

УДК 551.513:519.6

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ В 2019–2022 гг.

© 2023 г. И. А. Репина^{a, b, *}

^aИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., д. 3, Москва, 119017 Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, ул. Ленинские Горы, д. 1, стр. 4, Москва, 119234 Россия

*e-mail: repina@ifaran.ru

Поступила в редакцию 03.09.2023 г.

После доработки 09.11.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

Обзор содержит наиболее значимые результаты работ российских ученых в области динамической метеорологии, выполненных в 2019–2022 гг. Он является частью Национального отчета России по метеорологии и атмосферным наукам, подготовленного для Международной ассоциации метеорологии и атмосферных наук (IAMAS). К обзору прилагается список основных публикаций российских ученых по динамической метеорологии за 2019–2022 гг.

Ключевые слова: динамическая метеорология, динамика атмосферы, мезомасштабные процессы, турбулентность, прогноз погоды, тропосфера, средняя и верхняя атмосфера, климат, математическое моделирование

DOI: 10.31857/S0002351523070118, **EDN:** NYBZJC

ВВЕДЕНИЕ

Динамическая метеорология традиционно является одним из наиболее развивающихся направлений в области наук о земле. Развитие методов прогноза погоды и климата, математических моделей Земной системы, численного моделирования гидродинамических процессов требует развития как теоретических, так и экспериментальных методов исследования динамики атмосферы.

Работы российских ученых, выполненные в области динамической метеорологии в 2019–2022 гг. и обсуждаемые в данном обзоре, можно условно разбить по следующим часто пересекающимся между собой темам: “Общая динамика атмосферы”, “Крупномасштабные процессы и прогноз погоды”, “Мезомасштабные процессы”, “Мелкомасштабные движения и турбулентность в пограничном слое атмосферы”, “Динамическое взаимодействие нижних, средних и верхних слоев атмосферы”, “Численное моделирование климата”. Структура обзора следует, в основном, предшествующему обзору 2015–2018 гг. [Курганский, Крупчатников, 2019].

Внимание к проблемам динамической метеорологии подтверждается проведение специализированных конференций. Основной площадкой для обсуждения вопросов, связанных с ролью разномасштабных процессов в динамике атмосферы и океана является всероссийская конфе-

ренция с международным участием “Турбулентность, атмосфера и динамика климата”, посвященная памяти академика А.М. Обухова. За представленный период она проходила дважды — в ноябре 2020 и 2022 гг. На конференции обсуждались ключевые вопросы, связанные с одним из наиболее актуальных направлений в науках о Земле, а именно исследованиями в области физики атмосферы, климата и окружающей среды. Отдельные доклады конференции были опубликованы в сборнике [Turbulence, Atmospheric and Climate Dynamics, 2022]. Среди российских конференций, посвященных динамике атмосферы, также стоит отметить ежегодные конференции ENVIROMIS (CITES) и Международный симпозиум “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы”. Симпозиум “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы” проводится ежегодно в Москве или Томске по следующим направлениям: молекулярная спектроскопия и атмосферно-радиационные процессы, распространение оптического излучения в атмосфере и океане, оптические исследования атмосферы и океана, физика тропосферы, физика средней и верхней атмосферы [Romanovski, Kharchenko, 2022]. Междисциплинарная конференция ENVIROMIS (четные годы в Томске, нечетные годы (CITES) в Москве), включающая и Школу молодых ученых, посвящена использованию современных методов наблюдения и вычислительных и информационных

технологий для оценки состояния и прогноза изменений окружающей среды Северной Евразии под воздействием природных и антропогенных факторов, в том числе вызванных глобальным изменением климата. Также решается крайне важная проблема — содействие росту профессионального мастерства молодых ученых [Gordov et al., 2020].

1. ОБЩАЯ ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ

За отчетный период было опубликовано несколько монографий, посвященных динамике атмосферы.

В книге Г.С. Голицына [Голицын, 2021] на основе теории Колмогорова рассмотрены землетрясения с их параметром подобия, спектры морского ветрового волнения, энергетический спектр космических лучей; объяснены природа рельефов поверхностей небесных тел (правило Каулы), природа ураганов и сходных вихрей с оценкой их мощностей, законы затопления осадками земной поверхности; дан вывод основных законов конвекции, в том числе во вращающейся жидкости. Эти закономерности десятки лет оставались эмпирическими, но использование законов теории вероятностей возводит их в ранг законов природы. Подобные методы могут быть использованы и в других областях знаний.

Основное внимание в книге [Polonsky, 2019] уделяется физическим процессам в Мировом океане, которые регулируют межгодовую и декадную естественную изменчивость климатической системы, а также ключевым проявлениям этой изменчивости в динамике атмосферы и океана. Оценена роль океана в недавнем перерыве глобального потепления и вероятность резкого изменения климата из-за термохалинной катастрофы. Особое внимание в книге уделено изменению параметров синоптических атмосферных возмущений над Северным полушарием и его субрегионами в разные фазы естественных квазипериодических климатических сигналов.

В книге [Климат Арктики..., 2022] представлены результаты исследований климата Арктики, выполненные в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН в сотрудничестве с другими научными институтами. В первой части приведены результаты анализа эмпирических данных для различных составляющих климатической системы Арктики: атмосферы, морских льдов, океана и суши с оценкой современных тенденций изменения. Во второй части рассмотрены характерные процессы и обратные связи в арктической климатической системе, важные для формирования долгопериодных аномалий климата в Арктике, а также механизмы влияния изменений климата в Арктике на циркуляцию атмосферы в средних широтах Северного полушария. В третьей части приведены оценки возможных бу-

дущих изменений климата в Арктике по результатам численных расчетов с моделями климата при сценариях антропогенного воздействия, а также влияния этих изменений на продолжительность морской навигации вдоль Северного морского пути, морское волнение, характеристики многолетнемерзлых грунтов и распад придонных метангидратов.

Книга [Исследование природной среды..., 2021] посвящена исследованиям природной среды острова Большевик архипелага Северная Земля и прилегающих акваторий пролива Шокальского, возобновленных в 2013 г. на научно-исследовательской станции “Ледовая база Мыс Баранов” Арктического и антарктического НИИ Росгидромета. Представлены результаты изучения химического состава осадков, данные океанографических наблюдений в проливе Шокальского, результаты исследований морфологических и физико-механических свойств припая, включая описание технологии наблюдения за характеристиками ледяного покрова. Представлены результаты гидрологических, гляциологических и палеогеографических исследований на прилегающей к станции территории острова Большевик. Книга призвана показать состояние природной среды этого высокоширотного региона в условиях быстро меняющегося климата Арктики.

В книге [The Republic of Adygea Environment, ed. Bedanokov, Lebedev, Kostianoy, 2022] изложено современное состояние окружающей среды и особенности атмосферной динамики Республики Адыгея в России. В книге дана оценка экологических условий, экологического состояния, изменения климата и растительности, антропогенной нагрузки на почву, воду и атмосферу, а также освещен потенциал водных ресурсов, возобновляемых источников энергии и развития туризма, сельского хозяйства и промышленности в этом регионе.

Динамика атмосферы полярных регионов традиционно привлекает внимание исследователей.

На основе среднемесячных данных реанализа ERA-Interim (1979–2014 гг.) получены оценки вертикального градиента температуры в тропосфере высоких широт Северного полушария и анализ его связи с приповерхностной температурой для разных сезонов [Акперов и др., 2019a]. Проведен анализ способности региональной климатической модели HIRHAM5 воспроизводить особенности распределения вертикального градиента температуры в тропосфере в арктических широтах и параметра чувствительности к изменению приповерхностной температуры. Отмечены региональные особенности связи вертикальной стратификации температуры в тропосфере с индексом арктического колебания. Полученные по данным реанализа и модельным расчетам оценки имеют особую значимость в связи с более высокой изменчивостью и чувствительностью клима-

та арктических широт при глобальных изменениях, что характеризуется так называемым арктическим усилением.

Статическая устойчивость атмосферы является важным индикатором пространственной и временной изменчивости полярных мезоциклонов в Арктическом регионе. Для анализа были использованы результаты ансамблевого моделирования региональных климатических моделей (RCM) HIRHAM/NAOSIM за период с 1979 по 2016 гг. [Акперов et al., 2019]. Был проведен анализ 10 ансамблевых моделей с идентичными граничными условиями и одинаковым радиационным воздействием для Арктики.

В работе по данным климатического моделирования [Акперов и др., 2019б] установлено, что существует сильная связь между изменениями состояния океанических вод и притоком океанского тепла, концентрацией морского льда и температурой приземного воздуха в Баренцевом море. При этом увеличение притока океанических вод в Баренцево море зимой приводит к снижению статической устойчивости, что способствует изменению региональной циклонической активности. Снижение статической устойчивости наиболее выражено в южной части Баренцева моря, а также к западу от Шпицбергена.

Проведен глобальный анализ географических особенностей вертикальных профилей удельной влажности воздуха и концентраций диоксида серы и сульфатных аэрозолей по данным реанализа CAMS, а также высоты планетарного пограничного слоя (ППС) по данным реанализа ERA5 для 2003–2020 гг. [Елисеев и др., 2022]. Максимумы высоты верхней границы ППС отмечены в регионах преобладающей циклонической циркуляции — в шторм-треках и в регионах муссонной циркуляции летом. Для вертикального масштаба профиля удельной влажности выявлены минимумы в регионах субтропических круговоротов с преобладающим крупномасштабным опусканием воздушных масс. Вертикальный масштаб профиля концентрации SO_2 характеризуется пространственными минимумами, связанными с окислением диоксида серы. Выявлены статистически значимая отрицательная корреляция между толщиной ППС и вертикальным масштабом профиля удельной влажности во влажных регионах тропиков, а также положительная корреляция между вертикальными масштабами профилей концентраций диоксида серы и сульфатов, наиболее значимо проявляющаяся в регионах с сильным загрязнением нижней тропосферы этими веществами.

В работе [Махотина и др., 2021] приводятся результаты анализа измерений облакомера на станциях “Северный Полюс”-37, 39 и 40. Анализ показал, что радиационный эффект облачности существенно отличается от станции к станции, как и повторяемость облачности и ее влияние на температурный режим. Эти различия могут стать

предметом дальнейших исследований взаимосвязи характеристик облачности с другими процессами в климатической системе Арктики.

Северная Атлантика — один из ключевых регионов формирования низкочастотной изменчивости климата. Но, несмотря на многочисленные исследования, связанные с этой темой, некоторые вопросы до сих пор остаются нерешенными. Одним из них является неоднозначная взаимная корреляция температуры поверхности моря в Северной Атлантике и интенсивности Атлантической меридиональной опрокидывающей циркуляции. В исследовании [Bekryaev et al., 2019] были проанализированы функции взаимной корреляции основных климатических индексов Северной Атлантики, полученные на основе простой стохастической модели. Установлено, что связь основных арктических индексов зависит от океанических обратных связей и интенсивности диссипации. Анализируя контрольные эксперименты CMIP5, [Bekryaev, 2019b] продемонстрировал, что наблюдаемые фазовые сдвиги между температурой поверхности моря в Арктике и поверхностными тепловыми потоками не противоречат стохастической теории. Долгосрочная изменчивость в Северной Атлантике может быть вызвана преобразованием атмосферного случайного воздействия, но роль процессов циркуляции океана остается решающей.

В работе [Бекряев, 2022] рассматриваются статистические проблемы количественной оценки полярного усиления изменений климата. Теоретически исследована плотность распределения выборочного коэффициента полярного усиления, определяемого как отношение коэффициентов линейных трендов пространственно-осредненной температуры воздуха. Статистически обоснованная количественная оценка полярного усиления по результатам ансамблевого воспроизведения изменений климата может быть получена на основе метода Филлера, применение которого рассмотрено в условиях нестационарного отклика климатической системы на внешнее воздействие.

В работе [Акперов и др., 2022] получены количественные оценки изменений ветроэнергетических ресурсов в Арктике с использованием региональной климатической модели (PKM) RCA4 при сценариях изменения климата RCP4.5 и RCP8.5 для 2006–2099 гг. Проанализирована мощность ветроэнергетического потенциала, пропорциональная кубу скорости ветра. По расчетам с помощью PKM RCA4 для XXI в. при обоих сценариях антропогенных воздействий отмечено, в частности, заметное увеличение мощности ветрового потока над Баренцевым, Карским и Чукотским морями зимой. Летом проявляется его общее увеличение над Северным Ледовитым океаном. При этом изменения больше при сценарии RCP8.5 с сильными антропогенными воздействиями для

XXI века. Согласно полученным модельным оценкам, увеличение межсуточных вариаций мощности ветрового потока в целом не приводит к отклонениям скорости ветра до значений, при которых работа ветрогенераторов невозможна.

В работе [Демчев и др., 2020] приведены результаты верификации данных о приповерхностной температуре воздуха реанализов ERA-Interim и ERA5 по результатам измерений, полученным с дрейфующих буев, наземных метеостанций, а также впервые — по данным измерений, выполненных на дрейфующих станциях “Северный полюс”. Последние не ассимилировались ни в одном из рассматриваемых реанализов, что дает редкую возможность для независимой валидации.

На основе данных численного моделирования циркуляции вод Охотского моря с 1986 по 2015 гг. исследован ее отклик у северо-восточного побережья о. Сахалин на прохождение глубоких циклонов [Дианский и др., 2022]. Проведена классификация экстремальных атмосферных синоптических ситуаций, связанных с интенсивной циклонической активностью над Охотским морем в холодный период года. Установлено, что высокая скорость перемещения характерна для циклонов, приходящих на акваторию моря со стороны о. Сахалин, а скорость ветра на периферии больше для циклонов, приходящих на акваторию Охотского моря с юга и юго-запада. Анализ отклика циркуляции вод у северо-восточного побережья о. Сахалин позволил заключить, что для всех типов циклонов на шельфе меридиональная составляющая скорости течений увеличивалась в несколько раз от поверхности до дна.

В работах [Ingel, Makosko, 2021; Ингель и Макоско, 2021a, 2021b] рассматривается теоретическая задача о линейных стационарных возмущениях, вносимых пространственными неоднородностями гравитационного поля в фоновый геострофический поток стратифицированной вращающейся среды (атмосферы). Впервые рассматривается трехмерная аналитическая модель [Ингель, Макоско, 2021a]. Неоднородности поля силы тяжести, деформируя поля давления, плотности и температуры воздуха, влияют на температурный режим пограничного слоя атмосферы, на теплообмен воздуха с подстилающей поверхностью. Получены аналитические выражения для профилей температурных возмущений и амплитуд отклонений вертикальных потоков тепла на поверхности. Последние, помимо амплитуд неоднородностей поля силы тяжести, наиболее сильно зависят от фоновой стратификации среды. В работе [Ingel, Makosko, 2021] рассмотрена стационарная аналитическая модель, предназначенная для оценки амплитуд этих эффектов, в результате которой получены аналитические выражения для профилей температурных возмущений и амплитуд отклонений вертикальных тепловых потоков на поверхностях.

Особое внимание уделено спутниковым методам изучения атмосферных процессов. В работе [Стерлядкин и др., 2022] на базе нового метода спутникового радиотепловидения, который позволяет на основе анализа восстанавливаемой динамики полей интегрального влагосодержания рассчитывать потоки водяного пара над океанами, оценена точность восстановления полей содержания водяного пара над сушей в районе водосбора р. Амур. Проведенные оценки позволяют рассчитать баланс атмосферной воды над выделенной территорией: запасенного над поверхностью водяного пара, количество воды, вошедшей или вышедшей через границы водосбора, и определить количество выпавших осадков за любой выбранный интервал времени. Предложены способы проверки точности разработанного метода сравнением с данными наземных радиозондовых измерений, наземных метеостанций, измеряющих количество выпавших осадков, и данными наземных метеорологических радиолокаторов. Проведенный анализ показывает, что определение количества выпавших осадков над территорией бассейна крупных рек, основанное на многоканальных радиометрических микроволновых измерениях из космоса, вполне возможно.

В работе [Ermakov et al., 2021] впервые приведены результаты прямых сравнений длинных (5 лет) временных рядов зональных вертикально интегрированных суточных потоков водяного пара по данным радиозондов, реанализа и спутникового радиотепловидения. Показано, что все ряды данных статистически достоверно коррелируют (при доверительной вероятности 0.995).

В статьях [Ermakov et al., 2019a, 2019b] представлен алгоритм построения глобальных радиотепловых полей океана и атмосферы с высокой пространственно-временной дискретизацией по спутниковым микроволновым измерениям. Программное обеспечение, реализующее описанный алгоритм, позволяет получать глобальные анимированные радиотепловые поля с шагом по времени 1.5 часа и пространственным разрешением 0.2° . Эти параметры необходимы для анализа сложных, быстрых и энергоемких процессов, происходящих в системе океан—атмосфера, таких как, например, формирование и эволюция тропических циклонов.

В ряде статей обсуждались теоретические вопросы динамики атмосферы.

Разработан аналитический подход к определению оптимальных возмущений [Kalashnik, Chkhetiani, 2020a], основанный на уравнении баланса энергии возмущений и явных выражениях для скорости роста энергии или отношения конечной и начальной энергии. В рамках подхода рассматриваются классическая задача Рэля о неустойчивости свободного сдвигового слоя и задача о неустойчивости системы, состоящей из двух встречных струйных потоков во вращающемся слое мелкой воды. Параметры оптимальных возмуще-

ний сравниваются с параметрами растущих нормальных режимов. Изучена бароклинная неустойчивость течения с постоянным вертикальным сдвигом в зональном русле [Kalashnik, Chkhetiani, 2020b]. Для описания динамики возмущений потока использовалась максимально усеченная SQG-модель. В рамках этой модели сформулирована динамическая система, описывающая нелинейные взаимодействия неустойчивых встречных волн Россби с одним зональным волновым числом и нейтральной модой, не зависящей от зональной координаты. Как аналитическое, так и численное решение системы показывает, что экспоненциально нарастающие возмущения на линейной стадии развития неустойчивости сменяются нелинейными колебаниями. По численным оценкам период колебаний составляет порядка месяца, что согласуется с данными измерений, полученными для зимней атмосферы.

В качестве показателя межгодовой климатической изменчивости атмосферы предлагается рассчитывать средневзвешенный по площади полушария поток вертикальной спиральности через верхнюю границу планетарного пограничного слоя, который определяется на произведение параметра Кориолиса на квадрат скорости ветра на этой границе [Kurgansky et al., 2020]. Показано, что введенный индекс хорошо характеризует межгодовую изменчивость климата атмосферы обоих полушарий.

В статье [Kalashnik et al., 2021] сформулированы новые вертикальные дискретные версии поверхностной квазигеострофической модели с двумя границами. Исследовалась линейная устойчивость струйных течений, индуцированная кусочно-постоянными граничными распределениями плавучести. Для этих течений получены аналитические выражения для скорости роста возмущений и показано, что наиболее неустойчивое возмущение имеет длину волны порядка бароклинного радиуса деформации Россби. Также рассматриваются течения с вертикальным сдвигом, вызванным плавным и медленно меняющимся граничным распределением плавучести. Установлено, что неустойчивость этих течений абсолютна, т. е. не зависит от горизонтальной структуры профиля скорости.

Возможность существования различных режимов баротропной циркуляции в закрытых кольцевых каналах при одних и тех же внешних параметрах, определяющих динамику течения, исследуется как экспериментально, так и численно в работе [Gledzer et al., 2021]. В численных экспериментах возможны следующие результаты. 1. Начальный и конечный режимы количественно различаются по числу генерируемых циклонических и антициклонических вихрей. 2. Число вихревых образований не меняется, но меняется их локализация в пространстве, например угловые координаты их центров. 3. После изменения и восстановления исходного значения управляющего параметра течение возвращается к режиму, практически неот-

личимому от исходного. Представлены схемы течения и соответствующие диаграммы для лабораторных экспериментов и численного моделирования на основе уравнений мелкой воды.

В статье [Калашник, 2019] рассмотрена задача об устойчивости струйного течения с кусочно-линейным профилем скорости в стратифицированной вращающейся атмосфере. Показано, что течение, устойчивое в рамках квазигеострофического приближения, становится неустойчивым за счет излучения инерционно-гравитационных волн.

В работе [Калашник и др., 2022] представлены современные теоретические подходы к исследованию бароклинной неустойчивости, с которой связана генерация крупномасштабных вихревых потоков в атмосферах Земли и других планет. Рассмотрены также классические энергетические критерии устойчивости зональных течений, полученные с помощью прямого метода Ляпунова—Арнольда.

В статье [Kalashnik, 2020] рассматриваются поверхностные квазигеострофические течения с горизонтальным масштабом, значительно большим, чем радиус деформации Россби. Для описания динамики таких потоков предлагается новая версия модели SQG с двумя границами, сводящаяся к нелинейной системе уравнений в частных производных. В рамках этой системы получены решения ряда задач теории бароклинной неустойчивости, согласующиеся с уже известными решениями. В рамках двухуровневой модели SQG исследуется гидродинамическая устойчивость пространственно-периодического течения с синусоидальным профилем скорости (колмогоровского течения). Подобные пространственно-квазипериодические потоки часто наблюдаются в атмосферах планет-гигантов и в Южном океане [Kalashnik et al., 2021]. Для описания динамики возмущений использовался метод Галеркина с тремя базисными тригонометрическими функциями. Показано, что использование этого варианта упрощает исследование устойчивости и приводит к асимптотически правильным результатам. В рамках этой модели рассматриваются задачи линейной и нелинейной устойчивости зональных пространственно-периодических течений [Kalashnik et al., 2020].

В работе [Калашник, Куличков, 2019] рассмотрена задача о возмущениях приземного давления, вызываемых движущимся, нестационарным источником тепла, локализованным по одной горизонтальной координате и периодическим по другой. Возмущения давления связаны с внутренними гравитационными волнами (ВГВ). Показано, что при движении источника в слое атмосферы конечной высоты (атмосферном волноводе), когда возбуждается дискретный набор вертикальных мод ВГВ, возможны три типа временного хода приземного давления в фиксированной точке наблюдения. Каждый из типов реализуется для

определенных значений частоты колебаний источника и числа Маха (отношения скорости движения источника к фазовой скорости ВГВ). Движение источника в полуграниченной атмосфере приводит к дополнительному возбуждению волн, переносящих энергию в верхние слои атмосферы.

Влияние трения Экмана на динамику зональных потоков (ЗП) исследовано в рамках квазигеострофической модели атмосферы с двумя горизонтальными границами (подстилающая поверхность и тропопауза) [Калашник, 2020]. Показано, что в случае периодических распределений противоположно направленный вертикальный профиль скорости ЗФ трансформируется в однопольный профиль с максимальной скоростью на верхней границе и нулевой скоростью на нижней границе. Возникающее течение представляет собой струю, прижатую к верхней границе, которую можно считать прототипом западного верхнего тропосферного струйного течения. Важные особенности строения такой струи, устанавливаемые в рамках полной негеострофической модели, связаны с горизонтальной асимметрией струи и образованием фронтов (поверхностей разрыва), примыкающих к верхней границе.

Исследована гидродинамическая неустойчивость системы вертикальных движений, инициируемых пространственно-периодическим распределением источников тепла [Kalashnik, Kurgansky, 2020]. Установлено, что вертикальные движения неустойчивы в отсутствие диссипации, если число Ричардсона меньше $1/8$. Разработана слабонелинейная модель невязкой неустойчивости. Показано, что потеря устойчивости при наличии диссипации может привести к формированию как стационарного, так и осциллирующего во времени вторичного течения с нетривиальной топологией линий тока.

Уравнения траекторий выведены для описания нелинейной эволюции тонких струй, генерируемых температурными фронтами [Goncharov, 2021a]. Найдены частные решения в виде установившейся меандрирующей струи, остроконечной струи и двурукавной спирали.

Модель мелкой воды с горизонтально-неоднородной плотностью используется для изучения динамики струйных течений, возникающих под действием плавучести и силы Кориолиса [Goncharov, 2021b]. В рамках этого подхода струя описывается автомодельным компактно-локализованным решением и интерпретируется как полоса сдвигового течения, имеющая температурный контраст с окружающей жидкостью. Теория предсказывает, что период пульсаций теплых струй больше периода инерционных колебаний, вызванных вращением Земли, а пульсаций холодных струй короче. Таким образом, только теплые струи могут оказать заметное влияние на динамику атмосферы в синоптическом диапазоне.

В работе [Kurgansky et al., 2020a] приведены результаты лабораторных экспериментов с вращающимся цилиндрическим кольцом, в которых обнаружена прогрессивная струя, примыкающая к (продольно) либрирующей внутренней прямой цилиндрической стенке. Здесь либрация стенки реализуется как гармоническая по времени модуляция скорости вращения внутреннего цилиндра. Предложена простая аналитическая модель, которая способна предсказать величину и пространственную структуру возникающей пристеночной струи с точки зрения нелинейности, присущей динамике пограничного слоя внутреннего цилиндра.

В работе [Kurgansky, 2021a] исследуется линейная и нелинейная инерционная устойчивость колмогоровского течения во вращающейся вязкой жидкости однородной плотности. Необходимым условием неустойчивости является нарушение критерия невязкой инерционной устойчивости, а достаточное условие неустойчивости формулируется в терминах критерия Рейнольдса. Более подробно изучен случай чисел Прандтля, меньших или равных единице, когда существует вторичный стационарный режим, который может быть неустойчивым (в отличие от случая однородной по плотности жидкости) и устойчивой стратификацией плотности дестабилизирующий фактор.

В статье [Курганский, 2022a] показана возможность неустойчивости при меньших сдвигах скорости, чем на это указывает критерий инерционной устойчивости стационарного течения такой же амплитуды скорости. С использованием теории Флоке, приближений Галеркина и метода (обобщенных) цепных дробей вновь рассматривается проблема линейной устойчивости стратифицированного колмогоровского течения, движимого синусоидальной в пространстве силой в вязкой диффузионной жидкости Буссинеска [Kurgansky, 2022b]. Высказано предположение, что коротковолновая неустойчивость стратифицированного колмогоровского течения обусловлена резонансным усилением доплеровско-смещенных внутренних гравитационных волновых мод при наличии критических уровней основного течения, которые не учитываются при доказательстве закона Майлза–Ховарда. Также исследована инерционная параметрическая неустойчивость нестационарного пространственно-периодического течения (колмогоровского течения) во вращающейся стратифицированной жидкости Буссинеска с полным учетом силы Кориолиса в задаче и с возможностью произвольной ориентации течения в горизонтальной плоскости. [Kurgansky, 2022c]. В частности, оценки неустойчивости получены для слабо стратифицированных геофизических сред, например для глубоких слоев океана, и предполагается, что возможные приложения теории также могут быть напрямую связаны с лабораторным экспериментом.

В работе [Zagumennyi, Chashechkin, 2019] численно исследована структура и динамика течения вокруг горизонтальной и наклонной пластины при нестационарном вихревом режиме течения как для стратифицированной, так и для однородной жидкости при различных геометрических модификациях передней и задней стенок и различных углах наклона. Проанализированы нестационарные закономерности полей завихренности, градиентов давления и плотности, а также значений сил и моментов, действующих на поверхность пластины при различных углах наклона и значениях радиуса скругления передней кромки пластины и коэффициента остроты ее задней кромки. Особое внимание уделено изучению тонкой структуры течения вокруг передней кромки пластины, которая является наиболее многомасштабной областью течения, где формируются и активно взаимодействуют друг с другом и со набегающим потоком как крупномасштабные, так и мелкомасштабные вихревые элементы. Волновая и вихревая тонкая структура нестационарных стратифицированных течений исследована численно на основе системы фундаментальных уравнений для неоднородной несжимаемой жидкости с граничными условиями прилипания и непротекания и экспериментально с использованием методов визуализации высокого разрешения [Chashechkin, Zagumennyi, 2019]. Предложена классификация компонентов течения, включающая волны, вихри и связки, проявляющиеся в виде протяженных границ раздела, поперечные масштабы которых определяются диссипативными свойствами жидкости и динамикой течения. Движущееся тело в стратифицированной жидкости создает восходящие возмущения, группы присоединенных внутренних волн, передние вихри и вихревую дорожку в следе, которые сосуществуют в стратифицированном потоке как единое целое и разделены связками. Численные и экспериментальные визуализации диффузионных течений, внутренних волн, вихревых дорожек и тонких структурных связок качественно согласуются друг с другом.

На основе фундаментальной системы, включающей уравнения неразрывности, импульса и переноса вещества с линеаризованным уравнением состояния, разработаны методы экспериментального и численного исследования визуализации полей возмущений потока, порождаемых равномерным горизонтальным движением вертикальной пластины в стратифицированной среде [Chashechkin, Zagumennyi, 2020]. Результаты наблюдений и расчетов находятся в хорошем качественном и количественном согласии друг с другом. Экспериментальное исследование было подтверждено видеозаписью течения в высоком разрешении [Chashechkin, 2020]. Образование мелких компонент течения связано с высвобождением доступной потенциальной энергии и сохранени-

ем возмущений в тонком “двойном слое”, расположенном вблизи исходных контактных поверхностей. Взаимодействие падающей капли (разбавленного водного раствора чернил различной концентрации) с целевой жидкостью (частично дегазированной водопроводной водой) отслеживалось с помощью видеосъемки и фотосъемки высокого разрешения [Chashechkin, Ilynykh, 2020].

На основе численных и экспериментальных методов визуализации исследованы картины обтекания равномерно движущейся пластины, расположенной под произвольным углом атаки [Chashechkin, Zagumennyi, 2021]. Исследование основано на фундаментальных уравнениях переноса неразрывности, импульса и расслаивающегося вещества для случаев сильно и слабо стратифицированных однородных жидкостей. Анализ проводился в единой математической постановке для широкого диапазона параметров движения пластин, включая медленные диффузионные течения и быстрые нестационарные вихревые течения. Описаны закономерности формирования и последующей эволюции основных структурных составляющих: восходящих возмущений, нисходящего следа, внутренних волн, вихрей и связок как в начале движения, так и в последующем равномерном движении пластины. Численные и экспериментальные результаты по картинам течения вокруг пластины хорошо согласуются друг с другом для различных режимов течения. Методами теории сингулярных возмущений в линейном и слабонелинейном приближениях рассмотрена задача генерации пучков периодических внутренних волн в вязкой экспоненциально стратифицированной жидкости полосой, колеблющейся вдоль наклонной плоскости [Chashechkin, 2021]. Сделанные оценки показывают, что амплитуды таких волн достаточно велики, чтобы их можно было наблюдать в лабораторных условиях.

Модель используется для анализа характеристик траектории штормов в Северном полушарии в зимний сезон. Результаты показывают схожие особенности траекторий штормов в Северной Атлантике и Северной части Тихого океана, которые доминируют в Северном полушарии в моделировании и данных реанализа [Vargin et al., 2019].

2. КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ПРОГНОЗ ПОГОДЫ

Обзор работ, посвященных вопросам влияния обледенения на работу воздушного транспорта, представлен в [Иванова, 2021]. Обсуждаются проблемы наземного обледенения, приводящего к ухудшению состояния взлетно-посадочных полос и усложнению предполетных аэродромных работ. Рассматриваются причины обледенения воздушных судов в полете, средства и методы наблюдения за обледенением, подходы к прогнозированию обледенения в облаках и осадках. Анализи-

руются методы прогноза обледенения двигателей воздушных судов в зонах высокой концентрации ледяных кристаллов. В работе [Иванова и др., 2022] предложен метод прогноза обледенения воздушных судов в полете над территорией Российской Федерации с заблаговременностью до 12 ч на базе выходной продукции конфигурации COSMO-Ru модели COSMO с шагом 6.6 км. Для выделения обледенения сильной интенсивности предложено использовать значения модельной водности, превышающие 0.4 г/кг.

В работе [Мохов и др., 2020] проведен анализ особенностей центров действия атмосферы Северного и Южного полушарий, их изменчивости и связи с температурным режимом полушарий и ключевыми климатическими модами, включая Эль-Ниньо – южное колебание, атлантическую мультidesятилетнюю и тихоокеанскую десятилетнюю осцилляции, с использованием разных долгопериодных данных реанализа. По долгопериодным данным отмечено, что вековое полушарное потепление сопровождается статистически значимым ослаблением полярных максимумов, а также гренландского максимума, особенно летом. Отмечено углубление исландского (особенно летом) и алеутского (особенно зимой) минимумов. Проявляются также значимое ослабление зимних сибирского и североамериканского максимумов и углубление летнего североамериканского минимума. В Южном полушарии при потеплении значимо усиливаются все три субполярных океанических минимума и маскаренинский максимум и ослабляются летние австралийский и южноафриканский минимумы.

Установлено [Мохов и др., 2022], что региональные особенности глобальных климатических изменений существенно связаны с режимами центров действия атмосферы (ЦДА) и их изменчивостью. Проведен анализ ожидаемых изменений ЦДА в Северном полушарии по расчетам с ансамблями современных климатических моделей международных проектов CMIP5 и CMIP6 при сценариях антропогенных воздействий RCP8.5 и SSP5-8.5 в XXI веке. Наиболее согласованные оценки по расчетам с ансамблями моделей CMIP5 и CMIP6 получены для тенденций ослабления зимнего Североамериканского максимума и летнего Азиатского минимума. Для интенсивности субполярных циклонических ЦДА над Атлантическим и Тихим океанами отмечено обратное – их интенсивность в целом больше для зимних сезонов, чем для летних. При этом межгодовая изменчивость интенсивности ЦДА, характеризуемая среднеквадратическим отклонением, в зимние сезоны в целом больше, чем в летние.

В работе [Мохов, 2021] представлены оценки региональных особенностей формирования экстремальных атмосферных и гидрологических, климатических и экологических режимов в связи с проявлениями Тихоокеанской десятилетней ос-

цилляции (ТДО) на фоне общего потепления последних десятилетий. Формированию рекордного амурского наводнения в 2013 г. и камчатского “красного прилива” в 2020 г. способствовали положительные аномалии температуры в западной части Тихого океана в Северном полушарии, соответствующие отрицательной фазе ТДО. С режимами ТДО связаны крупномасштабные климатические вариации типа “климатического сдвига” во второй половине 1970-х гг., отмечена связь с особенностями атмосферных блокирований. В частности, повторяемость летних атмосферных блокирований, наибольшая над европейской территорией России, особенно велика в отрицательной фазе ТДО. Рекордный по продолжительности период атмосферного блокирования над европейской территорией России летом 2010 г. с рекордной жарой и пожарами был отмечен именно в отрицательной фазе ТДО.

Рассмотрена двухзонная модель циркуляции атмосферы над полушарием [Kurgansky, 2021c]. На основе предложенной модели решается вопрос блокирующего действия атмосферы над полушарием. Моделирование показало, что долгосрочное изменение климата, связанное либо с значительным глобальным потеплением, либо с значительным глобальным похолоданием, как соответствующих текущему состоянию климата, так и количественно выражаемых изменениями широты ϕ , приводит к увеличению вероятности блокингов.

В статье [Serykh, Sonechkin, 2021] исследуется предсказуемость Эль-Ниньо и Ла-Нинья. В данном случае рассматривается недавно открытое так называемое глобальное атмосферное колебание (ГАО). Предполагая, что ГАО является основным режимом краткосрочной климатической изменчивости, в данной работе определен индекс, характеризующий динамику и взаимоотношения внетропических компонентов ГАО и Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК). Используя эту зависимость, можно спрогнозировать Эль-Ниньо и Ла-Нинья с заблаговременностью примерно 12 месяцев.

Получены оценки изменения повторяемости атмосферных блокирований на основе ансамблевых расчетов CMIP5 с помощью современных климатических моделей общей циркуляции с использованием различных критериев детектирования атмосферных блокингов и разных RCP-сценариев антропогенных воздействий для XXI в [Мохов, Тимажев, 2019]. Для оценки качества воспроизведения характеристик атмосферных блокингов по модельным расчетам проведено сравнение меридиональных сезонных распределений повторяемости блокирований с данными реанализа. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности модельных оценок с выделением ансамблей лучших моделей (с точки зрения воспроизведения блокингов для совре-

менного климата). При выделении лучших моделей выявляется риск увеличения повторяемости блокингов при потеплении, что не отмечено при анализе ансамбля всех моделей. Обнаружено, что блокирующие события в Северном полушарии (1968–1998 гг.) были сильнее, чем блокинги в Южном полушарии, а зимние события сильнее, чем летние события в обоих полушариях [Lupo et al., 2019]. В этой работе также изучалась межгодовая изменчивость блокингов в связи с Эль-Ниньо и Южным колебанием (ЭНСО). Представлены оценки региональных аномалий повторяемости атмосферных блокирований в Северном полушарии, диагностированных по данным реанализа с 1979 г. при разных фазовых переходах явлений Эль-Ниньо в различных фазах Тихоокеанской десятилетней и Атлантической мультидесятилетней осцилляций.

Отмечены существенные различия для явлений Эль-Ниньо, диагностированных с использованием разных индексов, характеризующих процессы разного типа [Мохов, Тимажев, 2022a]. Предложен новый интегральный индекс для описания суммарной активности атмосферного блокирования на протяженных территориях в различные интервалы времени [Мохов, Тимажев, 2022б]. Для характеристики суммарной активности атмосферных блокирований (блокингов) для протяженных областей на разных временных интервалах предложен новый интегральный индекс.

В работе [Мохов, 2023] проведен анализ зимних атмосферных блокирований в Северном полушарии при климатических изменениях в 1980–2018 гг. Результаты анализа свидетельствуют о значимом увеличении общей продолжительности зимних атмосферных блокирований. Отмеченные особенности связаны с различиями в разных фазах ключевых мод климатической изменчивости.

Оценки вероятности теплых и холодных зим в регионах Северной Евразии получены на основе данных за восемь десятилетий в зависимости от явления Эль-Ниньо [Мохов, 2020]. Отмечены особенности аномально теплых и аномально холодных зим в разных российских регионах в фазах Эль-Ниньо, Ла-Нинья и в нейтральной фазе. Проведено сравнение особенностей аномальных зим при явлениях Эль-Ниньо разного типа.

Проанализированы сезонные аномалии приземной температуры воздуха для регионов Северной Евразии в средних широтах с использованием многолетних данных конца XIX века с оценкой эффектов Южного колебания Эль-Ниньо (ЭНСО) [Mokhov, Timahzev, 2022]. В частности, с помощью индексов Niño3, Niño3.4 и Niño4 оценены аномалии температуры в весенне-летние месяцы для Европейского (ЕТР) и Азиатского (АР) регионов России для различных фазовых переходов явлений ЭНЮК. Наибольшая повторяемость экстремально высоких температур и засушливых условий в весенне-летние месяцы в ЕТР

отмечена в годы, начинающиеся в фазе Эль-Ниньо с переходом в фазу Ла-Нинья в конце года. Соответствующая наибольшая повторяемость высокой температуры в АО получена для условий с продолжением фазы Эль-Ниньо в течение всего года. Такие условия в АР были отмечены, в частности, летом 2015 г. при экстремально высокой температуре и экстремально малом количестве осадков в бассейне озера Байкал.

Изменения характеристик активности циклонов (частоты, глубины и размера) в Арктике анализируются на основе моделирования с использованием современных региональных климатических моделей (РКМ) и глобальных климатических моделей (ГКМ) [Akperov et al., 2019]. В большинстве РКМ к концу XXI века наблюдается увеличение повторяемости циклонов зимой и уменьшение летом. Но в половине РКМ циклоны становятся слабее и существенно меньше зимой и глубже и крупнее летом. РКМ, как и ГКМ, показывают увеличение повторяемости циклонов над заливом Баффина, Баренцевым морем, к северу от Гренландии, Канадским архипелагом и снижение над Северными морями, Карским морем и морями Бофорта, а также над субарктическими континентальными районами в зимний период.

В статье [Akperov et al., 2021] выдвигается гипотеза о том, что биогеофизические обратные связи над сушей, связанные с изменением альбедо весной и увеличением испарения летом, могут привести к значительному изменению циклонической активности в Арктике.

В статье [Дурнева, Чхетиани, 2021] представлен анализ среднемесячных положений планетарной высотной фронтальной зоны в Атлантико-Европейском секторе Северного полушария в летние сезоны за период 1990–2019 гг. Отмечены характерные положения для летних месяцев — июня, июля и августа — и максимальные смещения от среднего многолетнего положения за 1961–1990 гг. в северном направлении в годы с образованием блокирующего режима в атмосфере. Рассчитаны значения среднеквадратических отклонений смещений относительно климатического положения за весь летний период для каждого года как для акватории Северной Атлантики и континентальной части Европы и европейской части России, так и для единого Атлантико-Европейского сектора. Выявлена тенденция увеличения меридиональных смещений планетарной высотной фронтальной зоны на основе линейной регрессии за последние 30 лет и появления максимальных отклонений за последний 10-летний период.

В работе [Курганский, 2020] рассматривается отклик крупномасштабной атмосферной циркуляции на аномальный нагрев с незамерзающей поверхности Баренцева и Карского морей, который наблюдается последние два десятилетия. Обнаружено появление очага повышенной призем-

ной температуры воздуха над областью нагрева, некоторого понижения приземного давления там и, наконец, возникновение антициклонической циркуляции в основной толще атмосферы. Показано, что модельные результаты крайне чувствительны к параметризации экмановского пограничного слоя.

В статье [Ривин и др., 2020] рассмотрена реализованная в Гидрометцентре России новая система краткосрочного оперативного численного прогноза с детализацией вычислений 1 км для Московского региона с учетом особенностей городской подстилающей поверхности на основе модели COSMO-Ru1M. Приведены результаты подбора оптимальной конфигурации модели и ее тестирования в Московском регионе по данным измерений плотной сети метеостанций и температурных профиломеров МТП-5. Показаны высокие прогностические возможности новой системы.

Исследование (Ivanov et al., 2019) посвящено особенностям взаимодействия океана и воздуха в море Лаптевых в конце лета на основе периодических измерений в ходе четырех экспедиций 2000-х и 2010-х гг., атмосферного реанализа, и спутниковых данных о концентрации льда. Установлено, что в годы с большим количеством льда накопление тепла в верхнем слое океана незначительно для последующего ледообразования. В безледные годы накопление тепла в верхнем перемешанном слое зависит от продолжительности сезона открытой воды и расстояния точки измерений до ближайшей кромки льда. В период с 2007 по 2017 гг. на евразийском сегменте Арктики выявлена значительная “сезонная память”, характеризующаяся последовательным изменением параметров ледяного покрова в последовательные сезоны. На американском сегменте связи в сезонном временном масштабе не обнаружено. Предлагается возможное объяснение резкого контраста между двумя географическими регионами.

3. МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ

В статье [Иванова, 2019] представлен обзор работ, посвященный истории развития и современному состоянию технологий наукастинга грозовой конвекции. Показана роль информации о грозах, получаемой от различных источников — спутников, радаров, грозопеленгаторов, наземных микроволновых радиометров, и значение выходной продукции численных моделей прогноза погоды для наукастинга гроз. Обсуждаются особенности систем наукастинга грозовых штормов, используемых мировыми метеослужбами.

Значительное внимание в публикациях было уделено климатологии смерчей и конвективных бурь. На территорию России регулярно обрушиваются сильные конвективные ураганы и смерчи, вызывающие значительный ущерб и человече-

ские жертвы. Анализ климатологии и условий формирования этих явлений необходим для оценки риска, улучшения прогнозов и выявления связей с наблюдаемым изменением климата.

В статье [Chernokulsky et al., 2020] представлена новая база данных о смерчах на северо-востоке России, охватывающая период с десятого века по 2016 г. База данных, составленная с использованием различных источников, содержит 2879 случаев смерчей над сушей и водой и включает их характеристики.

В статье [Shikhov et al., 2020] представлена новая база данных геоинформационной системы (ГИС) о ветровых явлениях в лесной зоне Европейской России за период 1986–2017 гг. На конвективные ураганы приходится 82.5% общей площади, пострадавшей от ветра, а на торнадо и неконвективные ураганы приходится 12.9 и 4.6% этой площади соответственно. Большинство ветровалов в ЕТР произошло летом, в отличие от Западной и Центральной Европы, где они происходят в основном осенью и зимой. Из-за некоторых ограничений данных и методов составленная база данных является пространственно и временно неоднородной и, следовательно, неполной. Несмотря на эту неполноту, представленная база данных представляет собой ценный источник пространственной и временной информации о ветровых явлениях в России.

Представлены новые данные о смерчах над сушей в России за период с 1900 по 2018 г. на основе различных источников [Чернокульский и др., 2021]. Отмечены как единичные смерчи, так и “вспышки” смерчей — случаи формирования нескольких смерчей в пределах одной системы мезо- или синоптического масштаба. Рассчитаны повторяемость смерчей разной категории и вероятность их прохождения через точечный объект, эти данные могут быть использованы для оценки риска смерчопасных ситуаций. Проанализирована общая недооценка числа смерчей по стационарным наблюдениям и согласно данным статистики.

В работе [Shikhov et al., 2022] рассмотрено пространственное и временное распределение ветровалов в лесной зоне Западной Сибири за период 2001–2020 гг. Максимальная плотность ветровалов наблюдается в Кемеровской области, а также на западе Томской области и юго-востоке Ханты-Мансийского автономного округа. Наибольшее количество ветровалов зарегистрировано в 2007 и 2010 гг. Смерчи и шквалы, вызывающие ветровалы, чаще всего наблюдаются в июне, а ветровалы, вызванные неконвективными явлениями, наблюдались в октябре–ноябре в горах Урала и Кузнецкого Алатау. Зарегистрировано несколько крупных вспышек шквалов и смерчей.

Были проведены исследования смерчей и шквалов, а также анализ условий их формирования в уральском регионе [Chernokulsky et al., 2020b] для июня 2017 года. Был проведен детальный анализ вспышек формирования смерчей с

использованием различных данных. Синоптический анализ выявил сходство двух вспышек, которые образовались вблизи полярного фронта в теплой части углубляющихся южных циклонов. Анализ показывает, что для Уральского региона, как и для других регионов мира, совместное использование результатов глобальной и региональной моделей можно использовать для прогнозирования высоких значений индексов штормовой погоды и вероятности образования сильного смерча.

В работе [Калинин и др., 2021] рассмотрены условия возникновения 53 сильных шквалов и смерчей, вызвавших крупные ветровалы в лесной зоне Европейской части России и Урала в период с 1989 по 2019 г. Для анализа условий, в том числе расчета разных индексов конвективной неустойчивости, использованы данные систем реанализа CFSR и ERA-5 и данные аэрологического зондирования. Установлено, что важными факторами возникновения сильных шквалов и смерчей являются значительный контраст температуры на фронте, а также наличие струйного течения в нижней или средней тропосфере, ориентированного вдоль фронтальной зоны. В большинстве случаев для возникновения шквалов и смерчей необходимо сочетание высокого влагосодержания воздушной массы, умеренной или сильной конвективной неустойчивости и сильного сдвига ветра по скорости. При этом для формирования шквалов большее значение имеют влагосодержание и конвективная неустойчивость атмосферы, а для формирования смерчей ключевым является сдвиг ветра в нижнем слое.

В статье [Шихов и др., 2021] представлен анализ сильных конвективных ураганов — шквалов и смерчей, зарегистрированных в период с 1984 по 2020 гг. в Пермском крае (северо-восток Европейской части России), где ранее был обнаружен локальный максимум частоты таких явлений. Спутниковые снимки поврежденных лесов являются основным источником данных о торнадо, но их роль для ураганных явлений существенно ниже из-за большего пространственного и временного масштаба таких явлений. Для каждого события с известной датой и временем определялись условия синоптического масштаба и связанные с ними значения индексов конвекции. Выявлены сходства и различия условий формирования смерчей и ураганов. И шквалы, и смерчи возникают преимущественно на быстро движущихся холодных фронтах или на волнистых квазистационарных фронтах, связанных с системами низкого давления. В целом штормовые явления, вызывающие ветровыбросы, происходят преимущественно в условиях, более благоприятных для глубокой хорошо организованной конвекции.

Летом 2010 г. Европейская часть России испытала беспрецедентно высокую температуру воздуха, катастрофические лесные пожары, сильное загрязнение воздуха, а также несколько сильных

конвективных штормов. В исследовании [Chernokulsky et al., 2022] с использованием изображений Landsat оценен ущерб лесам, вызванный ураганами, и проведен анализ синоптических и мезомасштабных особенностей формирования и развития этих ураганов с использованием данных спутниковых и реанализов, наземных наблюдений и мезомасштабного численного моделирования. Результаты работы показывают значительную роль блокингов в формирование и развитии сильных конвективных штормов.

В работе [Шихов и др., 2022] рассмотрена применимость спутниковых данных для оценки неустойчивости и влагосодержания атмосферы в случаях возникновения конвективных опасных явлений погоды на Европейской территории России и Урале. Отмечена существенная ограниченность данных MODIS в связи с низкой частотой съемки и невозможностью получения информации о параметрах неустойчивости для ячеек с облачностью, что, в частности, сократило итоговую выборку с 305 до 95 случаев.

Исследованы особенности условий возникновения конвективных опасных явлений, включая долгоживущий шквал и несколько смерчей, наблюдавшихся на Европейской части России 15 мая 2021 г [Чернокульский и др., 2022]. Проведены численные эксперименты по воспроизведению события с помощью региональной модели атмосферы WRF с разными начальными условиями.

Ряд статей был посвящен строению смерча, а именно динамике частиц в атмосферных вихрях (Ingel, 2020, Ингель, 2021а, 2022а). Аналитически исследовано движение инерционных частиц в интенсивных вихрях с вертикальной осью в поле силы тяжести (Ingel, 2020). Установлен ряд общих законов динамики частиц. Аналитически проанализировано движение инерционных частиц в интенсивных вихрях с вертикальной осью в поле силы тяжести и динамика концентрации инерционных частиц в интенсивных вихревых потоках (Ингель, 2021а, 2022а). Оценено расстояние переноса тяжелых частиц за пределы области сильных ветров. Адекватное описание движения частиц может иметь важное значение для корректной интерпретации результатов радиолокационного зондирования смерчей, оценки связанных с ним опасностей и, возможно, для моделирования динамики самих смерчей. Найденные аналитические решения демонстрируют существенную роль нелинейных эффектов, поскольку эффективные коэффициенты сопротивления отличаются от ранее изученного случая стоксовых частиц как минимум в десятки раз.

В работе [Калмыкова и др., 2019] рассмотрен автоматизированный прогноз черноморских смерчей. Приведены основы методики краткосрочного прогноза смерчопасных ситуаций, а также распознавания смерчопасных областей в реальном времени по радиолокационным наблюдениям и ре-

зультаты авторского тестирования методики за период с августа 2017 г. по октябрь 2018 г. Проанализированы перспективы использования полученного опыта для разработки автоматизированной системы прогноза смерчей на Европейской части России.

Методика оценки смерчопасности, разработанная в ФГБУ “НПО “Тайфун”, позволяет строить прогнозы смерчопасных областей в пределах восточной части акватории Черного моря, выявлять облака с потенциальным риском образования из них смерчей, давать прогноз возможного формирования смерчей вблизи различных участков Черноморского побережья России [Калмыкова, 2021б]. В работе [Калмыкова и др., 2021а] представлен анализ синоптической ситуации, способствовавшей возникновению вспышки смерчей над Черным морем 16 июля 2019 г. Установлено, что в рассматриваемый день Черноморский регион находился под влиянием мезоциклона и фронта с волновыми возмущениями. Отмечено, что на рассматриваемый день давался прогноз крайне высокой опасности появления смерчей вблизи всего побережья Краснодарского края, что указывало на возможность вспышки смерчей.

В статье [Chechin et al., 2019] представлена простая аналитическая модель пограничного слоя атмосферы, связанного с морским льдом. Она описывает охлаждение ясного неба над морским льдом во время полярной ночи. Модельные решения показывают, что концентрация морского льда и скорость ветра оказывают сильное влияние на тепловой режим морского льда. Теоретические решения хорошо согласуются с результатами более реалистичной одномерной модели и с наблюдениями, выполненными на трех российских дрейфующих станциях “Северный полюс” (НП-35, -37 и -39). Как результаты моделирования, так и наблюдения показывают сильную зависимость потока длинноволновой радиации на поверхности от скорости ветра.

Движущие механизмы мезомасштабных процессов и связанный с ними перенос тепла в Японском/Восточном море (JES) с 1990 по 2010 год были изучены с использованием вихреразрешающей модели океана [Stepanov et al., 2022]. Анализ вихревой кинетической энергии) показал, что мезомасштабная динамика достигает максимальной интенсивности в верхнем 300-метровом слое. Летом ведущую роль в формировании мезомасштабной динамики играет баротропная неустойчивость течений, ответственных за возникновение мезомасштабных вихрей, а осенью ведущую роль играют неустойчивость и ветер. Показано, что меридиональный перенос тепла преимущественно направлен к полюсам. В районе пролива Цугару обнаружен интенсивный вихревой перенос тепла на запад, достигающий максимума в первой половине года и снижающийся до минимума к лету.

Аналитическое описание турбулентных течений дано в работах [Ingel, 2019a, 2019b, 2021c, Ингель, 2022б]. Известная нелинейная интегральная модель турбулентного термика обобщена на случай наличия горизонтальной составляющей его движения относительно окружающей среды (например, всплытие термика в сдвиговом потоке) [Ingel, 2019b]. Решение описывает, в частности, нелинейный эффект взаимодействия горизонтальной и вертикальной составляющих теплового движения. В статье [Ingel, 2019a] рассматривается простейшая линейная модель конвекции, обусловленной двойной диффузией во вращающейся среде. Обсуждается возможность вклада этих эффектов в концентрацию завихренности при формировании торнадо. В [Ingel, 2021c] в развитие предыдущей работы рассматривается более сложная задача с учетом температурной стратификации среды. С помощью методов масштабного анализа, анализа размерности и симметрии дифференциальных уравнений исследована динамика плавучих конвективных струй, связанных со стационарными локальными источниками тепловыделяющей примеси в нейтрально стратифицированной среде [Ingel, 2019b]. Приведены законы движения турбулентных термиков, связанных с мгновенными источниками примеси, вытекающие из соображений размерности и подобия. Разработана и обобщена в ряде направлений известная упрощенная модель турбулентной конвекции от локальных источников плавучести и/или импульса, действующих кратковременно. Рассмотрены особенности динамики конвекции от источников конечных размеров [Ingel, 2021c]. Аналитически проанализирована двумерная стационарная линейная модель течений, возникающих в устойчиво (нейтральной) стратифицированной среде над термически неоднородной плоской наклонной поверхностью [Ингель, 2022б]. Модель склоновых течений Прандтля (конвекция в стратифицированной среде вблизи наклонной поверхности) обобщена на случай наличия объемных источников/стоков тепла, ориентированных параллельно склону [Ингель, 2021б]. Численные оценки показывают возможность генерации заметных наклонных атмосферных потоков при наличии аэрозоля, влияющего на радиационный баланс. Горизонтальные неоднородности коэффициентов обмена в стратифицированной среде приводят к неоднородностям вертикального диффузионного потока плавучести и его горизонтального распределения и, как следствие, к возникновению горизонтальных неоднородностей гидростатического давления и генерации течений [Ingel, 2022]. В качестве примера рассмотрено возникновение упорядоченных течений в стратифицированной по температуре (плотности) турбулентной среде в поле силы тяжести вблизи наклонной поверхности. Разработана стационарная нелинейная аналитическая модель пограничного слоя типа

Экмана с анизотропным сопротивлением [Ingel, 2021c]. Результаты показывают, что эффекты анизотропии могут быть заметны.

Простое решение уравнения сохранения абсолютной завихренности использовано для обхода известной нелинейной задачи о взаимодействии точечных вихрей с регулярным полем завихренности и получено точное решение задачи динамики диполя вихрей на вращающейся сфере [Mokhov et al., 2020]. Благодаря этому получено новое устойчивое стационарное решение динамики вихрей, которое может моделировать динамику глобальных вихревых структур, таких как атмосферные центры действия.

В работе [Калашник, Чхетиани, 2019] построен ряд точных и асимптотических решений уравнений двумерной гидродинамики, описывающих нестационарные вихревые дорожки. Определена ширина полосы, заключающей вихревую дорожку, получено уравнение сепаратрисы, отделяющей вихревые ячейки с замкнутыми линиями тока от внешнего меандрирующего течения. В рамках уравнения переноса потенциальной завихренности изучено влияние квазидвумерной сжимаемости и бета-эффекта на динамику вихревых дорожек. С использованием длинноволнового приближения построены решения, описывающие формирование вихревых дорожек в ходе развития неустойчивости зонального периодического течения и свободного слоя сдвига.

Проводится исследование мезомасштабной валиковой циркуляции и ее транспортных свойств в атмосферном пограничном слое [Вазаева и др., 2019]. С использованием модели WRF-ARW рассматривается характерный эпизод 28 июля 2007 г. в Калмыкии, охваченный наблюдениями экспедиции ИФА им. А.М. Обухова РАН. Отмечается развитие циркуляции, с существенной асимметрией по положительным и отрицательным компонентам поля скорости и спиральности. Квазидвумерные валиковые структуры отмечаются интенсификацией захвата и аккумуляции пыли, поднимающейся с подстилающей поверхности, и, наряду с интенсивными вихрями с вертикальной осью, являются существенным источником примесей в атмосфере. Захваченный мелкодисперсный аэрозоль способен переноситься на большие расстояния и образовывать аэрозольные слои.

Спиральность присуща множеству циркуляционных движений и структур в атмосферном пограничном слое (АПС), в котором она непрерывно воспроизводится вследствие совместного действия вращения Земли и трения, что связано с явлениями обратного каскада и крупномасштабной перестройки течений. Фактор спиральности требует его корректного учета при построении атмосферных моделей и, соответственно, необходимо знание о распределении спиральности в АПС и ее связи с динамическими атмосферными процессами. В работе [Вазаева и др., 2021] спи-

ральность циркуляционных структур различного пространственного и временного масштаба в атмосферном пограничном слое определяется по результатам анализа данных полевых измерений. Качественное и количественное сравнения с измеренными значениями проводятся на основе результатов численного моделирования с помощью квазидвумерной модели и мезомасштабной атмосферной негидростатической модели WRF-ARW, в частности WRF-LES. Показана связь турбулентных характеристик и спиральности исследуемых структур.

В работе [Davydova et al., 2022] рассматриваются два обоснованных подхода к задаче численного моделирования распределения концентрации мелкодисперсного аэрозоля в спиральных вихревых структурах (валах) в пограничном слое атмосферы с целью оценки вклада вихревых структур в перенос аэрозолей через пограничный слой. На основе модельных данных получена оценка количества аэрозоля, переносимого вихревыми структурами.

Предложен теоретический подход на основе преобразования Абеля для вывода статистического распределения перепада давления в центре конвективных, в том числе пылевых вихрей, на основе измерений пиковых перепадов давления на наземной метеостанции при прохождении вихрей над или рядом с барометрическим датчиком. В работе [Kurgansky, 2019] показано, что если давление внутри вихря моделировать реалистично, то статистика наблюдаемых перепадов давления связана со статистикой перепадов давления в вихревых центрах субпопуляции вихрей, регистрируемых датчиком давления. Это соотношение справедливо для произвольного распределения пылевых вихрей по размерам и частотам. Эти теоретические результаты применены к трем сериям наблюдений марсианских конвективных вихрей, включая пылевые вихри, что позволяет определить не только средний диаметр вихря, но и все размерно-частотное распределение вихрей [Kurgansky, 2020a]. Численная плотность конвективных вихрей (количество вихрей на км^2) в месте посадки InSight на Марсе используется как метрика вихревой активности с использованием теоретического выражения, связывающего эту числовую плотность с зарегистрированным количеством близлежащих прохождений вихрей [Kurgansky, 2021b]. Получена очень высокая оценка средней за весь период наблюдаемой вихревой активности плотности числа вихрей — 56 вихрей на км^2 . Принимая во внимание все неопределенности, связанные с этой количественной оценкой, последняя может быть уменьшена максимум примерно в два раза, но все равно остается на беспрецедентно высоком уровне. Пересмотрены теоретические основы экспоненциальных и степенных аналитических формулировок размерно-частотных и интенсивно-частотных распределений конвективных вихрей, в том числе пылевых вих-

рей [Kurgansky, 2022a]. Обсуждаются приложения к статистике конвективных вихрей, в том числе пылевых вихрей, на Земле и Марсе.

В работе (Kurgansky, 2020b) исследована гидродинамическая неустойчивость монохроматических инерционно-гравитационных волн (ИГВ) конечной амплитуды, распространяющихся под малыми углами как к вертикали, так и к горизонту. В обоих случаях соответствующий угол служит малым параметром задачи, а неустойчивость исследуется методом Галеркина. Для внутренних гравитационных волн (ВГВ), распространяющихся под малым углом к вертикали, показано, что устойчивая стратификация плотности является стабилизирующим фактором, а вращение жидкости — дестабилизирующим. В исследовании [Harlander, Kurgansky, 2021] модель ВГВ низкого порядка используется для описания как линейной, так и так называемой немодальной переходной неустойчивости. Сделан вывод, что при полной рандомизации пучки мелких волн могут демонстрировать докритический рост при входе в турбулентное фоновое поле. Такие растущие и, в конечном итоге, разрушающиеся пучки волн могут добавить турбулентность к существующей фоновой турбулентности, возникающей из других источников неустойчивости. Однако устойчивость переходного роста возмущений волнового пучка сильно зависит от степени рандомизации начальных условий, угла падения луча и длины волны возмущения.

Метод фазовых экранов широко применяется для моделирования распространения волн в неоднородных средах [Gorbunov et al., 2021]. В работе [Горбунов и др., 2020] проводится дальнейшее обобщение этого метода для 3-мерной задачи и предлагается метод сферических фазовых экранов.

В статье [Кан и др., 2020] проведена апробация методики восстановления глобального распределения статистических параметров внутренних гравитационных волн (ВГВ) в атмосфере по данным измерений флуктуаций амплитуды радиосигнала в спутниковых радиозатменных наблюдениях. Восстанавливаемыми параметрами вертикального спектра ВГВ являются внешний масштаб, задающий в крупномасштабной области переход от ненасыщенного режима волн к насыщенному, и структурная характеристика, определяющая спектральную амплитуду волн в режиме насыщения. По этим параметрам вычисляются дисперсия флуктуаций температуры и потенциальная энергия волн. В данной статье приведено высотно-широтное распределение параметров ВГВ в стратосфере по данным измерений эксперимента COSMIC за 2011 г. Отмечены характерные особенности этих распределений, проведено сравнение результатов с данными других измерений.

В статье [Кан и др., 2020b] рассматривается методика восстановления параметров внутренних гравитационных волн (ВГВ) в стратосфере по

флуктуациям амплитуды в спутниковых радиозатменных наблюдениях. В формировании флуктуаций радиосигнала в этих наблюдениях основную роль играют ВГВ, а вклад изотропной турбулентности пренебрежимо мал.

В работе [Nerushev et al., 2019] представлены результаты исследования пространственно-временной изменчивости основных характеристик струйных течений верхней тропосферы Северного и Южного полушарий в зоне обзора европейских геостационарных метеорологических спутников за период 2007–2017 гг. Основное внимание уделено их связи с температурой тропосферы, площадью морского льда и крупномасштабными атмосферными явлениями. Выявлены общие закономерности и существенные различия межгодовой изменчивости основных характеристик струйных течений в Северном и Южном полушариях.

В работе [Нерушев и др., 2021a] представлена статистическая модель временной изменчивости характеристик высотных струйных течений Северного полушария за период 2007–2019 гг. В основу модели положены результаты обработки данных измерений радиометра SEVIRI. В качестве предикторов для построения модели множественной линейной регрессии использовались площадь арктического морского льда, значения температуры тропосферы на разных уровнях и их разности между низкими и высокими широтами, различные индексы крупномасштабных процессов, характеризующие климатическую изменчивость. Детальный спектральный анализ стандартизованных рядов характеристик струйных течений и предикторов выявил присутствие периодических колебаний в широком спектральном диапазоне — от короткопериодных до длиннопериодных (30–50 мес.). Построена модель, описывающая весь спектр временных вариаций характеристик струйных течений, а также модель вариаций только длиннопериодной части.

Рассмотрена связь аномалий среднемесячной приземной температуры воздуха в 2017–2019 гг. на 147 метеорологических станциях Европы и 53 станциях Европейской территории России с характеристиками высотных струйных течений, определяемыми по данным измерений радиометра SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения в канале водяного пара с центром на 6.2 мкм [Нерушев и др., 2021b]. На основе статистического анализа показано, что наибольшая связь аномалий среднемесячной приземной температуры отмечается с аномалиями широты центра струйного течения. Отмечается также связь с аномалиями средней площади и эффективного времени жизни струйного течения.

Традиционно большое количество работ посвящено тропическому циклогенезу. Анимационный анализ данных глобального радиотеплового спутникового мониторинга, проведенный в

августе 2000 г., был использован для изучения процессов эволюции тропических циклонов в Северном полушарии [Ermakov et al., 2019]. Выявлена значительная роль тропосферных адвективных потоков скрытого тепла в быстрой интенсификации тропического циклона. Сформулированы предложения по дальнейшему совершенствованию методики анализа, направленного на детальное исследование отдельных фаз эволюции тропического циклона с использованием больших массивов радиотепловых дистанционных данных.

Представлены результаты анализа повторяемости тропических циклонов, вероятности трансформации во внетропические и их трендов в разных океанических бассейнах Северного и Южного полушарий по данным наблюдений для 50-летнего периода (1970–2019 гг.) [Мохов и др., 2020б]. Отмечены значимые тенденции увеличения повторяемости трансформации тропических циклонов во внетропические для Земли в целом. Проявляются особенности разных океанических бассейнов Северного и Южного полушарий. В том числе отмечен значимый тренд роста повторяемости событий трансформации для северо-западной акватории Тихого океана с выходом циклонов в прибрежные внетропические регионы Евразии, включая Дальний Восток. На фоне этого общего тренда проявляются существенные вариации для разных фаз явлений Эль-Ниньо.

Для оценки изменений энергетики тропических циклонов использовалась специальная характеристика — действие с размерностью [энергия] $\times$ [время] [Мохов, Порошенко, 2020]. Получены оценки изменений общего действия тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана по данным для периода 1951–2019 гг. Отмечено значительное увеличение межгодовой изменчивости действия тропических циклонов в последние десятилетия на фоне увеличения средних значений. Отмечены также тенденции увеличения действия тропических циклонов и тайфунов, достигающих внетропических широт, при значительных межгодовых вариациях.

В работе [Мохов, Порошенко, 2021а] получены статистические оценки связи времени существования и интенсивности тропических циклонов с использованием данных RSMC для периода 1951–2019 гг. Отмечено хорошее соответствие времени существования тропических циклонов, в том числе самых мощных из них — тайфунов, и их максимальной интенсивности для северо-западной части Тихого океана, выраженное в виде степенной зависимости. Аналогичные зависимости получены для тропических циклонов, трансформировавшихся во внетропические.

В статье [Sukhanovskii, Popova, 2020] лабораторные исследования посвящены роли конвективных валков в усилении потока тепла с моря. Появление когерентных конвективных структур типа термиков и валков регистрируется различ-

ными оптическими методами и измерениями температуры. Двумерные поля скорости используются для исследования структуры и характеристик течения. Тепловой поток от нагревательной пластины к жидкости измеряется напрямую. Полученные результаты наглядно показывают, что быстрая интенсификация лабораторного аналога тропического циклона тесно связана с процессом теплопереноса в пограничном слое. Образование вторичных конвективных структур резко увеличивает теплообмен и интенсивность конвективной циркуляции.

Особое внимание уделено нестационарной стадии формирования интенсивных циклонических вихрей [Evgrafova, Sukhanovskii, 2022b]. Передача углового момента играет ключевую роль в формировании циклонических и антициклонических течений; поэтому дан подробный анализ перераспределения и изменения углового момента. Временная эволюция потоков углового момента и полного углового момента сильно зависит от скорости вращения. Другим важным результатом является то, что вращающийся слой жидкости очень быстро адаптируется к новым граничным условиям (нагреву и охлаждению). Для достижения квазистационарного состояния требуется примерно два периода вращения. Обсуждается применение полученных результатов к эволюции реальных тропических циклонов.

Предлагается оригинальный подход для определения точного времени начала тропического циклогенеза [Левина, 2022]. Этот подход включает совместный анализ космических изображений облачности и соответствующих данных облачно-разрешающего численного моделирования для области развивающегося вихревого возмущения. Теоретической основой является фундаментальная гипотеза турбулентного вихревого динамо.

Полярные мезоциклоны, также известные как полярные циклоны (ПЦ), представляют собой важные морские мезомасштабные (диаметр по горизонтали до 1000 км) погодные системы в высоких широтах. Получены статистические оценки связи между характерными размерами и временем жизни полярных мезоциклонов (ПМЦ) с использованием данных STARS для периода 2002–2010 гг [Мохов, Порошенко, 2021б]. Предложено модельное объяснение степенной и экспоненциальной, в простейшем случае линейной, зависимости для наиболее крупномасштабных и долгоживущих ПМЦ.

В работе [Vazaeva et al., 2020] рассмотрены возможные прогностические критерии ПЦ, в частности, кинематическая спиральность как квадрат характеристики, связанная с интегральными вихревыми образованиями и числом кинематической завихренности. Для расчета таких характеристик использовались данные реанализа и результаты численного моделирования с использованием модели WRF-ARW над Северными (Норвежским и

Баренцевым) морями. Для сравнения использованы экспериментальные данные. Критерии, связанные с завихренностью и спиральностью, проявляются в генезисе и развитии ПЦ достаточно четко. Эти критерии можно использовать для повышения эффективности и точности методов прогнозирования полярных циклонов.

На основании данных реанализа и результатов расчета по модели WRF-ARW проанализированы случаи полярных мезоциклонов над Норвежским и Баренцевым морями в 2013 г., в окрестностях Северной Земли в 2015 г., в прикромочной зоне моря Лаптевых в 2021 г. [Вазаева и др., 2022]. Подобрана комбинация критериев, достаточных для идентификации полярных мезоциклонов и анализа их размера и интенсивности в удобной и понятной форме: оценки спиральности как интегральной характеристики, относящейся к целостным вихревым образованиям, и кинематического числа завихренности. Данные критерии могут быть использованы для упрощения трудоемкой процедуры сбора первичных данных о полярных мезоциклонах для машинного обучения.

Орографические циркуляции ветра рассматривались в ряде работ. В статье [Shestakova, Debolskiy, 2022] рассмотрено влияние новоземельской боры на турбулентный теплообмен между атмосферой и океаном и на процессы в океане. Другая цель этого исследования – продемонстрировать чувствительность моделируемых турбулентных потоков во время боры для моделирования взаимодействия между атмосферой, океаном и морскими волнами. Бора оказывает существенное влияние на процессы в океане непосредственно у побережья, образуя сильное прибрежное течение и внося решающий вклад в образование плотных вод. В открытом море бора, а точнее, перераспределение полей ветра и температуры, вызванное орографией Новой Земли, приводит к уменьшению потерь теплосодержания океана за счет уменьшения турбулентного теплообмена по сравнению с экспериментом с равнинный рельеф.

В статье [Shestakova et al., 2022] представлен комплексный анализ эпизода фена, произошедшего над Шпицбергом 30–31 мая 2017 г. Рассматриваются как формирование орографического ветра, так и потепление, вызванное феном. В частности, установлено, что потепление пропорционально высоте горных хребтов и распространялось далеко вниз по течению. Также наблюдалась сильная пространственная неоднородность фенового потепления с явным холодным следом, связанным с разрывными потоками вдоль горных долин и фьордов. Положительный дневной радиационный баланс на поверхности, увеличенный за счет фена, наряду с нисходящим потоком явного тепла, вызвал ускоренное таяние снегов в горных долинах, что предполагает потенциально большое влияние часто наблюдаемых фенов

Шпицбергена на снежный покров и баланс тепла и массы ледника.

В статье [Shestakova, 2021] рассмотрены причины занижения скорости ветра моделью WRF-ARW при моделировании ураганов в Российской Арктике. Занижение скорости ветра в основном связано с неправильным заданием рельефа. Уменьшение длины шероховатостей в соответствии с наблюдениями приводит не только к количественному изменению скорости ветра в пограничном слое, но и к качественным изменениям динамики течения. Задание корректных значений рельефа и шероховатости в Тикси и других регионах, где наблюдаются склоновые бури (Новая Земля, Певек, остров Врангеля), привело к снижению погрешности моделирования скорости ветра более чем в 2.5 раза.

В статье [Shestakova, Repina, 2021] представлены результаты исследования озерной циркуляции над озером Байкал в декабре 2012 г., когда поверхность озера еще была свободна ото льда. Наиболее эффективным проявлением озерного эффекта стал мезомасштабный вихрь над северной частью озера. Анализ этого явления основан на спутниковых наблюдениях, натурных измерениях, а также на мезомасштабном численном моделировании с помощью модели WRF-ARW. Орография создала благоприятные условия для местных ветров и бризовой циркуляции и во многом сформировала неустойчивую температурную стратификацию за счет частичного блокирования набегающего потока.

В статье [Shestakova et al., 2020] исследуется морское волнение во время новоземельской боры с использованием статистического подхода. Статистический анализ данных высотометра у западного побережья Новой Земли во время боры показывает, что, несмотря на сильное ветровое воздействие, частота высот опасных волн была низкой из-за ограниченности выборки. Этот результат был подтвержден численным моделированием с высоким разрешением для двух эпизодов боры.

В статье [Shestakova, Toropov, 2021] представлены результаты численного моделирования экстремальных осадков на южном побережье Каспийского моря с использованием модели WRF-ARW с реалистичными и идеализированными условиями, направленными на оценку орографических и озерных эффектов. Тесты на чувствительность показали, что эффект озера проявляется только при наличии орографии. Суммарный вклад теплового Каспийского моря и орографии в количество осадков составляет в среднем 50%.

На основе спутниковых данных и по результатам численного исследования на модели WRF-ARW проанализированы случаи мезомасштабной циркуляции над оз. Убсу-Нур (Увс-Нуур), Монголия, в ноябре 2016 г. [Вазаева и др., 2022]. В этот промежуток времени, когда поверхность озера еще не полностью покрывалась льдом, несколько

дней наблюдался устойчивый мезомасштабный вихрь — яркое проявление озерного эффекта. Эксперименты по чувствительности выявили роль теплой поверхности озера и орографии в образовании и усилении вихрей. Орография близ Убсу-Нур достаточна для создания благоприятных условий для местной ветровой и бризовой циркуляции, и она в значительной степени формировала неустойчивую температурную стратификацию за счет частичного блокирования набегающего потока, играя преимущественную роль в формировании вихря за счет орографически индуцированной конвергенции.

4. МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ ДВИЖЕНИЯ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

В 1982 г. Ш. Лавджой опубликовал иллюстрацию к предложению Б. Мандельброта о том, как охарактеризовать отношение площади к периметру для сложных плоских форм. Было обнаружено, что показатель степени такого фрактала для определяемых спутниками и радаром дождевых облаков составляет 1.35, что близко к $4/3$. Позднее оказалось, что такой же показатель степени характерен и для серебристых облаков. Такое значение может быть связано с классической теорией турбулентности 1941 года. Статья [Голицын и др., 2022] демонстрирует эту связь с использованием двух основных работ Колмогорова и Обухова. Выявлена роль префрактальных множителей, которые образуют пару своеобразных инвариантов для облачных полей и безразмерные числа самоподобия для этих полей размерами $1-106 \text{ км}^2$. Особенность заключается в их размерной зависимости и наличии небольшого количества инвариантов, а не обычных инвариантов в облачных формах.

В работе [Kuznetsov, Mikhailov, 2022] изучается процесс разрушения невязких течений несжимаемой жидкости вдоль твердого тела со скользящими граничными условиями. Такие скользящие течения можно считать сжимаемыми на твердой поверхности, где нормальная скорость обращается в нуль. Это является основной причиной образования особенности градиента компоненты скорости, параллельной жесткой границе. Показано, что максимальный градиент скорости экспоненциально растет со временем на жесткой границе с одновременным увеличением градиента завихренности по двойному экспоненциальному закону.

В работе [Vulfson and Nikolaev, 2022] построены аппроксимации турбулентных моментов атмосферного конвективного пограничного слоя на основе варианта локальной теории подобия. В качестве основных параметров этой теории используются второй момент вертикальной скорости и “спектральная” длина смещения Прандтля. Полученные аппроксимации турбулентных мо-

ментов следует рассматривать как естественное дополнение полуэмпирической теории турбулентности. Предложенные приближения следует рассматривать как прямое обобщение теории подобия Мони́на—Обухова в условиях свободной конвекции. Новые приближения сравниваются с соотношениями известных локальных теорий подобия, обсуждаются преимущества и ограничения новой теории. Сравнение аппроксимаций новой локальной теории подобия с данными натурных и лабораторных экспериментов свидетельствует о высокой эффективности предложенного подхода.

Прямое численное моделирование направленных гравитационных волн морской поверхности проводится в рамках потенциальных уравнений гидродинамики [Слюняев, Кокорина, 2020; Slunyaev, 2020]. Данные, полученные для условий глубокой воды, спектра JONSWAP, волн различной интенсивности и ширины направленного спектра, обрабатываются с акцентом на статистические и спектральные характеристики волн, а также на экстремальные явления. Показано, что динамический эксцесс (т.е. создаваемый свободной волновой составляющей) может вносить существенный вклад в аномально большие значения эксцесса поверхностного смещения, когда волны интенсивны, а спектр направленности относительно узок [Slunyaev, 2020]. В этой ситуации стохастическая динамика свободных волн является сильно негауссовой, а экстремальные события длятся аномально длительное время — до нескольких десятков характерных волновых периодов [Слюняев, Кокорина, 2020]. Долгоживущие когерентные структуры, в которых возникает большинство экстремальных волн, могут быть выявлены с использованием предложенного оконного подхода обратного рассеяния [Slunyaev, 2021]. Физические механизмы генерации волн—убийц и соответствующие математические модели; имеющиеся полевые данные; результаты прямого численного моделирования и лабораторных экспериментов; новые подходы к моделированию и прогнозированию экстремальных морских волнений рассмотрены и обсуждены в работе [Slunyaev, 2020]. Развита теория нелинейной самомодуляции гравитационных волн на водной поверхности, покрытой сжатым ледниковым покровом заданной толщины и плотности в бассейне постоянной глубины. Показано, что при определенных условиях модуляционная неустойчивость может развиваться из более коротких групп и за меньшие периоды волн, чем в ситуации глубоководных гравитационных волн на свободной поверхности воды [Slunyaev, Stepanyants, 2022].

Предложена простая модель развития субмезомасштабных возмущений в атмосферном пограничном слое (АПС) [Чхетиани, Вазаева, 2019]. Рост возмущений связан со сдвиговой алгебраической неустойчивостью профиля скорости ветра

в АПС. Поиск оптимальных значений таких возмущений (стриков) позволяет решить задачу об оценке их масштабов, которые оказываются порядка 100–200 м по вертикали и 300–600 м по горизонтали. Подобные масштабы отмечаются и для экспериментальных данных о структуре поля ветра в нижней части АПС, полученных в летнее время в 2017, 2018 гг. на Цимлянкой научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН при акустическом зондировании атмосферы доплеровским трехкомпонентным минисодаром высокого разрешения.

В статье [Шишов и др., 2021] приведены результаты многоточечных измерений пульсаций направления ветра и температуры воздуха в приземном слое на базе Цимлянкой научной станции Института физики атмосферы им. Обухова РАН. Определены характерные размеры вихревых и тепловых структур, а также соотношение этих размеров в различных условиях. Подтверждена обнаруженная ранее зависимость характерных размеров структур от условий термической стратификации. Представлены визуализации двумерных полей температуры и направления ветра.

Экспериментально исследована связь между концентрацией аридного аэрозоля размером 0.2–0.4 мкм и напряженностью электрического на пустынной территории Калмыкии в 2020 г. [Malipovskaya, Chkhetiani, 2021]. Показано, что увеличение и уменьшение напряженности электрического поля связано с изменением скорости ветра и его направления относительно гребней дюн. Согласно аналитической оценке, относительное изменение напряженности электрического поля пропорционально квадрату числа образующихся микрочастиц.

Прямое моделирование турбулентности (DNS) и вихреразрешающее моделирование (LES) широко используются для описания турбулентных процессов в атмосфере. В работе [Глазунов и др., 2019] проанализированы данные численного моделирования устойчиво-стратифицированных турбулентных течений Куэтта при различных значениях числа Ричардсона. Для расчетов применены две различные технологии: прямое численное моделирование (DNS) и моделирование методом крупных вихрей (LES). Показано, что, независимо от метода расчета, наряду с хаотической турбулентностью, течения содержат крупные организованные структуры. В моделях зафиксирован рост турбулентного числа Прандтля при увеличении градиентного числа Ричардсона. Предлагается гипотеза, что именно эти структуры и служат физическим механизмом поддержания турбулентности при сверхкритически устойчивой стратификации.

В работе рассматривается релаксационное уравнение относительно волнового числа для полумпирических замыканий геофизической турбулентности [Мортиков и др., 2019]. Показано, что традиционное феноменологическое уравне-

ние скорости диссипации кинетической энергии турбулентности можно рассматривать как аппроксимацию предложенного релаксационного уравнения для устойчиво-стратифицированных течений, находящихся в состоянии квазиравновесия. Предложенный подход допускает возможность уточнения турбулентных замыканий для пограничных слоев атмосферы и океана за счет задания равновесных состояний и релаксационных соотношений, согласованных с данными прямого и вихреразрешающего моделирования.

Рассмотрена задача моделирования двумерной изотропной турбулентности в периодической прямоугольной области, возбуждаемой силовой структурой заданного пространственного масштаба [Perezhogin et al., 2019]. Эту ситуацию можно рассматривать как простейший аналог крупномасштабной квазидвумерной циркуляции океана и атмосферы. Построение замыканий основано на априорном анализе DNS-решения и учитывает вид схемы пространственной аппроксимации, используемой в конкретной модели.

В статье [Дебольский и др., 2019] рассматриваются подходы к построению интегральных моделей конвективного пограничного слоя (КПС), основанных на концепции полной перемешанности. Для проверки основных гипотез подобия используются результаты вихреразрешающего моделирования. Показано, что поток кинетической энергии с верхней границы КПС, осуществляемый гравитационными волнами, мал по сравнению с другими составляющими баланса турбулентной кинетической энергии (ТКЭ) в конвективном слое. Впервые применена параметризация генерации ТКЭ за счет сдвига скорости в конвективном пограничном слое в терминах скорости трения и средней скорости ветра в КПС; получены все безразмерные константы теоретической модели. Результаты работы позволяют сформулировать интегральную модель сдвигового КПС, пригодную для практического использования.

Проведены численные эксперименты с использованием метода LES нейтрально-стратифицированного турбулентного течения над поверхностью городского типа и пассивного скалярного переноса этим потоком [Glazunov et al., 2022a]. Построена многослойная модель турбулентного течения и турбулентной скалярной диффузии, усредненная по Рейнольдсу-Навье-Стоксу (RANS). Результаты модели RANS сравниваются с экспериментами LES. Показано, что предложенный подход позволяет прогнозировать среднюю скорость потока и концентрацию частиц внутри и над городским пологом.

В работе [Ткаченко и др., 2022] представлены результаты вихреразрешающего моделирования вечернего перехода в атмосферном пограничном слое в случае свободной конвекции и при наличии геострофического ветра. Проведен анализ баланса кинетической энергии турбулентности

(КЭТ) и динамики дисперсий компонент скорости, из которого следует существование интервалов быстрого и медленного затухания КЭТ. Показано, что одномерная (по вертикали) модель пограничного слоя, в которой турбулентные потоки параметризуются с помощью двухпараметрического замыкания на основе уравнений для КЭТ и скорости ее диссипации, не воспроизводит подобную динамику вечернего перехода.

Турбулентность всегда возникает в потоках маловязкой/крупномасштабной жидкости за счет сдвига скорости, а при неустойчивой стратификации — за счет сил плавучести. Принято считать, что оба механизма создают один и тот же тип хаотических движений, а именно, вихри распадаются на более мелкие и создают прямой каскад турбулентной кинетической энергии и других свойств от больших к малым масштабам в сторону вязкой диссипации. Традиционная теория, основанная на этом видении, дает правдоподобную картину вертикального перемешивания и продолжает использоваться с середины двадцатого века, несмотря на возрастающее количество доказательств ошибочности почти всех других предсказаний. В статье [Zilitinkevich et al., 2021] показано, что на самом деле плавучесть порождает хаотичные вертикальные плюмы, сливающиеся в более крупные и образующие обратный каскад по их преобразованию в самоорганизующиеся регулярные движения.

В работе [Zasko et al., 2022] исследованы оптимальные возмущения турбулентного устойчиво стратифицированного плоского течения Куэтта в широком диапазоне чисел Рейнольдса и Ричардсона. Эти возмущения рассчитываются на основе упрощенной системы уравнений, в которой турбулентные напряжения Рейнольдса и тепловые потоки аппроксимируются изотропной вязкостью и диффузией с коэффициентами, полученными по результатам прямого численного моделирования. Показано, что развитие наклонных оптимальных возмущений обусловлено совместным действием эффекта подъема и невязкого механизма Орра. Обсуждается энергетика оптимальных возмущений. Показано, что наклонные оптимальные возмущения быстро рассеиваются после достижения максимального усиления энергии.

В статье [Glazunov et al., 2022b] представлены результаты вихреразрешающего моделирования (LES) нейтрально и устойчиво стратифицированных турбулентных потоков над поверхностями городского типа. Численные эксперименты проводились для различных форм обтекаемых объектов и при различной статической устойчивости. Предложен новый метод постановки численного эксперимента, направленный на изучение переноса тепла и импульса внутри слоя шероховатостей, а также на исследование теплового и динамического взаимодействия турбулентного потока с поверхностью в целом. Обсуждаются также фи-

зические механизмы, приводящие к поддержанию турбулентности над пологом при сильном охлаждении поверхности.

Ряд работ посвящен новым методам экспериментального исследования атмосферной турбулентности. В статье [Shelekhov et al., 2022] рассматриваются возможности использования квадрокоптера в режиме зависания для маловысотного зондирования атмосферной турбулентности с высоким пространственным разрешением в городских районах, характеризующихся сложной орографией. Исследования проводились в разные времена года (зима, весна, лето и осень). Расхождения в данных, полученных с квадрокоптера и ультразвуковых метеостанций на территории со сложной орографией, объясняются частичной корреляцией рядов скоростей ветра в разных точках измерений и влиянием неоднородной поверхности. В статье [Шелехов и др., 2021] показана возможность использования телеметрии малогабаритных БПЛА для контроля над состоянием атмосферной турбулентности. Установлено, что спектры турбулентности, полученные с помощью ультразвукового анемометра и квадрокоптера, в целом совпадают, а незначительные различия наблюдаются в высокочастотной области спектра. В работе [Shelekhov et al., 2021] показана возможность использования малых БПЛА с поворотным крылом для мониторинга состояния атмосферной турбулентности на разных высотах. При определении продольных и поперечных масштабов турбулентности на высотах 4, 10 и 27 м использовался метод наименьших квадратов с использованием модели фон Кармана в качестве кривой регрессии. Условие, описывающее соотношение продольного и поперечного масштабов в изотропной атмосфере, выполняется с достаточной точностью.

В статье [Evgrafova, Sukhanovskii, 2022b] представлены результаты лабораторного моделирования процессов теплопереноса в условиях идеализированного городского ландшафта. Оценка определяющих параметров проводилась с использованием коэффициентов вихревого переноса, общих для пограничного слоя атмосферы. Изучен процесс охлаждения поверхности модели города после длительного нагревания инфракрасным излучением. Ключевым вопросом является временная зависимость температуры поверхности от типа городской застройки.

В статье [Репина, Артамонов, 2020] рассматриваются результаты прямых измерений турбулентных потоков на антарктической станции Беллинсгаузен в летние сезоны 2002, 2003, 2007 и 2009 гг. Исследуются особенности энергообмена для этих сезонов, а также межгодовая и внутрисезонная изменчивость характеристик энергообмена. Установлено, что основными факторами, влияющими на энергообмен атмосферы и подстилающей поверхности в прибрежной зоне Ан-

тарктики, являются синоптическая ситуация и состояние подстилающей поверхности (продолжительность бесснежного сезона и наличие мохового покрова).

В статье [Drozd et al., 2022] рассмотрены условия применимости теории подобия Монина—Обухова для расчета турбулентных потоков над неоднородным городским ландшафтом. Установлено, что турбулентные колебания составляющих скорости ветра усиливаются с высотой в пределах 20 метров над поверхностью. Турбулентная кинетическая энергия пропорциональна квадрату средней скорости горизонтального ветра. Коэффициент сопротивления определяется типом поверхности в области футпринта и имеет значение 0.08 и 0.05 для урбанизированных и покрытых растительностью поверхностей соответственно. Турбулентный поток теплового потока достаточно хорошо прогнозируется с помощью диагностической связи с тепловым потоком, асимметрией и стандартным отклонением вертикальной скорости, что предполагает значительный вклад когерентных структур в турбулентные потоки.

В статье [Barskov et al., 2022] представлены результаты многоуровневых измерений, проведенных над степью и над сложной городской местностью. Проанализирована связь между параметром устойчивости и статистическими свойствами атмосферной турбулентности. Над степью безразмерные турбулентные моменты вплоть до третьего порядка подчиняются теории подобия Монина—Обухова. Над городским ландшафтом для всех направлений ветра третий момент хорошо соответствует теоретической кривой в случаях устойчивой и неустойчивой стратификации, но имеется широкий разброс данных в условиях, близких к нейтральным. Асимметрия вертикальной составляющей скорости в условиях городского ландшафта отрицательна, и ее значение зависит от направления ветра. Связь между вторым и третьим моментами существует даже в устойчивых пограничных слоях над неоднородным ландшафтом. В работе [Barskov et al., 2019] представлены экспериментальные результаты турбулентного теплообмена между небольшим замерзшим озером, окруженным лесом, и пограничным слоем атмосферы. Отчетливо выделяются два режима формирования теплового потока в приземном слое. В условиях одновременной горизонтальной адвекции теплого воздуха в пограничном слое над пологом турбулентная диффузия отрицательного теплового потока вниз приводит к увеличению отрицательного потока явного тепла в приземном слое, сопровождаемому увеличением третьего момента. При этом возрастает вклад когерентных структур. Разработана модификация теории подобия Монина—Обухова с учетом непостоянства потоков в приземном слое.

5. ДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НИЖНИХ, СРЕДНИХ И ВЕРХНИХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ

В статье [Kosyakov et al., 2019] анализируются экспериментальные данные об акустических сигналах, зарегистрированных при взрывах и выбросах вещества на высотах 120–150 км. Отмечается, что значительная часть акустической энергии высотных взрывов достигает поверхности Земли без существенного поглощения. На основе анализа нелокальной трехпоточной газодинамической модели трансформации сильной взрывной волны в воздухе в непрерывное возмущение предложена гипотеза о последовательном распаде волны от высотного взрыва на волновые пакеты. Значительная часть энергии взрыва должна передаваться такими волновыми пакетами при их движении сверху вниз по атмосфере, которая должна быть практически “прозрачна” для подобных акустических возмущений.

Проанализированы динамические процессы в стратосфере над Арктикой в зимний сезон 2017/2018 г. с использованием данных реанализа NCER и результатов измерений с помощью спутниковых приборов SABER и MLS. Выявлены следующие особенности: отражение потоков волновой активности из стратосферы в тропосферу над Канадой в конце декабря 2017 г. и в начале января 2018 г., главное внезапное стратосферное потепление в феврале 2018 г. с изменением направления зонального ветра, с разделением стратосферного полярного вихря, с распространением аномалий циркуляции стратосферы до нижней тропосферы, с похолоданием в мезосфере, с изменением высоты стратопавзы и со снижением температуры нижней стратосферы в тропиках [Варгин, Кирюшов, 2019].

В [Варгин и др., 2021a, Vargin et al., 2022a] показано, что арктическая стратосферная зима 2021–2022 гг. характеризовалась устойчивым холодным стратосферным полярным вихрем с объемом полярных стратосферных облаков (ПСО), близким к максимальным значениям с 1980 г., до начала небольших явлений внезапного стратосферного потепления (ВСП) в конце февраля и начале марта и крупного ВСП 20 марта. Зимний сезон 2020–2021 г. в стратосфере Арктики характеризовался стратосферным полярным вихрем, ослабленным в начале января в результате главного внезапного стратосферного потепления, сопровождавшегося усилением Алеутского антициклона. Как малые, так и крупные события ВСП привели к ослаблению остаточной меридиональной циркуляции в верхней арктической стратосфере и ее усилению в средней и нижней стратосфере, что способствовало дополнительному потеплению приполярной области и ослаблению полярного вихря. После ВСП, продолжавшегося около 3 недель, и до конца зимнего сезона ниж-

няя стратосферная температура внутри стратосферного полярного вихря оставалась выше необходимой для образования полярных стратосферных облаков.

В работе [Лукьянов и др., 2021a] представлены результаты применения лагранжевых методов исследования тонкой динамической структуры стратосферного полярного вихря в зимне-весенний период 2019–2020 гг. Вследствие низкой активности планетарных волн, полярный вихрь в 2019–2020 гг. оставался устойчивым вплоть до конца апреля, что создало условия для рекордного разрушения озона в Арктике. Представлены вариации горизонтальной динамической структуры, полученной с помощью метода заполнения пространства обратными траекториями, и силы вихря, представленной в виде М-функции, в зависимости от времени и высотного уровня. Также представлены вариации озона и термодинамических параметров, осредненные по ансамблю траекторий внутри вихря, с использованием данных реанализа ERA5.

С использованием данных пяти пятидесятилетних расчетов 5-й версии климатической модели ИВМ РАН для современного климата анализируется межгодовая изменчивость характеристик стратосферного полярного вихря в Арктике и дат весенней перестройки циркуляции стратосферы по сравнению с данными реанализа [Варгин и др., 2020a]. Ранние перестройки сопровождаются более сильной волновой активностью по сравнению с поздними. Зимние сезоны с максимальным объемом воздуха в полярной стратосфере и условиями, достаточными для формирования полярных стратосферных облаков, в среднем характеризуются ранними весенними перестройками.

Комплексный анализ ослабления/усиления арктических стратосферных полярных вихрей с их влиянием на тропосферу показывает сдвиг к экватору/полюсу траектории штормов в Северной Атлантике [Vargin et al., 2022b]. В ответ на недавнее усиление арктических явлений при сравнении двух периодов: 1998–2014 и 1980–1997 гг. было выявлено смещение к полюсам траектории тихоокеанских штормов и ослабление североатлантической траектории штормов.

Исследован отклик стратосферы Арктики на климатическое явление Эль-Ниньо с учетом его восточно- и центрально-тихоокеанского типов за период 1950–2005 гг. на основе регрессионного и композитного анализа с использованием расчетов шести совместных климатических моделей проекта CMIP5 и данных реанализа [Коленникова и др., 2021]. По результатам пяти 50-летних расчетов с 5-й версией совместной климатической модели ИВМ РАН показано, что зимние сезоны с явлением Эль-Ниньо характеризуются более высокой температурой арктической стратосферы по сравнению с сезонами с Ла-Нинья. Зимним сезонам с положительными аномалиями

температуры поверхности в северной части Тихого океана соответствует более низкая температура стратосферы в арктических районах по сравнению с сезонами с отрицательными аномалиями температуры воды [Варгин и др., 2021б].

Анализ динамических процессов и изменений озонового слоя в арктической стратосфере зимой 2019–2020 гг. проводился с использованием численных экспериментов с химико-транспортной моделью (XTM) и данных реанализа [Smishlyayev et al., 2021]. Результаты численных расчетов, выполненных по нескольким сценариям учета химического разрушения озона, показали, что как динамические и химические процессы вносят значительный вклад в изменения озона как в восточном, так и в западном полушариях.

С использованием данных спутникового мониторинга озонового слоя TOMS/OMI, реанализа MERRA-2 и аэрологического зондирования вертикального распределения озона и температуры на Южном полюсе проведено исследование изменчивости параметров антарктической озоновой аномалии. Анализируются динамические процессы в стратосфере Антарктики, определяющие условия для сильного разрушения озонового слоя, которое за последние 8 лет, несмотря на уменьшение концентраций озоноразрушающих веществ, наблюдалось в Антарктике в 2011 и 2015 гг. [Варгин и др., 2020б].

Трехмерный (3D) анализ планетарных волн может предоставить более региональную информацию о динамических взаимодействиях стратосферы и тропосферы [Wei et al., 2021]. Восходящий поток волн из тропосферы в стратосферу максимален над северо-восточной Евразией, тогда как нисходящий поток происходит в основном над регионом Северной Америки и Северной Атлантики, который намного сильнее в середине–конце зимы. Это распределение определяется волновыми взаимодействиями между различными волновыми числами планетарных волн, особенно между волновым числом 1 и волновым числом 2.

В статье [Vyazankin et al., 2020] представлены прогностические возможности модели глобального климата SOCOL. В работе [Цветкова и др., 2021] приведены оценки химического разрушения озона в зимне-весенние сезоны для стратосферы Арктики на базе многолетних данных наблюдений вертикального распределения озона. Проанализированы особенности и возможные причины необычайно сильного и устойчивого стратосферного полярного вихря в Арктике в зимний сезон 2019/2020 г., приведшего к рекордному за последние годы разрушению озонового слоя, и связанные с этим полярным вихрем динамические процессы. Для достижения лучшего согласования смоделированной динамики стратосферы арктической зимы с наблюдениями в CCM SOCOL была включена процедура ассимиляции [Tsvetkova et al., 2020]. Траектории, основанные

на результатах расчетов SOCOL, демонстрируют разумное согласие с траекториями, основанными на данных реанализа внутри полярного вихря. То есть модель может быть использована для анализа и прогноза процессов, связанных с озоном в зимне-весенние сезоны. Полученные результаты анализа нескольких последних крупных событий ВСП в Арктике показывают, что ССМ SOCOL может использоваться для прогноза ВСП на период до 8 дней.

В статье [Лукьянов и др., 2021б] представлено краткое описание и некоторые результаты применения траекторной и дисперсионной транспортных моделей, разработанных в ЦАО для исследования процессов переноса примесей в стратосфере и тропосфере. Модели используют в Региональном информационно-аналитическом центре “Средняя атмосфера”, созданном в Центральной аэрологической обсерватории. На основе результатов моделирования с использованием траекторной модели TRACAO выполнен сравнительный анализ эволюции стратосферных полярных вихрей зимой 2015/2016 и 2018/2019 гг. [Варгин и др., 2020с].

Изменчивость общего содержания озона в Арктике зимой 2015/2016 г. изучена с использованием данных национальной сети, оснащенной фильтро-озонметрами М-124 и спутникового мониторинга [Никифорова и др., 2019]. По данным отечественной сети фильтровых озонметров М-124 и результатам спутникового мониторинга исследована изменчивость общего содержания озона в Арктике в зимний сезон 2015/2016 г. Проанализировано развитие в конце января 2016 г. первой за всю историю наблюдений озоновой мини-дыры, возникшей в первом полугодии. Представлен анализ причин наблюдавшейся изменчивости общего содержания озона над территорией России в первом квартале 2016 г., проведено сопоставление со значительными озоновыми аномалиями в Арктике в 1996/1997 и 2010/2011 гг.

В работах [Нерушев, Ивангородский, 2019; Nerushev et al., 2020] изложен метод определения зон турбулентности в верхней тропосфере по данным измерений собственного излучения атмосферы с геостационарных метеорологических спутников и при использовании корреляционно-экстремальных алгоритмов. Приводятся результаты расчетов среднемесячных площадей зон турбулентности с различными значениями коэффициента горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии за 2007–2017 гг. в зоне обзора спутников. Показано, что на протяжении последних 11 лет происходило существенное увеличение площади областей, занятых сравнительно слабой и умеренной турбулентностью, и некоторое уменьшение площадей с сильной и очень сильной турбулентностью. Выявлена тесная связь межгодовой изменчивости среднемесячных значений площадей зон турбулентности с соответствующей

изменчивостью характеристик струйных течений. Выявлена связь изменчивости турбулентности с изменчивостью температуры верхней тропосферы. В этом случае влияние температуры на турбулентность проявляется косвенно через характеристики реактивного течения.

В статье [Chkhetiani, Shalimov, 2022] предложена простая двумерная модель, позволяющая указать причину аномальных амплитуд движения ветра в нижней ионосфере. Модель основана на существовании установившегося экмановского профиля ветра на высотах мезосферы–термосферы.

6. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТА

В работе [Володин, Грицун 2020] рассматриваются результаты моделирования изменений климата в 2015–2100 гг. с помощью климатической модели ИВМ РАН INM-CM5. Анализируется изменение среднеглобальной температуры и географического распределения температуры и осадков. Показано, что величина глобального потепления для рассматриваемых сценариев, предсказываемая моделью INM-CM5, меньше, чем величина потепления согласно другим моделям CMIP6. Показано, что летом именно на территории России температура самого жаркого месяца может расти быстрее, чем среднесезонная температура. Рассматривается изменение площади морского льда в Арктике и показано, что, согласно данным моделирования, ни при каком сценарии не происходит полного освобождения Северного Ледовитого океана ото льда в XXI в. Исследуются изменения меридиональной функции тока в атмосфере и в океане.

В статье [Vorobyeva, Volodin, 2021] представлено исследование прогнозируемости продолжительности и температуры зимних сезонов с помощью климатической модели ИВМ РАН INM-CM5. Проведено сравнение корреляции среднемесячных зимних аномалий основных переменных в нескольких регионах с аналогичными результатами модели ПЛАВ. Показано увеличение корреляции аномалий за годы с событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Показано, что стратосферная изменчивость вносит значительный вклад.

Современные климатические модели демонстрируют большие расхождения в равновесной чувствительности климата (ECS) [Volodin, 2021]. Было исследовано влияние изменений параметризации облачности на ECS в климатической модели ИВМ РАН INM-CM4-8. Эта модель демонстрирует самую низкую ECS среди моделей CMIP6. Тремя основными механизмами, ответственными за увеличение ECS, были увеличение рассеивания облачности в более теплом климате из-за увеличения дефицита водяного пара в безоблачной части ячейки, уменьшение образования облачности в пограничном слое атмосферы в теп-

лом климате и мгновенная реакция облаков. CO_2 увеличивается из-за изменений стратификации.

Проведен анализ изменений стока двух рек — Амура и Селенги — в XXI в. по расчетам с ансамблем климатических моделей CMIP6 с использованием байесова подхода в сравнении с данными гидропостов о годовом стоке и данными архива GPCP-2.3 о годовом количестве осадков над водосборами на разных временных масштабах [Липавский и др., 2022]. Для обоих водосборов большие межмодельные различия связаны с оценками и многолетнего среднего стока, и межгодовой изменчивости. Межмодельное распределение байесовых весов указывает на большую роль неопределенности, связанной с начальными условиями для модельных расчетов. Для полного стока в бассейне Амура проявляется положительный тренд в XXI в. при всех проанализированных сценариях антропогенного воздействия. Для полного стока Селенги тренды в XXI в. при всех использованных сценариях антропогенного воздействия на систему не выявлены. Значимые тренды для поверхностного стока Амура и Селенги не выявлены при всех алгоритмах учета байесовых весов и сценариях антропогенных воздействий. При этом отмечены существенные междесятилетние вариации межгодовой изменчивости стока.

Проведен анализ продолжительности навигационного периода (ПНП) на Северном морском пути (СМП) в 21 веке на основе моделей ансамбля CMIP5 при сценарии RCP 8.5 с использованием методов байесового осреднения с выделением различных участков СМП [Парфенова и др., 2022]. Получено, что различия качества воспроизведения моделями ПНП и ее изменений в западной части СМП больше, чем в восточной. Ансамблевое среднее для ПНП получено в диапазоне 3–4 мес в середине XXI века с увеличением до примерно 6 мес к концу века. Совместный учет качества воспроизведения моделями характеристик климата на всех временных масштабах (многолетнее среднее, межгодовые вариации, линейный тренд) в сравнении со спутниковыми данными позволяет уменьшить межмодельное стандартное отклонение вдвое для западной части СМП и в полтора раза — для восточной.

В работе [Денисов и др., 2022] получены модельные оценки вклада антропогенных и природных потоков парниковых газов с территории разных стран в глобальные изменения климата в XXI в. при различных сценариях антропогенных воздействий. Сделаны количественные оценки влияния учета изменений региональных климатических условий на интенсивность обмена парниковыми газами между атмосферой и естественными экосистемами на разных временных горизонтах в сопоставлении с антропогенными эмиссиями. Для России, Китая, Канады и США во второй половине XXI в. поглощение CO_2 природными экосистемами уменьшается при всех сценариях антропо-

генного воздействия с ослаблением соответствующего стабилизирующего климат эффекта. При этом, согласно модельным оценкам, эмиссия метана в атмосферу болотными экосистемами в анализировавшихся регионах в XXI в. значительно увеличивается. Как следствие, суммарный эффект естественных потоков парниковых газов в атмосферу для отдельных регионов может ускорять потепление.

Разработана стационарная вычислительно эффективная схема ChAP 1.0 для круговорота серы в тропосфере [Eliseev et al., 2021]. Эта схема предназначена для моделей Земной системы средней сложности. Схема учитывает выбросы диоксида серы в атмосферу, ее выпадение на поверхность, окисление до сульфатов, а также сухое и влажное выпадение сульфатов на поверхность. Расчеты по схеме обусловлены антропогенными выбросами диоксида серы в атмосферу за 1850–2000 гг., взятыми из набора данных CMIP5, и метеорологией ERA-Interim, предполагающей, что естественные источники серы в атмосферу остаются неизменными в течение этого периода. Модель разумно воспроизводит характеристики тропосферного цикла серы, известные из этих источников информации. Признаны ограничения схемы и определены перспективы дальнейшего развития. Несмотря на свою простоту, ChAP может успешно использоваться для моделирования антропогенного загрязнения атмосферы серой в грубых пространственных и временных масштабах. В статье (Елисеев и др., 2019) уточнены ранее полученные с климатической моделью ИФА им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН) результаты, связанные с влиянием сернистого газа атмосферы на наземный углеродный цикл. Ввиду недоступности глобальных данных о приземной концентрации SO_2 она была восстановлена по соответствующим данным о приземной концентрации сульфатов с использованием статистической модели, коэффициенты которой были подобраны по расчетам с моделью химии атмосферы RAMS-CMAQ. Наиболее значимое влияние SO_2 на характеристики наземного углеродного цикла выявлено на юго-востоке Северной Америки и в Европе. При этом такое влияние на юго-востоке Азии существенно слабее, чем было получено ранее, что связано с завышением влагосодержания атмосферы КМ ИФА РАН в этом регионе.

Используя результаты расчетов 5-й версии совместной климатической модели ИВМ РАН CM5 с 2015 г. по 2100 г., выполненных в рамках проекта CMIP6 по умеренному (SSP2-4.5) и экстремальному (SSP5-8.5) сценарию роста концентраций парниковых газов, исследуется отклик шторм-треков Северного полушария на изменение климата, а также на усиление и ослабление арктического стратосферного полярного вихря [Мартынова и др., 2022]. При умеренном сценарии к концу XXI века ожидается существенный

сдвиг обоих шторм-треков к северу, а также небольшое усиление Северо-Тихоокеанского и ослабление Северо-Атлантического шторм-трека. При экстремальном сценарии отклик обоих шторм-треков проявляется через их усиление и в меньшей степени через сдвиг к северу. Выявлено различие в отклике Северо-Тихоокеанского и Северо-Атлантического шторм-треков на усиление и ослабление стратосферного полярного вихря в разных климатических условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом обзоре рассмотрены статьи, относящиеся к области динамической метеорологии или тесно связанной с ней, авторами/соавторами которых являются российские ученые, и которые были опубликованы в 2015–2018 гг. в рецензируемых журналах (изданиях), проиндексированных в базах данных WoS и/или Scopus. Обзор был невозможен без участия и поддержки со стороны большого числа российских ученых, которым выражаю искреннюю благодарность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акперов М.Г., Елисеев А.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Парфенова М.Р., Кенинг Т. Потенциал ветровой энергии в арктических и субарктических широтах и его изменение в XXI веке по расчетам с использованием региональной климатической модели // Метеорология и гидрология. 2022. № 6. С. 18–29.
- Акперов М.Г., Мохов И.И., Дембицкая М.А., Парфенова М.Р., Ринке А. Особенности температурной стратификации в тропосфере арктических широт по данным реанализа и модельных расчетов // Метеорология и гидрология. 2019а. № 2. С. 19–27.
- Акперов М.Г., Семенов В.А., Мохов И.И., Парфенова М.Р., Дембицкая М.А., Бокучава Д.Д., Ринке А., Дорн В. Влияние океанического притока тепла в Баренцево море на региональные изменения ледовитости и статической устойчивости атмосферы // Лед и Снег. 2019б. Т. 59. № 4. С. 529–538.
- Бекряев Р.В. Статистические аспекты количественной оценки полярного усиления. I. Отношение трендов // Метеорология и гидрология. 2022. Т. 47. № 6. С. 419–427.
- Вазаева Н.В., Репина И.А., Шестакова А.А., Ганбат Г. Мезомасштабный вихрь над озером Убсу-Нур (Увс-Нуур): анализ и численное моделирование // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022а. Т. 19. № 4. С. 306–317.
- Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Дурнева Е.А. О критериях идентификации полярных мезоциклонов // Метеорология и гидрология. 2022б. № 4. С. 20–33.
- Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Курганский М.В., Каллистратова М.А. Спиральность и турбулентность в атмосферном пограничном слое // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 34–52.
- Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Максименков Л.О. Организованная валиковая циркуляция и перенос минеральных аэрозолей в атмосферном пограничном слое // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 2. С. 17–31.
- Варгин П.Н., Кирюшов Б.М. Внезапное стратосферное потепление в Арктике в феврале 2018 г. и его влияние на тропосферу, мезосферу и озоновый слой // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 41–56.
- Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Ракушина Е.В., Володин Е.М., Погорельцев А.И. Исследование изменчивости дат весенних перестроек циркуляции стратосферы и параметров стратосферного полярного вихря в Арктике по данным моделирования и реанализа // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020а. Т. 56. № 5. С. 526–539.
- Варгин П.Н., Никифорова М.П., Звягинцев А.М. Изменчивость антарктической озоновой аномалии в 2011–2018 гг // Метеорология и гидрология. 2020б. № 2. С. 20–34.
- Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Кирюшов Б.М. Динамические процессы в стратосфере Арктики в зимний сезон 2018/19 г // Метеорология и гидрология. 2020с. № 6. С. 5–18.
- Варгин П.Н., Гурьянов В.В., Лукьянов А.Н., Вязанкин А.С. Динамические процессы стратосферы Арктики зимой 2020–2021 г // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021а. Т. 57. № 6. С. 651–664.
- Варгин П.Н., Коленникова М.А., Кострыкин С.В., Володин Е.М. Влияние аномалий температуры поверхности экваториальной и северной частей Тихого океана на стратосферу над Арктикой по расчетам климатической модели ИВМ РАН // Метеорология и гидрология. 2021б. № 1. С. 5–16.
- Володин Е.М., Грицун А.С. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5 // Изв. Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 3. С. 255–266.
- Глазунов А.В., Мортиков Е.В., Барсков К.В., Каданцев Е.В., Зилитинкевич С.С. Слоистая структура устойчиво стратифицированных турбулентных течений со сдвигом скорости // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 4. С. 13–26.
- Голицын Г.С. Вероятностные структуры макромира: землетрясения, ураганы, наводнения // М.: Физматлит. 2021. 174 с.
- Голицын Г.С., Чхетиани О.Г., Вазаева Н.В. Облака и теория турбулентности: самоподобие, показатель фрактала $4/3$ и инварианты // Известия Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 2. С. 242–244.
- Горбунов М.Е., Коваль О.А., Мамонтов А.Е. Метод сферических фазовых экранов для моделирования расходящихся волновых пучков в неоднородных средах // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 1. С. 66–75.
- Дебольский А.В., Степаненко В.М., Глазунов А.В., Зилитинкевич С.С. Интегральные модели проникающей конвекции со сдвигом скорости // Известия

- Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 2. С. 3–16.
- Демчев Д.М., Кулаков М.Ю., Макштас А.П., Махотина И.А., Фильчук К.В., Фролов И.Е. Верификация данных реанализов ERA-Interim и ERA5 о приповерхностной температуре воздуха в Арктике // Метеорология и гидрология. 2020. № 11. С. 36–45.
- Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Модельные оценки вклада в глобальные изменения климата в XXI в. естественных и антропогенных эмиссий CO₂ и CH₄ в атмосферу с территории России, Китая, Канады и США // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 18–32.
- Дианский Н.А., Степанов Д.В., Фомин В.В., Чумаков М.М. Циркуляция вод у северо-восточного побережья острова Сахалин при прохождении трех типов глубоких циклонов над Охотским морем // Метеорология и гидрология. 2020. № 1. С. 45–58.
- Дурнева Е.А., Чхетиани О.Г. Планетарная высотная фронтальная зона в Атлантико-Европейском секторе в летние сезоны в 1990–2019 гг // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 24–33.
- Елисеев А.В., Тимажев А.В., Хименес Л.П. Вертикальный масштаб для профилей водяного пара и соединений серы в нижней тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 7(402). С. 572–580.
- Елисеев А.В., Чжан М., Гизатуллин Р.Д., Алтухова А.В., Переведенцев Ю.П., Скороход А.И. Влияние сернистого газа в атмосфере на наземный углеродный цикл // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 41–53.
- Иванова А.Р. Влияние обледенения на функционирование авиационного транспорта: состояние вопроса и проблемы прогнозирования // Метеорология и гидрология. 2021. № 7. С. 59–78.
- Иванова А.Р. Мировой опыт наукастинга грозовой деятельности // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 71–83.
- Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н., Комасько Н.И., Завьялова А.А. Использование системы COSMO-RU для прогноза обледенения воздушных судов над территорией Российской Федерации // Метеорология и гидрология. 2022. № 6. С. 30–45.
- Ингель Л.Х. О динамике инерционных частиц в интенсивных атмосферных вихрях // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021а. Т. 57. № 6. С. 632–640.
- Ингель Л.Х. Пограничный слой экмановского типа над анизотропной подстилающей поверхностью // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021б. Т. 14. № 1. С. 63–66.
- Ингель Л.Х. Возникновение вихревого движения, обусловленное дифференциальной диффузией // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 36–40.
- Ингель Л.Х. О динамике концентрации тяжелых частиц в интенсивных вихревых течениях // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022а. Т. 58. № 4. С. 396–402.
- Ингель Л.Х. Стратифицированные течения, обусловленные пространственными неоднородностями коэффициентов обмена // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022б. Т. 58. № 1. С. 22–26.
- Ингель Л.Х., Макоско А.А. Оценки влияния неоднородностей силы тяжести на тепловой режим пограничного слоя атмосферы // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 1. С. 83–87.
- Исследование природной среды высокоширотной Арктики на НИС “Ледовая база мыса Баранова” / Ред. Макштас А.П., Соколов В.Т. СПб: 2021. ААНИИ, 260 с.
- Калашиник М.В. Излучательная неустойчивость баротропного струйного течения в стратифицированной вращающейся атмосфере // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 3–10.
- Калашиник М.В. Экмановское трение и формирование верхнетропосферных зональных течений // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 5. С. 514–525.
- Калашиник М.В., Куличков С.Н. О возмущениях давления, вызываемых движущимся тепловым источником фронтального типа (гидростатический режим) // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 51–61.
- Калашиник М.В., Курганский М.В., Чхетиани О.Г. Бароклинная неустойчивость в геофизической гидродинамике // Успехи физических наук. 2022. Т. 192. № 10. С. 1110–1144.
- Калашиник М.В., Чхетиани О.Г. Нестационарные вихревые дорожки в сдвиговых течениях // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 127–138.
- Калинин Н.А., Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Костарев С.В., Быков А.В. Условия возникновения сильных шквалов и смерчей, вызывающих крупные ветровалы в лесной зоне Европейской части России и Урала // Метеорология и гидрология. 2021. № 2. С. 35–49.
- Калмыкова О.В., Федорова В.В., Фадеев Р.О. Анализ условий возникновения вспышки смерчей над Черным морем 16 июля 2019 года и оценка успешности прогноза // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021а. № 1 (379). С. 112–129.
- Калмыкова О.В. Методика оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья России и результаты ее испытаний // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2021б. № 48. С. 42–61.
- Калмыкова О.В., Шершаков В.М., Новицкий М.А., Шмерлин Б.Я. Автоматизированный прогноз смерчей у Черноморского побережья России: первый опыт и оценка его результативности // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 84–94.
- Кан В., Горбунов М.Е., Федорова О.В., Софиева В.Ф. Широтное распределение параметров внутренних волн в атмосфере по флуктуациям амплитуды радиозатменных сигналов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020а. Т. 56. № 6. С. 647–659.
- Кан В., Горбунов М.Е., Шамаков А.В., Софиева В.Ф. Восстановление параметров внутренних волн в атмосфере по флуктуациям амплитуды сигнала в радиозатменном эксперименте // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020б. Т. 56. № 5. С. 499–513.

- Коленникова М.А., Варгин П.Н., Гущина Д.Ю. Влияние Эль-Ниньо на стратосферу Арктики по данным моделей CMIP5 и реанализа // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 5–23.
- Курганский М.В. Отклик атмосферной циркуляции на аномалии притоков тепла в двумерной бароклинной модели атмосферы // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 1. С. 43–54.
- Курганский М.В., Крупчатников В.Н. Российские исследования в области динамической метеорологии в 2015–2018 гг // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 6. С. 6–47.
- Курганский М.В. К теории симметричной неустойчивости периодических по времени течений с точным учетом силы Кориолиса // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58, № 4. С. 384–395.
- Левина Г.В. Применение теории турбулентного вихревого динамо для ранней диагностики зарождения тропических циклонов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15. № 2. С. 47–59.
- Липавский А.С., Елисеев А.В., Мохов И.И. Байесовы оценки изменения стока Амура и Селенги в XXI веке по результатам ансамблевых модельных расчетов CMIP6 // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 64–82.
- Лукиянов А.Н., Варгин П.Н., Юшков В.А. Исследование с помощью лагранжевых методов аномально устойчивого арктического стратосферного вихря, наблюдавшегося зимой 2019–2020 гг // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021а. Т. 57. № 3. С. 278–285.
- Лукиянов А.Н., Ганышин А.В., Юшков В.А., Вязанкин А.С. Траекторное моделирование средней атмосферы // Метеорология и гидрология. 2021б. № 9. С. 95–104.
- Мартынова Ю.В., Варгин П.Н., Володин Е.М. Изменение шторм-треков Северного полушария в зимний период в условиях будущего климата по расчетам климатической модели ИВМ РАН CM5 // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 3. С. 250–262.
- Махотина И.А., Чечин Д.Г., Макитас А.П. Радиационный эффект облачности над морским льдом в Арктике во время полярной ночи по данным дрейфующих станций “Северный Полюс”-37, 39, 40 // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 514–525.
- Мортиков Е.В., Глазунов А.В., Дебольский А.В., Лыков В.Н., Зилитинкевич С.С. О моделировании скорости диссипации кинетической энергии турбулентности // Доклады Академии Наук. 2019. Т. 489. № 4. С. 414–418.
- Мохов И.И. Экстремальные атмосферные и гидрологические явления в российских регионах: связь с тихоокеанской десятилетней осцилляцией // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 2. С. 183–188.
- Мохов И.И. Аномальные зимы в регионах Северной Евразии в разных фазах явлений Эль-Ниньо // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 2. С. 93–98.
- Мохов И.И. Зимние атмосферные блокирования в Северном полушарии при климатических изменениях последних десятилетий (1980–2018 гг.) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 508. № 1. С. 132–138.
- Мохов И.И., Чернокульский А.В., Осипов А.М. Центры действия атмосферы Северного и Южного полушарий: особенности и изменчивость // Метеорология и гидрология. 2020а. № 11. С. 5–23.
- Мохов И.И., Макарова М.Е., Порошенко А.Г. Тропические циклоны и их трансформирование во внетропические: оценки полувексовых тенденций изменения // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020б. Т. 493. № 1. С. 83–88.
- Мохов И.И., Юшков В.П., Тимажев А.В., Бабанов Б.А. Шквалы с ураганным ветром в Москве // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2020с. № 6. С. 168–172.
- Мохов И.И., Осипов А.М., Чернокульский А.В. Центры действия атмосферы в Северном полушарии: современные особенности и ожидаемые изменения в 21 веке по расчетам с ансамблями климатических моделей CMIP5 и CMIP6 // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 2. С. 332–340.
- Мохов И.И., Порошенко А.Г. Действие как интегральная характеристика атмосферных (климатических) структур: оценки для тропических циклонов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 6. С. 619–625.
- Мохов И.И., Порошенко А.Г. Статистические и модельные оценки связи интенсивности и времени существования тропических циклонов // Метеорология и гидрология. 2021а. № 5. С. 25–30.
- Мохов И.И., Порошенко А.Г. Статистические и модельные оценки связи размеров и времени жизни полярных мезоциклонов // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2021б. № 6. С. 53–57.
- Мохов И.И., Семенов В.А. (Ред.). Климат Арктики: процессы и изменения. М.: Физматкнига, 2022. 360 с.
- Мохов И.И., Тимажев А.В. Атмосферные блокирования и изменения их повторяемости в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 5–16.
- Мохов И.И., Тимажев А.В. Повторяемость летних атмосферных блокирований в Северном полушарии в разных фазах явлений Эль-Ниньо, тихоокеанской десятилетней и атлантической мультidesятилетней осцилляций // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022а. Т. 58. № 3. С. 239–249.
- Мохов И.И., Тимажев А.В. Интегральный индекс активности атмосферных блокирований в Северном полушарии в последние десятилетия // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022б. Т. 58. № 6. С. 638–647.
- Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В. Статистическая модель временной изменчивости характеристик высотных струйных течений северного полушария на основе спутниковых измерений // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021а. Т. 57. № 4. С. 401–413.
- Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Кулижникова Л.К., Ивангородский Р.В. О связи температурных аномалий с характеристиками высотных струйных течений // Современные проблемы дистанционного

- зондирования Земли из космоса. 2021б. Т. 18. № 1. С. 199–209.
- Нерушев А.Ф., Ивангородский Р.В. Определение зон турбулентности в верхней тропосфере на основе спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 205–215.
- Никифорова М.П., Варгин П.Н., Звягинцев А.М. Аномалии содержания озона над территорией России в зимне-весенний период 2015/16 г // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 36–49.
- Парфенова М.Р., Елисеев А.В., Мохов И.И. Изменения периода навигации в арктических морях на Северном морском пути в 21 веке: байесовы оценки по расчетам с ансамблем климатических моделей // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507, № 1. С. 118–125.
- Репина И.А., Артамонов А.Ю. Турбулентный теплообмен атмосферы и подстилающей поверхности в прибрежной зоне Антарктики по данным инструментальных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 45–52.
- Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Тудрий К.О., Блинов Д.В., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Самсонов Т.Е., Репина И.А., Артамонов А.Ю. Разработка оперативной системы численного прогноза погоды и условий возникновения опасных явлений с высокой детализацией для Московского мегаполиса // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 5–19.
- Слюняев А.В., Кокорина А.В. Численное моделирование “волн–убийц” на морской поверхности в рамках потенциальных уравнений Эйлера // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 210–223.
- Стерлядкин В.В., Ермаков Д.М., Кузьмин А.В., Пашинов Е.В. Предсказание наводнений на крупных реках по радиометрическим микроволновым измерениям из космоса. Возможно ли это? // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 40–52.
- Ткаченко Е.В., Дебольский А.В., Мортиков Е.В., Глазунов А.В. Вихреразрешающее моделирование и исследование параметризаций затухающей турбулентности в вечернем переходе атмосферного пограничного слоя // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 3. С. 263–281.
- Цветкова Н.Д., Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Кирюшов Б.М., Юшков В.А., Хаттатов В.У. Исследование химического разрушения озона и динамических процессов в стратосфере Арктики зимой 2019–20 г // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 70–83.
- Чернокульский А.В., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Ерошкина Н.А., Корнев Д.П., Быков А.В., Калинин Н.А., Курганский М.В., Павлюков Ю.В., Спрыгин А.А., Яринич Ю.И. Шквалы и смерчи на европейской части России 15 мая 2021 г.: диагностика и моделирование // Метеорология и гидрология. 2022. № 11. С. 71–90.
- Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Селезнева Е.В., Захарченко Д.И., Антонеску Б., Кюне, Т. Смерчи в российских регионах // Метеорология и гидрология. 2021. № 2. С. 17–34.
- Чхетиани О.Г., Вазаева Н.В. Об алгебраических возмущениях в атмосферном пограничном слое // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 62–75.
- Шелехов А.П., Афанасьев А.Л., Шелехова Е.А., Кобзев А.А., Тельминов А.Е., Молчунов А.Н., Поплевина О.Н. Использование малоразмерных БПЛА для измерения турбулентности в атмосфере // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 611–624.
- Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Яринич Ю.И. Оценка конвективной неустойчивости атмосферы в случаях со шквалами, смерчами и крупным градом по данным спутниковых наблюдений и реанализа ERA5 // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 6(401). С. 429–435.
- Шишов Е.А., Соленая О.А., Чхетиани О.Г., Азизян Г.В., Конров В.М. Многоточечные измерения температуры и ветра в приземном слое // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 3. С. 286–297.
- Akperov M., Rinke A., Mokhov I.I. et al. Future projections of cyclone activity in the Arctic for the 21st century from regional climate models (Arctic-CORDEX) // Glob. Planet. Change. 2019. V. 182. P. 103005.
- Akperov M., Zhang W., Miller P.A., Mokhov I.I., Semenov V.A., Matthes H., Rinke A. Responses of Arctic cyclones to biogeophysical feedbacks under future warming scenarios in a regional Earth system model // Environmental Research Letters. 2021. V. 16. № 6. P. 064076.
- Barskov K., Chechin D., Drozd I., Repina I. et al. Relationships between second and third moments in the surface layer under different stratification over grassland and urban landscapes // Boundary-Layer Meteorology. 2022.
- Barskov K., Stepanenko V., Repina I., Artamonov A., Gavrikov A. Two regimes of turbulent fluxes above a frozen small lake surrounded by forest // Boundary-Layer Meteorology. 2019. V. 173. P. 311–320.
- Bekryaev R.V. Interrelationships of the North Atlantic multidecadal climate variability characteristics // Russian Journal of Earth Sciences. 2019a. V. 19(3). P. ES3004.
- Bekryaev R.V. One mystery of the North Atlantic multidecadal variability. An attempt of simple explanation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019b. V. 231. № 1. P. 012008.
- Chashechkin Y.D. Conventional partial and new complete solutions of the fundamental equations of fluid mechanics in the problem of periodic internal waves with accompanying ligaments generation // Mathematics. 2021. V. 9 (6). № 586.
- Chashechkin Yu.D. Fast superfine components and sound packets in flows induced by a drop impact on a target fluid at rest // Fluid Dynamics & Material Processing (FDMP). 2020. V. 16. № 4. P. 773–800.
- Chashechkin Y.D., Zagumennyi I.V. Formation of waves, vortices and ligaments in 2D stratified flows around obstacles // Physica Scripta. 2019. V. 94. № 5 P. 1–17.
- Chashechkin Yu.D., Ilynykh A.Yu. Complete Coalescence, Partial Bounce and Rebound: Different Regimes Resulting from the Interaction of a Free Falling Drop with a Target Fluid // Fluid Dynamics & Material Processing (FDMP). 2020. V. 16. № 4. P. 801–811.

- Chashechkin Yu.D., Zagumennyi I.V. 2D hydrodynamics of a plate: from creeping flow to transient vortex regimes // *Fluids*. 2021. V. 6(9). P. 310.
- Chechin D.G., Makhotina I.A., Lüpkes C., Makshtas A.P. Effect of Wind Speed and Leads on Clear-Sky Cooling over Arctic Sea Ice during Polar Night // *Journal of the atmospheric science*. 2019. V. 76. P. 2481–2503.
- Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., Shikhov A., Azhigov I., Selezneva E., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T. Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era // *Monthly Weather Review*. 2020a. V. 148. № 8. P. 3081–3110.
- Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Azhigov I. Satellite-based study and numerical forecasting of two tornado outbreaks in the Ural region in June 2017 // *Atmosphere*. 2020b. V. 11. № 11. P. 1146.
- Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Kalinin N., Kurgansky M., Sherstyukov B., Yarinich Yu. Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010 // *Atmospheric Research*. 2022. V. 267. P. 105928.
- Chkhetiani O.G., Shalimov S.L. On anomalous wind amplitudes in the lower ionosphere // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2022. V. 240. P. 105960.
- Davydova M.A., Chkhetiani O.G., Levashova N.T., Nechaeva A.L. On estimation of the contribution of secondary vortex structures to the transport of aerosols in the atmospheric boundary layer // *Fluid Dynamics*. 2022. V. 57. № 8. P. 998–1007.
- Drozd I., Repina I., Gavrikov A. et al. Atmospheric turbulence structure above urban nonhomogeneous surface // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2022. V. 22. № 5. P. ES01SI11.
- Eliseev A.V., Gizatullin R.D., Timazhev A.V. ChAP 1.0: a stationary tropospheric sulfur cycle for Earth system models of intermediate complexity // *Geoscientific Model Development*. 2021. V. 14. № 12. P. 7725–7747.
- Ermakov D., Kuzmin A., Pashinov E., Sterlyadkin V., Chernushich A., Sharkov E. Comparison of Vertically Integrated Fluxes of Atmospheric Water Vapor According to Satellite Radiothermography, Radiosondes, and Reanalysis // *Remote Sens*. 2021. V. 13. P. 1639.
- Ermakov D.M., Raev M.D., Chernushich A.P., Sharkov E.A. Algorithm for construction of global ocean-atmosphere radiothermal fields with high spatiotemporal sampling based on satellite microwave measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019a. V. 55. № 9. P. 1041–1052.
- Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P. Role of tropospheric latent heat advective fluxes in the intensification of tropical cyclones // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019b. V. 55. № 9. P. 1254–1265.
- Evgrafova A., Sukhanovskii A. Angular momentum transfer in direct numerical simulations of a laboratory model of a tropical cyclone // *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*. 2022a. V. 116. № 3. P. 185–205.
- Evgrafova A., Sukhanovskii A. Impact of complex relief on heat transfer in urban area // *Urban Climate*. 2022b. V. 43. P. 101177.
- Glazunov A.V., Debolskiy A.V., Mortikov E.V. Turbulent Length Scale for Multilayer RANS Model of Urban Canopy and Its Evaluation Based on Large-Eddy Simulations // *Supercomputing Frontiers and Innovations*. 2022a. V. 8(4). P. 100–116.
- Glazunov A., Mortikov E., Debolskiy A. Studies of Stable Stratification Effect on Dynamic and Thermal Roughness Lengths of Urban-Type Canopy Using Large-Eddy Simulation // *J. Atmos. Sci.* 2022b. V. 80. P. 31–48.
- Gledzer A.E., Gledzer E.B., Khapaev A.A., Chkhetiani O.G. Multiplicity of flow regimes in thin fluid layers in rotating annular channels // *Fluid Dynamics*. 2021. V. 56. № 4. P. 587–599.
- Goncharov V.P. Dynamics of thin jets generated by temperature fronts // *Physical Review Fluids*. 2021a. V. 6. № 10. P. 103801.
- Goncharov V.P. Nonlinear pulsations of horizontal jets // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2021b. V. 95. P. 101237.
- Gorbunov M.E., Kirchengast G., Lauritsen K.B. Generalized Canonical Transform Method. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2021. V. 14. № 2. P. 853–867.
- Gordov E.P. et al. Multidisciplinary ENVIROMIS conference: new experience // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — IOP Publishing, 2020. V. 611. № 1. P. 012063.
- Harlander U., Kurgansky M.V. Two-dimensional internal gravity wave beam instability. Linear theory and subcritical instability // *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*. 2021. V. 115. № 5–6. P. 612–647.
- Ingel L.Kh. On the nonlinear dynamics of turbulent thermals in the shear flow // *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. 2019a. V. 15. № 1. P. 35–39.
- Ingel L.Kh. On the limiting laws of buoyant convective jets and thermals from local sources of a heat releasing impurity // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2019b. V. 92. № 6. P. 1481–1488.
- Ingel L.Kh. On the nonlinear dynamics of massive particles in tornadoes // *Technical Physics*. 2020. V. 65. № 6. P. 860–864.
- Ingel L.Kh. Initiation of vortex flows induced by double diffusion // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021a. V. 94. № 3. P. 648–653.
- Ingel L.Kh. Slope flows produced by bulk heat release // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021b. V. 94. № 1. P. 160–164.
- Ingel L.Kh. Some problems of nonlinear dynamics of turbulent thermals // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2021c. V. 64. № 3. P. 205–213.
- Ingel L.K. On the theory of slope flows over a thermally inhomogeneous surface // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2022. V. 63. № 5. P. 843–850.
- Ingel L.Kh., Makosko A.A. Geostrophic flow disturbances influenced by inhomogeneities of gravity field. 3D analytical model // *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*. 2021. V. 115. № 1. P. 35–43.
- Ivanov V., Varentsov M., Matveeva T., Repina I., Artamonov A., Khavina E. Arctic Sea Ice Decline in the 2010s: The Increasing Role of the Ocean–Air Heat Exchange in the Late Summer // *Atmosphere*. 2019. V. 10. № 4. P. 184.
- Kalashnik M.V. Long-wave instabilities in the SQG model with two boundaries // *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*. 2020. V. 115(4). P. 1–19.
- Kalashnik M.V., Chkhetiani O.G. Optimal disturbances in the development of the instability of a free shear layer and a system of two counter-streaming jet flows // *Fluid Dynamics*. 2020a. V. 55. № 2. P. 171–184.
- Kalashnik M.V., Chkhetiani O.G. Baroclinic instability and nonlinear oscillations in the truncated SQG model //

- Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020b. V. 146. № 732. P. 3534–3547.
- Kalashnik M.V., Chkhetiani O.G., Kurgansky M.V.* Discrete SQG models with two boundaries and baroclinic instability of jet flows // *Physics of Fluids*. 2021. V. 33. № 7. P. 076608.
- Kalashnik M.V., Kurgansky M.V.* Hydrodynamic instability of vertical motions excited by spatially periodic distributions of heat sources // *Fluid Dynamics*. 2020. V. 55. № 4. P. 554–565.
- Kalashnik M.V., Kurgansky M.V., Kostykin S.V.* Instability of surface quasigeostrophic spatially periodic flows // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2020. V. 77. № 1. P. 239–255.
- Kosyakov S.I., Kulichkov S.N., Chkhetiani O.G., Tsybul'skaya N.D.* On the effect of weak attenuation of acoustic waves from high-altitude explosions // *Acoustical Physics*. 2019. V. 65. № 6. P. 731–741.
- Kurgansky M.V.* On the statistical distribution of pressure drops in convective vortices: Applications to martian dust devils // *Icarus*. 2019. V. 317. P. 209–214.
- Kurgansky M.V.* On determination of the size-frequency distribution of convective vortices in pressure time-series surveys on Mars // *Icarus*. 2020a. V. 335. P. 113389.
- Kurgansky M.V.* On the instability of finite-amplitude inertia-gravity waves // *Fluid Dynamics Research*. 2020b. V. 52. P. 035503.
- Kurgansky M.V.* Inertial instability of the Kolmogorov flow in a rotating stratified fluid // *Fluid Dynamics Research*. 2021a. V. 53. P. 035502.
- Kurgansky M.V.* An estimate of convective vortex activity at the InSight landing site on Mars // *Icarus*. 2021b. V. 358. P. 114200.
- Kurgansky M.V.* A simple model of blocking action over a hemisphere // *Theoretical and Applied Climatology*. 2021c. V. 147. № 1–2. P. 65–71.
- Kurgansky M.V.* Statistical distribution of atmospheric dust devils on Earth and Mars // *Boundary-Layer Meteorology*. 2022a. V. 184. № 3. P. 381–400.
- Kurgansky M.V.* Inertial instability of the time-periodic Kolmogorov flow in a rotating fluid with the full account of the Coriolis force // *Fluid Dynamics Research*. 2022b. V. 54. № 5.
- Kurgansky M.V.* On short-wave instability of the stratified Kolmogorov flow // *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*. 2022c. V. 36. № 4. P. 575–595.
- Kurgansky M.V., Seelig T., Klein M., Will A., Harlander U.* Mean flow generation due to longitudinal librations of sidewalls of a rotating annulus // *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*. 2020a. V. 114. № 6. P. 742–762.
- Kurgansky M.V., Maksimenkov L.O., Chkhetiani O.G.* Vertical helicity flux as an index of interannual atmospheric variability // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020b. V. 606 P. 012028.
- Kuznetsov E.A., Mikhailov E.A.* Slipping flows and their breaking // *Annals of Physics*. 2022. V. 447. P. 169088.
- Lupo A.R., Jensen A.D., Mokhov I.I., Timazhev A., Eichler T., Efe B.* Changes in global blocking character during recent decades // *Atmosphere*. 2019. V. 10. № 2. P. 92.
- Malinovskaya E.A., Chkhetiani O.G.* On conditions for the wind removal of soil particles // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2021. V. 62. № 7. P. 1117–1131.
- Mokhov I.I., Chefranov S.G., Chefranov A.G.* Point vortices dynamics on a rotating sphere and modeling of global atmospheric vortices interactions // *Phys. Fluids*. 2020. V. 32. 106605.
- Mokhov I.I., Timazhev A.V.* Seasonal Temperature Extremes in the North Eurasian Regions Depending on ENSO Phase Transitions // *Atmosphere*. 2022. V. 13. № 2. P. 249.
- Nerushev A.F., Visheratin K.N., Ivangorodsky R.V.* Dynamics of High-Altitude Jet Streams from Satellite Measurements and Their Relationship with Climatic Parameters and Large-Scale Atmospheric Phenomena // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. V. 55. № 9. P. 1198–1209.
- Nerushev A.F., Visheratin K.N., Ivangorodsky R.V.* Turbulence in the upper troposphere according to long-term satellite measurements and its relationship with climatic parameters // *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. V. 17. № 6. P. 82–86.
- Perezhogin P.A., Glazunov A.V., Gritsun A.S.* Stochastic and deterministic kinetic energy backscatter parameterizations for simulation of the two-dimensional turbulence // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2019. V. 34. № 4. P. 197–213.
- Polonsky A.B.* The Ocean's Role in Climate Change. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle, UK, 2019, 294 p.
- Romanovskii O.A., Kharchenko O.V.* Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics III // *Atmosphere*. 2022. V. 13. № 11. P. 1912.
- Serykh I.V., Sonechkin D.M.* El Niño forecasting based on the global atmospheric oscillation // *International Journal of Climatology*. 2021. V. 41. P. 3781–3792.
- Shelekhov A.P. et al.* Low-Altitude Sensing of Urban Atmospheric Turbulence with UAV // *Drones*. 2022. V. 6. № 3. P. 61.
- Shelekhov A.P. et al.* Profiling the turbulence from spectral measurements in the urban atmosphere using UAVs // *Proc. SPIE 11864, Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments VI*, 118640B (12 September 2021).
- Shestakova A.A., Debolskiy A.V.* Impact of the Novaya Zemlya Bora on the Ocean-Atmosphere Heat Exchange and Ocean Circulation: A Case-Study with the Coupled Model // *Atmosphere*. 2022. V. 13. № 7. P. 1108.
- Shestakova A.A., Myslenkov S.A., Kuznetsova A.* Influence of Novaya Zemlya Bora on sea waves: Satellite measurements and numerical modeling // *Atmosphere*. 2020. V. 11. № 7. P. 726.
- Shestakova A.A., Chechin D.G., Lüpkes C., Hartmann J., Maturilli M.* The foehn effect during easterly flow over Svalbard // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. V. 22. № 2. P. 1529–1548.
- Shestakova A.A.* Impact of land surface roughness on downslope windstorm modelling in the Arctic // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2021. V. 95. P. 101244.
- Shestakova A.A., Repina I.A.* Mesoscale vortex over Lake Baikal: A case-study // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2021. V. 21. № 5. P. 1.
- Shestakova A.A., Toropov P.A.* Orographic and lake effect on extreme precipitation on the Iranian coast of the Caspian sea: a case study // *Meteorology and Atmospheric Physics*. 2021. V. 133. P. 69–84.

- Shikhov A., Chernokulsky A., Azhigov I., Semakina A. A satellite-derived database for stand-replacing windthrows in boreal forests of the European Russia in 1986–2017 // *Earth System Science Data*. 2020. V. 12. P. 3489–3512.
- Shikhov A., Chernokulsky A., Kalinin N., Bykov A., Pischalnikova E. Climatology and Formation Environments of Severe Convective Windstorms and Tornadoes in the Perm Region (Russia) in 1984–2020. // *Atmosphere*. 2021. V. 12. № 11. P. 1407.
- Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Azhigov I.O. Spatial and Temporal Distribution of Windthrows in the Forest Zone of Western Siberia in 2001–2020 // *Cosmic Research*. 2022. V. 60 (Suppl 1). P. S91–S103.
- Slunyaev A.V. Effects of coherent dynamics of stochastic deep-water waves // *Phys. Rev. E*. 2020. V. 101. P. 062214.
- Slunyaev A.V. Persistence of hydrodynamic envelope solitons: detection and rogue wave occurrence // *Physics of Fluids*. 2021. V. 33. P. 036606.
- Slunyaev A.V., Stepanyants Y.A. Modulation property of flexural-gravity waves on a water surface covered by a compressed ice sheet // *Phys. Fluids*. 2022. V. 34. P. 077121.
- Smyshlyaev S.P., Vargin P.N., Motsakov M.A. Numerical modeling of ozone loss in the exceptional Arctic stratosphere winter-spring of 2020 // *Atmosphere*. 2021. V. 12. P. 1470.
- Stepanov D., Fomin V., Gusev A., Diansky N. Mesoscale Dynamics and Eddy Heat Transport in the Japan/East Sea from 1990 to 2010: A Model-Based Analysis // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. V. 10(1). P. 33.
- Sukhanovskii A., Popova E. The Importance of Horizontal Rolls in the Rapid Intensification of Tropical Cyclones // *Boundary-Layer Meteorology*. 2020. V. 175. P. 259–276.
- The Republic of Adygea Environment* // Ed. Kostianoy A.G., Bedanokov M.K., Lebedev S.A. Springer International Publishing AG, 2020. 714 p.
- Tsvetkova N.D., Vyzankin A.S., Vargin P.N., Lukyanov A.N., Yushkov V.A. Investigation and forecast of Sudden Stratospheric Warming events with chemistry climate model SOCOL // *IOP Conf. Series, Earth Environmental Science*. 2020. V. 606. P. 012062.
- Turbulence, Atmosphere and Climate Dynamics // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2022. V. 1040.
- Vargin P., Martynova Y., Volodin E., Kostykin S. Investigation of boreal storm tracks in historical simulations of INM CM5 and reanalysis data // *IOP Conf. Series, Earth Environmental Science*. 2019. V. 386. P. 012007.
- Vargin P.N., Koval A.V., Guryanov V.V. Arctic Stratosphere Dynamical Processes in the Winter 2021–2022 // *Atmosphere*. 2022a. V. 13. 1550.
- Vargin P.N., Kostykin S.V., Volodin E.M., Pogoreltsev A.I., Wei K. Arctic Stratosphere Circulation Changes in the 21st Century in Simulations of INM CM5 // *Atmosphere*. 2022b. V. 13. P. 25.
- Vazaeva N.V., Chkhetiani O.G., Kurgansky M.V. On integral characteristics of Polar Lows // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020. V. 606 P. 012065.
- Volodin E. The Mechanisms of Cloudiness Evolution Responsible for Equilibrium Climate Sensitivity in Climate Model INM-CM4-8 // *Geophysical Research Letters*. 2021. V. 48. P. e2021GL096204.
- Vorobyeva V., Volodin E. Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale // *Tellus A*. 2021. V. 73. P. 1892435.
- Vulfson A., Nikolaev P. Local Similarity Theory of Convective Turbulent Layer Using “Spectral” Prandtl Mixing Length and Second Moment of Vertical Velocity // *Journal of the atmospheric science*. V. 79. P. 101–118.
- Vyazankin A.S., Tsvetkova N.D., Vargin P.N., Yushkov V.A. Atmospheric Modeling for Controlling the Motion of a Return Vehicle // *Solar System Research*. 2020. V. 54. № 7. P. 679–684.
- Wei K., Chen W., Vargin P. Longitudinal peculiarities of planetary waves-zonal flow interaction and its role in stratosphere-troposphere dynamical coupling // *Climate Dynamics*. 2021.
- Zagumennyi Y.V., Chashechkin Y.D. Numerical Analysis of Flows of Stratified and Homogeneous Fluids near Horizontal and Inclined Plates // *Fluid Dyn*. 2019. V. 54. P. 958–969.
- Zasko G.V., Glazunov A.V., Mortikov E.V., Nechepurenko Y.M., Perezhogin P.A. Optimal Energy Growth in Stably Stratified Turbulent Couette Flow // *Boundary-Layer Meteorol*. 2023. T. 187. № 1–2. C. 395–421.
- Zilitinkevich S., Kadantsev E., Repina I., Mortikov E., Glazunov A. Order out of Chaos: Shifting Paradigm of Convective Turbulence // *J. Atmos. Sci.* 2021. V. 78. P. 3925–3932.

Research in Dynamic Meteorology in Russia in 2019–2022

I. A. Repina^{1, 2, *}

¹Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Science, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia

²Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, 1-4, Moscow, 119234 Russia

*e-mail: repina@ifaran.ru

This review outlines the most significant results of research in dynamic meteorology performed by Russian scientists in 2019–2022. It is part of the Russian National Report on Meteorology and Atmospheric Sciences submitted to the International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences (IAMAS). The review is supplemented by a list of main publications of Russian scientists on dynamic meteorology in 2019–2022.

Keywords: dynamic meteorology, atmospheric dynamics, mesoscale processes, turbulence, weather forecasting, troposphere, middle and upper atmosphere, climate, mathematical modeling