

1.11

МГУ имени М.В. Ломоносова

Кафедра метеорологии и климатологии

№ госрегистрации  
121051400081-7

УДК  
551.5 Метеорология. Климатология



ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

Погодные и климатические процессы различных  
пространственно-временных масштабов в условиях антропогенного  
воздействия (ГЗ)  
(промежуточный)

Зам. директора/декана  
по научной работе

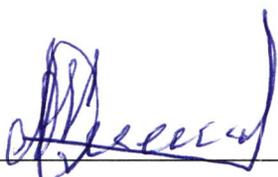
Руководитель темы  
Кислов А.В.

«26» декабря 2023 г.

«19» декабря 2023 г.

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:  
заведующий кафедрой, доктор  
географических наук, профес-  
сор по кафедре

  
\_\_\_\_\_ (Кислов А.В.)

Исполнители темы:  
старший научный сотрудник,  
кандидат географических на-  
ук, доцент по кафедре  
инженер 1 категории  
инженер 1 категории  
инженер 2 категории  
ведущий научный сотрудник,  
кандидат географических наук  
профессор, доктор географиче-  
ских наук, профессор, до-  
цент/с.н.с. по специальности  
научный сотрудник, кандидат  
географических наук  
старший научный сотрудник,  
кандидат географических наук  
доцент, кандидат географиче-  
ских наук  
ведущий научный сотрудник,  
кандидат географических на-  
ук, доцент/с.н.с. по специаль-  
ности  
ведущий научный сотруд-  
ник, кандидат физико-  
математических наук  
профессор, доктор биологиче-  
ских наук, кандидат географи-  
ческих наук  
ведущий инженер  
  
старший научный сотрудник,  
кандидат географических наук  
младший научный сотрудник,  
кандидат географических наук  
доцент, кандидат географиче-  
ских наук, доцент по кафедре

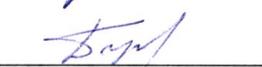
  
\_\_\_\_\_ (Алексеева Л.И.)

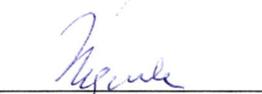
  
\_\_\_\_\_ (Белоцкая У.В.)

  
\_\_\_\_\_ (Вазакина Т.А.)

  
\_\_\_\_\_ (Гайкинвельдер Т.Н.)

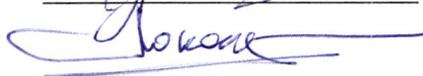
  
\_\_\_\_\_ (Горбаренко Е.В.)

  
\_\_\_\_\_ (Гущина Д.Ю.)

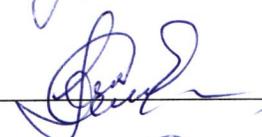
  
\_\_\_\_\_ (Жданова Е.Ю.)

  
\_\_\_\_\_ (Железнова И.В.)

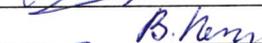
  
\_\_\_\_\_ (Константинов П.И.)

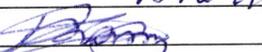
  
\_\_\_\_\_ (Локощенко М.А.)

  
\_\_\_\_\_ (Мухартова Ю.В.)

  
\_\_\_\_\_ (Ольчев А.В.)

  
\_\_\_\_\_ (Осипов А.М.)

  
\_\_\_\_\_ (Перепелкин В.Г.)

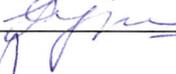
  
\_\_\_\_\_ (Платонов В.С.)

  
\_\_\_\_\_ (Полюхов А.А.)

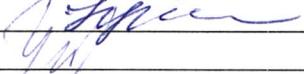
  
\_\_\_\_\_ (Соколихина Н.Н.)

ведущий научный сотрудник,  
кандидат физико-математических наук, доктор физико-математических наук  
инженер 2 категории  
профессор, кандидат географических наук, доктор географических наук, доцент по кафедре  
доцент, кандидат географических наук  
техник  
инженер 1 категории  
профессор, доктор географических наук, доцент/с.н.с. по специальности  
инженер 2 категории  
инженер 2 категории, доктор биологических наук, профессор по специальности

  
\_\_\_\_\_ (Степаненко В.М.)

  
\_\_\_\_\_ (Столярова Е.Г.)  
  
\_\_\_\_\_ (Суркова Г.В.)

  
\_\_\_\_\_ (Торопов П.А.)

  
\_\_\_\_\_ (Устинов А.А.)  
  
\_\_\_\_\_ (Черненьков О.П.)  
  
\_\_\_\_\_ (Чубарова Н.Е.)

  
\_\_\_\_\_ (Шевход О.О.)  
  
\_\_\_\_\_ (Шульгин И.А.)

## РЕФЕРАТ

Ключевые слова:

погодные и климатические процессы, циркуляционные системы

Ключевые слова по-английски:

weather and climatic processes, circulation systems.

Работы по анализу пространственно-временных атмосферных процессов и развитию концепции формирования погоды и климата в условиях антропогенного воздействия проводилась по четырем направлениям: 1. Связь изменений климата и циркуляционных систем, включающая изучение взаимодействия ведущих мод изменчивости (Северо-Атлантическое колебание, Арктическое усиление, Эль-Ниньо Южное Колебание и др.) с климатическими трендами; 2. Исследование климата Москвы и других урбанизированных территорий, включающее изучение городского «острова тепла», состава воздуха и осадков, экстремальных метеорологических явлений, атмосферной радиации (в т.ч. ультрафиолетовой) и освещенности; 3. Изучение воздействия антропогенных нарушений лесных и болотных экосистем на потоки парниковых газов; вариаций горного оледенения (в т.ч. Кавказа и Камчатки); изменений специализированных климатических показателей, учитывающих влияние на экономику и социальную сферу, для различных регионов России; 4. Развитие методики компьютерного моделирования с помощью моделей атмосферы (COSMO-CLM/ICON-CLM, COSMO-ART, WRF-ARW и также турбулентно-разрешающих) и оценок по базам данных высокого разрешения с целью изучения механизмов формирования экстремумов. Практическая значимость этих исследований: позволит оценить влияние крупномасштабных мод климатической изменчивости на частоту возникновения экстремальных погодных явлений во внетропических широтах Северного полушария; исследования Арктики имеет стратегическое значение для устойчивого развития экономики РФ; позволит предсказывать более точно опасные явления погоды урбанизированных территорий; адаптация населения в современном климате.

## ВВЕДЕНИЕ

В 2023 году работы по анализу пространственно-временных атмосферных процессов и развитию концепции формирования погоды и климата в условиях антропогенного воздействия проводились по следующим направлениям: I. Исследование связи изменений климата и циркуляционных систем, включающее изучение взаимодействия ведущих мод изменчивости (Эль-Ниньо Южное Колебание, Североатлантическое колебание, и др.) с климатическими трендами для оценки удаленного влияния на изменения климата Российской Арктики, а также развитие теории индивидуальных вихревых систем (режимов блокирования). II. Исследование климата Москвы и других урбанизированных территорий, включающее изучение городского «острова тепла», состава воздуха и осадков, экстремальных метеорологических явлений, атмосферной радиации (в т.ч., ультрафиолетовой) на основе измерений (наземной сети, акустического и радиозондирования, высотных измерительных комплексов, спутниковых данных) и моделирования (см. пункт 4). III. Исследование ряда объектов, на динамику которых эффективно влияют изменения климата, в т.ч., оценка возможного отклика потоков CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> на экстремальные погодные явления (положительные и отрицательные аномалии температуры и осадков) по результатам пульсационных и камерных наблюдений на карбоновых полигонах; исследование метеорологических условий формирования аномальной стратиграфии снежной толщи в высокогорных районах Кавказа и Камчатки; изменений климатически зависимых социально-экономических показателей для различных регионов России. IV. Развитие методики компьютерного моделирования с помощью моделей атмосферы (COSMO-CLM/ICON-CLM, COSMO-ART, WRF-ARW а также турбулентно-разрешающих) и оценок по базам данных высокого разрешения с целью изучения механизмов формирования экстремумов (в т.ч., осадков, гололедно-изморозевых отложений высокой интенсивности, загрязнения воздуха, обледенения морских судов и др.), в сложных топографических и ландшафтных условиях (Арктика, Кавказ, урбанизированные территории).

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

I. Исследование связи изменений климата и циркуляционных систем, включающее изучение взаимодействия ведущих мод изменчивости: 1. Выполнено обобщение материалов для развития теории изменений климата в плиоцене-плейстоцене и голоцене, в том числе проведены новые расчеты изменений инсоляции для разных временных срезов последних 20 тысяч лет; развиты теоретические модели временной изменчивости в масштабе флуктуаций от 1 года до 1 000 000 лет, основанные на законе «-5/3» Колмогорова и «-2» Хассельмана. (А.В. Кислов) 2. Исследована термодинамическая структура отклика тропосферы и стратосферы умеренных и полярных широт Северного и Южного полушарий на два типа Эль-Ниньо. Выявлено, что различия в циркуляционном отклике на ВТ и ЦТ Эль-Ниньо аналогичны в умеренных и полярных широтах, при этом отклик на ВТ Эль-Ниньо и Ла-Нинья практически противоположен. В стратосфере и тропосфере можно выделить два типа отклика, характерных для Азиатско-Тихоокеанско-Американского и Атлантико-Европейского сектора. (Гущина Д.Ю., Осипов А.А.) 3. Для развития теории индивидуальных вихрей использована математическая теория параметризации неучитываемых (подсеточных) масштабов для квадратичной нелинейности MTV (Majda et al). Основой теории служит значение завихренности, поскольку использование спиральности в качестве характеристики вихревой динамики оказалось неэффективным. (А.В. Кислов) 4. Рассмотрена межгодовая динамика субтропических антициклонов и оценена их интенсивности и локализации поля завихренности за период 1980-2021 гг. Показано, что наиболее стабильными антициклонами на межгодовом масштабе являются Гавайский и Азорский, самым изменчивым – Южно-Тихоокеанский. Самые большие значения относительной завихренности характерны для Южно-Атлантического и Маскаренского антициклонов. Для определения роли различных процессов в изменении завихренности в антициклоне были проанализированы слагаемые бюджета завихренности на примере Гавайского антициклона. EOF-анализ для пяти летних периодов (1980, 1990, 2000, 2010, 2020 годы) показал, что локализация центральной части антициклона сильно смещается год от года в долготном направлении и незначительно – в широтном. Первая мода EOF-разложения имеет пространственную структуру, соответствующую типичному положению Гавайского антициклона и описывает около половины общей изменчивости в регионе. На долю второй моды (имеющей дипольную структуру) приходится около 10-15% изменчивости. Третья мода объясняет, как правило, менее 10% изменчивости, и имеет сильно изменяющуюся год от года пространственную структуру. (Жданова И.В., Мухартова Ю.В.) 5. Проведен анализ уравнения бюджета завихренности для первой и второй мод EOF-разложения. Показано, что в эволюцию антициклона (первая мода EOF-анализа) наибольший вклад вносят вертикальные движения, действующие на его развитие как отрицательная обратная связь, а также адвекция температуры в слое. В отдельные периоды значимым фактором становится изменение завихренности в верхних слоях тропосферы. Непосредственное воздействие на циркуляционную систему потоков явного и скрытого тепла, а также радиационного баланса крайне невелико. (Жданова И.В., Мухартова Ю.В.) 6. Для динамики второй моды EOF-разложения наиболее значимыми факторами является адвекция температуры. Ряд погрешностей, связанных

с шагом сетки реанализа, принятыми упрощениями и недоучетом мод EOF-разложения более высоких порядков приводит к возникновению в уравнении завихренности добавочного члена (невязки). Невязка явно разрешаемых факторов компенсируется параметризацией, которая строится на основе учета влияний второй и последующих мод EOF-разложения. Показано, что она состоит из гауссового шума и неслучайной компоненты, которая может быть наиболее успешно аппроксимирована с помощью кубической функции от временных коэффициентов при первой и второй модах. (Железнова И.В., Мухартоев Ю.В., Кислов А.В.) 7. С помощью индекса RMM оценена способность различных версий модели ИВМ воспроизводить характеристики Колебания Маддена-Джулиана (КМД). Показано, что все версии модели корректно воспроизводят восточное распространение КМД и усиление амплитуды колебаний зимой Северного полушария, однако версии модели INM-CM5-0 и INM-CM6-L существенно недооценивают амплитуду индекса RMM. В модели INM-CM5-0 колебания Маддена-Джулиана не способны преодолеть Морской континент Индонезия. В версии модели INM-CM6-L конвективный центр периодически пересекает Индонезию, а амплитуда возмущения увеличивается. Улучшения в основном касаются зимы Северного полушария, в то время как летние условия моделируются хуже. В моделях INM-CM6-L\* и INM-CM6-MKMД выходит в Тихий океан как зимой, так и летом, амплитуда резко возрастает по сравнению с более ранними версиями модели, хотя и остается в среднем ниже, чем в данных реанализа. Частота возникновения конвективных структур КМД с амплитудой, превышающей пороговое значение 1, существенно недооценивается в версиях модели с низким пространственным разрешением, и резко возрастает до сопоставимых с данными реанализа значений в последней версии модели INM-CM6-M (Железнова И.В., Гущина Д.Ю.) 8. Изучение синоптических аспектов формирования экстремумов скорости ветра в полярных регионах по данным наблюдений, реанализа и моделирования на примере Норвежского, Баренцева и Карского морей и влияние на них полярных мезомасштабных циклонов показало, что в большей части случаев максимальные скорости формируются в рамках крупномасштабного циклона и они больше, чем экстремумы скорости ветра, связанные с полярным мезомасштабным циклоном. Лишь в отдельных ситуациях особенно высокая скорость связана с мезомасштабным циклоном. Арктическое усиление рассмотрено с позиций изменения турбулентного теплообмена на фон интенсивного потепления Арктики. Исследование пространственной и временной изменчивости потоков явного и скрытого тепла над Баренцевым и Карским морями за период 1979 – 2018 гг. на основе данных реанализа ERA-Interim с шестичасовым разрешением показало, что локализация экстремумов турбулентных потоков за последние десятилетия не изменилась по сравнению с серединой и второй половиной прошлого века. Выявлено, что наибольшая пространственная и временная изменчивость потоков наблюдаются в южном и юго-западном секторах Баренцева моря. Продемонстрировано, что зимние значения пространственной изменчивости потоков тепла превышают летние в 2 – 5 раз, а годовые суммы потоков тепла в Баренцевом море в 3 – 5 раз больше, чем в Карском. Исследование влияния аномалий в поле давления при разных фазах Северо-Атлантического, Арктического и Скандинавского колебания на интенсивность турбулентных потоков показало, что наиболее чувствительна к изменению атмосферной циркуляции область теплых течений Барен-

цева моря. (Суркова Г.В.) 9. Исследовано пространственное распределение наблюдений атмосферных явлений, приводящих к образованию гололедно-изморозевых отложений на побережье Карского моря. Показано, что на территории наиболее часто повторяющимися гололедно-изморозевыми отложениями, является кристаллическая изморозь. В среднем по всем станциям ее повторяемость составляет около 70%. На втором месте – отложения мокрого снега (около 20%). Оставшиеся 10% отложений образуются в виде гололеда и зернистой изморози. В холодное время года, с ноября по март, подавляющее количество наблюдаемых на метеорологических станциях гололедно-изморозевых отложений образуется в виде кристаллической изморози. В переходные сезоны наиболее часто выпадет мокрый снег. Гололед и зернистая изморозь образуются довольно редко в течение всего года. Для каждого вида гололедно-изморозевого отложения по определенным диапазонам температуры воздуха и скорости ветра были выделены отложения высокой интенсивности, потенциально относящиеся к опасным явлениям погоды. К этим отложениям относятся гололед, изморозь и мокрый снег. Временные тренды отложений гололеда, изморози (и кристаллической, и зернистой) и мокрого снега за период с 1966 года по настоящее время имеют тенденцию к росту, хотя сами тренды и не значимы. (Соколичина Н.Н.)

II. Исследование климата Москвы и других урбанизированных территорий. 1. В 2023 году с помощью модельных инструментов WRF + Envi-Met проведены исследования волн жары 2010 и 2021 года. Показано, что для волн жары 2021 года не обнаруживаются географические предикторы пространственной неоднородности термического режима Московского мегаполиса. Проведенные вычислительные эксперименты для Nature Based Solutions – «зеленых» и «белых» крыш для Москвы в течение летних волн жары показывают заметное влияние ландшафтных преобразований на термический режим мегаполиса. (Константинов П.И.) 2. В 2023 году были продолжены исследования явления «острова тепла» применительно к Москве и к малым населённым пунктам Московского региона. Был проведён цикл экспериментов по прямым измерениям температуры воздуха (микроклиматическим съёмкам) в разных точках г. Вереи, дер. Афанасова и Бяконтова и в их окрестностях для исследований малых «островов тепла». Помимо этого, весной и летом 2023 года проведена первая серия экспериментов с передвижным содаром Scintec по изучению влияния крупного города на ветровой режим нижней атмосферы в тёмное время суток в антициклональных условиях. В отчётном году был продолжен ранее начатый анализ высоты приземного слоя воздуха по многолетним данным содара MODOS. Проведён подробный анализ современных изменений этого явления за последние 30 лет в поле температуры как воздуха на высоте 2 м, так и поверхности по данным спутников системы MODIS. Проведена работа по обобщению, анализу и критическому контролю всех доступных данных высотных измерительных комплексов о многолетних изменениях температурной стратификации в Московском регионе за период 1991-2022 гг. Был продолжен анализ вековых изменений температуры воздуха и количества осадков в Москве. (Локощенко М.А., Алексеева Л.И.) 3. На основе многолетних наблюдений, проводимых в МО МГУ: Проанализированы уровни естественной освещенности в зависимости от балла и формы облаков, получены эмпирические зависимости естественной освещенности при сплошном

покрове облаков различных ярусов и форм. На основании модельных расчетов методом Монте-Карло сделаны теоретические оценки изменения освещенности земной поверхности для сплошной облачности различной оптической толщины. Проведены сравнения математической и эмпирической моделей освещенности в условиях сплошной облачности. Сделана оценка уровня освещенности по значению коэффициента пропускания светового потока различными формами облаков относительно ясного неба. Проведено сравнение методов с наблюдениями. Показано, что преимуществ в использование того или иного метода нет, так как во всех случаях остается неопределенность, связанная с невозможностью точного определения параметров облачности по наземным, визуальным наблюдениям.. Проведена всесторонняя оценка светового климата Москвы. Получены климатические нормы естественной освещенности земной поверхности, в большинстве случаев достаточные для любых практических применений. Проанализированы условия, приводящие к уменьшению освещенности ниже критических значений, при которых требуется использование совмещенного или искусственного освещения помещений. Показано, что прогнозы освещенности можно давать по прогнозу нижней облачности на основании общего прогноза погоды. Продолжено исследование радиационного режима атмосферы и его изменений в Московском регионе. Получены статистически достоверные сведения о многолетней (1955-2022 гг.) динамике радиационных параметров атмосферы. Оценены особенности радиационного режима в XXI веке (Горбаренко Е.В.) 4. Совместно с сотрудниками НИИСФ РААСН проведено исследование изменения температуры фасадной стены, с учетом воздействия солнечной радиации при различной облачности. Были проведены измерения прямой и рассеянной солнечной радиации при переменной облачности и сделан расчет потоков с учетом затенения окружающими зданиями. На основании высокой корреляции расчетных и экспериментальных данных по температуре нагрева фасада сделан вывод, что точность предложенного метода расчета достаточна для решения прикладных задач. Полученные результаты можно рекомендовать для изучения инерции и долговечности строительных конструкций под действием солнечной радиации. Предложены критерии подбора энергосберегающего остекления с учетом солнечной радиации, поступающей на фасады зданий. Показано, что актуальным является расчет солнечной радиации в ясные дни при оценке влияние окружающей застройки на поступление прямой, рассеянной и отраженной солнечной радиации. (Горбаренко Е.В.) 5. Проведены работы по усовершенствованию программного обеспечения для радиационного комплекса RAD-MSU(BSRN), предназначенного для приема данных измерений, их визуализации и обработки. Создан архив измерений радиационного комплекса RAD-MSU(BSRN), который включает минутные и часовые значения радиационных потоков. Разработана структура ежемесячных обзоров по измеряемым радиационным потокам, которые составляются на регулярной основе и содержат статистические характеристики измеряемых величин, анализ их временной изменчивости, а также оценки качества измерений. Проведен детальный анализ радиационного режима в Москве с использованием радиационного комплекса RAD-MSU(BSRN), по данным 2022 года выполнены сравнения измеряемых потоков со стандартными радиационными измерениями в МО МГУ, принятыми на сети Росгидромета, которые показали сходимость стандартных измерений компонент коротковолнового

баланса и измерений радиационного комплекса RAD-MSU(BSRN) с учетом погрешностей измерений приборов. Разность годовых сумм рассеянной радиации по данным MSU-RAD (BSRN) и стандартными измерениями составляет менее 2.5%, а для суммарной радиации менее 0.9%. Отмечено, что в холодный период наблюдаются более существенные различия. Так, в ноябре, феврале и марте, по данным MSU-RAD (BSRN), месячные суммы прямой радиации на 2.5% больше, чем по данным стандартных измерений, что может быть связано с погрешностями наведения на Солнце стандартного гелиостата, что приводит недооценке прямого излучения в случаях кратковременных разрывов в облаках. Месячные суммы рассеянного излучения по данным MSU-RAD (BSRN) меньше, чем суммы по стандартным измерениям. Наибольшая разность наблюдается зимой (до -12.7% в январе), что может быть объяснено инструментальной погрешностью приборов, особенно в случаях малых величин значений радиации. Разность в месячных суммах отраженного излучения имеет похожее значение и также может быть объяснена инструментальной погрешностью, дополнительное влияние может оказывать неоднородность подстилающей поверхности на измерительной площадке. Выполнен детальный анализ влияния основных атмосферных факторов на компоненты коротковолнового баланса, а также оценены особенности радиационного режима в 2022 г. Получено, что за счет вариаций аэрозольной оптической толщины потери суммарной радиации варьируются от 37 до 186 Вт/м<sup>2</sup> (или около 18-22%) на разных высотах Солнца при значительном снижении прямого излучения и увеличении рассеянного излучения из-за многократного рассеяния. Выявлено, что высокое альбедо снежной поверхности, меньшее содержание аэрозоля и водяного пара в зимний период приводит к росту суммарной радиации примерно на 45 Вт/м<sup>2</sup> (или на 9%) при высоте Солнца 30 градусов. В то же время коротковолновый радиационный баланс значительно снижается из-за преобладающего влияния высокой отражательной способности снега. Определена нелинейная зависимость облачного пропускания для суммарной радиации и коротковолнового баланса от продолжительности солнечного сияния. В 2023 году продолжены работы по анализу непрерывных измерений потоков биологически активной эритемной радиации и УФ радиации области А. Созданы скрипты для обработки исходных данных измерений, а также проведена работа по сравнению параллельных серий измерений приборов для контроля качества используемых калибровочных констант и результатов измерений. В результате архив измерений биологически активной эритемной радиации дополнен измерениями 2022 года. Оценены месячные аномалии эритемной радиации, которые выявили положительные значения в летний период года (+17%, +13%, +18% в июне, июле, августе, соответственно, относительно средних многолетних значений за период 1999-2019 гг.). Наибольшая положительная аномалия эритемной радиации в августе связывается с высокой продолжительностью солнечного сияния, которая также отразилась в значениях других коротковолновых радиационных потоков. Отрицательные аномалии эритемной радиации в 2022 году по сравнению со средними многолетними значениями за период 1999-2019 гг. наблюдались в сентябре, ноябре и январе (-10%, -25%, -28%, соответственно). Причины отрицательных аномалий эритемной радиации были различны: в сентябре аномалия осуществилась за счет большего поглощения радиации в атмосфере при повышенных значениях общего содержания озона,

отрицательные аномалии эритемной радиации в ноябре и январе связаны с исключительно пасмурными условиями, практически сплошной облачностью (продолжительность солнечного сияния за месяц не превышала 5-9% от возможных значений). Анализ данных измерений эритемной радиации и длинноволновой УФ радиации в области А (315-400 нм) после проведения коррекций на однородность рядов показал, что в летний период солнечная радиация в обоих спектральных диапазонах была выше месячных норм на 10-18% за счет меньшего балла облаков, в то время, как в зимние месяцы, наоборот, отмечались пониженные значения УФР, особенно для эритемной радиации (-9-29%). Длинноволновая УФ радиация ближе к норме в зимний период года. Отмечается синхронность между отклонениями эритемной радиации и УФ радиации области А с коэффициентом корреляции выше 0.9. Модель реконструкции в целом отражает сезонные особенности изменчивости УФ радиации, которые, главным образом, определялись облачностью и озоном (для эритемной радиации). Часть результатов была представлена в докладе "Long-term variability of erythemal UV irradiance according to ground-based and satellite measurements, re-analysis, and CCM modelling over Northern Eurasia" на международном симпозиуме IUGG-2023. (Чубарова Н.Е., Жданова Е.Ю., Полюхов А.А.)

6. Модельный архив данных COSMO-CLM с разрешением ~1 км за период 2007-2016 гг. (май-сентябрь) был использован для исследования влияния городской среды на условия формирования конвективных опасных явлений в Московском регионе в летний период. Для оценки влияния использовалась метрика разности исследуемых величин между экспериментами с учётом и без учёта городской подстилающей поверхности ("URB-noURB"). Выявлено значительное влияние Москвы на экстремальные осадки и максимальную приземную скорость ветра, а также на поля вертикальной скорости и спиральность восходящего потока в слое 2-5 км (UH25), благоприятствующее более высокой частоте и интенсивности конвективных опасных явлений погоды (КОЯП). Значимый эффект был получен для средних суточных сумм осадков, количества дней с осадками >1 мм, повторяемости экстремальных осадков (R20mm, R30mm и более), индексов R95TOT, R99TOT с максимумом над городом и шлейфом на его подветренной стороне (северо-восток). Наиболее яркое увеличение, более 100%, отмечено для повторяемости суточных сумм осадков >30 и 40 мм в пределах города, наиболее плотной застройки. Также показано значимое увеличение повторяемости экстремальных скоростей ветра при учёте городской подстилающей поверхности, в первую очередь в городе (до 100% для порогов 30 и 35 м/с). Рассмотрение событий совместного одновременного появления событий экстремальных скоростей ветра и осадков (т.н. compound events) показало значимое увеличение их повторяемости (до 50%) в эксперименте с учётом городской подстилающей поверхности. Значительное увеличение экстремальных вертикальных скоростей, а также их изменчивости в слое 2-5 км, отражает значительные возмущения вертикального переноса не только в приземном и пограничном слоях, но и над ними. Структура влияния города (разности "URB-noURB") имеет максимумы над центром города, в том числе для случаев интенсивных осадков (>20 мм/сут.), демонстрируя роль вертикального переноса в формировании интенсивных осадков, в том числе при формировании и развитии КОЯП. Влияние города на максимумы UH25 имеет схожую пространственную структуру с максимумом над центром города и шлейфом на северо-восток. Зна-

чимое превышение повторяемости UH25 выше различных порогов также отмечается в экспериментах URB над экспериментами поURB. (Платонов В.С.) 6. Проведено тестирование гипотезы о наличии диагностической связи между вторыми и третьими моментами гидродинамических величин  $s_1$  и  $s_2$  в пограничном слое атмосферы над геометрически сложной поверхностью (Zilitinkevich et al., 1999; Barskov et al., 2023). Для проверки данного соотношения использовался семимесячный ряд высокочастотных наблюдений на микрометеорологической мачте, установленной в Метеорологической обсерватории (МО) МГУ имени М.В.Ломоносова. Исходя из статистического распределения третьих моментов, были определены оптимальные методы для анализа достоверности исследуемой зависимости. Впервые на большом ряде данных была получена статистически обоснованная оценка оправдываемости тестируемой гипотезы в условиях городской подстилающей поверхности. Исследовано влияние условий стратификации, а также характера подстилающей поверхности в области формирования потока на выполнение исследуемой зависимости. Проверяемое соотношение справедливо в 80% случаев. (Степаненко В.М.) III. Исследование ряда объектов, на динамику которых эффективно влияют изменения климата. 1. На основании полевых измерений потоков  $CO_2$  и  $CH_4$  методом экспозиционных камер на участках карбоновых полигонов в Краснодарском крае, Московской области и Чеченской республике получены количественные оценки потоков  $CO_2$  и  $CH_4$  у поверхности почвы в разные сезоны года, а также выявлены зависимости потоков от температуры и влажности почвы. Выявлена значительная пространственная и временная изменчивость потоков, определяемая ландшафтными особенностями исследуемых участков, а также температурой и влажностью почвы. Показано, что почвы на экспериментальных участках в Краснодарском крае и Чеченской республике служат устойчивым стоком  $CH_4$  из атмосферы. Рост температуры почвы в различных интервалах температур может вести к разнонаправленным тенденциям в изменении эмиссии  $CO_2$  и поглощении  $CH_4$  почвой. (Ольчев А.В.) 2. Разработана новая версия трехмерной гидродинамической модели переноса парниковых газов над неоднородной подстилающей поверхностью со сложным рельефом и мозаичной растительностью. Проведено сравнение разработанной модели с результатами пульсационных измерений потоков на лесном болоте в Тверской области. Показано хорошее соответствие измеренных и смоделированных потоков для условий хорошо выраженной турбулентности и разных направлений ветра ( $R^2=0.95$ ,  $p<0.05$ ). (Ольчев А.В.) 3. На основании данных пульсационных и камерных наблюдений на рекультивированном участке карбоновой фермы в Чеченской республике показано преобладающее превышение эмиссии  $CO_2$  над его поглощением в течение всего вегетационного периода. Измерения показали, что диапазон изменения потоков  $CO_2$  на участках полигона в зависимости от атмосферных условий и состояния травянистой растительности изменялся от -1 до 6 мкмоль/(м<sup>2</sup>с). Результаты измерений потоков  $CO_2$  и  $CH_4$  методом экспозиционных камер показали хорошее согласование результатов с измерениями потоков методом турбулентных пульсаций. Потоки  $CH_4$ ,  $N_2O$  и  $NH_3$  значительно варьировали по времени и в пространстве от отрицательных к положительным значениям, определяясь преимущественно температурой и влажностью почвы. (Ольчев А.В.) 4. Проведена оценка влияния экстремальных погодных явлений (значительных положительных и отрицательных аномалий температу-

ры воздуха и осадков) на потоки диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) в лесных экосистемах внетропических широт в Северном полушарии. Для анализа потоков были выбраны 26 станций мониторинга потоков парниковых газов глобальной сети FLUXNET с наиболее продолжительными рядами наблюдений. Показано, что различия в отклике потоков CO<sub>2</sub> на аномалии температур и осадков обусловлены, главным образом, типом лесной экосистемы, ее географическим положением, региональными климатическими условиями, видовым составом и фенологией растительности. Экстремально высокая температура воздуха в любое время года преимущественно приводит к усилению эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферу во всех исследуемых типах лесов, при этом наибольший отклик отмечается в хвойных лесах. Отрицательные аномалии температуры воздуха в теплый период могут оказывать противоположное воздействие, приводя как к увеличению поглощения CO<sub>2</sub> лесными экосистемами, так и к его снижению в зависимости от типа экосистемы. При выпадении интенсивных осадков отмечалась преобладающая эмиссия CO<sub>2</sub> в атмосферу. В то же время, в теплое время года после выпадения большого количества осадков был выявлен кумулятивный эффект накопления влаги в корнеобитаемом слое почвы, в результате которого происходило усиление поглощения CO<sub>2</sub> растительностью на фоне роста скорости фотосинтеза растений в условиях достаточного почвенного увлажнения. Рассчитаны аномалии потоков CO<sub>2</sub> для тундровых сообществ приполярной зоны и проведен анализ их временной динамики. (Гущина Д.Ю.) 5. Параметризация орографической составляющей осадков, разработанная на кафедре метеорологии и климатологии Географического факультета МГУ, относится к «моделям наветренного склона», и основана на вычислении скорости конденсации водяного пара по данным реанализа ERA5. Данная схема представляет собой комбинацию уравнения Клаузиуса-Клапейрона с упрощенным уравнением притока тепла для случая адиабатического охлаждения воздушной частицы, вынужденно поднимающейся вдоль горного склона. Также учитывается крупномасштабная вертикальная скорость, определяемая текущим синоптическим процессом. Специфика предложенной модели - оценка орографической составляющей вертикальной скорости ветра, которая вычисляется из упрощенного варианта уравнения неразрывности, с учетом условиями стратификации атмосферы (в зависимости от частоты Брента-Вяйсяля во влажном воздухе). Также используется эмпирическая связь между температурой и долей сконденсировавшейся влаги, выпадающей в виде осадков. Полученные таким образом значения влагосодержания интегрируются по всему столбу тропосферы, и в результате рассчитывается итоговая сумма осадков на наветренной стороне склона. В течение отчетного года выполнены оценки качества предложенной модели на основе сравнения с данными сетевых метеостанций по территории Северного Кавказа и Алтая. Выполнены расчеты орографического добавка осадков за период 1980 - 2020 гг. с суточным разрешением. Результаты сравнения с горными метеостанциями (Шаджатмаз, Терскол, Клухорский перевал) показали удовлетворительные результаты работы предложенной модели на месячных и сезонных масштабах: коэффициент детерминации для зимнего сезона составляет 0.6 - 0.7, для летнего сезона 0.35 - 0.5. Таким образом, предложенная модель может быть использована для оценок сезонного снегонакопления на горных склонах и на ледниках Кавказа, а в перспективе использоваться в качестве процедуры уточнения осадков в горных районах в рамках Моделей Земной

Системы. Показано, что аномальное таяние ледников Кавказа Алтая и Камчатки определяют антициклональные циркуляции: на Кавказе в основном азорские процессы, на Алтае и на Камчатке – блокирующие антициклоны. То есть основной причиной аномального таяния являются не столько положительные аномалии температуры, сколько продолжительные периоды малооблачных условий. (Торопов П.А.) IV. Развитие методики компьютерного моделирования с помощью моделей атмосферы (COSMO-CLM/ICON-CLM, COSMO-ART, WRF-ARW а также турбулентно-разрешающих) и оценок по базам данных высокого разрешения с целью изучения механизмов формирования экстремумов. 1. Проведена оценка трендов приземных скоростей ветра в Российской Арктике по модельному архиву COSMO-CLM Russian Arctic hindcast (1980–2016 гг.) с шагом сетки ~12 км, покрывающему атлантические моря Российской Арктики и прилегающую акваторию Северной Атлантики (<https://figshare.com/account/home#/collections/5186714>). Для сравнения использовались данные 95 метеостанций из базы данных ВНИИГМИ МЦД, попадающих в пределы области модельного архива. Рассчитывались тренды средних и максимальных скоростей ветра и значений 0.90, 0.95, 0.99 квантилей для всего года и центральных месяцев сезонов: январь, апрель, июль, октябрь. Статистическая значимость трендов оценивалась по t-критерию Стьюдента на уровне 0.95. По данным модельного архива COSMO-CLM Russian Arctic hindcast (1980–2016) отмечены значимые отрицательные тренды средней (до -0.8 м/с за 37 лет) и максимальной скорости ветра над Баренцевым морем и северной Атлантикой в течение года, в особенности в январе (до -0.5 м/с за 10 лет), в июле – в приполярных областях к северу от Карского моря и моря Лаптевых (до -0.4 м/с за 10 лет), в октябре – в Норвежском море (до -1.1 м/с за 10 лет). Значимый рост средней скорости ветра и 0.90–0.99 квантилей отмечается в Карском море и на его побережье, а также в Белом море и Финском заливе, особенно в июле (до 0.7 м/с за 10 лет). Значимое снижение величин квантилей скоростей ветра наблюдается в приполярных областях (до -0.4 м/с за 10 лет для квантиля 0.99), а в июле – также у побережья Белого и в Печорском море (до -0.5 м/с за 10 лет). Значимый рост максимальной скорости ветра отмечается над Восточно-Сибирским морем в октябре (до 0.8 м/с за 10 лет). Над континентами – значимое уменьшение скорости ветра на Таймыре и западе Эвенкии, и рост экстремальных скоростей ветра – на севере Якутии в январе (до 1 м/с за 10 лет). В континентальных районах (в первую очередь на северо-западе ЕТР) значимые отрицательные тренды по станциям оказались не всегда значимыми по модельному архиву, но, когда для обоих случаев тренды значимы, их знак и величина как правило совпадают. Значимость положительных трендов, напротив, обычно переоценивается модельным архивом. Однако, в целом, модельный архив COSMO-CLM Russian Arctic hindcast даёт адекватные оценки трендов сильных скоростей ветра в Российской Арктике, в особенности ценные над акваториями морей, не охваченных стационарными наблюдениями. Также была выполнена оценка трендов скорости ветра по данным глобального реанализа NCEP/CFS (шаг сетки 0.2–0.30) для акватории Карского моря. Для средней скорости ветра получены положительные тренды, которые значимы практически для всей акватории моря (до 0.2 м/с за 10 лет), а для 0.95 квантиля значимы для западной и северо-западной частей моря (до 0.3 м/с за 10 лет). Наибольшие величины трендов как для средней скорости ветра, так и для 0.95 квантиля наблюдаются в Баренце-

вом море, а также на границе Баренцева и Карского морей. (Платонов В.С.)

2. Данные модельного архива COSMO-CLM Russian Arctic hindcast использовались для анализа качества воспроизведения траекторий полярных мезоциклонов (ПМЦ), разработки и реализации алгоритма их идентификации на основе динамических характеристик. Были 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. Составлен сводный календарь ПМЦ, попадающих внутрь модельной области COSMO-CLM Russian Arctic hindcast (436 случаев), послуживший основой для проверки разработанного алгоритма трекинга. Алгоритм подбора кандидатов для трекинга ПМЦ позволяет определять положение центров ПМЦ на основе модельных данных о локальных минимумах давления и максимумах относительной завихренности с различной степенью фильтрации. В результате реализации алгоритма трекинга была создана база данных, содержащая информацию о кандидатах ПМЦ, в том числе: их координаты, значения минимума давления и максимума завихренности, расстояния между кандидатами и координатами по различным календарям, между минимумом давления и максимумом завихренности, значения циркуляции и индексы присутствия кандидатов в фильтрованных полях. Данный алгоритм был также применен к модельному архиву RAS-NAAD для Северной Атлантики, результаты были сравнены с COSMO-CLM Russian Arctic hindcast для территории их пересечения: общее количество центров ПМЦ, полученных путем выбора кандидатов по давлению и завихренности, составило 138 (RAS-NAAD) и 130 (COSMO-CLM), количество центров, определенных только по максимуму завихренности, составило 18 (RAS-NAAD) и 26 (COSMO-CLM). В модельных данных RAS-NAAD для давления выявлен сдвиг в сторону более низких значений в функции плотности вероятности. Распределение завихренности в COSMO-CLM имеет более вытянутый хвост с большими значениями, в то время как распределение в RAS-NAAD обнаруживает больший пик в плотности вероятности. В модельных данных COSMO-CLM центры ПМЦ находятся на большем расстоянии от положений ПМЦ, определенных на основе спутниковых наблюдений, составляя в среднем 100–250 км. В результате применения фильтрации обеспечивается высокая степень сохранения максимумов завихренности в отфильтрованных полях – как в COSMO-CLM RAh (только 8.6% не проявились), так и в RAS-NAAD (11.2%). Однако минимумы давления демонстрируют меньшую степень сохранения, причем различия в этом показателе между двумя модельными архивами являются значительными: 20.7% и 43.1% не проявившихся экстремумов для COSMO-CLM и RAS-NAAD, соответственно. Анализ результатов расчётов на пробной выборке показал применимость алгоритма в качестве вспомогательного инструмента для визуального определения центров ПМЦ в модельных данных. Метод будет использоваться при визуальном трекинге ПМЦ в данных атмосферных моделей, исследований их трёхмерной структуры, механизмов формирования, траекторий перемещения, статистических оценок. (Платонов В.С.)

3. Модельный архив данных COSMO-CLM с разрешением ~1 км за период 2007–2016 гг. (май–сентябрь) был использован для исследования влияния городской среды на условия формирования конвективных опасных явлений в Московском регионе в летний период. Для оценки влияния использовалась метрика разности исследуемых величин между экспериментами с учётом и без учёта город-

ской подстилающей поверхности (“URB-noURB”). Выявлено значительное влияние Москвы на экстремальные осадки и максимальную приземную скорость ветра, а также на поля вертикальной скорости и спиральность восходящего потока в слое 2–5 км (UH25), благоприятствующее более высокой частоте и интенсивности конвективных опасных явлений погоды (КОЯП). Значимый эффект был получен для средних суточных сумм осадков, количества дней с осадками >1 мм, повторяемости экстремальных осадков (R20mm, R30mm и более), индексов R95TOT, R99TOT с максимумом над городом и шлейфом на его подветренной стороне (северо-восток). Наиболее яркое увеличение, более 100%, отмечено для повторяемости суточных сумм осадков >30 и 40 мм в пределах города, наиболее плотной застройки. Также показано значимое увеличение повторяемости экстремальных скоростей ветра при учёте городской подстилающей поверхности, в первую очередь в городе (до 100% для порогов 30 и 35 м/с). Рассмотрение событий совместного одновременного появления событий экстремальных скоростей ветра и осадков (т.н. compound events) показало значимое увеличение их повторяемости (до 50%) в эксперименте с учётом городской подстилающей поверхности. Значительное увеличение экстремальных вертикальных скоростей, а также их изменчивости в слое 2–5 км, отражает значительные возмущения вертикального переноса не только в приземном и пограничном слоях, но и над ними. Структура влияния города (разности “URB-noURB”) имеет максимумы над центром города, в том числе для случаев интенсивных осадков (>20 мм/сут.), демонстрируя роль вертикального переноса в формировании интенсивных осадков, в том числе при формировании и развитии КОЯП. Влияние города на максимумы UH25 имеет схожую пространственную структуру с максимумом над центром города и шлейфом на северо-восток. Значимое превышение повторяемости UH25 выше различных порогов также отмечается в экспериментах URB над экспериментами noURB. (Платонов В.С.) 4. Были проведены серии модельных экспериментов COSMO-CLM по воспроизведению случаев интенсивных осадков в Московском регионе 29–31 мая 2020 г. и 28–29 июня 2021 г. Эксперименты проводились по схеме «вложенных сеток», базовая расчетная область имела шаг сетки 0,027° (~3 км, 500\*500 узлов), вложенная – с шагом сетки 0,009° (~1 км, 200\*200 узлов) с различной заблаговременностью и продолжительностью (4 и 6 дней). На вложенном домене использовалась параметризация городского полога TERRA-URB с актуальными данными о городской застройке. Оценка качества воспроизведения осадков моделью проводилась сравнением с данными сети стационарных наблюдений, а также с данными сети МРЛ – методом FSS. Кроме того, оценивалось воспроизведение моделью индексов неустойчивости атмосферы, являющихся индикаторами формирования интенсивных осадков. Сравнение экспериментов с различной заблаговременностью показало, что при более длительном эксперименте сглаживаются поля давления и осадков, суммы осадков становятся меньше на 1–2 мм, сдвигается время выпадения осадков (в основном на 15–30 минут). Индексы K и SWEAT наилучшим образом воспроизвели потенциал атмосферы для формирования ОЯ, а хуже всего показал себя индекс VT. Индекс UH25 хоть и не продемонстрировал критических значений, но воспроизвел траектории прохождения холодного фронта и фронта окклюзии. Привлечение радарных данных и использование метода пространственной верификации FSS позволило количественно оценить воспроизведение моделью краткосрочных интен-

сивностей осадков, их суточных сумм, а также пространственно-временную динамику поля осадков и соответствующие смещения зон интенсивности, как источников ошибок моделирования. Показано, что в большинстве рассмотренных случаев модель воспроизводила систему осадков смещённой по времени относительно реальности, а в случаях успешной синхронизации зачастую занижала интенсивность осадков. При этом, пространственное распределение малых интенсивностей в большинстве случаев воспроизводилось успешно, а структуру полей высокой интенсивности удалось уловить только в одном из рассмотренных случаев. При этом, на масштабах часовых и суточных сумм успешность воспроизведения сумм осадков моделью была значительно выше. (Платонов В.С.)

5. Проведена оценка способности различных версий климатической модели Института вычислительной математики РАН воспроизводить явление Эль-Ниньо в исторических прогнозах за период 1850-2014гг. Осуществлено сравнение результатов, полученных по моделям INM-CM5-0, INM-CM6-L (версии 2022 и 2023 гг.) и модели INM-CM6-M (по данным исторического эксперимента) с данными реанализа (HadISST), а также результатами моделей CMIP6. По картам распределения EOF1 и EOF2 выделены границы «модельных» районов Nino3 (максимум EOF1) и Nino4 (максимум EOF2). Показано, что модель INM-CM6-M практически точно воспроизводит локализацию региона ВТ Эль-Ниньо, и гораздо лучше воспроизводит локализацию региона ЦТ Эль-Ниньо по сравнению с предыдущими версиями модели. Также показано, что все модели INM достаточно плохо воспроизводят коэффициенты квадратичной аппроксимации в диаграмме рассеяния коэффициентов PC1 и PC2 при первых двух модах EOF-разложения АТПО. Это означает, что они слабо разделяют явления Эль-Ниньо ЦТ и ВТ типов. Картины E- и C-паттернов в модели INM-CM6-M воспроизводятся лучше, чем в предыдущих версиях. Также версия INM-CM6-M намного лучше воспроизводит статистику явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья ЦТ типа, особенно повторяемость явлений. Наиболее реалистичная сезонность явлений Эль-Ниньо наблюдалась в модели INM-CM6-L версии 2023г. (Мухартова Ю.В.)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты научно-исследовательской работы опубликованы в журналах (20 статей), индексируемых в базе данных "Сеть науки" (WEB of Science), в базе данных Российский индекс научного цитирования (ВАК) и других российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования (GoogleScholar, European Reference Index for the Humanities, MathSciNet и др.). А также доложены на международных и всероссийских конференциях (61 доклад). В текущем году опубликован одна книга. План по теме «Погодные и климатические процессы различных пространственно-временных масштабов в условиях антропогенного воздействия» (ГЗ) выполнен.

ПРИЛОЖЕНИЕ А  
Объем финансирования темы в 2023 году  
Таблица А.1

Источник финанси- рования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами
Денежные сред- ства в виде субси- дии на выполнение фундаментальных научных исследо- ваний в соответ- ствии с госзадани- ем МГУ, часть 2 (р. 01 10)	16 658 117	16 658 117