными с точки зрения воспроизведения колебаний Маддена-Джулиана и экваториальных волн. Проведено сравнение качества воспроизведения ВТИ в новой версии модели INM-CM6-L и версии INM-CM5-0.

На основании сравнения данных модели INM с данными реанализа NCEP/NCAR и других моделей CMIP6 показано, что в версии модели INM-CM5-0 исчез самый главный недостаток, свойственный многим моделям CMIP5, - сигнал в интервале частот и длин волн МЖО, но распространяющийся на запад. В INM-CM5 явно присутствует распространяющийся на восток сигнал в интервале 30-60 дней, с зональным волновым числом от 1 до 3, но спектральная плотность меньше, чем в реанализе и в других моделях. В INM-CM6-L интенсивность МЖО увеличивается, но всё ещё остается в два раза меньше, чем в реанализе.

В INM-CM5 корректно воспроизводится распределение интенсивности МЖО вдоль экватора, однако сама интенсивность почти в два раза меньше, чем в реанализе и меньше, чем во всех остальных ис-

следованных моделях. В модифицированной версии INM-CM6-L увеличивается интенсивность МЖО на экваторе, особенно в районе Индонезии и запада Тихого океана, а также уменьшается величина среднеквадратичной ошибки. Сезонный ход интенсивности МЖО корректно воспроизводится на экваторе и в Южном полушарии, но существенно отличается от данных реанализа в Северном. В новой версии модели не наблюдается значительных улучшений воспроизведения сезонного хода МЖО по сравнению с INM-CM5-0.

Интенсивность экваториальных волн Россби в модели INM-CM5 соответствует наблюдаемой, в то время как многие модели CMIP6 завышают ее более, чем в два раза. Максимум изменчивости в модели несколько смещен на запад в Индийский океан по сравнению с реанализом, где он локализован на западе Тихого океана. Сезонный ход интенсивности волн Россби также воспроизводится корректно с максимумом летом Южного полушария и минимумом летом Северного полушария. Только половина исследованных моделей CMIP6 способна правильно воспроизводить сезонную изменчивость волн Россби.

Интенсивность конвективных волн Кельвина недооценивается в модели INM-CM5 почти в два раза, однако этот недостаток прослеживается во многих моделях. Также моделью не воспроизводится максимум изменчивости, локализованный в западном и центральном Тихом океане.

Скорость распространения МЖО и волн Кельвина в модели соответствует наблюдаемой, волн Россби – меньше, чем в реанализе.

Потенциальная предсказуемость динамики климатической системы на временных масштабах 1 – 10 лет в тропиках Тихого океана по данным климатических моделей CMIP6

Грицун А.С.

Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия
E-mail: asgrit@mail.ru

Рассмотрен вопрос воспроизведения динамики климатической системы во временном диапазоне 1 – 10 лет в тропиках Тихого океана в моделях ведущих зарубежных научных центров, а также моделей INM-CM5 и INM-CM6 (ИВМ РАН). Было показано, что в структуре низкочастотной изменчивости во всех моделях хорошо выделяется двумерный паттерн, соответствующий явлению Эль-Ниньо, который удобно характеризовать в терминах комплексного ЕОФ-анализа, выделяющего ведущие в смысле изменчивости колебательные моды в системе. Для всех моделей имеет место высокое значение пространственных корреляций первого комплексного ЕОФ температуры поверхности и теплосодержания с их аналогами, рассчитанными по данным наблюдений. Модель INM-CM5 отличается низким значением доли изменчивости, приходящейся на первую комплексную ЕОФ теплосодержания, амплитуда явления Эль-Ниньо в модели значительно ослаблена.

Рассмотрен вопрос потенциальной предсказуемости океанской циркуляции в декабре по информации о ее состоянии в марте и июне. С этой целью для каждой модели и данных реанализа вычислялись ведущие пары сингулярных векторов операторов регрессии для полей аномалий теплосодержания в марте/июне и декабре. Показано, что ведущим левым сингулярным вектором (максимальным откликом) является паттерн Эль-Ниньо. Для моделей MPI-ESM, CESM2, GFDL-CM4, HADGEM3 и INM-CM6 имеет место также близость ведущего воздействия к воздействию, полученному для данных наблюдений. В модели INM-CM5 при расчете оптимальных векторов по полю теплосодержания отклик в виде структуры Эль-Ниньо не возбуждается.

Оптимальное воздействие во всех моделях, кроме INM-CM5, на уровне корреляции 0.4-0.5 соответствует структуре мнимой части ведущего комплексного ЕОФ (идентичного по структуре 2ой моде традиционного ЕОФ-анализа). Следовательно, можно заключить, что источником предсказуемости в совместной системе океанической и атмосферной циркуляции в тропиках может служить пространственная структура, связанная со вторым ЕОФ теплосодержания. Аккуратный ее учет при построении начальных условий в прогностических моделях может помочь преодолеть весенний барьер предсказуемости.

■ Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ 22-12-00388.

Моделирование межгодовой изменчивости явления Эль-Ниньо-Южное Колебание

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

Одним из характерных аспектов динамики явления Эль-Ниньо-Южное Колебание (ЭНЮК) является наблюдаемая асимметрия между его теплой (Эль-Ниньо) и холодной (Ла-Нинья) фазами. События Эль-Ниньо могут достигать большей интенсивности по сравнению с событиями Ла-Нинья, в то время как последние демонстрируют большую повторяемость и продолжительность. В рамках современных представлений о динамике ЭНЮК в качестве возможных причин такой асимметрии указываются влияние нелинейного динамического нагрева подповерхностного слоя океана [1], волн тропической неустойчивости [2], а также внутрисезонных процессов в тропической атмосфере (таких как колебания Маддена-Джулиана), вызывающих флуктуации зонального ветра [3]. Тем не менее, вопрос о том, какой из этих факторов вносит определяющий вклад, остается открытым. В данной работе этот вопрос исследуется на основе построения оптимальной по-Байесу эмпирической динамической модели межгодовой изменчивости ЭНЮК. В качестве фазовых переменных эмпирической модели используются временные ряды амплитуд сезонных циклов аномалий температуры поверхности (ТПО) и теплосодержания (ТО) верхнего слоя тропической части Тихого океана с шагом один год, рассчитанные как по реальным данным наблюдений [4], так и по данным, сгенерированным общепринятой концептуальной моделью ЭНЮК в виде “перезаряжающегося” осциллятора [5]. Исходя из сопоставления динамических свойств эмпирических моделей, построенных по реальным и модельным данным, делается вывод о причинах наблюдаемой асимметрии Эль-Ниньо/Ла-Нинья.

■ Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-12-00388.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Hayashi, M., & Jin, F.-F. (2017). Subsurface nonlinear dynamical heating and ENSO asymmetry. *Geophysical Research Letters*, 44, 12,427–12,435.
2. An, S., 2008: Interannual Variations of the Tropical Ocean Instability Wave and ENSO. *J. Climate*, 21, 3680–3686
3. Martinez-Villalobos C., Newman, M., Vimont, D. J., Penland, C., & Neelin, J. D. (2019). Observed El Niño-La Niña asymmetry in a linear model. *Geophysical Research Letters*, 46, 9909–9919.
4. Seleznev, A., Mukhin, D. Improving statistical prediction and revealing nonlinearity of ENSO using observations of ocean heat content in the tropical Pacific. *Clim Dyn* 60, 1–15 (2023).
5. Jin, F., 1997: An Equatorial Ocean Recharge Paradigm for ENSO. Part I: Conceptual Model. *J. Atmos. Sci.*, 54, 811–829

Оценка воспроизведения фазы и амплитуды Колебания Маддена-Джулиана в моделях INM-CM5-0 и INM-CM6-L и других моделях проекта CMIP6

Железнова И.В., Гущина Д.Ю., Котляревская А.Д.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия
E-mail: ijeleznova@gmail.com, dasha155@mail.ru, a_kotlyarevskaya@mail.ru

Колебания Маддена-Джулиана (КМД) - ключевой элемент внутрисезонной тропической изменчивости, оказывающий существенное воздействие на широкий спектр погодных и климатических явлений. Это организованная конвективная структура, имеющая временной масштаб 30-60 дней и перемещающаяся с запада на восток в приэкваториальных широтах Индийского и Тихого океанов. Большинство климатических моделей недооценивает интенсивность КМД и связанные с ними атмосферные осадки [1], однако качество воспроизведения в моделях проекта CMIP6 выросло по сравнению с моделями CMIP5 [2].

В исследовании оценена способность различных версий климатической модели Института вычислительной математики (ИВМ) воспроизводить амплитуду и фазу КМД и проведено сравнение с другими климатическими моделями, участвующими в проекте CMIP6 и данными реанализа ERA-Interim.

Для выделения периодов КМД были рассчитаны индексы RMM (Real-time Multivariate MJO index) [3], основанные на расчете эмпирических ортогональных функций комбинированных полей усредненного приэкваториального зонального ветра на поверхностях 850 и 200 гПа и спутниковых данных об уходящей длинноволновой радиации.

На основе амплитудно-фазовых диаграмм проведен анализ воспроизведения в моделях траектории перемещения отдельных событий КМД, а также их амплитуды в зимнее и летнее полугодия Северного полушария. Показано, что все модели, включая модель ИВМ, правильно воспроизводят усиление КМД зимой Северного полушария, однако во многих моделях амплитуда существенно ниже, чем в реанализе. В целом модели корректно воспроизводят восточное перемещение МЖО, однако в целом ряде моделей обнаруживается проблема невозможности пересечения Индонезии (IPSL-CM6A-LR, CMCC-CM2-SR5, MPI-ESM1-2-LR), а в других КМД затухает уже начиная с третьей фазы (INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR; MPI-ESM1-2-LR).

В новой версии модели ИВМ (INM-CM6-L) существенно улучшено воспроизведение траектории перемещения КМД. Конвективный центр периодически пересекает Индонезию, амплитуда увеличивается. Однако улучшения преимущественно отмечаются зимой Северного полушария. Летом амплитуда остается небольшой, а траектория не выходит за пределы Индийского океана. В целом качество воспроизведения амплитуды и фазы КМД в новой версии модели ИВМ сопоставимо с лучшими моделями из исследуемого ансамбля моделей проекта CMIP6.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Le P.V.V. et al. Underestimated MJO Variability in CMIP6 Models // *Geophys. Res. Lett.* 2021. Vol. 48, № 12.
2. Ahn M.S. et al. MJO Propagation Across the Maritime Continent: Are CMIP6 Models Better Than CMIP5 Models? // *Geophys. Res. Lett.* 2020. Vol. 47, № 11. P. 1–9.
3. Wheeler M.C., Hendon H.H. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction // *Mon. Weather Rev.* 2004. Vol. 132, № 8. P. 1917–1932.

Воспроизведение водного режима северных рек России в модели деятельного слоя суши ИВМ РАН – МГУ

^{1,2,3}Медведев А.И., ^{1,4,5}Степаненко В.М., ^{6,7}Богомолов В.Ю., ^{8,9}Черненко А.Ю.

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

²ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия

³Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

⁵Московский Центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

⁶Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

⁷Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, Россия

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

⁹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

E-mail: alexbear95@yandex.ru

Модель деятельного слоя суши ИВМ РАН – МГУ успешно воспроизводит качественную структуру водного режима северных рек России, основной чертой которого является ярко выраженная сезонность: наблюдаются фазы весеннего половодья, связанного со сравнительно быстрым поступлением в реки большого количества талой воды, осенних или летних паводков, формирующихся из-за сезонного увеличения дождевых осадков, и летней и зимней межени, формируемой за счет сравнительно медленной разгрузки грунтовых вод в русловую сеть. Для большей части территории России подавляющая часть годового стока рек (до 80%) проходит через русловую сеть в течение нескольких недель, приходящихся на период весеннего половодья. Проблемой является то, что параметризация процессов, регулирующих сток половодья в модели ИВМ РАН – МГУ, несмотря на её формальную способность воспроизводить ожидаемые результаты, не имеет прозрачного физического смысла.

Целью работы была замена исходной параметризации модели ИВМ РАН – МГУ, отвечающей за формирование половодья, на альтернативный вариант, основанный на физических соображениях. Качество моделирования проверялось в численных экспериментах по воспроизведению водного режима рек Северная Двина, Печора и Колыма. Основной задачей было достижение воспроизведения сроков половодья с точностью порядка декады и стока половодья с точностью до порядка значения величины.

Успешные результаты были получены при интеграции в модель параметризаций влагопроводности мерзлой почвы, жидкой воды в снежном покрове, изменения степени покрытия ячейки снежным покровом.

вом во процессе снеготаяния и движения воды в речной сети. При этом, часть подходов была заимствована из гидрологических моделей, отличающихся по постановке задачи и исходным предположениям от моделей деятельного слоя суши, в том числе, использующих автоматическую калибровку параметров. Полученные результаты имеют не только техническую, но и методическую ценность.

Сравнение воспроизведения отклика циркуляции тропосферы полярных и умеренных широт на два типа Эль-Ниньо в модели INM-CM5-0 с другими моделями CMIP6

Гвоздева А.В., Гущина Д.Ю.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия
E-mail: gvozdevaav@my.msu.ru, dasha155@mail.ru

События двух типов Эль-Ниньо в значительной степени влияют на атмосферную циркуляцию в умеренных и полярных широтах обоих полушарий [1]. В современных условиях меняющегося климата отклик тропосферы полярных и умеренных широт на процессы в тропиках может существенно изменяться. Учитывая, что потепление климата наиболее сильно проявляется в высоких широтах, важно понять, какое влияние может оказать тропическая межгодовая изменчивость на процессы в высоких широтах: способствовать усилению или, наоборот, ослаблению эффекта глобального потепления.

В настоящем исследовании выполнена оценка воспроизведения отклика атмосферной циркуляции в тропосфере полярных и умеренных широт обоих полушарий на два типа явления Эль-Ниньо российской климатической моделью ИВМ РАН – INM-CM5-0 и проведено сравнение с результатами, полученными по данным реанализа и другим моделям проекта CMIP6. Для сравнения были выбраны модели, которые наиболее успешно воспроизвели отклик на Эль-Ниньо на стадии CMIP5 [1]. Также проведено сравнение результатов, полученных по модели INM-CM5-0 с новой модифицированной версией INM-CM6-L. Качество моделей оценивалось путем сравнения с данными, полученные по результатам реанализа NCEP-NCAR. Для моделей использованы данные «исторического» эксперимента с наблюдаемыми изменениями концентраций парниковых газов. Для анализа отклика циркуляции полярных и умеренных широт на Эль-Ниньо рассчитаны регрессии среднемесячных аномалий геопотенциала севернее 20° с.ш. (южнее 20° ю.ш.) на разных изобарических поверхностях на индексы ВТ (E) и ЦТ (C) Эль-Ниньо за период с 1950 по 2017 гг. за декабрь-февраль (период кульминации Эль-Ниньо).

Показано, что модель INM-CM5-0 в целом занижает интенсивность отклика на оба типа Эль-Ниньо; лучше воспроизводит отклик в Северном полушарии, чем в Южном; воспроизводит кольцевую пространственную структуру отклика, сходную со структурой Арктической (Антарктической) осцилляции, на ЦТ Эль-Ниньо в Северном и Южном полушарии; не воспроизводит волновую структуру отклика, аналогичную PNA, в Северном полушарии и кольцевую структуру отклика на ВТ Эль-Ниньо в Южном полушарии. В новой версии модели существенно улучшается воспроизведение отклика на ЦТ Эль-Ниньо как в Северном, так и в Южном полушарии. Однако отклик на ВТ Эль-Ниньо воспроизводится некорректно: хуже, чем в предыдущей версии в Северном полушарии и несколько лучше в Южном. Все выбранные модели CMIP6 лучше воспроизводят отклик на ВТ Эль-Ниньо; часть моделей правильно воспроизводят отклик на ЦТ явление, сходный с отрицательной фазой АО (лучше, чем INM-CM5-0). Кроме того, все отобранные модели плохо воспроизводят отклики на ЦТ и ВТ Эль-Ниньо в Южном полушарии.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Gushchina D., Kolennikova M., Dewitte B., Sang-Wook Yeh. On the relationship between ENSO diversity and the ENSO atmospheric teleconnection to high-latitudes. – International Journal of Climatol-ogy 42(23), 2021.



Выделение глобальных мод климата по данным модели ИВМ РАН

Буянова М., Гаврилов А., Мухин Д.

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

E-mail: marbu@ipfran.ru, gavrilov@ipfran.ru, mukhin@ipfran.ru

В данной работе исследуются различные наборы данных о температуре приповерхностного воздуха, полученные с помощью климатической модели ИВМ РАН в рамках проектов CMIP5 и CMIP6. В частности, рассматриваются данные исторического эксперимента, учитывающие влияние известных внешних воздействий, в том числе ансамблевые данные нескольких климатических реализаций исторических данных, генерируемые моделью ИВМ РАН. Кроме того, рассматриваются данные моделирования с фиксированными внешними воздействиями, соответствующими режимам доиндустриального климата (середина 19-го века) и климата среднего голоцена (6000 лет назад). Целью всех исследований является выделение и анализ двух компонент динамики климатической системы: собственной внутренней изменчивости и отклика на внешнее воздействие, а также их сравнение с модами, находимыми по доступным данным реанализа. Для этого применяются различные варианты метода линейных динамических мод (ЛДМ), разработанного в ИПФ РАН.

Метод ЛДМ состоит в рассмотрении обратной задачи, в которой пространственно распределенные климатические данные представляются в виде заранее неизвестного отображения в наблюдаемые переменные небольшого количества временных сигналов (мод) скрытых переменных, описывающих динамику системы. При рассмотрении ансамблевых данных в такой задаче появляется возможность самосогласованно разделить временные ряды переменных, описывающих моды внутренней изменчивости, и переменных, описывающих вынужденный отклик системы на внешние воздействия. Это позволяет избежать использования методов для отделения вынужденной компоненты в данных, требующих дополнительных знаний и предположений о структуре этой компоненты (например, метода линейной регрессии данных на временной ряд глобальной концентрации парниковых газов). При обработке всех наборов данных методом ЛДМ учитывается наличие у всех мод определенных временных масштабов. Эти масштабы, как и само количество мод, в методе ЛДМ оптимизируются в рамках байесова подхода.

Применение метода ЛДМ к указанным наборам данных позволяет провести сравнительный анализ мод внутренней изменчивости и мод отклика на внешнее воздействие в различных конфигурациях модели и соотнести их с модами, имеющимися в реальных наблюдаемых данных.

■ Работа выполняется в рамках госзадания ИПФ РАН (проект № FFUF-2022-0008).

Оценка неопределенности потоков турбулентного тепла в Баренцевом море по данным ансамбля моделей CMIP6

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

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

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

³Институт географии РАН, Москва, Россия

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

Баренцево море является ключевым регионом в высоких широтах Северного полушария, где наблюдается наиболее сильная межгодовая и междекадная изменчивость климата и, по данным моделей климата, ожидаются самые сильные изменения температуры в ближайшие десятилетия. По современным оценкам, практически все тепло, поступающее в море через западную границу с океаническим притоком, переходит в атмосферу, главным образом посредством интенсивных потоков явного (H) и скрытого тепла (LE). Вариации нагрева атмосферы в регионе Баренцева моря существенно влияют на формирование региональных и крупномасштабных аномалий атмосферной циркуляции в средних широтах, интенсивность холодных вторжений.

В работе исследуются потоки турбулентного тепла в Баренцевом море по данным ансамбля климатических моделей проекта CMIP6 в современный период и в XXI в. с использованием сценарных экспериментов (сценарии SSP245 и SSP585). Сценарий SSP245 характеризуется средним форсингом парниковых газов (4.5 Вт/м^2) к 2100 г., вызванным умеренными антропогенными выбросами. Сценарий SSP585 наиболее «жесткий». Он характеризуется значительными антропогенными выбросами с радиа-

ционным форсингом порядка 8.5 Вт/м^2 . Целью исследования является выявление будущих возможных тенденций изменения региональных потоков турбулентного тепла в Арктике и поиск причин расхождений результатов моделей ансамбля CМIP6. Анализируется связь изменений потоков тепла и изменений концентрации морского льда (КМЛ) и температуры поверхности океана (ТПО), а также метеорологических параметров: температуры воздуха, и скорости ветра.

Наибольшие потоки как H , так и LE , наблюдаются в зимнее время года, в период с декабря по март. В марте в течение 1980 – 2100 гг. отмечается значительный рост потока LE , который к 2100 г. увеличится в два раза по отношению к 1980 г. согласно сценарию SSP585. Такой рост объясняется, прежде всего, быстрым сокращением КМЛ. Увеличение потока H в атмосферу происходит нелинейно, с ростом до 2060 г., после чего поток H постепенно начинает снижаться в среднем для ансамбля анализируемых моделей. В сентябре рост потока LE происходит в течение всего периода исследования и к 2100 г. его величина превысит таковую на 1980 г. в полтора раза, согласно сценарию SSP585. H , наоборот, за это время уменьшится в два раза, что связано с более быстрым ростом температуры воздуха по сравнению с ТПО. Отмечаются признаки нелинейной связи потоков H с изменениями площади льда и температуры над Баренцевым морем в марте. Максимальные потоки в среднем для моделей отмечаются при концентрациях льда в диапазоне 30%..50% и температурах $-5\text{..}-10^\circ\text{C}$. При больших, как и при меньших концентрациях и температурах потоки слабее.

Исследование влияния температуры поверхности океана на химический состав атмосферы с помощью химико-климатической модели ИВМ РАН - РГГМУ

¹Яковлев А.Р., ¹Смышляев С.П., ²Галин В.Я.

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

²Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

Изменение температуры поверхности океана (ТПО) оказывает влияние на изменение температуры приводного воздуха, вертикальные потоки тепла и массы, циркуляцию атмосферы и, следовательно, на погоду, климат и состав атмосферы по всему земному шару. Локальные изменения ТПО оказывают влияние на физические и химические процессы в атмосфере как непосредственно в области изменчивости, так и в удалённых областях земного шара за счет влияния на общую циркуляцию атмосферы. В стратосфере изменения ТПО влияют на её химический состав за счет воздействия на вертикальные потоки тепла и массы, влияющие на содержание стратосферных газов и скорости химических реакций.

В данном исследовании рассмотрены многолетние (несколько десятилетий) и межгодовые изменения ТПО и их влияние на химический состав стратосферы с особым вниманием на полярные районы. Рассматривается влияние изменчивости ТПО на устойчивость стратосферного полярного вихря (СПВ), температуру, химические реакции и содержание озона в полярных районах. Влияние изменчивости ТПО на химический состав и температуру стратосферы сравнивается с влиянием изменения содержания парниковых газов (CO_2 , CH_4 и N_2O).

Основным методом исследования являлось проведение численных экспериментов с использованием химико-климатической модели (ХКМ) ИВМ РАН - РГГМУ. ХКМ представляет собой интерактивное объединение двух частей – модели общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН, и модели химического состава атмосферы, разработанной в РГГМУ. Модели взаимодействуют между собой на каждом временном шаге, что позволяет учесть взаимодействие физических и химических процессов в атмосфере. В данном исследовании использовалась усовершенствованная в рамках развития национальной климатической модели версия ХКМ ИВМ РАН - РГГМУ. Разрешение ХКМ – 50 по долготе (от 1850 з.д. до 1800 в.д.) и 40 по широте (от 880 ю.ш. до 880 с.ш.). По вертикали модель охватывает нижнюю и среднюю атмосферу (39 σ -уровней от поверхности до 0.003 гПа). Базовый шаг по времени – 12 минут.

В динамической части ХКМ ИВМ РАН - РГГМУ осуществляется расчёт основных метеорологических параметров с помощью уравнений гидротермодинамики атмосферы с учетом параметризации процессов подсеточного масштаба, таких как турбулентность и конвекция. В химической части ХКМ ИВМ РАН - РГГМУ рассчитываются концентрации 74-х газовых примесей с учетом влияния на них процессов фотодиссоциации, газозависимых и гетерогенных химических реакций, а также атмосферного переноса химически активных газов адвективными, турбулентными и конвективными процессами.

ХКМ учитывает взаимодействие между химическими и физическими процессами на каждом шаге по времени. Сначала рассчитываются потоки солнечной и уходящей радиации, при этом учитывается текущее содержание поглощающих радиацию газов и молекулярное рассеяние света. Эти потоки ис-

пользуются для расчёта скоростей нагрева атмосферы и фотодиссоциации газов. Далее рассчитываются скорости химических реакций с учетом значений температуры, рассчитанных в динамической части модели. После этого оцениваются скорости фотохимического образования и разрушения атмосферных газов, которые учитываются при оценке эволюции химического состава атмосферы за счет переноса фотохимически взаимодействующих газов. Рассчитанные в химическом блоке концентрации атмосферных газов и аэрозолей учитываются в динамической части ХКМ при оценке скоростей нагрева атмосферы, влияющего на изменения ее температуры и циркуляции. На рисунке представлена схема взаимодействия физических и химических процессов в ХКМ ИВМ РАН - РГГМУ.

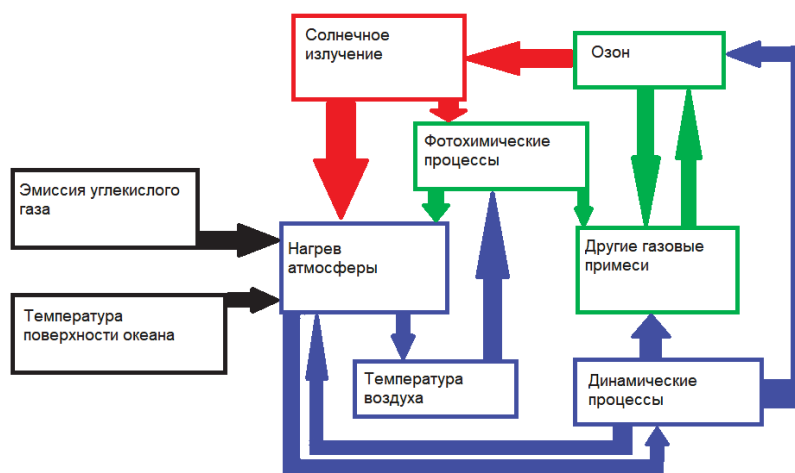


Схема взаимодействия физических и химических процессов.

Изменения ТПО, площади ледяного покрова и уровня парниковых газов оказывают влияние на нагрев атмосферы, что, в свою очередь, влияет на температуру воздуха и динамические процессы, которые влияют на изменения концентраций озона и других газовых примесей. С помощью ХКМ можно оценить пространственную и временную изменчивость содержания атмосферных газов и распределение метеорологических параметров.

Для оценки влияния долгопериодных и межгодовых изменений ТПО на химический состав атмосферы проводились численные эксперименты с ХКМ ИВМ РАН – РГГМУ по нескольким сценариям. Среднемесячные данные ТПО и площади покрытия океана льдом (ППОЛ) из данных ре-анализа Metoffice, интерполировались в среднесуточные значения и использовались для задания температуры на нижней границе модели в тех точках сетки, которые попадают в море. Расчеты выполнялись на 30 лет с повторяющимся сезонным циклом на 2020 г. по всем параметрам, кроме ТПО и ППОЛ. Для них использовались данные, соответствующие разным годам с повышенными значениями ТПО в тропической части Тихого океана (1983, 1987, 1998, 2015, 2016), и годы с пониженными значениями ТПО в тропической части Тихого океана (1985, 1989, 1999, 2008, 2011 гг.), соответствующие фазам Эль-Ниньо и Ла-Нинья Южного колебания. За эти десять лет было выполнено десять модельных экспериментов с соответствующими ТПО и ППОЛ для оценки влияния межгодовых изменений ТПО на химический состав атмосферы. Средние расчетные значения параметров атмосферы за 5 лет, соответствующие фазе Эль-Ниньо, сравнивались со средними значениями за 5 лет, соответствующие фазе Ла-Нинья. Кроме того, были выбраны 5 лет, соответствующие нейтральной фазе Южного колебания в начале климатического периода 1980-2020 гг. (1980, 1981, 1984, 1986 и 1988 гг.), а также в конце периода (2013 г., 2014, 2017, 2018, 2019). Сравнение результатов расчетов средних за 5 лет в начале и в конце климатического периода использовалось для анализа влияния долгопериодных изменений ТПО на химический состав атмосферы.

Результаты расчетов показали, что разница температуры воздуха в нижней тропической тропосфере во время фаз Эль-Ниньо и Ла-Нинья приводит к значительным изменениям атмосферных условий в стратосфере и, прежде всего, в полярных районах. В результате этого появляются отклики температуры воздуха, оказывающие влияние на содержания озона в стратосфере, которые связаны с Южным колебанием, особенно в Северном полушарии. Тренды по температуре, и следовательно, по озону, в стратосфере идут на понижение, кроме Арктической стратосферы, где наблюдается повышение содержания озона.

Показано, что явление Эль-Ниньо – Южное колебание оказывает влияние на стратосферу посредством изменения вертикальных потоков тепла в стратосферу, которые приводят к нагреву стратосферы. Они, в свою очередь, оказывают воздействие на зональный ветер, что способствует неустойчивости полярного вихря, и усиливают меридиональный перенос (остаточную циркуляцию), что способствует

усилению циркуляции Брюера-Добсона, стратосферным потеплениям и увеличению содержания озона. Также увеличивается поток волновой активности, способствуя разрушению полярного вихря из-за торможения зонального потока, что также способствует увеличению содержания озона. При Ла-Нинья потоки тепла отсутствуют, и вихрь восстанавливается, хотя в годы Ла-Нинья возможны стратосферные потепления, которые способствуют ослаблению полярного вихря и увеличению содержания озона.

Показано, что в результате повышения ТПО и повышения температуры воздуха в тропосфере усиливаются вертикальные потоки тепла в стратосферу, что может способствовать стратосферным потеплениям и ослаблению зонального ветра, а, значит, неустойчивости полярного вихря и повышению содержания озона из-за усиления циркуляции Брюера-Добсона. Однако, в отличие от межгодовых колебаний, влияние повышения ТПО в стратосфере слабее, и проявляется в Северном полушарии. В Южном полушарии температура воздуха в стратосфере и содержание озона имеют тенденцию к уменьшению – тренд на повышение ТПО способствует углублению озоновой дыры в Южном полушарии. На поток волновой активности тренд ТПО оказывает незначительное влияние.

SESSION VIII

FUTURE EARTH PROGRAM AND NORTHERN EURASIA FUTURE INITIATIVE

Northern Eurasia Future Initiative (NEFI), Present Status and Perspectives

Groisman P.Ya.

Hydrology Science and Services Corp, North Carolina Institute for Climate Studies, Asheville, USA

Northern Eurasia Future Initiative (NEFI) emerged in 2016 as a successor of another large-scale interdisciplinary international program Northern Eurasia Earth Science Partnership Initiative (NEESPI). Both Initiatives cover the same area, territory of Northern Eurasia. A lot of efforts of NEFI are based on NEESPI results. However, the science questions of NEFI differ from those of NEESPI. While the major Science question of NEESPI was: How do Northern Eurasia's terrestrial ecosystems dynamics interact with and alter the biosphere, atmosphere, cryosphere, and hydrosphere of the Earth? for NEFI, this question has been appended with the following science question: How to provide in Northern Eurasia a sustainable societal development (economy well-being, activities, health, and strategic planning) in changing climate, ecosystems, and... societies?

The NEFI Core Science Plan is available at <http://nefi-neespi.org/NEFI-WhitePaper.pdf>.

The current programmatic NEFI papers are:

- Groisman et al. 2017: Northern Eurasia Future Initiative (NEFI): Facing the Challenges and Pathways of Global Change in the 21st Century. Problems of Earth and Planetary Sciences, 4, 41. <https://doi.org/10.1186/s40645-017-0154-5>
- Monier et al. 2017: A Review of and Perspectives on Global Change Modeling for Northern Eurasia. Environ. Res. Lett., 12, 083001 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa7aae/meta>.
- Chen, Y.Z et al. 2017: Quantitative assessment of carbon sequestration reduction induced by disturbances in Temperate Eurasian Steppe. Environ. Res. Lett., 12, 115005 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa849b>
- Chen, J., et al. 2022: Sustainability Challenges for the Social-Environmental Systems across the Asian Drylands Belt. Environ. Res. Lett. 17, 023001, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac472f>

Devoted NEFI outlet a NEFI Special Focus Issue of Environ. Res. Lett. was launched in March 2017: "Focus on Northern Eurasia in the Global Earth and Human Systems: Changes, Interactions, and Sustainable Societal Development" <http://iopscience.iop.org/1748-9326/focus/NEFI>. As of today, the Focus Issue has included 75 papers. Submissions to the Issue were closed on December 31, 2022. Presently, we are using/recommending for the NEFI publications three international MDPI journals: *Water*, *Land* and *Fire*, where our colleagues are serving on the Editorial Boards. Each year, NEFI organizes scientific sessions at the international Conferences in the U.S., Japan, and Russia, devoted to environmental and socio-economic studies in Northern Eurasia (AGU, JpGU, ENVIROMIS/CITES). Since February 2020, these sessions have been mostly held online or in the hybrid formats due to the COVID Pandemy. Keeping in mind new sets of science questions, the new generation of NEFI studies became and will continue to be "more regional" (with exception of the carbon cycle studies). Specifically, the studies are presently concentrated within (a) The Eurasian Arctic—the region of the most prominent natural changes; (b) Dry Latitudinal Belt of Northern Eurasia—the largest region with acute water deficit in the extratropics; and (c) within the Boreal Forest zone of Eurasia—the largest storage of terrestrial carbon. Ecosystems' boundaries here are unstable. Due to current financial restrictions in collaboration between Western countries and Russia and Belarus, the joint NEFI projects with the involvement of scientists from "two camps" can be now advanced only with support from internal resources. The restrictions do not stop these projects, are annoying, and require realignments of logistics and funding.

Assessment of the potential impact of climate change in Uzbekistan using the RCP and SSP scenarios

¹Belikov D.A., ²Rakhmatova N., ²Nishonov B., ²Shardakova L., ^{2,3}Rakhmatova V.

¹CERES, Chiba University, Japan

²Hydrometeorological Research Institute, Uzhydromet, Tashkent, Uzbekistan

³Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan

Climate change is a global phenomenon that has significant impacts on the environment and society. The Central Asia region is highly vulnerable to the effects of climate change due to its delicate ecological environment. Uzbekistan, a Central Asian country, faces serious environmental challenges that significantly impact people's livelihoods, including the degradation of the Aral Sea, water scarcity, increased desertification, and the frequent occurrence of extreme events, such as prolonged droughts and frequent dust storms. Accurate assessments of historical and future climate trends are necessary to develop appropriate measures and actions to adapt to these challenges. In this study, we examine the potential impact of climate change on Uzbekistan using the RCP and SSP scenarios from the CMIP5 and CMIP6 projects. The RCP scenarios are used to represent different pathways of future greenhouse gas emissions, while the SSP scenarios represent different socioeconomic development pathways. The study uses observed and projected climate data to assess historical and future climate trends in Uzbekistan. Uzbekistan's territory has different agroclimatic conditions, and for the assessment, we classified it according to relatively homogeneous geographical features, climatic characteristics, and water supply conditions. The historical analysis reveals a sharp acceleration of the warming trend in Uzbekistan since the mid-1990s, with significant temperature increases observed. Seasonal analysis shows the largest changes in temperature and precipitation during winter (December, January, February) and spring (March, April, May), which are critical seasons as two-thirds of the annual precipitation amount falls during this time. Changes in rainfall patterns and shifting seasons can affect available water resources and increase evaporation during the growing season, leading to water scarcity and affecting crop yields. The analysis of historical Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) values reveals consistent patterns across all regions of Uzbekistan, indicating severe droughts in 2000-2001, 2008, and 2011. The combination of RCP and SSP scenarios provides a comprehensive outlook on the interactions between climate change and socioeconomic factors and their impact on the country until 2100. The study calculates climate parameters for the entire country by twenty-year periods and analyzes them relative to the base period. The findings of this study indicate that Uzbekistan will face increasing temperature, decreased precipitation, and severe water scarcity in the future. By the end of the century, temperature increases of 2-4°C and precipitation reductions of 10-20% are expected under different RCP scenarios. The analysis also shows that the SSP scenarios have a significant impact on the climate outcomes. Under high SSP scenarios, the impacts of climate change are more severe, leading to increased water scarcity, crop yield reductions, and more frequent extreme weather events. The study's results provide valuable insights into the potential impact of climate change on Uzbekistan and can inform the development of adaptation measures and preparedness plans for meteorological hazards.

Extreme low flow during the long-lasting river runoff phases in the central part of the East-European plain

¹Georgiadi A.G., ²Groisman P.Ya.

¹Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

²Hydrology Science & Services Corporation, Asheville, USA

E-mail: georgiadi@igras.ru

On the rivers of the central part of the East-European Plain, we revealed long phases (lasting 10-15 years or more) of increased/decreased annual and seasonal runoff during the past two centuries. Extreme low water flow conditions were quite often formed on the background of these phases. The frequencies of these low flow conditions were quite different during the above-mentioned contrasting phases. To identify the phase boundaries, cumulative deviations curves and criteria for statistical homogeneity (the Student t-test and Mann-Whitney-Pettitt test) were used. The frequencies of specific water flow values were estimated using the empirical curves of the exceedance probability of annual and seasonal water flows based on their long-term time series.

In the century-long changes of all rivers considered, two long contrasting phases were revealed. These phases characterize increased and decreased runoff for entire year during annual and for hydrological seasons.

Near simultaneously, a phase of increased runoff was first observed for the freshet season, which was replaced by the phase of decreased runoff in 1971 (on the Volga-River near Staritsa, the Oka-River near Kaluga, the Don-River near Stanitsa Kazanskaya), in 1988 (on Moskva-River near Mozhaysk) and in 1959 (on the Dnieper-River near Orsha). On the contrary, phases of decreased runoff were first observed for low water seasons. Thereafter, almost synchronously (in 1976-1979), a phase of increased runoff occurred at all these rivers. The character of the runoff phases differs significantly among rivers. The duration of long-term phases of different annual runoff components on these rivers is within the following limits: on the Volga-River from 28 to 86 years, the Dnieper-River from 34 to 99 years, the Moskva-River from 31 to 66 years, the Oka-River from 35 to 96 years, and the Don-River from 37 to 91 years. The differences in the flow (as a percentage of the phase of decreased flow) for contrasting phases are on the Oka-River: 20-72%, Don-River: 19-68%, Moskva-River: 18-144%, Volga-River: 24-81%, and Dnieper-River: 20-79%. The runoff differences (in percent), as a rule, reach the greatest values in the low water seasons of the year, and are the smallest for the annual runoff. Very significant differences were revealed in the frequency of low-water years for low runoff with exceedance probability equal or above 75% and equal or above 95%. These differences were observed at all rivers of the region and for all phases of annual and seasonal runoff (i.e., for snow-melt freshet, as well as for summer-autumn and winter low flow seasons). For the summer-autumn and winter seasons on the Oka and Don, and Moskva Rivers during the phases of increased runoff, extreme low water flows were not observed at all. However, in the same seasons but in contrasting phases, there were more significant differences in the frequency of low-water years compared with the snow-melt freshet and annual runoff. The range of changes in the frequency of low-water years, the runoff of which was lower than the runoff of 75 and 95% exceedance probability, is also different for the phases of increased and decreased runoff.

Cloud and radiation characteristics of the atmosphere in the Arctic based on expedition and satellite observations

Narizhnaya A.I., Chernokulsky A.V., Repina I.A., Chechin D.G.

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

E-mail: alex.narizhnaya@ifaran.ru, a.chernokulsky@ifaran.ru, repina@ifaran.ru, chechin@ifaran.ru

Clouds play an important role in the Arctic climate system, having a significant warming effect during almost an entire year. However, the existing numerical estimates of cloud-radiative characteristics differ significantly according to various data.

This paper analyzes the characteristics of cloud cover, radiation fluxes, and cloud-radiation effects (forcing) on the surface based on three NABOS (Nansen and Amundsen basins observation system) polar expeditions in the central regions of the Arctic Ocean. The expeditions were performed in August-September 2013, 2015, and 2018 on the scientific research vessels Akademik Fedorov and Akademik Treshnikov. The cloud-radiation characteristics obtained from the expedition observations are compared with the CERES satellite data.

The following values for radiation fluxes and cloud-radiation effects in Russian Arctic in warm period (August-September) were obtained using NABOS data: for incoming long-wave radiation fluxes the median and interquartile variation were on average 305 W/m² and 22 W/m², for upward radiation ~ 314 W/m² and 14 W/m². For the downward short-wave radiation flux, the values were ~ 30 W/m² and 60 W/m², while for the reflected radiation: ~ 5 W/m² and 10 W/m². It was shown that during summer months clouds contribute to the cooling of the lower atmospheric layer in the Arctic: the total cloud-radiation effect according to shipboard measurements reached -12 W/m². It was noted that the CERES satellite data demonstrates lower values of incoming and outgoing longwave radiation fluxes (~ by 10 W/m²) and overestimates shortwave radiation fluxes as compared to NABOS data (~ by 60 W/m²).

The consistency of NABOS and CERES data depending on different external parameters (sea ice cohesion, solar altitude, cloud characteristics) was analyzed. The greatest discrepancies between the data are noted for the transient ice concentration: above the completely open or completely ice surface the agreement is higher. A multidirectional statistically significant correlation between the fluxes (different for short- and long-wave fluxes) and the cloud fraction was obtained. The dependence on the cloud phase was revealed: in general, the correspondence between fluxes is higher for ice clouds than for water clouds.