

УДК 551.513:519.6

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ В 2015–2018 гг.

© 2019 г. М. В. Курганский^{1*}, В. Н. Крупчатников^{2, 3**}

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

²Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт
630090, Новосибирск, Советская ул., 30

³Институт вычислительной математики и математической
геофизики Сибирского Отделения РАН
630090, Новосибирск, пр-т Академика Лебедева, 6
E-mail: *kurgansk@ifaran.ru, **vkrupchatnikov@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.07.2019 г.

Принята к печати 07.08.2019 г.

Обзор содержит наиболее значимые результаты работ российских ученых в области динамической метеорологии, выполненных в 2015–2018 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 2015–2018 гг.

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

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-35155566-47>

ВВЕДЕНИЕ

Исследования российских ученых, выполненные в области динамической метеорологии в 2015–2018 гг. и обсуждаемые в данном обзоре можно условно разбить по следующим темам: «Общая динамика атмосферы», «Крупномасштабные процессы и прогноз погоды», «Мезомасштабные процессы», «Мелкомасштабные движения и турбулентность в пограничном слое атмосферы», «Динамическое взаимодействие нижней, средней и высокой атмосферы», «Математические проблемы в теории климата и экологии». Структура обзора следует в основном предшествующему обзору за 2011–2014 гг. (Курганский, Крупчатников, 2016).

Специально выделим, что Всероссийская конференция с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», посвященная столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова, состоялась 16–18 мая 2018 г. в г. Москве. На конференции обсуждались ключевые вопросы, относящиеся к актуальным направлениям в науках о Земле — исследованиям в области фи-

зики атмосферы, климата и окружающей среды. Избранные труды конференции опубликованы в [1].

Также необходимо отметить, что под эгидой Всемирной программы исследований погоды ВМО в связи с проведением Олимпийских игр, с 2000 г. был подготовлен и реализован ряд метеорологических проектов, поскольку своевременное предоставление высококачественного прогноза погоды крайне важно для организаторов и участников спортивных соревнований, особенно на открытом воздухе. Один из таких проектов (FROST-2014) был связан с зимними Олимпийскими и паралимпийскими Играми в Сочи с 7 по 23 февраля и с 7 по 16 марта 2014 г. соответственно. В [2, 3] представлено общее описание проекта FROST-2014 и результаты его успешной реализации. В частности, отмечено, что для метеорологического обеспечения зимних Олимпийских игр 2014 г. сеть наблюдений в Сочинском регионе была усилена более чем 40 автоматическими метеорологическими станциями, доплеровским радаром с двойной поляризацией, профиломерами температуры и ветра, радиолокаторами и т.д., что

позволило использовать сочинский стенд для разработки, опробования и взаимного сравнения различных технологий прогнозирования текущей погоды и краткосрочного численного прогноза погоды. Прогностическая продукция FROST-2014 использовалась для оперативного метеорологического обслуживания олимпийских событий. Полученные новые технологии, обмен опытом и профессиональные разработки способствовали успеху Олимпиады и оставили ценное наследие для дальнейших исследований.

1. ОБЩАЯ ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ

За отчетный период были выпущены три монографии, имеющие отношение к динамике атмосферы. В 2016 г. в издательстве МАКС Пресс вышла коллективная монография [4]. Цель авторов заключалась в представлении некоторых результатов работы, проводимой в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, по созданию численной модели земной системы, отвечающей современным требованиям и находящейся на переднем крае мировой научно-технологической деятельности в этом направлении. В 2017 г. в издательстве ГЕОС вышла книга [5], где представлены результаты экспериментальных, теоретических и модельных исследований динамики волновых и обменных процессов в атмосфере, выполненных в последние годы в ИФА им. А.М. Обухова РАН, в том числе при поддержке РФФИ. В книге рассматривается широкий круг вопросов: взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью; развитие, распространение и взаимодействие волн, вихревых структур и турбулентности в толще атмосферы от приземного слоя до нижней термосферы и систематическое влияние этих процессов на результаты дистанционного зондирования. В том же издательстве в 2018 г. опубликована книга [6], где представлены результаты экспериментальных, диагностических, теоретических и модельных исследований атмосферных вихрей, которые в течение последних лет выполнялись в ИФА им. А.М. Обухова РАН при поддержке РФФИ. Сделана попытка общего анализа иерархии интенсивных атмосферных вихрей: циркумполярных вихрей и центров действия атмосферы океанского и континентального масштаба, внутритропических циклонов и антициклонов, в том числе блокирующих антициклонов, тропических циклонов (ураганов, тай-

фунов), интенсивных полярных мезоциклонов («полярных ураганов»), смерчей (торнадо).

Классическим разделом общей динамики атмосферы является динамика крупномасштабных атмосферных процессов, включая теорию квазидвумерной турбулентности и теорию динамических систем.

В [7] исследуется роль так называемых инвариантов Казимира (казимиров, Casimirs) в формировании динамики двумерных потоков и формулируются условия, возникающие в задаче устойчивости течений идеальной несжимаемой жидкости в присутствии казимиров. Рассматриваются некоторые общие подходы к конструированию разностных схем для решения уравнений двумерной динамики, которые обладают заданными казимирами.

В [8] исследовано влияние численных аппроксимаций на статистические характеристики моделируемой двумерной турбулентности, поддерживаемой стохастическим внешним воздействием. Проверена способность различных конечно-разностных и полулагранжевых схем достоверно воспроизводить двунаправленный каскад энергии и энтропии при грубом пространственном разрешении. Изучено, насколько важным требованием к численным схемам является требование сохранения инвариантов, присущих идеальной двумерной жидкости. В качестве эталонного решения использовались результаты расчета с высоким пространственным разрешением. Выбор исследуемых схем связан с их применением в задачах моделирования атмосферы и океана, в частности в климатической модели INMCM ИВМ им. Г.И. Марчука РАН и модели среднесрочного прогноза погоды SL-AV. Выявлена важность законов сохранения интегральной завихренности и энтропии в эксперименте с мелкомасштабным внешним воздействием. В отличие от вязкой жидкости при больших числах Рейнольдса уравнения двумерной идеальной жидкости обладают бесконечным числом инвариантов, наличие которых усложняет как ее статистическое описание, так и численное моделирование.

В [9] исследованы равновесные состояния аппроксимаций Аракавы для уравнений двумерной идеальной жидкости при высоком разрешении 8192×8192 . Проведено их сравнение с квазиравновесными состояниями вязкой жидкости. Особое внимание уделено недавно обнаруженной ступенчатой форме крупных вихрей, а также наличию мелких вихрей в конечном состоянии. Показано, что равновесная

динамика крупных масштабов в аппроксимациях Аракавы близка к теоретическим равновесным состояниям идеальной жидкости. В [10] проведено численное моделирование исследованных в [9] квазиравновесных состояний в рамках двух моделей: аппроксимации Аракавы с двумя квадратичными инвариантами и аппроксимации уравнений вязкой жидкости в асимптотическом случае малой вязкости. В указанных работах рассмотрена возможность применения теории сходимости по Чезаро для решения проблемы нестационарности конечных состояний, а также проблемы достижения равновесных состояний.

В статье [11], опубликованной в юбилейном номере журнала «Известия РАН. Физика атмосферы и океана», посвященном 100-летию А.М. Обухова, исследованы статистические свойства различных конечномерных аппроксимаций уравнений двумерной идеальной жидкости. Рассмотрен особый класс аппроксимаций, введенный А.М. Обуховым: системы гидродинамического типа. Изучены распределения завихренности по площадям и квазиравновесные когерентные структуры. Проведено сравнение этих когерентных структур со структурами, возникающими в вязкой жидкости со случайным форсингом.

Авторы [12] изучают реакцию простой квазигеострофической баротропной модели атмосферы на различные классы возмущений, используя формализм теории отклика Рюэля. Они исследуют геометрию таких возмущений путем построения ковариантных векторов Ляпунова невозмущенной системы и обнаруживают в случае орографического воздействия существенную его проекцию на устойчивые ляпуновские направления. Это приводит к резонансному отклику, подобному волне Россби, что не имеет сходства с вынужденной изменчивостью в том же диапазоне пространственно-временных масштабов. Такой «климатический сюрприз» соответствует нарушению флуктуационно-диссипационной теоремы, что согласуется с основными положениями неравновесной статистической механики. Резонанс можно отнести к определенной группе редко посещаемых неустойчивых периодических орбит невозмущенной системы. Полученные результаты подтверждают идею использования базовых методов неравновесной статистической механики и многомерных хаотических динамических систем для понимания динамики климата.

В [13] изучается нелинейная динамика длинноволновых возмущений невязкого потока

Колмогорова, который моделирует периодически изменяющиеся в горизонтальном направлении геофизические потоки, будь то океанические или атмосферные. Используется метод Галеркина с базисными функциями, представляющими первые три члена в разложении пространственно-периодических возмущений в тригонометрический ряд. Условия ортогональности этих функций формулируют нелинейную систему уравнений в частных производных для коэффициентов разложения. На основе асимптотических решений этой системы идентифицирована линейная, квазилинейная и нелинейная стадия динамики возмущения. Показано, что нестационарный рост возмущений на первых двух стадиях сменяется стадией устойчивых нелинейных колебаний. Соответствующие колебания описываются уравнением осциллятора, содержащим кубическую нелинейность, интегрируемую в терминах эллиптических функций. Получена аналитическая формула для периода колебаний, определяющая ее зависимость от амплитуды начального возмущения. Описаны структурные особенности поля функции потока возмущенного потока, связанные с образованием замкнутых вихревых ячеек и извилистым течением между ними. В качестве дополнения проведен асимптотический анализ нелинейной динамики длинноволновых возмущений, наложенных на затухающее при малой вязкости течение Колмогорова. Строго показано, что в этом случае все компоненты скорости возмущенного потока остаются ограниченными.

Ранее проведенная работа показала, что интегральная региональная энтропия (integrated regional enstrophy, IRE) связана с суммой положительных показателей Ляпунова. Относительно высокие значения IRE, полученные по полю атмосферного потока при исследовании блокирования атмосферы, были идентифицированы с началом или прекращением событий блокирования, а также, вообще говоря, с переходами между состояниями крупномасштабного потока, даже теми, которые не связаны с событиями блокирования. Энтропия Колмогорова–Синая (KSE), известная как метрическая энтропия, также связана с суммой положительных показателей Ляпунова. Эта величина может рассматриваться как мера предсказуемости и будет ненулевой для хаотической системы. Таким образом, показатель IRE также связан с KSE. Исследования в [14] показывают, что относительно низкие (высокие) значения IRE соответствуют более

стабильному (переходному) крупномасштабному потоку с большей (меньшей) степенью предсказуемости. Переходный режим наименее предсказуем и должен быть связан с более высокими значениями IRE и KSE. Основанная на понятии энтропии диагностика используется в [15] при моделировании климата Северного полушария на климатической модели Института Пьера Симона Лапласа версии 4 (IPSL-CM4) и версии 5 (IPSL-CM5) для сценариев умеренного изменения климата. В [15] 31-летний диагностический временной ряд IRE исследуется на предмет изучения кратковременной (5–40 дней) изменчивости планетарного масштаба, которая может соответствовать изменениям режима циркуляции в среде с повышенным содержанием углекислого газа. Приведенный анализ временных рядов указывает, что диагностика IRE обеспечивает доказательства примерно 30–35 переходов режимов атмосферной циркуляции в год в более теплом климате, что аналогично контрольному расчету и наблюдениям за последние 30 лет с использованием данных реанализа. Этот результат имеет значение для вопроса о предсказуемости погоды в более теплом климате.

Конвекция является принципиально важным механизмом, ответственным за генерацию кинетической энергии атмосферных движений, и ее исследованиям посвящен ряд работ.

В цикле работ [16–19] экспериментально и численно изучалась конвекция над локализованным источником тепла в цилиндрическом слое для жидкостей с различными значениями числа Прандтля, в том числе и при наличии общего вращения жидкости. Структура воспроизводимого в лаборатории циклонического вихря подобна типичной структуре тропических циклонов по данным наблюдений и результатам численного моделирования, включая вторичные потоки в пограничном слое.

В традиционных теоретических моделях конвекции от изолированных источников результаты обычно слабо зависят от размеров источников — конвективные струи и изолированные термики быстро «забывают» геометрию источников. Но в последнее время стали актуальными задачи, в которых размеры источников относительно велики и могут существенно влиять на результаты. Сюда относится, например, задача о динамике мощных выбросов метана геологического происхождения. В [20] рассматриваются некоторые обобщения известных интегральных моделей термиков и струй.

Хотя эти упрощенные схемы не могут конкурировать со сложными численными моделями в описании пространственной структуры течений, они, как показано в [20], могут удовлетворительно воспроизводить ряд важнейших численных результатов (высота, время подъема конвективных элементов) и, сверх того, позволяют выявить физические закономерности и установить явные зависимости от параметров задачи.

Нелинейная интегральная модель турбулентного термика обобщена в [21] на случай наличия горизонтальной составляющей его движения относительно среды (например, при всплытии термика в сносящем потоке). Найдено общее аналитическое решение для случая кусочно-постоянного вертикального профиля горизонтальной скорости среды. Решение описывает разные режимы динамики термиков. Обращается внимание на нелинейный эффект взаимодействия горизонтальной и вертикальной составляющих движения термика, поскольку каждая из составляющих влияет на интенсивность вовлечения окружающей среды, т.е. на скорость роста объема термика и, следовательно, на его подвижность. Показано, что интенсификация вовлечения среды за счет взаимодействия термика с поперечным потоком может приводить к существенному уменьшению его подвижности.

В [22] представлены результаты теоретических оценок, относящихся к интенсивной нисходящей конвекции, возникающей над «холодным пятном» на горизонтальной поверхности. Рассматривается случай термических неоднородностей достаточно большой амплитуды, когда нельзя ограничиться линейным приближением. Безразмерным критерием является аналог числа Рэлея, пропорциональный амплитуде отклонения температуры и кубу горизонтального масштаба термической неоднородности. Из физических соображений и масштабного анализа получены явные аналитические выражения для глубины (высоты) проникновения термических возмущений в среду и амплитуд составляющих скорости конвекции. Эти результаты хорошо согласуются с имеющимися в литературе экспериментальными данными. Число Нуссельта пропорционально аналогу числа Рэлея в степени $1/5$, причем из сравнения с результатами экспериментов следует, что коэффициент пропорциональности имеет величину порядка единицы. Определено влияние рассматриваемой конвекции на перенос пассивной примеси.

В [23] исследована линейная гидродинамическая неустойчивость пространственно-периодической системы восходящих и нисходящих потоков в устойчиво стратифицированной атмосфере. Такая постановка задачи призвана смоделировать системы облачных гряд, наблюдаемые в атмосфере, когда области восходящих токов отвечают облакам, а нисходящих токов — межоблачным промежуткам. Получен довольно неожиданный вывод о том, что учет в задаче турбулентной вязкости и теплопроводности атмосферы, а также радиационного выхолаживания ведет к неустойчивости при числах Ричардсона, превышающих критическое значение $1/8$ для случая без диссипации.

Классическая теория конвективной неустойчивости Рэлея в работе [24] обобщена на случай фазовых переходов водяного пара как для конвекции с выпадением осадков (precipitation convection, PC), так и для конвекции без выпадения осадков (non-precipitation convection, NPC). Установлено, что область неустойчивости на плоскости параметров задачи состоит из двух подобластей, в одной из которых наибольшие скорости роста имеют локализованные осесимметричные возмущения со структурой тропического циклона (урагана). В случае PC таким возмущениям соответствуют восходящие движения на оси симметрии, в случае NPC возможен самопроизвольный рост локализованных вихрей как с восходящими, так и с нисходящими движениями на оси. В случае PC при других значениях параметров пространственно-периодические облачные структуры (конвективные валы или замкнутые облачные ячейки) имеют наибольшую скорость роста, а в случае NPC-мезомасштабных систем это относится к конвективным валам или мезомасштабным облачным кластерам с кольцевыми структурами. В [25] рассмотрена задача о конвективной неустойчивости слоя атмосферы, содержащего конечную по горизонтали область, заполненную облачной средой. Построены экспоненциально растущие со временем решения: или уединенные облачные валы, или локализованные в пространстве системы облачных валов. В случае осевой симметрии их аналогами являются конвективные вихри как с восходящими, так и с нисходящими движениями на оси, а также облачные кластеры с кольцевыми конвективными структурами. В зависимости от анизотропии турбулентного обмена масштаб вихрей меняется от масштаба смерча до масштаба тропических циклонов. Решения с нисходящими движениями на оси могут соответствовать формированию

«хобота» смерчей или «глаза бури» в тропических циклонах.

Некоторые работы были посвящены изучению интенсивных атмосферных вихрей конвективной природы: тропических циклонов, смерчей (торнадо) и пыльных вихрей.

В [26] показано, что для лабораторной модели тропического циклона (ТЦ) критическим параметром, определяющим среднюю радиальную скорость и интенсивность вихря, является наложенная разность температур. Найдена сильная зависимость интенсивности развитого вихря от скорости вращения. Сходство между временной динамикой максимальных значений радиальной и азимутальной скоростей для разных скоростей вращения, несмотря на их большие количественные расхождения, показывает, что существует некоторая универсальная особенность стадии развития циклонического вихря с локализованным тепловым потоком. Это может служить основой простой аналитической модели динамики ТЦ.

Чтобы предложить ответ на вопрос «Когда начнется циклогенез в благоприятной тропической среде?» в [27] представлена численная диагностика тропического циклогенеза во вращающейся среде. Примененный подход использует почти-облачно-разрешающее численное моделирование для количественного анализа спиральной самоорганизации влажно-конвективной атмосферной турбулентности. Моделирование позволяет диагностировать циклогенез, когда в формирующемся вихре происходит зацепление первичной и вторичной циркуляции за счет конвективных когерентных структур — вихревых горячих башен (ВГБ). Утверждается, что ВГБ являются неотъемлемыми элементами турбулентного вихревого динамо в тропической атмосфере Земли. Обсуждается, как сгенерированное зацепление превращает зарождающийся вихрь в целостную спиральную систему, обеспечивающую положительную обратную связь между циркуляциями. С помощью численных экспериментов показано, как именно происходит обмен энергией между первичной и вторичной циркуляцией и их дальнейшее взаимное усиление.

В [28] на основе соображений теории подобия предложена простая гидродинамическая модель смерчеобразных вихрей, которая с учетом «распада вихря» на некотором уровне над землей связывает максимальную азимутальную скорость в вихре, достигаемую у поверхности земли, с конвективной доступной потенциал-

ной энергией (КДПЭ), накопленной в смерчевых условиях в окружающей атмосфере. Оценена относительная доля разрушения (диссипации) спиральности (кинетической энергии) в зоне «распада вихря» и, соответственно, в приземном пограничном слое под вихрем. Эти рассуждения положены в основу динамико-статистического рассмотрения связи между интенсивностью смерча и запасами КДПЭ в окружающей атмосфере.

Исследования пыльных вихрей (dust devils) и их влияние на общество рассмотрены в обзорной статье [29]. Пыльные вихри были замечены с древних времен и были задокументированы во многих странах, включая Россию, а также на планете Марс. Выделены три основных стимула для исследований пыльных вихрей: ядерные испытания, исследования земного климата и, возможно наиболее значимо, исследования Марса. Простые аналитические модели структуры потока в пыльных вихрях в их установившемся состоянии и «теплофизическая» теория, которая объясняет, как эти структуры поддерживаются, рассмотрены в обзоре [30]. Далее в [30] результаты численного моделирования с высоким разрешением используются для получения представления о структуре пыльных вихрей и изучения влияния на них шероховатости поверхности. Статья завершается обзором влияния поднятой пыли на структуру потоков в пыльных вихрях и обсуждением открытых вопросов. Обзоры [29, 30] переизданы в книге [31].

Самосогласованная гидродинамическая модель генерации пыльного вихря за счет солнечного нагрева предложена и проанализирована в [32]. Тороидальные потоки и поля вертикальной скорости обусловлены неустойчивостью, возникающей в результате инверсной плотностной стратификации, вызванной солнечным нагревом песчаной поверхности почвы. Моделирование сложной нелинейной структуры потока проводится с учетом пассивного переноса песчаных пробных частиц и возникающих при этом трибоэлектрических эффектов. Предложены значения параметров для лабораторного эксперимента «Пыльный вихрь», с учетом возможности использования различных рабочих газов и параметров пылевых частиц. Новый тип «взрывнорастущей» вихревой структуры теоретически исследован в рамках гидродинамики идеальной жидкости в работе [33]. Показано, что подобные пыльным вихрям вихревые структуры могут возникать в конвективно неустойчивых атмосферных слоях, содержащих фоновую завихренность. Из точного аналити-

ческого решения получена и проанализирована структура вертикальной завихренности и тороидальной скорости. Предположение, что завихренность постоянна с высотой, приводит к решению, которое взрывно растет, когда поток невязок. Полученные результаты согласуются с наблюдениями и лабораторными экспериментами.

Интенсивные атмосферные вихри характеризуются ненулевой спиральностью поля скорости. Нижеперечисленные работы посвящены изучению динамических аспектов спиральности, которые также имеют общее гидродинамическое значение.

В [34] приведены общие сведения о спиральности поля скорости и месте этого понятия в современных исследованиях в области геофизической гидродинамики и динамической метеорологии. Сведены воедино различные, как известные ранее в литературе, так и введенные впервые формы уравнения баланса спиральности в атмосферных движениях, в том числе с учетом эффектов сжимаемости воздуха и вращения Земли. Даны уравнения и соотношения, справедливые при различных приближениях, которые делаются в динамической метеорологии, как-то: приближение Буссинеска, приближение квазистатики, квазигеострофическое приближение. Сделан акцент на анализе баланса спиральности в крупномасштабных квазигеострофических системах движения, приведена формула для потока спиральности через верхнюю границу нелинейного экмановского пограничного слоя и показано, что этот поток в точности компенсируется разрушением спиральности внутри экмановского пограничного слоя.

В [35] проведен численный анализ процесса генерации спиральности в тропической атмосфере Земли. Исследование выполнено путем обработки (post-processing) данных облачно-разрешающего численного моделирования тропических циклонов, полученных с помощью региональной модели атмосферы RAMS — Regional Atmospheric Modeling System. Обсуждается механизм, генерирующий вертикальную завихренность и спиральность в тропической атмосфере при взаимодействии облачной конвекции и вертикального сдвига горизонтальной скорости. В связи с тем, что во всех известных примерах крупномасштабных неустойчивостей, обнаруженных в спиральных турбулентных средах, существуют пороги возбуждения, зависящие от величины спиральности, в данной работе

пристальное внимание уделено влиянию начальных условий на генерацию спиральности в первые часы экспериментов. Рассчитаны спиральные характеристики течений и проведено их сравнение для двух численных экспериментов, в одном из которых задавалось начальное слабое крупномасштабное вихревое возмущение в средней тропосфере, а в другом оно отсутствовало. Обсуждается влияние локального нагрева на нижних уровнях тропосферы, который применялся в начальные 300 с экспериментов для ускоренного развития облачной конвекции, на генерацию спиральности. Рассмотрен процесс генерации, за счет локального нагрева, одиночной интенсивной спиральной облачной структуры — вихревой горячей башни (ВГБ), которая достигала максимальной интенсивности в течение первых 1–2 ч. Выполнен количественный анализ генерации спиральности в одиночной ВГБ для двух разных сценариев.

В [36] конвективные потоки от локализованного нагревателя во вращающемся слое исследовались численно в трехмерной нестационарной постановке. Распределение спиральности, ее среднее значение и флуктуации изучались для двух режимов. В первом из них устойчивый циклонический вихрь и интенсивная конвективная струя генерируют спиральность вблизи оси вращения. Во втором режиме конвективное течение более хаотично и циклонический вихрь появляется на некотором расстоянии от центра, и в результате спиральность распределена в нижнем слое жидкости. Спиральность в описываемой системе характеризуется высоким уровнем пульсаций. Пространственные и временные изменения источников спиральности проанализированы с использованием уравнения для баланса спиральности. Изменения во времени вязкого члена и члена с плавучестью в уравнении баланса спиральности сильно превышают изменения других членов и самой частной производной спиральности по времени. В описываемой системе плавучесть является источником спиральности, а вязкость приводит к ее стоку. Показано, что они находятся в противофазе и компенсируют друг друга.

В настоящее время имеется большой интерес к фундаментальному вопросу о возможности циклон-антициклонной асимметрии (ЦАА), которая в принципе отсутствует в классической формулировке, основанной на использовании уравнения Чарни–Обухова для квазигеострофической потенциальной завихренности.

В атмосферных и океанических процессах, в лабораторных экспериментах и численных расчетах отмечается эффект ЦАА. Это проявляется, в частности, в их разной повторяемости. В [37] проведен анализ эффектов ЦАА в атмосфере внетропических широт Северного полушария для разных сезонов в зависимости от размеров вихрей и их времени жизни. Приведены результаты сравнительного анализа для внетропических циклонов и антициклонов с характерным радиусом не более 1500 км и длительностью не более 2 недель.

Проявления ЦАА при исследовании устойчивости вращающихся сдвиговых течений исследованы в [38] как теоретически, так и экспериментально. Анализируется устойчивость вращающихся тангенциальных разрывов и течений с постоянным сдвигом. Определена зависимость скорости роста возмущения от знака и абсолютного значения сдвига. Трехмерные возмущения, ведущие к продольным модуляциям потока, оказались наиболее опасными. Представлены результаты наблюдений за эффектом ЦАА в лабораторных условиях.

Распределения скорости ветра в атмосферных струйных течениях имеют горизонтальную асимметрию: сдвиг ветра на северной (циклонической) стороне струи больше, чем на южной (антициклонической) стороне. Авторы [39] предлагают объяснить эту особенность на основе нелинейной теории адаптации к геострофическому балансу. Получены простые теоретические оценки для коэффициента асимметрии профиля скорости. Показано, что асимметрия увеличивается с ростом числа Россби (скорости струи). Представлены результаты статистического анализа горизонтальной асимметрии струйных течений по спутниковым измерениям.

Значительное внимание обращалось на классическую модель бароклинной неустойчивости Иди (Eady, 1949) и на различные гидродинамические задачи, которые могут быть сформулированы и решены в ее рамках.

Краевые бароклинные волны генерируются в геострофическом потоке с вертикальным сдвигом вблизи твердой поверхности. Авторы [40] исследуют новый класс бароклиновых волн в потоках с горизонтальными и вертикальными сдвигами скорости и линейным распределением потенциальной завихренности. Показано, что учет горизонтального сдвига скорости приводит к появлению новых особенностей волновой динамики. К ним относятся немодальный рост энергии на начальном этапе развития, зависи-

мость от времени вертикального масштаба волны и возможность генерации стационарных или блокированных волн. Одна важная особенность связана с «вихревыми дорожками», которые образуются в результате наложения бароклинной волны на поток с горизонтальным сдвигом скорости.

Негеострофический вариант задачи Иди рассмотрен в [41]. Линеаризованная система динамических уравнений для двумерных возмущений сводится к одному уравнению второго порядка волнового типа относительно модифицированного давления (линейная комбинация давления и функции тока). В рамках сформулированных уравнений изучаются динамические особенности возмущений с нулевой потенциальной завихренностью. Проблема начальных значений при больших числах Ричардсона рассматривается с использованием разложений по нескольким характерным временам. Решение задачи представляется в виде суммы быстрой (волновой) и медленной (квазигеострофической) составляющих. В неустойчивом режиме медленная компонента описывает бароклинные волны (циклоны и антициклоны), генерируемые неоднородным начальным распределением плавучести (потенциальной температуры) на границах.

Структура бароклиновых волн в модели Иди очень хорошо согласуется со структурой атмосферных вихревых образований. В [42] предлагается подход к описанию генерации этих волн при начальных возмущениях поля потенциального вихря (ПВ). Решение исходной задачи для квазигеострофической формы уравнения переноса ПВ представляется в виде суммы волновой и вихревой компонент с нулевым и ненулевым ПВ соответственно. Система обыкновенных дифференциальных уравнений с правой частью, зависящей от вертикального распределения ПВ, формулируется с использованием функций Грина для амплитуды волновой составляющей. Решение обеспечивает простое описание резонансных и квазирезонансных эффектов возбуждения бароклинной волны, при которых амплитуда волны растет в соответствии с линейными или логарифмическими законами. Эти типы возбуждения имеют место для сингулярных и разрывных начальных распределений ПВ, если частоты волновой и вихревой компонент совпадают. Гладкие распределения генерируют волны конечной амплитуды.

В модели бароклинной неустойчивости Иди обычно используются численные методы varia-

ционных расчетов для нахождения оптимальных возмущений. В [43] предлагается простой физический подход, позволяющий аналитически определять параметры оптимальных возмущений. Этот подход основан на уравнении баланса энергии и явных выражениях для функционалов энергии, которые следуют из представления возмущений посредством суперпозиции краевых волн Россби. Соответствующие выражения являются функциями параметров начального возмущения, и определение оптимальных параметров сводится к исследованию этих функций на экстремум. В качестве параметров для возмущений с нулевой ПВ используются амплитуды начальных распределений плавучести на границах атмосферного слоя и фазовые сдвиги между этими распределениями. Получена аналитическая формула для оптимального фазового сдвига, которая определяет его зависимость от волнового числа и времени оптимизации. Также показано, что оптимальные возмущения всегда имеют одинаковые граничные амплитуды. Параметры оптимальных возмущений сравниваются с параметрами растущих нормальных мод. Обнаружено, что существует только одна экспоненциально растущая нормальная мода, которая является оптимальным возмущением, однако ее волновое число отличается от волнового числа нормальной моды с максимальным инкрементом роста.

Квазигеострофическая динамика возмущений потока с вертикальным сдвигом скорости описывается в [44] уравнением переноса для ПВ. Волновые решения этого уравнения представлены краевыми бароклиновыми волнами (моды дискретного спектра) и сингулярными модами непрерывного спектра. Когда частоты этих мод совпадают, возникает эффект резонансного усиления, при котором амплитуда бароклиновых волн линейно возрастает. В [44] этот эффект также изучается при наличии экмановского трения. Показано, что трение подавляет линейный рост волн и приводит к возникновению бароклиновых волн конечной амплитуды.

Имеются также статьи по общей динамике атмосферы, которые условно можно отнести к категории «Разное».

В [45] найдено приближенное аналитическое решение одномерной задачи об установившихся колебаниях вращающейся вязкой жидкости под воздействием гармонических по времени касательных напряжений на горизонтальной границе. Решение демонстрирует резонансное усиление амплитуды колебаний и глубины их

проникновения в среду при приближении частоты воздействия к инерционной частоте. В атмосфере частота суточных вариаций совпадает с инерционной на широте $\pm 30^\circ$ и с этим могут быть связаны некоторые резонансные явления.

В [46] аналитически решена задача об отклике устойчиво стратифицированной жидкой (газообразной) среды на воздействие вытянутых по вертикали источников тепла и количества движения, гармонически меняющихся со временем. Обращено внимание на особую чувствительность таких сред по отношению к воздействиям с частотами, близкими к частоте плавучести.

В [47] аналитически исследуется горизонтальное движение инерционных частиц в интенсивных вихрях, в которых центробежная сила существенно превышает силу тяжести. Ранее аналогичная задача была исследована для малых («стоксовых») частиц при небольших значениях чисел Рейнольдса, когда можно ограничиваться линейным законом сопротивления. Показано, что полученные ранее результаты в большой степени могут быть экстраполированы на случай частиц существенно большего размера (например, капля воды диаметром до 1 мм при числах Рейнольдса до 10^3). Для таких частиц необходим учет нелинейного характера сопротивления. Установлен ряд общих закономерностей динамики таких частиц. В частности, их тангенциальная скорость близка к скорости движения среды, в то время как радиальная скорость существенно меньше (она близка по порядку величины к среднему геометрическому тангенциальной скорости частицы и отлится последней от тангенциальной скорости среды). Найдены пределы применимости полученных результатов — ограничения на размеры и массу/плотность частиц.

Модель склоновых течений Прандтля обобщена в [48] на случай, когда на наклонной поверхности имеется однородный стационарный источник тяжелой примеси, которая вносит заметный вклад в плотность среды. Получено стационарное аналитическое решение для скорости возникающих течений, отклонений температуры и распределения примеси. Модель может описывать, например, некоторые особенности динамики приземных метелей над наклонной поверхностью. В [49] анализируются парадоксальные свойства классического решения Прандтля для течений, возникающих в полуграниченной жидкой (газообразной) среде над бесконечной однородно охлаждаемой/нагреваемой наклонной плоскостью. В частности,

максимальная скорость стационарного склонового течения, согласно этому решению, не зависит от угла наклона. Следовательно, отсутствует предельный переход к случаю нулевого угла, когда охлаждение/нагрев, очевидно, не должны приводить к возникновению однородных горизонтальных течений. Показано, что парадокс не возникает, если не рассматривать источники плавучести бесконечных пространственных масштабов, действующие бесконечно долго.

По литературным данным и результатам, полученным авторами [50] в последние годы, в [50] рассматриваются сейсмические проявления некоторых атмосферных явлений (смерчей, шквалов, интенсивных облаков, гроз, тропических циклонов). Одно из возможных приложений этих исследований — оперативное дистанционное обнаружение и мониторинг смерчей и шквалов по их сейсмическим сигналам. Другое направление — выявление возможного влияния интенсивных атмосферных процессов (прежде всего — тропических циклонов, атмосферных фронтов) на сейсмическую активность.

В цикле работ [51–54] теоретически исследуются возможные механизмы (в их числе вертикальный теплообмен в слое воздуха) влияния малых неоднородностей поля силы тяжести на динамику атмосферы. Найденные аналитические решения показывают, что в определенных ситуациях влияние неоднородностей поля силы тяжести на атмосферные течения может быть заметным.

В [55] в квазистатическом приближении независимо образом получено асимптотически точное уравнение для распределения вертикальной скорости по распределению плотности, температуры и горизонтальных компонент скорости ветра.

Авторы [56] рассматривают проблему устойчивости изолированного струйного потока и двух встречных струйных течений во вращающемся мелководном слое. Эти потоки описываются точными решениями уравнения Чарни–Обухова с одним или двумя разрывами ПВ соответственно. Показано, что изолированный струйный поток устойчив. Для системы, состоящей из двух струйных течений, определяется зависимость характеристик неустойчивых волновых мод от отношения расстояния между осями струи к радиусу деформации. На основе метода контурной динамики разработана слабо нелинейная модель длинноволновой неустойчивости.

Линейный механизм генерации гравитационных волн возмущениями ПВ в потоках с постоянными горизонтальными и вертикальными

сдвигами скорости изучен в [57]. Рассмотрен случай начального сингулярного распределения ПВ, в котором ПВ локализован в одной координате и является периодическим по отношению к другим координатам. В стратифицированной вращающейся среде такое распределение индуцирует вихревую волну (непрерывную моду), распространение которой сопровождается излучением гравитационных волн. Чтобы найти характеристики излучения, линеаризованная система динамических уравнений сводится к волновым уравнениям с источниками, которые пропорциональны начальным распределениям ПВ. Асимптотические решения уравнений построены для малых чисел Россби (горизонтальный сдвиг скорости) и больших чисел Ричардсона (вертикальный сдвиг скорости). В непосредственной близости от источника решения носят монотонный характер, соответствующий квазигеострофической вихревой волне. На больших расстояниях от источника решения имеют колебательный характер. Поток горизонтального импульса и поток Элиассена–Пальма оценены с использованием асимптотических решений. Обнаружено, что в указанном диапазоне чисел Россби и Ричардсона эти потоки экспоненциально малы, то есть излучение волн слабое.

В [58] вновь рассмотрен вопрос о неустойчивости внутренних гравитационных волн (ВГВ), распространяющихся под очень малым, но конечным углом θ к вертикали. Угол θ служит малым параметром в задаче, и неустойчивость ВГВ исследуется с использованием метода Фурье и интегральных соотношений Сивашинского. Проведенный анализ подтверждает существование коротковолновой неустойчивости для малых амплитуд ВГВ и для сколь угодно малого значения θ . При малой вязкости и теплопроводности воздушной среды скорость роста наиболее неустойчивой моды пропорциональна квадрату амплитуды ВГВ. Полученные результаты могут представлять интерес для интерпретации результатов наблюдений, подтверждающих существование турбулентности в средней атмосфере.

В [59] приводятся некоторые результаты регистрации высокочастотного инфразвука в диапазоне 2–16 Гц («голос моря») над акваторией Черного моря. Исследованы различные параметры зарегистрированного инфразвукового сигнала: направление и фазовая скорость приходящих инфразвуковых волн, а также спектральный состав инфразвукового сигнала и когерентность. Подробно исследована ветровая и волновая обстановка в акватории Черного моря в период проведения измерений.

2. КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ПРОГНОЗ ПОГОДЫ

В последние годы качество прогноза на основе моделей численного прогноза погоды (ЧПП) постоянно улучшалось, главным образом благодаря возможности повышения разрешения моделей прогноза и соответствующих систем усвоения данных наблюдений (УД), физических параметризаций и новых высокопроизводительных вычислительных методов.

Большую популярность в последние годы среди алгоритмов УД приобрел Ансамблевый Фильтр Калмана (АФК), в котором ковариации ошибок прогноза оцениваются с помощью ансамбля прогнозов по возмущенным начальным полям. В [60] предлагается вариант стохастического АФК, который является алгоритмом ансамблевого сглаживания, когда последнее производится для среднего по выборке значения и затем осуществляется трансформация ансамбля возмущений. С предложенным в [60] алгоритмом сглаживания проведены модельные численные эксперименты для одномерной модели переноса и диффузии, в которых проводится оценка параметра модели, а именно, эмиссии пассивной примеси. Следует отметить, что в задачах высокой размерности АФК эффективен в применении только при малом количестве ансамблевых реализаций.

Многие из современных методов УД основаны на вероятностных методах, где используется байесовский подход. В [61] предложен и протестирован новый ансамблевый фильтр, который учитывает неопределенность в предыдущем распределении. Фильтр основан на условном гауссовом распределении состояний с учетом ковариационных матриц ошибки модели и ошибки прогноза. Последние обрабатываются как случайные матрицы и обновляются в иерархической байесовской схеме вместе с искомым состоянием. Предполагается, что априорное распределение матриц ковариации является обратным распределением Уишарта. Работоспособность нового фильтра протестирована в численных экспериментах. Эксперименты показали, что применение нового фильтра существенно улучшает результаты по сравнению с АФК.

Генератор пространственно-временных псевдослучайных гауссовых полей был предложен в [62]. Генератор предназначен для создания возмущений, которые моделируют ошибки численных прогностических моделей в геофизике. Генератор протестирован с метеорологической

моделью COSMO в качестве источника аддитивных пространственно-временных возмущений прогностических полей.

Дальнейшее развитие концепции природоохранного прогнозирования и проектирования, реализованной в виде технологии математического моделирования предложено в [63–66]. Особенностью этой концепции является ее направленность на решение прямых и обратных задач на базе вариационного принципа в формулировке со слабыми ограничениями. Основные положения концепции изложены на примере совместных моделей гидротермодинамики и химии атмосферы.

Влияние наблюдений на УД определяется чувствительностью определенного типа наблюдений к конкретной переменной модели прогноза и ошибкой наблюдения. В случае спутниковых наблюдений основная часть информации усваивается в виде данных измерения радиации в различных диапазонах длин волн с помощью радиометров и других инструментов; эти данные измерений чувствительны к температуре атмосферы, влажности, концентрации газов, облачности и состоянию поверхности. Учитывая это, оценка влияния спутниковых данных может быть довольно сложной.

В [67] рассматриваются проблемы УД наблюдений спутниковых приборов AMSU-A и AIRS, оценивается эффект их использования при анализе метеорологических полей в Западной Сибири. Эксперименты показали, что система УД функционирует успешно; в зимний период данные наблюдений AMSU-A несколько улучшают качество полей анализа и прогнозов; в летний период влияние УД спутниковых наблюдений на качество прогнозов неоднозначно.

В [68] дано описание микроволнового радиометра MTVZA-GY, установленного на борту российского метеорологического спутника Метеор-М2 и предложен метод, который последовательно усваивает разности наблюденных и модельных потоков излучения в 24-часовом цикле с целью оценивания текущих коэффициентов калибровки, зависящих от зенитного и азимутального углов Солнца. Модельный поток излучения вычисляется с помощью схемы переноса излучения RTTOV, имеющей на входе поля численного прогноза погоды. Метод калибровки применен для температурных и влажностных каналов. Показано, что калиброванные наблюдения имеют существенно более высокую точность, чем при использовании более простых и традиционных методов калибровки. Точность кали-

брованных наблюдений сравнивается с точностью наблюдений радиометров AMSU-A и MHS.

Хорошо известно, что главные проблемы развития систем ЧПП («физической и химической») в условиях быстрого роста вычислительных мощностей и различного рода систем наблюдений, связаны с рядом ключевых направлений — это параметризация физических и химических процессов, анализ и оценка неопределенности прогноза с помощью ансамблей и подготовка согласованных начальных и краевых условий для прогнозов с использованием данных наблюдений, а также развитие суперкомпьютерных технологий численных прогнозов высокого разрешения.

В [69] описаны основные этапы процесса модернизации технологии подготовки прогнозов погоды в Росгидромете начиная с 1990-х гг., связанные с применением суперкомпьютеров для ЧПП и разработкой суперкомпьютерных технологий ЧПП разной заблаговременности. Подведены некоторые итоги проведенной модернизации.

Описание второго этапа работы (2011–2014 гг.) по реализации и развитию системы мезомасштабного негидростатического краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru дано в [70]. Отмечено влияние работ и идей Г.И. Марчука на развитие современных методов решения систем дифференциальных уравнений, описывающих атмосферные процессы и методов усвоения метеорологической информации, связанных с применением сопряженных уравнений. Приводится краткое описание модели атмосферы и деятельного слоя суши COSMO, системы COSMO-Ru и работ по развитию этой системы.

В [71] представлено описание численной модели химического прогноза погоды COSMO-ART, которая используется в оперативном режиме. Система COSMO-ART демонстрирует способность адекватно воспроизводить значения концентрации основных загрязняющих веществ. В систему включен модуль оценки эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу от очагов лесных пожаров, успешно апробированный летом 2010 г. для европейской территории России. Успешный прогноз концентрации загрязняющих веществ оказывает положительное влияние и на прогноз температуры воздуха благодаря учету обратного влияния аэрозоля на радиацию.

В цикле работ [72–76] описываются существующие и предшествующие версии глобальной гидродинамической модели атмосферы Российского гидрометеорологического центра SL-AV (полу-

лагранжева модель, основанная на уравнении абсолютной завихренности). На основе этих версий разработана унифицированная многомасштабная версия модели, предназначенная для численного прогноза погоды и для моделирования изменений климата. В частности, последняя версия модели, SL-AV20, обеспечивает глобальный оперативный среднесрочный прогноз погоды с разрешением 20 км над Россией. Конфигурации SL-AV20 с низким разрешением тестируются для сезонного прогнозирования и моделирования климата. Оперативная модель SL-AV использовалась для исследования асимметрии ошибок прогноза (surface air temperature SAT): повышения SAT в холодных погодных условиях и понижения SAT в теплых погодных условиях. Наконец, выходные данные глобальной модели SL-AV применялись для мезомасштабного моделирования атмосферных процессов в районах, не охваченных метеорологическими наблюдениями.

В [77] представлены результаты расчета метеорологических параметров с использованием метеорологической модели TSU-NM3. Для моделирования неизотермических турбулентных отрывных течений в уличных каньонах в [78] представлена нестационарная трехмерная вихреразрешающая модель. Для параметризации подсеточных турбулентных процессов используется модель Смагоринского. Результаты расчетов демонстрируют влияние местоположения источника загрязняющих веществ, размера уличного каньона, скорости основного потока и разницы температур стенок на загрязнение воздуха в каньоне.

Результаты прогнозирования метеорологических условий, способствующих обледенению воздушных судов в пограничном слое атмосферы, представлены в [79]. Эти результаты были получены на основе мезомасштабной модели TSU-NM3. В качестве критериев вероятности обледенения самолета при взлете или посадке были использованы формула Годске (Godske), основанная на расчете температуры насыщения надо льдом, метод NCEP и статистический метод Гидрометеорологического центра России. Результаты численного прогноза сравнивались с наблюдениями, проведенными в пограничном слое атмосферы в октябре 2012 г. в аэропорту г. Томска. Полученное хорошее согласие дало возможность быть уверенным в жизнеспособности вышеуказанного подхода.

Одной из наиболее сложных проблем прогноза погоды является прогноз осадков, особенно

конвективных осадков. Численное моделирование конвекции обычно малоэффективно, даже моделями с высоким разрешением, из-за хаотической природы осадков. Это особенно критично в районах водосбора рек. Ошибки прогноза могут возникать из-за параметризации физических процессов, неопределенности начального состояния атмосферы, характера неоднородности поверхности земли (неоднородность влаго содержания почвы, температуры поверхности, топография и др.).

Методика расчета снегонакопления с использованием прогноза полей осадков по мезомасштабной численной модели атмосферы, результаты прогноза с использованием модели WRF двух случаев сильного снегопада, отмечавшихся 18 и 23 октября 2014 г. на территории Урала, анализ результатов моделирования формирования и эволюции мезомасштабных конвективных систем (МКС), сопровождающихся опасными явлениями погоды над территорией Западного Урала, представлены в [80–82]. Полученные оценки прогноза осадков сравниваются с оценками глобальной модели GFS NCEP. Результаты свидетельствуют о том, что в данном случае обе модели обладают приблизительно одинаковой точностью прогноза количества выпавших осадков.

Штормовые нагоны являются одними из наиболее серьезных угроз в прибрежных регионах морей. Точный и своевременный численный прогноз нагонов является критически важной задачей для смягчения последствий стихийных бедствий.

В [83] было проведено исследование одних из самых экстремальных за период инструментальных наблюдений с 1881 г. нагонов в Таганрогском заливе, произошедших 24.03.2013 г. и 24.09.2014 г., с целью изучения особенностей их формирования и выявления требований к точности воспроизведения атмосферной и морской циркуляции в акватории Азовского моря. Для этой цели были использованы две версии модели морской циркуляции INMOM (Institute of Numerical Mathematics. Ocean Model) с пространственным разрешением ~4 км и ~250 м. Для задания атмосферного форсинга использовались два типа данных: реанализ Era-Interim и результаты расчетов по модели WRF (Weather Research and Forecast Model) с пространственным разрешением 80 и 10 км соответственно.

Крупномасштабные экстремальные погодные / климатические явления, такие как необычайная жара лета 2010 г. над европейской частью

России, продолжали привлекать внимание исследователей.

Особенности условий блокирования и погодных аномалий над Восточно-Европейской равниной летом 2010 г. рассматриваются в [84] с использованием EOF-анализа и уравнения завихренности. Анализ EOF моделирует основные режимы временной изменчивости блокирующего антициклона. Уравнение завихренности преобразуется в [84] в форму, которая позволяет оценить вклад различных факторов в развитие и длительное существование условий блокирования.

В качестве индекса общей циркуляции атмосферы над полушарием в [85] предлагается рассчитывать средневзвешенное по площади полушария (к полюсу от широты 20°) значение произведения параметра Кориолиса f на квадрат скорости ветра, U^2 , на верхней границе планетарного пограничного слоя. Показано, что введенный индекс полезно характеризует сезонную и межгодовую изменчивость общей циркуляции атмосферы над обоими полушариями. Было высказано предположение, что наблюдаемые максимумы индекса в течение лета в северном полушарии (июль) находятся в определенной корреляции с «волнами тепла», в частности над Россией в 2010 г. Эта корреляция может быть объяснена тем фактом, что, хотя долгоживущие атмосферные блокирования, которые вызывают «тепловые волны», характеризуются низкими локальными значениями fU^2 , но они всегда сопровождаются интенсивной циклонической активностью над полушарием, которая поддерживает и питает эти блокирующие структуры. Следовательно, в целом по полушарию, получается более высокое значение указанного индекса.

Продолжалось традиционное исследование различных аспектов крупномасштабной динамики атмосферы, в том числе изучение широкого спектра синоптических и климатически значимых атмосферных процессов на Земле.

Декадная изменчивость явления Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК) в последние десятилетия была, в том числе, связана с изменением повторяемости двух типов Эль-Ниньо (Восточно-тихоокеанского (ВТ) и Центрально-тихоокеанского (ЦТ)). В то же время, ЭНЮК тесно связана с внутрисезонной тропической изменчивостью (ВТИ), которая обычно усиливается перед возникновением Эль-Ниньо и может выступать в качестве пускового механизма данного явления. В [86] рассмотрена взаимосвязь ВТИ-ЭНЮК с учетом изменений в свой-

ствах ЭНЮК за последние шесть десятилетий. Основное внимание уделено двум основным компонентам ВТИ: колебаниям Маддена—Джулиана (МЮ) и конвективно-связанным экваториальным волнам Россби (ЕР). Статистика активности МЮ и ЕР согласуется с гипотезой о том, что они могут рассматриваться как зависящее от среднего состояния стохастическое воздействие на ЭНЮК, связанное с различными низкочастотными климатическими режимами. Далее в [87] исследовано воспроизведение взаимосвязей ВТИ-ЭНЮК в моделях проекта CMIP5 с учетом существования двух типов Эль-Ниньо. На первом этапе оценена способность моделей воспроизводить разнообразие ЭНЮК. Далее проведена оценка воспроизведения характеристик ВТИ. Она показала значительную межмодельную изменчивость в ансамбле из 16 моделей. В общей сложности 11 моделей демонстрируют способность воспроизведения ключевых с точки зрения вклада в генерацию Эль-Ниньо аспектов ВТИ: амплитуды в приэкваториальных районах, сезонного хода и скорости распространения вдоль экватора МЮ и ЕР. Пять моделей, которые воспроизводят как два типа Эль-Ниньо, так и характеристики ВТИ, используются для дальнейшего анализа сезонных особенностей взаимосвязи ВТИ-ЭНЮК. Результаты указывают на большой разброс между моделями и их в целом ограниченную способность воспроизводить наблюдаемые сезонные взаимосвязи ВТИ-ЭНЮК. Полученные результаты обсуждаются в свете недавних исследований механизма внешнего воздействия на разнообразие ЭНЮК.

В [88] проанализирована циклоническая активность в Арктическом регионе с использованием 4 различных данных реанализа для периода с 1981 по 2010 гг. для зимы и лета. В целом отмечено хорошее согласие в пространственно-временном распределении характеристик циклонической активности между различными данными. Отмечено уменьшение повторяемости циклонов в Баренцевом море, а также вдоль российской Арктики и увеличение над Арктическим океаном зимой. Летом регионы изменений циклонической активности расположены над морем Лаптевых, над Канадским архипелагом и над территорией России. Знаки трендов изменений характеристик циклонов схожи между различными данными реанализа, отличаясь лишь величинами тренда в различных регионах.

Характеристики циклонов (повторяемость, интенсивность и размеры) и их изменения в ар-

ктическом регионе проанализированы в [89] с использованием региональной климатической модели (PKM) HIRHAM с антропогенным сценарием SRES-A1B для 21 века. Основное внимание уделялось циклонам для теплого (апрель–сентябрь) и холодного (октябрь–март) сезонов. Современные характеристики циклоничности, полученные в результате численных расчетов с PKM HIRHAM, в целом согласуются с данными реанализа ERA-40. Различия, отмеченные для повторяемости циклонов, связаны с различным пространственным разрешением PKM и реанализа. Были проанализированы проекции будущих изменений характеристик циклонов в конце 21 века. Согласно модельным расчетам, повторяемость циклонов увеличивается в теплое время года и уменьшается в холодное время года, однако эти изменения статистически незначимы. Заметные изменения были обнаружены для интенсивности и размера циклонов для обоих сезонов, а также значительное увеличение частоты слабых циклонов в холодное время года. Кроме того, было рассчитано общее увеличение частоты циклонов малого размера в холодное время года и уменьшение этой частоты в теплое время года.

В [90] выполнен сравнительный анализ характеристик циклонической активности, полученных с использованием результатов расчетов с ансамблем региональных атмосферных моделей (CORDEX) для Арктического региона с данными на основе разных данных реанализа (ERA-Interim, NASA-MERRA2, NCEP-CFSR, JMA-JRA55, ASR). Характеристики циклонов (повторяемость, глубина, размер) анализировались для теплого и холодного периода за 1981–2010 гг. и 2000–2010 гг. для Арктического реанализа ASR. Отмечено, что характеристики циклонов, полученные с использованием моделей, в которых применялся метод «спектрального подталкивания» (spectral nudging), наиболее адекватно воспроизводят их пространственно-временное распределение, а также изменчивость во времени. Однако характеристики и тенденции изменений циклонической активности чувствительны к выбору «подталкиваемых» переменных. Отмечена также связь между воспроизведением зонального ветра и характеристиками циклонов в моделях.

В [91] оценена возможность выявления полярных мезоциклонов (ПМЦ) в атмосфере европейского сектора Арктики (ECA) по разным данным реанализа (NASA-MERRA, ERA-Interim, NCEP-CFSR, ASR) с различным простран-

ственным разрешением и по расчетам с региональной климатической моделью высокого разрешения (PKM HIRHAM5). Получено, что по данным реанализа можно отождествлять до 65% арктических мезоциклонов, выявленных по спутниковым данным для 2002–2008 гг. (проект STARS — Sea Surface Temperature and Altimeter Synergy for Improved Forecasting of Polar Lows). Отмечено, что по данным ASR с высоким пространственным разрешением воспроизводится больше ПМЦ, чем по остальным данным реанализа с более грубым пространственным разрешением. С использованием PKM HIRHAM5 идентифицируется примерно столько же ПМЦ, как и по данным ASR. Для воспроизведения ПМЦ малого масштаба необходимы модели с более высоким пространственным разрешением и с адекватным описанием мезомасштабных процессов в Арктике.

В [92] проведен анализ характеристик арктических циклонов и их внутри- и межгодовых вариаций, полученных по расчетам с PKM HIRHAM со спектральным подталкиванием в сопоставлении с данными ERA-Interim и ASR для периода 2000–2009 гг. Отмечено, что характеристики арктических циклонов, особенности их пространственных распределений, годового хода и межгодовых вариаций по модельным расчетам в целом согласуются с данными реанализа, в том числе ASR. Различия, отмеченные для повторяемости арктических циклонов, связаны, в частности, с разным пространственным разрешением данных и различиями в детектировании циклонов малого масштаба, в том числе ПМЦ.

В [93] на основе среднемесячных данных ERA-Interim (1979–2014 гг.) получены оценки вертикального градиента температуры γ в тропосфере высоких широт Северного полушария с анализом связи γ с приповерхностной температурой T_s в межгодовой изменчивости для разных сезонов. Проведен также анализ способности модели HIRHAM5 воспроизводить особенности реагирования γ и параметра чувствительности $d\gamma/dT_s$ на изменения T_s , которые были отмечены по данным реанализа. Среднее значение γ в тропосфере по данным реанализа увеличивается от 4.7 К/км в приполярных до 5.3 К/км в субполярных широтах зимой и от 5.3 до 6.1 К/км летом. Эти пространственные особенности в целом достаточно хорошо воспроизводятся по расчетам с региональной моделью. При этом по данным реанализа значения γ немного выше, чем по модельным

расчетам. Оценки $d\gamma/dT_s$ по данным реанализа и модельным расчетам в межгодовой изменчивости положительны над большей частью Арктики. При этом выявлена отрицательная корреляция γ с T_s зимой для атлантического сектора Арктики и летом над центральной Арктикой. Отмечены также региональные особенности связи вертикальной стратификации температуры в тропосфере с Арктическим колебанием.

В [94] представлены результаты сравнительного анализа характеристик внетропических циклонов, полученных с помощью 16 объективных алгоритмов (проект IMILAST) на основе данных реанализа и метода экспертного анализа синоптических карт. Анализ выполнен для Сибирского региона (50° – 80° с.ш., 60° – 110° в.д.) для двух сезонов (зима 2007/08 гг., лето 2008 г.). Большинство объективных алгоритмов, по сравнению с ручным методом, показывают в 1.5–3 раза больше циклонов и в 3–5 раз больше треков циклонов в сибирском регионе. Алгоритмы показывают хорошее согласие с ручным методом для пространственного распределения циклонов и числа треков с коэффициентом пространственной корреляции, варьирующимся в пределах 0.8–0.9 летом и около 0.7–0.9 зимой для большинства алгоритмов. Использованы две метрики для оценки близости объективных алгоритмов к экспертному методу.

В цикле работ [95–97] получил развитие метод спутникового радиотепловидения, основанный на обработке больших массивов данных спутниковых радиотепловых наблюдений. Важным аспектом исследований является то, что примененный метод независим от каких-либо динамических оценок по моделям общей циркуляции атмосферы.

Авторы [98] представили результаты измерений в верхних слоях воздуха с помощью радиозондов, в течение лета над Северным Ледовитым океаном выпускаемых с ледокола, движущегося к полюсу из области, свободной ото льда, через кромку льда в область толстого льда. В дополнение к общепринятым механизмам, ответственным за увеличение тропосферного потепления в течение лета над Арктикой, авторы продемонстрировали новый потенциально способствующий этому процесс, основанный на прямых наблюдениях и на подтверждающих эти наблюдения результатах численного моделирования и статистического анализа с использованием данных реанализа. Этот новый процесс называется «Сибирские атмосферные реки (Siberian

Atmospheric Rivers (SARs))». Скольжение SAR кверху в направлении полюса над куполами холодного воздуха, образующимися над морским льдом, обеспечивают верхнюю тропосферу дополнительным теплом за счет конденсации водяного пара. Этот нагрев приводит к увеличению плавучести и еще больше усиливает подъем и нагрев средней тропосферы. Указанный процесс требует сочетания SAR и морского льда в системе «суша–океан–атмосфера», а это означает, что крупномасштабный перенос тепла и влаги из более низких широт может удаленно усиливать потепление арктической тропосферы летом.

Авторы [99] применили квазигеострофическую трехуровневую модель со спектральным разрешением T63 зимней атмосферной циркуляции над Северным полушарием, чтобы исследовать влияние «Арктического усиления» (повышение температуры приземного воздуха и уменьшение арктического морского льда в течение последних 15 лет) на крупномасштабную атмосферную циркуляцию в средних широтах. Модель демонстрирует среднеширотный отклик на арктическую аномалию неадиабатического нагрева. Происходит четкий сдвиг в сторону отрицательной фазы арктического колебания (АО–) в условиях слабого морского ледяного покрова, связанный с ослаблением западных ветров в средних широтах над Атлантикой и более холодными зимами над Северной Евразией. В противоположность данным реанализа, нет четкого отклика в модели над Тихим океаном и Северной Америкой.

В [100] рассматривается «двухзонная» модель атмосферной циркуляции над полушарием. Переменной в модели является географическая широта ϕ границы между зоной вихревого режима Россби в высоких и средних широтах и зоной режима циркуляции Хэдли в низких широтах. Используется близость между фактическим и статистически (климатически) равновесным экспоненциальным распределением массы воздуха над полушарием по значениям модифицированного потенциального вихря (МПВ) Эртеля. Информационная энтропия статистического распределения МПВ в атмосфере над полушарием и информационная энтропия вихревого режима в основной зоне «шторм-треков» используются для того, чтобы определить статистически (климатически) равновесное значение широты ϕ . На основе построенной статистически-динамической модели, рассмотрен вопрос о блокирующих образованиях в атмосфере над полушарием.

3. МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Актуальной проблемой современной «динамической мезометеорологии» является изучение динамических процессов в Арктике, особенно, что касается взаимодействия атмосферы с океаном, покрытым льдом.

В [101] сформулирована новая «квази-аналитическая» модель перемешанного слоя, описывающая эволюцию конвективного пограничного слоя атмосферы (atmospheric boundary layer, ABL) во время вторжений холодного воздуха (cold-air outbreaks, CAO) над полярными океанами ниже по потоку от краевых зон морского льда. Новая модель превосходит предыдущие, поскольку она предсказывает не только температуру и высоту перемешанного слоя, но и усредненные по высоте горизонтальные составляющие ветра. Результаты модели сравниваются с самолетными и «дроп-зондовыми» (dropesonde) измерениями, проведенными в течение нескольких событий CAO над проливом Фрама, а также с результатами трехмерной негидростатической (NH3D) модели. Показано, что модель перемешанного слоя хорошо воспроизводит наблюдаемую высоту ABL, температуру, бароклинность низкого уровня и ее влияние на скорость ветра ABL. Делается вывод, что бароклинность в пределах ABL определяет структуру поля ветра, в то время как бароклинность над ABL важна для воспроизведения скорости ветра. Показано, что бароклинность в ABL наиболее сильна вблизи кромки льда и медленно затухает в направлении по ветру. Аналитические решения демонстрируют, что характерный масштаб этого затухания такой же, как и для затухания разности температур поверхности открытой воды и смешанного слоя. Этот масштаб, характеризующий массовую трансформацию холодного воздуха, колеблется от 450 до 850 км для высокоширотных CAO.

Взаимодействие морского льда и атмосферы сильно зависит от приповерхностных коэффициентов передачи импульса и тепла. В [102] разработана параметризация этих коэффициентов на основе существующей параметризации для нейтральной стратификации, которая учитывает сопротивление формы, вызванное краями льдин и подтаявших луж на льду. Эта схема расширена, чтобы лучше учитывать зависимость приземного ветра от предельных случаев высокой и низкой концентрации льда и включать в себя эффекты приповерхностной устойчивости над открытой водой и льдом на сопротивление формы. Поправка на устойчивость формулируется

на основе универсальных функций теории подобия Монина–Обухова (MOST), а также с использованием концепции Льюиса с функциями устойчивости, зависящими от объемных чисел Ричардсона. Результаты показывают, что устойчивость оказывает большое влияние на сопротивление формы и, таким образом, определяет значение концентрации морского льда, для которой коэффициенты переноса достигают своих максимумов. В зависимости от стратификации эти максимумы могут иметь место где-то между концентрациями льда от 20% до 80%.

В моделях прогнозирования климата и погоды приповерхностные турбулентные потоки тепла и импульса и связанные с ними коэффициенты переноса обычно параметризуются на основе MOST. Чтобы избежать итерации, необходимой для численного решения уравнений MOST, во многих моделях применяется параметризация коэффициентов переноса на основе подхода, связывающего эти коэффициенты с объемным числом Ричардсона Ri_b . Однако параметризации, которые в настоящее время используются в большинстве климатических моделей, действительны только для более слабой устойчивости и большей шероховатости поверхности, чем те, которые задокументированы во время кампании «Бюджет тепла на поверхности в Северном Ледовитом океане» (SHEBA). Эта кампания предоставила хорошо принятый научным сообществом набор данных о турбулентности в устойчивом приповерхностном слое над полярным морским льдом. Используя универсальные функции, основанные на данных SHEBA, авторы [103] решают уравнения MOST, применяя новый полуаналитический подход, который приводит к коэффициентам переноса как функциям Ri_b и длин шероховатости для импульса и тепла. Показано, что новые коэффициенты воспроизводят коэффициенты, полученные численным итерационным методом, с хорошей точностью в наиболее релевантном диапазоне устойчивости и шероховатости. Для малых Ri_b новые коэффициенты объемного переноса аналогичны традиционным коэффициентам, но для больших Ri_b они намного меньше используемых в настоящее время коэффициентов.

В [104] исследуются экстремальные случаи холодных вторжений в Арктике весной 2013 г., идентифицированные по снимкам в видимом диапазоне с помощью спектрорадиометров MODIS со спутников Terra и Aqua. Пространственная изменчивость скорости ветра оценивается на основе данных ERA-Interim и результатов обработки

данных спутникового микроволнового радиометра AMSR2. Чтобы объяснить наблюдаемую изменчивость скорости ветра в атмосферном пограничном слое (АПС) во время холодных вторжений, оценивается вклад бароклинности в АПС и экмановского трения в динамику ветрового потока. Показано, что над открытой водой бароклинная составляющая геострофического ветра, обусловленная горизонтальными градиентами температуры воздуха, играет важную роль в формировании пространственной изменчивости скорости ветра во время рассмотренных холодных вторжений.

В [105] представлена новая климатология полярных мезоциклонов (ПМЦ) над Северным и Баренцевым морями за 14 сезонов (1995/1996–2008/2009 гг.). Впервые в климатологических исследованиях ПМЦ был принят подход, основанный на использовании спутниковых пассивных микроволновых данных для их идентификации. В общей сложности были обнаружены 637 ПМЦ в 14 расширенных зимних сезонах путем объединения данных об общем содержании водяного пара в атмосфере и скорости ветра на поверхности моря, полученных из данных специального датчика «Special Sensor Microwave/Image». Также представлены отдельные индикативные характеристики ПМЦ (диаметр, время жизни, пройденное расстояние, скорость перемещения и максимальная скорость ветра).

В [106] проведены численные эксперименты на модели WRF, направленные на изучение структуры и эволюции ПМЦ в Карском море, наблюдавшегося 29–30 сентября 2008 г. Показано, что без учета фазовых переходов влаги интенсивность циклона уменьшается на 7%–20%, а время его развития увеличивается на 4 ч.

Авторы [107] представили всестороннее исследование трехмерной структуры Новороссийской боры — ураганной силы ветра на северо-восточном побережье Черного моря. Анализ основан на данных наблюдений, полученных от Гидрометеорологической службы России, автоматических метеорологических станций, содарной системы, микроволнового температурного профайлера и 10-метровой метеорологической мачты. Качественные и количественные характеристики новороссийской боры сравнивались с характеристиками других склоновых ветров, таких как адриатическая бора, бора в Боулдере (США) и альпийский фён.

В [108] проведены расчеты с региональной моделью атмосферы высокого простран-

ственного разрешения WRF по моделированию экстремальных осадков в районе г. Крымска 6–7 июля 2012 г. Обнаружено, что важную роль в формировании экстремальных значений осадков сыграло повышение температуры поверхности Черного моря (ТПЧМ) за последние 30 лет (в среднем для июня–июля примерно на 2 градуса). В условиях более холодного моря, соответствующих периоду 1980–90-х гг., циклон, прошедший над Крымском 6–7 июля, согласно модельным расчетам, сопровождался бы в 3–4 раза меньшими осадками. Показано, что зависимость величины осадков от ТПЧМ — нелинейная, и резкое увеличение осадков происходит при превышении порогового значения, которое было достигнуто климатическим трендом ТПЧМ в начале 21 века. Скачкообразное увеличение осадков связано с переходом к режиму глубокой конвекции. Еще более теплая, чем в современных условиях, ТПЧМ (согласно сценариями будущих климатических изменений в ближайшие 50 лет) не приводит к дальнейшему росту осадков из-за уменьшения относительной влажности в приземном слое при интенсивной конвекции. Полученные результаты говорят о том, что и в будущем следует ожидать увеличения экстремальности осадков в Черноморском регионе России.

Статья [109] посвящена оценке прогноза мезомасштабных конвективных систем (МКС), в которых наблюдались опасные метеорологические явления, по данным глобальных и мезомасштабных моделей атмосферы. Для этого реализованы два подхода: прогноз на основе физико-статистических параметров (индексов) неустойчивости по выходным данным глобальных моделей атмосферы GFS и SL-AV и прямое моделирование конвекции с помощью мезомасштабной модели WRF с динамическими ядрами ARW и NMM. Для прогноза МКС по данным глобальных моделей, помимо известных параметров неустойчивости, был разработан новый индекс, базирующийся на модификации индекса плавучести. Проверочным материалом для оценки прогноза послужили спутниковые снимки Terra/Aqua MODIS, а также данные наблюдательной сети. На основе сопоставления прогнозируемых областей максимальной неустойчивости с фактическим положением МКС, которое определялось по спутниковым данным, было показано, что прогноз по отечественной модели SL-AV имеет более высокое качество, чем по модели GFS. Оценка успешности прогноза МКС по моделям WRF-NMM и WRF-ARW показала, что в большинстве случаев прогностическое

положение МКС не соответствует фактическому, что может быть связано с ошибками в начальных условиях (данных глобальной модели GFS). Во внутримассовых ситуациях МКС иногда вообще не воспроизводятся. Также стоит отметить, что модель WRF-NMM существенно завышает площадь зон с сильными ливневыми осадками (≥ 30 мм/ч), а также их интенсивность. В связи с этим при прогнозе сильных ливней увеличивается число оправдавшихся прогнозов, но также растет и число ложных тревог.

В [110] новый метод полиномиальной аппроксимации использован для оценки экстремальных значений высот волн и скоростей ветра по 33-летним ретроспективным данным для шести мест вдоль побережья Индии. Эти ретроспективные оценки сравниваются со значениями, полученными из хорошо известных методов обобщенного экстремального распределения и обобщенного распределения Парето. Кроме того, все данные подразделяются на три десятилетних временных блока для оценки временной изменчивости, в выходных данных модели, экстремальных значений значительных высот волн и скоростей ветра. Хотя сравнение, в целом, оказалось хорошим, более тщательное изучение результатов показывает, что настоящий метод, основанный на полиномиальном приближении, может быть предпочтительным для практических применений.

В [111] спектры многолетних рядов скорости ветра и значительной высоты волны построены в двух областях шкал изменчивости: от 1 дня до 1 года (D1) и от 1 года до 15 лет (D2). Использовались данные приземного ветра из ERA-Interim в районе Индийского океана за период 1979–2015 гг. и высоты волн, смоделированные с помощью улучшенной модели WAM. С целью теоретической интерпретации особенностей спектров, обнаруженных в области D1, были проанализированы уравнения Навье–Стокса. Для области D2 не было обнаружено единой системы изолированных частот. Из набора выбранных периодов наиболее стабильным является период изменчивости около 5.5 лет.

В [112] использованы данные ERA-Interim над Индийским океаном путем разделения его на шесть зон, основываясь на анализе локальных экстремумов ветров. Тренд среднегодовой скорости ветра, усредненной по каждой зоне, показывает значительное ее увеличение в экваториальной области, Южном океане и южной части пассатов. Тренд для Бенгальского зали-

ва отрицателен, что может быть вызвано ослаблением муссонных ветров и северо-восточных пассатов. Максимальная межгодовая изменчивость наблюдается в Аравийском море из-за активности муссонов; минимум наблюдается в субтропическом регионе из-за расхожимости ветров. Изменения скорости ветра во всех зонах слабо коррелируют с индексом дипольного режима (Dipole Mode Index, DMI). Однако экваториальный Индийский океан, южная часть пассатов и субтропические зоны показывают относительно сильную положительную корреляцию с Индексом южного колебания (Southern Oscillation Index, SOI), что указывает на то, что SOI оказывает распространяющееся в зональном направлении влияние на скорость ветра в Индийском океане. Муссонные ветры имеют отрицательный тренд в северной части Индийского океана, что указывает на ослабление муссонов, и положительный тренд в экваториальной области из-за усиления западных ветров. Отрицательный тренд, наблюдаемый в немуссонный период, может быть результатом ослабления северо-восточных пассатов за последние несколько десятилетий.

В [113] проведено подробное моделирование метеорологических параметров за последние 30 лет (1985–2014 гг.) для регионов Охотского моря и Сахалина в рамках региональной мезометеорологической негидростатической атмосферной модели COSMO-CLM. Предлагается технология «даунскейлинга» (downscaling), что достигается с помощью трех последовательных «вложенных областей» («nesting domains»), с масштабами сетки 13.2, 6.6 и 2.2 км. Модель COSMO-CLM хорошо воспроизводит (особенно успешно на сетке 2.2 км) экстремумы скорости ветра, наблюдаемые на метеорологических станциях. Воспроизводятся в деталях синоптические ситуации, сопровождаемые экстремальными скоростями ветра.

Прогноз таких опасных конвективных явлений как гроза, град, ливневые осадки основан на анализе профилей температуры и влажности атмосферы, которые, как правило, регистрируются аэрологическими радиозондами. По результатам аэрологического зондирования рассчитываются характеристики неустойчивости атмосферы: индексы LIFT SWEAT, KIND, TOTL и CAPE. Значения индексов позволяют оценить совокупность температурно-влажностных характеристик атмосферы и параметров ветра, которые являются важными признаками развитой конвекции. Целью работы [114]

являлось определение возможности использования данных индексов для определения степени устойчивости атмосферы при прогнозе гроз над Амурской областью. По данным аэрологического зондирования были рассчитаны значения индексов неустойчивости атмосферы в дни с грозой и с ливнем, и в дни с ливнем, но без грозы. Проведен сравнительный анализ этих индексов в дни, отнесенные к категории «гроза с ливнем» и «ливень»; определены значения вероятности грозы и ливня без грозы при разных значениях индексов. Приведен анализ различий в значениях индексов неустойчивости, характерных для Амурской области со значениями, полученными для других территорий. Представлен дискриминантный анализ индексов неустойчивости атмосферы для разделения этих двух категорий опасных конвективных явлений в атмосфере. Однако, сеть аэрологических станций, с которых запускаются радиозонды, довольно редка и зондирование производится только дважды в сутки. Целью работы [115] является определение возможности использования базы данных спектрорадиометра MODIS для определения степени неустойчивости атмосферы при прогнозе гроз над Западной Сибирью. В качестве характеристик неустойчивости сравниваются три индекса, рассчитываемых по данным спутника и радиозондов: Lifted Index, TOTL и K Index. Получено, что хорошо коррелируют два индекса: Lifted Index и TOTL. Результаты зондирования спектрорадиометром MODIS позволяет определять пространственное положение мощных конвективных ячеек и уточнять прогноз гроз.

Ряд работ был посвящен горной метеорологии.

Работа [116] продолжает исследования зависимости орографических возмущений от свойств натекающего потока в рамках полуаналитического подхода. Проведена модернизация прежней модели обтекания гор, учитывающая плавные изменения масштаба Лира в натекающем потоке и в первую очередь его скорости. Показано, что зависимость от скорости может быть не только сильной, но и достаточно неожиданной. В частности, при возрастании по линейному закону скорости натекающего потока в тропосфере, возмущения в ней могут приобретать почти резонансный и волноводный характер.

По самолетным измерениям концентраций O_3 в средней тропосфере и общего содержания (OC) NO_2 в атмосферном столбе в ходе полетов над Приполярным Уралом в апреле 1984 г.

в [117] установлен волновой характер пространственных вариаций содержания газовых примесей. Характерный горизонтальный масштаб вариаций сопоставим с величиной масштаба Лира. При этом колебания концентрации O_3 и OC NO_2 составили около 25% и 50% от соответствующих фоновых значений. Результаты модельных расчетов позволяют связать обнаруженные вариации с мезомасштабными атмосферными возмущениями над горами, обусловленными динамическим воздействием рельефа на натекающий поток. Показано, что наблюдавшийся в период измерений сильный вертикальный сдвиг скорости в синоптическом поле ветра мог предоставить эффективный механизм генерации подветренных волн над горами не только в тропосфере, но и на стратосферных высотах, с амплитудами волн, достаточными для объяснения установленных вариаций.

В [118] метод спутникового радиотепловидения (см. также [95–97]) был использован для вычисления потоков скрытого тепла через систему концентрических круговых контуров, охватывающих тропический циклон (ТЦ) и дрейфующих вместе с ним в течение его эволюции. Была выявлена взаимосвязь между величиной и знаком адвективного потока скрытого тепла и интенсивностью ТЦ. Эта взаимосвязь была продемонстрирована на нескольких примерах ураганов и тайфунов августа 2000 г. и тайфунах ноября 2013 г., включая супертайфун Haiyan. В [119] тем же методом исследован сложный случай взаимодействующих тайфунов Goni и Atsani. При этом удовлетворительное описание энергетического баланса системы тайфунов, в отличие от предыдущих работ, потребовало ввести в анализ контуры интегрирования сложной (отличной от круговой) формы. Особенность конкретного рассмотренного случая тайфунов-близнецов Goni и Atsani позволила продемонстрировать эффективность упрощенного подхода с использованием составного контура, образованного пересечением двух круговых.

На основе анализа 36 эпизодов ураганных ветров в районах Новороссийска, Певека и на Новой Земле в [120] выявлены единые закономерности процесса обтекания гор в рамках модели гидравлического скачка. Во всех эпизодах натекающий поток характеризуется наличием слоя мощной инверсии на высотах 0.5–1.5 км, а в случае боры — критическим уровнем в профиле ветра, находящемся в средней тропосфере, что создает условия ослабленного динамического взаимодействия между перевалива-

ющим через горы низкоуровневым воздушным течением и вышележащими слоями атмосферы. Усиление ветра на подветренном склоне обусловлено переходом натекающего потока из субкритического в сверхкритический режим; при этом амплитуда скорости растет с увеличением мощности инверсии. Модельные оценки усиления скорости ветра хорошо согласуются с данными наблюдений на подветренных метеостанциях для эпизодов с сильной приподнятой инверсией. В [121] рассмотрено волновое сопротивление при подветренных бурях в Новороссийске, на Новой Земле и в Певеке, основываясь на результатах численных расчетов по модели WRF-ARW. Особое внимание уделено оценке вклада волновых процессов в общую динамику явления (на основе соотношения волнового и орографического сопротивления) и особенностям волнового сопротивления для различных подветренных бурь.

Особенности формирования боры в районе Новой Земли в окружении различающихся по гидрометеорологическим условиям Баренцева и Карского морей изучены в [122, 123]. Рассмотрены необходимые условия развития боры в зимний и летний периоды. Значение числа Фруда Fr используется в качестве основного критерия. Приведена статистика случаев боры на основе анализа совместного распределения значений частоты плавучести и скорости ветра. Приведены результаты численного моделирования с использованием модели WRF-ARW для трех (малых, промежуточных и больших) значений числа Fr . Рассмотрены особенности формирования гидродинамических характеристик боры для случаев, условно отнесенных к мелким и глубоким типам этого явления. Даны оценки орографического сопротивления и отдельных его составляющих.

Авторами [124] на основе данных наблюдений, реанализа и мезомасштабного численного моделирования с помощью модели WRF-ARW проводится оценка применимости гидравлической и волновой гипотез к новороссийской боре. Показано, что механизм формирования новороссийской боры существенно смешанный, что выражается в одновременном наличии обрушения гравитационных волн и гидравлического скачка, а также в значительной изменчивости вклада волновых процессов в динамику боры. Наиболее благоприятные условия для одновременного действия двух механизмов — наличие умеренной или слабой инверсии и высокого или отсутствующего фонового критического уровня. На основе данных измерений метеопараме-

тров в ходе зимних экспедиций в 2012–2013 гг. в районе Новороссийска и Геленджика, в [125] проведен анализ пространственной и временной изменчивости поля приземного ветра во время эпизодов боры, включая события 27 января и 7 февраля 2012 г., сопровождавшиеся ураганными ветрами на побережье и подветренных склонах Маркотхского хребта. Эффект частичного блокирования горами натекающего воздушного потока оказывает влияние на ветровой режим в подветренной области, особенно в окрестностях Геленджика, где горы выше, чем в районе Новороссийска.

Модель региональной циркуляции атмосферы WRF-ARW была использована в [126] для воспроизведения нескольких эпизодов холодного вторжения и Новороссийской боры, сопровождающихся образованием мезомасштабного циклонического вихря над Черным морем, что можно четко наблюдать на спутниковых снимках облачности. Показано, что развитие вихря связано с особенностями обтекания северо-западного края Кавказских гор. Оценена вертикальная завихренность, связанная с горизонтальным градиентом температуры вдоль берега. Рассмотрена структура поля скорости ветра и температуры осесимметричного квазидвумерного вихря, создаваемого в прибрежной зоне и смещенного в сторону моря после его отделения от берега. При фоновом северном ветре прибрежная циклоническая циркуляция не сопровождается отрывом вихря от побережья. Особенностью развития циклонического вихря является юго-восточный ветер со скоростью до 10 м/с в прибрежной зоне Кавказа от Сочи до Сухуми.

Несколько работ было посвящено изучению интенсивных атмосферных вихрей конвективного происхождения: тропических циклонов (ураганов, тайфунов) и торнадо (смерчей).

В [127] рассматриваются условия формирования сильного торнадо на Южном Урале (в Республике Башкортостан) 29 августа 2014 г. Отмечается, что торнадо было связано с суперячейкой, а синоптические условия его формирования соответствовали Типу I классификации, предложенной А.И. Снитковским в 1987 г. Оцениваются основные характеристики торнадо: ширина вихревой воронки составляет 150–200 м, а максимальная скорость ветра составляет 65 м/с. Выявлено, что торнадо относился к категории EF3 по расширенной шкале Фуджита (Fujita). Простой индекс конвективной неустойчивости (3D-индекс) используется в [128] для анализа

погодных и климатических процессов, способствующих возникновению опасных конвективных явлений, включая торнадо. Индекс основан на информации о температуре и влажности воздуха на поверхности земли. Проанализирована прогностическая способность индекса воспроизводить опасные конвективные явления (грозы, ливни, торнадо). Показано, что большинство торнадо в Северной Евразии характеризуются высокими значениями 3D-индекса. Более того, 3D-индекс существенно коррелирует с конвективной доступной потенциальной энергией. Данные реанализа (за последние десятилетия) и моделирования на глобальной климатической модели (для 21-го века) показывают увеличение частоты «встречаемости» благоприятных для формирования торнадо метеорологических условий в регионах Северной Евразии. Наиболее значительное увеличение наблюдается на побережье Черного моря и на юге Дальнего Востока.

В [129] представлен новый метод идентификации следов смерчей в лесных регионах Европы на основе данных дистанционного зондирования. Этот метод позволяет объективно оценить (т.е. он не зависит от плотности населения и сетей наблюдений) климатологию торнадо в лесных районах. Метод основан на идентификации узких и вытянутых областей нарушений леса, полученных с использованием спутниковых изображений Landsat и данных Глобального изменения леса (GFC) на основе Landsat. Спутниковые снимки Landsat и MODIS, данные наблюдений на метеостанциях и данные реанализа были дополнительно задействованы для определения дат торнадо. Минимальная интенсивность торнадо по шкале Фуджита F была оценена с помощью модели распределения Вейбулла с использованием информации о длине и ширине пути торнадо. Этот метод применяется к лесным районам северо-восточной Европы, где в период между 2000 и 2014 гг. было выявлено 110 следов торнадо, 105 из которых ранее не регистрировались и были обнаружены впервые. Наибольшее количество торнадо произошло в 2009 г., и июнь является наиболее благоприятным месяцем для формирования торнадо (включая сильные торнадо и «вспышки торнадо» (tornado outbreaks)). Большинство выявленных торнадо имеют длину пути < 10 км с максимальной и средней шириной приблизительно 200–300 м и 100–200 м соответственно. Было найдено несколько торнадо с длинными и широкими треками; четыре из них, вероятно, имели минимальную интенсивность F3.

«Вспышка смерчей» в Иваново в 1984 г. — одно из самых фатальных событий торнадо в Европе с ранее не до конца известными характеристиками пути смерчей. Авторы [130] использовали изображения Landsat для обнаружения вызванных смерчами лесных нарушений (ветроповалов) и восстановления фактических характеристик смерчей во время вспышки. Определены границы ветроповалов путем визуального сравнения спутниковых изображений и с помощью нормализованного разностного инфракрасного индекса.

В [131] дается анализ состояния атмосферы, которое предшествовало и сопровождало образованию смерча в Обнинске (Калужская область) 23 мая 2013 г. Исходными данными послужили наборы метеорологических параметров от различных источников, в том числе измерения на высотной метеорологической мачте в г. Обнинске, дающие полную картину состояния нижнего 300-метрового слоя атмосферы. Приводятся результаты расчетов ряда конвективных индексов с использованием модели WRF высокого пространственного разрешения применительно к изучаемой ситуации. Дается оценка возможности заблаговременного прогноза смерчеопасных ситуаций на основе указанного подхода.

В [132] рассмотрена возможность заблаговременного предупреждения о смерче. В качестве реального события использован смерч в Башкирии 29 августа 2014 г. Для расчетов метеорологических полей использовалась модель WRF высокого пространственно-временного разрешения. На основе этого вычислялись индексы конвективной неустойчивости. Анализ поведения индексов позволил прогнозировать опасность возникновения смерча с заблаговременностью вплоть до трех суток и с точностью до нескольких часов по времени и 200 км по пространству. Также продемонстрирована возможность регистрации и наукастинга смерчей на основе применения уже имеющихся математических средств обработки радиолокационной информации. Обсуждается возможность совместного использования упомянутой информации для создания системы мониторинга и прогноза опасных явлений погоды, в том числе смерчеопасных ситуаций.

Наряду с расчетом конвективных индексов с использованием модели WRF, к анализу и прогнозу смерчеопасных ситуаций авторы [133] привлекли расчет поля вертикальной скорости. Представлены результаты расчетов для четырех

смерчей 2015 г. Показано, что значения индексов выше пороговых коррелируют с формированием в модели локализованной интенсивной конвективной ячейки в окрестности максимальных значений индексов и в момент достижения этих значений. Обсуждается возможность использования этого результата в качестве дополнительного прогностического признака возникновения смерчеопасной ситуации.

В рамках гидромеханической модели (ГММ), предложенной Б.Я. Шмерлиным, движение тропического циклона (ТЦ) определяется в [134] крупномасштабным полем ветра и интенсивностью ТС. Модель содержит параметры, описывающие ТС и его взаимодействие с полем ветра. Проведены диагностические, квазипрогностические и прогностические расчеты движения ТЦ. В случае диагностических расчетов параметры модели (константы для каждого ТС) определяются из наилучшего совпадения между реальной и рассчитанной траекторией ТС в течение всего срока жизни ТС; для квазипрогностических расчетов они определяются в течение предварительного «предпрогностического» периода. Диагностические расчеты показывают, что ГММ довольно правильно описывает особенности движения ТС. Квазипрогностические расчеты показывают, что параметры модели могут быть достаточно правильно определены в течение предварительного «предпрогностического» периода. В [135] представлены результаты расчета траекторий и интенсивностей двух тайфунов 2012 г. для двух групп схем параметризации процессов энергообмена между океаном и атмосферой в тропических циклонах (ТЦ): пограничного и приводного слоев ТЦ, радиационных потоков, микрофизики и конвекции с внедрением в блок приземного слоя соотношений, учитывающих охлаждение приводного слоя из-за испарения брызг, и без него. Показано, что учет последнего эффекта оказывает положительное влияние на результаты моделирования траектории ТЦ на разных стадиях. В случаях, когда наблюдаются особенности в перемещении ТЦ, например, образование петли, это улучшение может быть принципиальным. Повышается также и точность результатов расчета интенсивности ТЦ.

Используя модель WRF-ARW, в [136] проведено численное моделирование циркуляции атмосферы в Крымском регионе в течение 30-дневного летнего периода. Воспроизведены особенности развития бриза как гравитационного течения, такие как ячейки прямой и непрямой циркуляции, волновые колебания на грани-

це между ними, связанные с неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца, и формированием го-ловки бриза. Оценены скорости бриза и их су-точный цикл. Было показано, что для горных районов южного побережья Крыма (ГТК) при-брежная циркуляция в основном обусловле-на квазисуточными колебаниями, связанными с возбуждением ветра на склонах гор.

4. МИКРОМАСШТАБНЫЕ ДВИЖЕНИЯ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Недавний прогресс по включению подпрог-рамм (subroutines) для озер в модели численного прогнозирования погоды (ЧПП) привел к более точным прогнозам. В моделях озер одним из су-щественных параметров является прозрачность воды, параметризуемая с помощью коэффици-ента ослабления света K_d , для которого обычно используется значение глобальной константы. Авторы [137] использовали прямые вихревые ковариационные методы и базовые метеороло-гические измерения в сочетании с измерениями температуры и прозрачности воды в бореальном озере для оценки эффективности двух моделей озера, LAKE и Flake. Эти модели представляют две одномерные структуры, широко используемые в ЧПП. Результаты показывают, что моде-ли озера очень чувствительны к изменениям K_d , когда этот коэффициент ниже 0.5 м^{-1} . Развитие термической стратификации также сильно за-висит от K_d . При моделировании не пропуска-ющей света воды перемешанный слой был бо-лее мелким, длинноволновые и турбулентные потери тепла выше, и, следовательно, средние температуры водяного столба ниже, чем при моделировании чистой воды. Таким образом, изменения прозрачности воды могут влиять на наступление ледяного покрова. Более слож-ная модель LAKE моделировала сезонное углу-бление термоклина, в то время как в модели Flake его положение оставалось практически постоянным в течение лета. Обе модели пе-реоценили температуру воды на поверхности примерно на 1°C , а скрытый тепловой поток на $>30\%$, но вариации в накоплении тепла и по-токе явного тепла были адекватно смоделиро-ваны. Результаты показывают, что, по крайней мере, для гуминовых озер можно использовать постоянное значение K_d для конкретного озера и что глобальное картирование K_d было бы наи-более полезным в регионах с относительно чи-стыми озерами, например, в озерах на больших высотах.

Авторы [138] провели серию LES-расчетов турбулентных течений над неоднородными поверхностями, имитирующими небольшие лесные озера. Исследованы закономерности турбулентного обмена теплом и импульсом над такими объектами. Отмечена слабая чувствительность характеристик турбулентности над озером к термической стратификации. Рассматриваются вопросы репрезентативности натурных измерений турбулентных потоков методом ковариации вихревых пульсаций над такими объектами.

В [139] LES-моделирование и лагранжево стохастическое моделирование дисперсии пассивных частиц были применены для определения «отпечатка» (footprint) скалярного потока в устойчивом пограничном слое атмосферы. Было показано, что разрешенные и частично разрешенные вихри («в масштабе субфильтра») в основном ответственны за дисперсию частиц в LES, подразумевая, что существенное улучшение может быть достигнуто с помощью восстановления мелкомасштабных флуктуаций скорости. В LES с явной фильтрацией это восстановление состоит в применении известного оператора обратного фильтра. Полученные в LES функции отпечатка (footprint functions) сравнивались с функциями, рассчитанными с использованием одночастичных лагранжевых стохастических моделей первого порядка (LSM) и лагранжевых стохастических моделей нулевого порядка — моделей случайных смещений (RDM). Согласно представленному LES, площадь источника и отпечатки в устойчивом пограничном слое могут быть значительно больше, чем предсказанные современными LSM.

В [140] дан анализ микрометеорологических измерений в пограничном слое атмосферы над холмистой поверхностью, покрытой лесной растительностью. Измерения проводились на метеорологической мачте на нескольких уровнях от верхней границы леса до высоты, приблизительно в семь раз превышающей высоту деревьев. Предложен и вычислен полуэмпирический масштаб длины, зависящий от особенностей местной топографии и типа подстилающей поверхности в районе измерений. Показано, что использование этого масштаба позволяет ввести коррекцию универсальных функций теории подобия Монина—Обухова для устойчивого атмосферного пограничного слоя над сложными поверхностями без их существенной модификации по сравнению с универсальными функциями над однородным ландшафтом с малыми элементами шероховатости. Предложенный подход может быть использован для уточнения методов

определения турбулентных потоков импульса по данным профильных измерений над пространственно-неоднородными ландшафтами.

Стохастический ансамбль конвективных термиков (вихрей), образующий тонкую структуру турбулентного конвективного слоя атмосферы, рассмотрен в [141]. Предложенная ансамблевая модель предполагает, что все термики имеют одинаковую детерминированную плавучесть и рассматривает их как сплошные сферы переменного объема. Значения радиусов и вертикальных скоростей термиков предполагаются случайными. Движение стохастической системы конвективных вихрей описывается нелинейным уравнением Ланжевена с линейным коэффициентом дрейфа и случайной силой, структура которой известна для системы броуновских частиц. Показано, что плотность вероятности для ансамбля термиков в фазовом пространстве скоростей удовлетворяет K -форме уравнения Фоккера—Планка с переменными коэффициентами. Максвелловское распределение скорости термиков строится как стационарное решение упрощенного уравнения Фоккера—Планка. Показано, что полученное распределение скоростей дает хорошее приближение экспериментальных распределений в турбулентном конвективном перемешанном слое.

В [142] предложены модификации интегральных моделей термиков и струй, включающие силу давления. Построены точные решения модифицированной модели стационарной напорно-конвективной струи. Полученные точные решения сопоставлены с аналитическими решениями интегральных моделей стационарных струй, использующих приближение вертикального пограничного слоя. Установлено, что модификации интегральных моделей конвективных струй сохраняют степенные зависимости изменения вертикальной скорости и плавучести от высоты, полученные в классических моделях. Для безнапорной нагретой конвективной струи, всплывающей в нейтрально стратифицированной атмосфере, учет сил давления увеличивает амплитуду плавучести и уменьшает амплитуду вертикальной скорости. При этом общее изменение амплитуд составляет примерно 10%. Для спонтанной струи, всплывающей в неустойчиво стратифицированной атмосфере, учет сил давления сохраняет амплитуду плавучести и увеличивает амплитуду вертикальной скорости примерно на 15%. Результаты представляют интерес для задач распространения примесей в водной и воздушной среде и построения моделей статистических ансамблей термиков для

конвективно-диффузионной параметризации турбулентных моментов.

В [143] предполагается, что конвективный приземный слой состоит из двух ярусов: нижнего динамического яруса, прилегающего к подстилающей поверхности, и верхнего яруса вынужденной конвекции. При этом считается, что турбулентные моменты каждого яруса допускают независимые аппроксимации. Для моментов вертикальной скорости и пульсаций потенциальной температуры яруса вынужденной конвекции предложены линейные аппроксимации. Первые приближения линейных аппроксимаций соответствуют свободно-конвективным пределам теории подобия Мони́на–Обухова в условиях отсутствия ветра. Вторые приближения линейных аппроксимаций позволяют описать профили турбулентных моментов в условиях существования умеренного ветра. Сопоставление с данными экспериментов убедительно демонстрирует справедливость линейных аппроксимаций в области вынужденной конвекции.

В [144] описан эксперимент по измерению всех трех компонент векторов скорости и завихренности, а также температуры, ее градиента и потенциального вихря с помощью комплекта приборов, состоявшего из четырех акустических анемометров. Анемометры были размещены в вершинах тетраэдра, горизонтальное основание которого представляло собой прямоугольный треугольник с равными катетами, а верхняя точка тетраэдра находилась точно над вершиной прямого угла. Расстояние от поверхности до основания тетраэдра было равно 5.5 м, длины катетов и длина вертикального ребра — 5 м. Вычислена матрица корреляций-ковариаций для турбулентных вариаций всех измеренных величин. Днем горизонтальное слагаемое спиральности имеет порядок -0.03 м с^{-2} , а вертикальное $+0.01 \text{ м с}^{-2}$. Ночью знаки сохраняются, а абсолютные значения в несколько раз меньше. Вычислены коспектры и спектральные коэффициенты корреляции для всех слагаемых спиральности. Демонстрируются временные вариации слагаемых «мгновенной» спиральности и потенциального вихря.

В августе 2014 г. авторами [145] на полигоне ИФА в Цимлянске при различных условиях стратификации были выполнены измерения турбулентной завихренности, турбулентного градиента температуры, турбулентной спиральности и турбулентного потенциального вихря. Измерения выполнялись по методике, впервые использо-

ванной в Цимлянской экспедиции 2012 г. [144]. Измерительная установка «Тетраэдр» состояла из четырех трехкомпонентных акустических анемометров-термометров Gill Windmaster, размещенных в вершинах прямоугольного тетраэдра с базовым масштабом 0.7 м. Она была оснащена поворотным устройством и располагалась на вершине мачты, высота которой принимала значения 3.5, 5, 13.5 и 25 м. Измерения на тетраэдре во многих случаях сопровождались регистрацией «мгновенного» профиля температуры пятью малоинерционными термометрами, верхний из которых стоял на высоте вершины мачты. Профиль температуры в слое 10–600 м непрерывно регистрировался микроволновым профиломером Е.А. Кадыгрова. Общая продолжительность регистраций на «Тетраэдре» составила около 200 ч.

В [146] представлены результаты экспериментального исследования турбулентного теплообмена между поверхностью замерзшего озера, окруженного лесом, и пограничным слоем атмосферы. Потоки тепла и импульса измерялись на трех уровнях методом вихревой ковариации (eddy covariance, EC). Кроме того, тепловые потоки оценивались методом баланса поверхностной энергии с использованием температурного профиля, измеренного в снежном покрове и результирующего длинноволнового и коротковолнового излучения. Результаты измерений показывают, что вихревые ковариационные потоки хорошо коррелируют с таковыми, полученными балансовым методом, с тенденцией недооценки. Присутствие эффектов сдвига ветра на высоте верхушек деревьев, продемонстрированное ранее в LES-моделировании, было подтверждено тем фактом, что поток импульса увеличивался с высотой от поверхности. Отрицательный поток явного тепла увеличивался с высотой большую часть времени. Предполагается, что это явление может быть частично вызвано большими отрицательными потоками тепла над поверхностью, образующимися, когда горизонтальная адвекция тепла происходит на высотах $\sim 100 \text{ м}$. Во время событий адвекции тепла теория подобия Мони́на–Обухова (MOST) не может воспроизвести резкое увеличение отрицательного потока тепла в поверхностном слое. За исключением событий адвекции тепла, расчеты MOST хорошо согласуются с потоками, рассчитанными методом ЕС, однако, с некоторой систематической недооценкой.

Основанное на наблюдениях исследование в [147] сравнивает сезонные изменения поверхностных потоков (турбулентных, радиационных и в почве) и другие вспомогательные данные

об атмосфере/поверхности/вечной мерзлоте на основе измерений, выполненных в наземных исследовательских обсерваториях, расположенных вблизи побережья Северного Ледовитого океана. Среднечасовые многолетние наборы данных, собранные в Eureka (Нунавут, Канада) и Тикси (Восточная Сибирь, Россия), детально анализируются, чтобы выявить сходства и различия в сезонных циклах на этих двух арктических станциях, которые расположены на значительно различающихся широтах (80.0° N и 71.6° N соответственно).

По данным измерений в прибрежной зоне и в открытом море в [148] рассматривается изменчивость коэффициента сопротивления c_D морской поверхности в различных фоновых условиях. По экспериментальным данным, полученным при измерениях с борта судна, подтверждается уменьшение значений c_D при скоростях ветра больше 25 м/с. Исследуются особенности взаимодействия атмосферы и морской поверхности в прибрежной зоне. Отмечено, что при ветрах с берега значение c_D возрастает, что связано с порывистостью ветров и формированием внутренних пограничных слоев в приземном слое атмосферы. При направлении ветра с открытого моря значения c_D также выше, чем в открытом океане. Это объясняется влиянием донной топографии и структуры береговой линии на характеристики морского волнения, а также малым разгоном волн. Следовательно, применение значений c_D для открытого моря при моделировании штормовых условий в прибрежных зонах приводит к недооценке в этих зонах ветрового сопротивления.

В [149] исследованы устойчиво стратифицированные турбулентные потоки в пограничном слое над волнистой и гладкой водной поверхностью с помощью прямого численного моделирования (DNS) для чисел Рейнольдса Re от 15 000 до 80 000. DNS воспроизводит следующие основные свойства потока. Статистически стационарный турбулентный режим поддерживается, если турбулентное число Рейнольдса Re_L , определенное по масштабу длины Обухова и скорости трения, больше 10^2 . При $Re_L < 10^2$ турбулентность над плоской поверхностью полностью вырождается, но над волнистой поверхностью она выживает в виде остаточных колебаний, которые слабее для меньших уклонов волн. В стационарном турбулентном режиме при $Re_L > 10^2$ вертикальные профили средней скорости потока и температуры имеют логарифмическую форму, как это предсказывает теория подобия Монина—Обухова, с такими же эмпирическими

безразмерными константами, что и в лабораторных и полевых экспериментах. Длина шероховатости скорости и температуры, вертикальные турбулентные потоки импульса и тепла и среднеквадратичные турбулентные колебания скорости и температуры увеличиваются с увеличением наклона поверхностных волн. В то же время вертикальные профили средней скорости и температуры сохраняют автомодельную форму, предсказанную теорией Монина—Обухова, независимо от наклона волны. В [150] выполнено DNS устойчиво стратифицированных потоков над плоской и волнистой поверхностями для широкого диапазона чисел Рейнольдса Re_L и Ричардсона и обнаружено, что один и тот же порог, $Re_L = 10^2$, сохраняется на обеих поверхностях. Однако, когда наклон поверхностной волны достаточно крутой, сверхкритическое стратифицированное течение включает вызванные волной «пред-турбулентные» структуры потока, наиболее выраженные вблизи волнистой поверхности воды. Посредством DNS изучаются основные свойства этих движений и предлагается теоретическая модель их генерации через вторичную параметрическую резонансную неустойчивость двумерных возмущений, вызванных в воздушном потоке поверхностными волнами.

Исследование [151] касается численного моделирования процессов обмена импульсом, теплом и влагой, происходящих в пограничном слое атмосферы над морем. В частности, исследовано влияние морских брызг на эти процессы. Показано, что капли уменьшают среднюю скорость и температуру воздуха и увеличивают относительную влажность по сравнению с потоком без капель.

В [152] исследовано влияние брызг из-за их фрагментации типа «разрушение мешка» на обмен импульсом в пограничном слое атмосферы над поверхностью моря при ураганных ветрах. На основании анализа результатов лабораторных экспериментов было показано, что аэродинамическое сопротивление определяется вкладом трех факторов: (а) сопротивлением полов «разрушающихся мешка» как препятствий потоку; (б) ускорением брызг, образующихся во время фрагментации; и (в) расслоением околоземного атмосферного слоя из-за присутствия левитированных (поднятых в воздух) капелек воды. Сочетание всех трех факторов приводит к немонотонной зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от скорости ветра, что подтверждает результаты полевых и лабораторных измерений.

Коспектральные (взаимных спектров) бюджеты используются в [153] для того, чтобы связать распределения кинетической и потенциальной энергии турбулентных вихрей, измеренных по их спектрам, с макроскопическими отношениями между турбулентным числом Прандтля (Pr_t) и показателями атмосферной устойчивости, такими как параметр устойчивости ζ , градиентное число Ричардсона R_g или потоковое число Ричардсона R_f в приземном слое атмосферы. Показано, что зависимость Pr_t от ζ , R_g или R_f в первую очередь определяется соотношением феноменологических констант Колмогорова и Колмогорова–Обухова–Коррзина и константой, связанной с изотропизацией турбулентного потока, которая может быть независимо определена с помощью теории быстрых деформаций (distortion) в однородной турбулентности. Изменения в законах подобия для вертикальных скоростей и температурных спектров также влияют на соотношение $Pr_t - \zeta$ (или $Pr_t - R_g$ или $Pr_t - R_f$). Результаты показывают, что отклонение Pr_t от единицы в нейтральных условиях вызвано различием между импульсом и теплом в терминах констант Ротта, констант изотропизации и констант в членах, описывающих «потоки потоков» (flux transfer terms). Максимальное значение потокового числа Ричардсона R_{fm} , предсказываемое методом коспектрального баланса ($= 0.25$), хорошо согласуется со значениями в литературе, что позволяет предположить, что R_{fm} может быть связано с коллапсом колмогоровских спектров вместо ламинаризации турбулентных течений при устойчивой стратификации.

В [154] проведены исследования особенностей вихревого переноса импульса и тепла в нижней атмосфере, включающей планетарный пограничный слой, а также тропосферу и нижнюю стратосферу, с помощью трехпараметрического метода моделирования стратифицированных турбулентных течений. Особое внимание уделено анализу поведения вертикальных вихревых коэффициентов диффузии импульса и тепла, полученных прямыми измерениями и с привлечением трехпараметрического метода моделирования турбулентности, в котором учтены эффекты внутренних гравитационных волн в поддержании импульса в условиях сильно устойчивой стратификации. Показано, что профиль вертикального вихревого коэффициента диффузии импульса, вычисленный по трехпараметрической модели турбулентности, хорошо согласуется с прямыми измерениями не только внутри устойчиво стратифицированного плане-

тарного пограничного слоя, но даже выше его, в свободной атмосфере.

В [155] представлены результаты численного моделирования турбулентной структуры проникающей конвекции над городским островом тепла малого относительного удлинения в устойчиво стратифицированной покоящейся среде. Используются представления градиентной диффузии для турбулентных потоков импульса и тепла, зависящие от кинетической энергии турбулентности, скорости ее спектрального расходования и дисперсии температурных флуктуаций. Эти параметры находятся из замкнутых дифференциальных уравнений баланса в RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) приближении описания турбулентности. Распределения осредненных полей скорости и температуры, а также турбулентных характеристик хорошо согласуются с данными экспериментальных измерений.

В [156] анализируются параметризации турбулентной скорости трения u_* в численной модели городского острова тепла малого относительного удлинения в устойчиво стратифицированной покоящейся среде с термической неоднородностью подстилающей поверхности: неустойчивая стратификация над локализованным поверхностным источником тепла и устойчивая стратификация вне его. Представлены результаты вычисления u_* по безытерационным алгоритмам Louis и Paulson для квазиустановившегося состояния циркуляции над островом тепла.

В [157] тестируется явная алгебраическая модель рейнольдсовских напряжений и вектора турбулентного потока тепла для планетарного пограничного слоя в нейтрально стратифицированном пограничном слое атмосферы над однородной шероховатой поверхностью. Рассматриваемый вариант алгебраической модели построен на физических принципах RANS приближения для описания стратифицированной турбулентности. В нем используются три прогностических уравнения и показано правильное воспроизведение основных характеристик нейтрального пограничного слоя атмосферы: компонент скорости среднего ветра, угла поворота ветра, турбулентной статистики. Тестовые расчеты показывают, что предложенная модель может быть использована для целенаправленных исследований атмосферного пограничного слоя.

В [158] полностью явная алгебраическая модель напряжений Рейнольдса и вектора турбулентного потока тепла термически стратифицированного планетарного атмосферного

пограничного слоя используется в отсутствие стратификации для численного исследования турбулентного пограничного слоя Экмана над однородной шероховатой поверхностью для разных значений безразмерного поверхностного числа Россби. Получены зависимости полного угла поворота ветра от числа Россби. Вычисленные вертикальные профили средней скорости, турбулентных напряжений, турбулентной кинетической энергии, поверхностной скорости трения, высоты пограничного слоя удовлетворительно согласуются с данными наблюдений и полученными ранее LES-результатами.

В [159] рассматривается предположение, постулируемое Деузебио и Линдборгом (Deusebio and Lindborg, 2014) о том, что спиральность, поступающая из свободной атмосферы в пограничный слой Экмана, подвергается каскаду с сохранением его знака (по правилу правого винта или альтернативно левого винта, что является признаком вращения системы), от больших до малых масштабов, вплоть до микромасштаба турбулентности Колмогорова. В то же время измерения турбулентной спиральности в [144] показывают противоположный ожидаемому знак спиральности. Возможным объяснением этого явления может быть совместное действие атмосферных потоков различных масштабов в пограничном слое, включая бризовую циркуляцию над испытательным полигоном. В связи с этим для описания структуры ветра в пограничном слое рассматривается суперпозиция классического спирального решения Экмана и решения для склонового ветра Прандтля. Последнее решение имитирует гидростатическую бризовую циркуляцию над неравномерно нагретой поверхностью. Показано, что существует сектор в 180° на плоскости годографа, в котором относительная ориентация профилей скорости Экмана и Прандтля способствует левому вращению с высотой результирующего вектора скорости ветра в самой нижней части пограничного слоя. Этим объясняется отрицательный (левосторонний) каскад спиральности в сторону турбулентных движений малого масштаба, что согласуется с измерениями в [144]. Предложена простая модель турбулентной релаксации, которая объясняет измеренные положительные значения относительно небольшого вклада в турбулентную спиральность от вертикальных составляющих скорости и завихренности.

В [160] модель комбинированного вихря Рэнкина применена для описания радиального профиля азимутальной скорости в атмосферных

пыльных вихрях, и предложен упрощенный вариант модели турбулентного пограничного слоя под периферией вихря Рэнкина, которая соответствует так называемому «потенциальному вихрю». На основании результатов, полученных в работе (Burggraf et al., 1971), принято, что радиальная скорость вблизи земли в потенциальном вихре значительно превышает азимутальную скорость, что делает решаемой проблему определения поверхностного напряжения сдвига, в том числе для турбулентного пограничного слоя. Построенная модель объясняет превышение пороговой скорости трения для золотого переноса в типичных пыльных вихрях на Земле и на Марсе.

5. ДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ТРОПОСФЕРОЙ, СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРОЙ

Начало исследований о взаимодействии между тропосферой и стратосферой во внетропических широтах относится к началу 1970-х гг. (Hines, 1974; Holton and Mass, 1976). Однако более глубокое понимание этой связи появилось благодаря работе (Thompson and Wallace, 1998), где было дано описание режима изменчивости давления на уровне моря северного полушария в зимний период, который тесно связывает тропосферу и нижнюю стратосферу. Этот режим называется Арктическим колебанием (АО), его проявление на поверхности Земли определяется как первая эмпирическая ортогональная функция (ЭОФ) — главная мода изменчивости давления на уровне моря к северу от 20°N . Сопоставляя главную ЭОФ и средний зональный ветер на разных высотах, обнаруживается вертикальная связь, охватывающая тропосферу и нижнюю стратосферу. Параллельно с этим с помощью простых и более сложных моделей изучались распространяющиеся вниз стратосферные аномалии (Holton and Mass, 1976; Scaife and James, 2000). Они составляют серию стратосферных колебаний без годового цикла: чередование положительных и отрицательных аномалий, что похоже на квазидвухлетнее колебание (QBO) но с более коротким периодом 50–100 дней. Сильное взаимодействие стратосферы и тропосферы обычно наблюдается в зимний период. Распространяющиеся вверх планетарные волны, как стационарные, так и нестационарные (синоптического временного масштаба), иногда вызывают внезапное стратосферное потепление (ВСП). На временном масштабе от месяца до сезона тепловые аномалии

в верхней стратосфере, которые генерируются в результате дисбаланса радиационного выхолаживания и нагревания, а также за счет потоков тепла, вызванных волновой динамикой, распространяются вниз, оказывая влияние на тропосферную циркуляцию. Это взаимодействие демонстрирует проявление моды естественной изменчивости, АО, в Северном полушарии.

Как показано в [161], первая ЭОФ внутригодовой изменчивости температуры, осредненной вдоль круга широты в слое 0–60 км по данным 500-летнего моделирования доиндустриального климата с моделью климата ИВМ РАН, представляет собой аномалии температуры, распространяющиеся из верхней стратосферы вниз в течение декабря–апреля. Такой аномалии температуры предшествует аномалия меридионального потока тепла в полярной верхней стратосфере в декабре.

Воспроизведению динамических процессов стратосферы внетропических широт посвящена работа [162], где с помощью глобальной климатической модели ИВМ РАН с верхней границей на уровне 0.2 гПа (~60 км) для периода с 1979 по 2008 гг. и на основе данных реанализа, анализируются изменения температуры, зонального ветра, активности планетарных волн, потоков тепла в нижней стратосфере, а также ВСП со смещением и разделением полярного вихря и распространение связанных с ними циркуляционных аномалий в тропосфере.

Подробный анализ стратосферно-тропосферного динамического взаимодействия в 5 реализациях 50-летнего расчета климатической модели ИВМ РАН 5-й версии для современного климата, представленный в [163], позволяет сформулировать ряд важных выводов о возмущении стратосферного полярного вихря и о его влиянии на тропосферу, указав на проблему многих моделей ОЦА, являющихся основой моделей климата — более слабый отклик тропосферы на возмущения стратосферного полярного вихря, чем в данных наблюдений.

Особенности ВСП в конце января 2017 г. были рассмотрены в [164], где показано, что ВСП привело к значительному потеплению стратосферы Арктики (предотвратившему сильное разрушение стратосферного озона), замедлению зональной циркуляции стратосферы, которая так и не восстановилась до весенней перестройки, ослаблению стратосферного полярного вихря и изменению фазы АО с положительной на отрицательную с потеплением в полярном регионе и похолоданием в средних/высоких ши-

ротах, а также к распространению потоков волновой активности (из-за отражения в верхней стратосфере) в нижнюю стратосферу и в тропосферу над севером Канады. В результате в начале февраля 2017 г. в верхней тропосфере усилилось распространение волнового пакета на восток над Северной Атлантикой, которое привело к усилению блокирующего антициклона над северо-западной Европой и похолоданию к юго-востоку от него, а на северо-востоке Северной Америки усилилась и расширилась область пониженного давления, что привело к значительному похолоданию и обильным осадкам.

На основе данных реанализа, наземных спектрометрических и спутниковых наблюдений в [165] анализируется изменение режимов общей циркуляции в стратосфере и тропосфере, связанных с явлением ВСП в начале января 2013 г. За две недели до ВСП было обнаружено усиление потоков волновой активности из тропосферы в стратосферу над Восточной Сибирью–Китаем. Показано, что за неделю до ВСП распространяющийся на восток в верхней тропосфере волновой пакет мог внести вклад в усиление антициклона над северо-восточной Атлантикой, что в ходе ВСП привело к разделению стратосферного полярного вихря на две части.

Зима 2009–2010 гг. в арктической стратосфере, по сравнению с другими зимними периодами, как показано в [166], характеризовалась главным образом ВСП в конце января, и это событие привело к значительному повышению температуры полярной стратосферы и к обращению зонального ветра. Основные результаты [166] состоят в следующем: (1) в отличие от других крупных событий ВСП в последние зимы, после ВСП в январе 2010 г., западный поток и полярный вихрь не восстановили свои состояния, которые наблюдались перед ВСП вплоть до весенней перестройки, в результате чего истощение озонового слоя внутри полярного вихря в течение всей зимы было относительно небольшим; (2) отличительной чертой зимы 2010 г. было расщепление стратосферного полярного вихря в декабре; при этом расщепление вихря сопровождалось повышением температуры полярной стратосферы и ослаблением западных ветров; расщепление произошло, когда в дополнение к системе высокого давления над северо-восточной Евразией и северной частью Тихого океана тропосферный антициклон над Европой усилился и распространился на нижнюю стратосферу; (3) анализ волновой активности во внетропической тропосфере показал,

что два пакета волн Россби распространялись на восток до Северной Атлантики за несколько дней до расщепления вихря; первый волновой пакет распространялся из субтропиков и средних широт восточной части Тихого океана над Северной Америкой, а второй — из северной части Тихого океана, и эти волновые потоки способствовали усилению тропосферного антициклона над Европой и расщеплению стратосферного полярного вихря.

Ряд работ посвящен связи между динамикой волн Россби, обрушением волн, потоками волновой активности и различными типами циркуляции в стратосфере и тропосфере.

В начале сентября 2002 г. наблюдались сильные конвективные процессы на юго-востоке Индонезии и на юго-востоке Африки. В условиях сильной дивергенции потока в верхней тропосфере были сгенерированы два волновых пакета волн Россби (Rossby wave train, RWT), которые распространялись на юго-восток на фоне среднего потока. В [167] сделано предположение, что эти волновые пакеты вызывают усиление волновой активности планетарных волн в верхней тропосфере/нижней стратосфере над Антарктидой. Такое изменение структуры планетарных волн было диагностировано в сентябре 2002 г., до того, как в Южном полушарии произошло первое крупное ВСП. Для проверки гипотезы была использована упрощенная версия модели ЕСНАМ4. Эксперименты по чувствительности были выполнены для среднего фонового потока, аналогичного сентябрю 2002 г. с использованием генератора волн Россби в субтропической верхней тропосфере в двух разных местах, которые соответствуют наблюдаемым областям дивергенции потока. В результате, после примерно 2 недель интегрирования модели с использованием генератора волн, обнаружили два RWT с распространением на юго-восток, вызывающие усиление планетарной волны 2 в верхней тропосфере и нижней/средней стратосфере. Поток волновой активности к полюсу оказался больше по сравнению с контрольным прогоном без применения генератора волн. Результаты моделирования показали, что конвергенция потока Элиассена–Пальма вызывает замедление среднего зонального потока в стратосфере, но не меняет направление ветра. Эксперименты по чувствительности подтверждают надежность этих результатов. Полученные результаты модели подтверждают гипотезу о том, что усиление активности планетарных волн в австралийской полярной области в 2002 г. вызвано усилением субтропического форсинга двух RWT.

С использованием зимних (ноябрь–март) данных реанализа ERA-Interim для геопотенциала в тропосфере и стратосфере с 1979 по 2016 гг., в [168] проведен анализ спектров волновых возмущений с зональными числами $1 \leq k \leq 10$. При этом выделен вклад волн, распространяющихся на восток (E) и на запад (W), а также стационарных волн (S). В тропосфере и стратосфере тропиков, а также в верхней стратосфере всего Северного полушария выявлена интенсификация волновой активности. Оказалось, что в тропиках и субтропиках это связано со всеми типами волн (E, W, S), тогда как в средних и высоких широтах преимущественно со стационарными волнами и волнами, распространяющимися на восток. В области субтропической тропопавзы выявлено общее увеличение энергии стационарных волн в последние десятилетия. Кроме того, в тропосфере тропиков и субтропиков и в субтропической нижней стратосфере энергия распространяющихся на восток волн в годы Эль-Ниньо может быть в полтора-два раза больше, чем в годы Ла-Нинья. Осредненное по спектру зональное волновое число для всех типов волн (E, W, S) максимально в верхней тропосфере субтропиков. При этом осредненное по спектру зональное волновое число для W- и S-волн связано с индексом АО и изменяется на 15% в 1979–2016 гг. (на междекадном временном масштабе). Осредненный по спектру период волн в стратосфере больше чем в тропосфере и максимален в средней стратосфере внетропических широт. Отмечена связь осредненных по спектру периодов волн с активностью ВСП. Знак этой связи зависит от географической широты, слоя атмосферы и зонального волнового числа.

В [169] изложено развитие концепций стратосферно-тропосферного обмена (СТО), приведены количественные оценки обмена между тропосферой и стратосферой, выполненные разными авторами. Описаны характерные временные масштабы СТО и его географические особенности. Особое внимание уделено изложению специфики СТО во внетропических широтах, где наблюдается активное перемещение воздуха по вертикали в обоих направлениях. Подъем воздуха через тропопавзу происходит здесь в зонах теплых несущих полос, опускание в областях стратосферных вторжений (интрузий). Описаны процессы обмена в слое, включающем верхнюю тропосферу и самую нижнюю стратосферу. Представлены механизмы реализации крупномасштабных стратосферных вторжений в системах складок тропопавзы или «отсеченных»

циклонов (cut-off cyclones), а также механизмы смешивания стратосферного и тропосферного воздуха. Изложены особенности глубоких стратосферных вторжений, основанные на анализе таких индикаторов стратосферного воздуха, как повышенные концентрации озона и стратосферного радионуклида ^7Be . Рассмотрены некоторые аспекты энергетического обмена между тропосферой и стратосферой.

В [170] на основе ERA-Interim, изучалось влияние нагревания в нижней тропической стратосфере, за счет аэрозоля в результате извержения вулкана Mt. Merapi в ноябре 2010 г., на интенсивность полярного вихря в период февраль–март 2011 г. Был также проведен анализ и оценка корреляции между вулканическим извержениями в осенне-зимний период и изменением озонового слоя в Арктике в следующий зимне-осенний период.

6. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В ТЕОРИИ КЛИМАТА И ЭКОЛОГИИ

Модели земной системы являются сложными и представляют большое количество процессов, что приводит к постоянному расхождению среди климатических прогнозов для данного сценария будущего. Из-за различий между моделями в сравнении с наблюдениями и отсутствием независимости между моделями, в настоящее время имеются доказательства того, что приращение одинакового веса каждой доступной модели прогноза динамики климата является неоптимальным. В этой перспективе обсуждаются новые инструменты, которые способствуют более быстрой и всесторонней оценке («взвешиванию») моделей и являются многообещающим способом сосредоточить оценку на наблюдениях, наиболее соответствующих климатическим прогнозам. Эти подходы необходимы для получения наиболее достоверной информации о региональных климатических изменениях, воздействиях и рисках для заинтересованных сторон и политиков.

В [171] представлены результаты воспроизведения современного климата с помощью новой версии модели климатической системы Земли INMCM5.0, которая является развитием предыдущей ее версии INMCM4.0. В атмосферном блоке INMCM5.0 использовано более высокое разрешение по вертикали в стратосфере и поднята верхняя граница расчетной области, включен аэрозольный блок, изменены параметризации облачности и конденсации. В океанском

блоке увеличено разрешение по горизонтали. Изменена также программная реализация модели. Делается акцент на уменьшении систематических ошибок по сравнению с предыдущей версией, на явления, которые в предыдущей версии не могли быть смоделированы, а также на проблемах моделирования, которые по-прежнему остаются нерешенными. Анализ современной климатологии INMCM5 (на основе данных исторического прогона за 1979–2005 гг.) показывает умеренное улучшение воспроизведения основных характеристик циркуляции по сравнению с INMCM4. Наиболее заметным улучшением является способность новой модели воспроизводить экваториальные стратосферные квазидвухлетние колебания и статистику ВСП.

В соответствии со сценарием, предложенным для шестого этапа проекта сравнения моделей климатической системы Земли (CMIP6), анализ результатов моделирования изменений климата, наблюдавшихся в 1850–2014 гг., полученных на основе семи исторических прогонов с помощью климатической моделью INMCM5, представлен в [172]. В соответствии с наблюдениями, во всех экспериментах глобальная средняя температура поверхности повышается на 0.8 К в конце эксперимента (2014 г.). Периоды быстрого потепления в 1920–1940 и 1980–2000 гг., а также его замедление в 1950–1975 и 2000–2014 гг. правильно воспроизведены в среднем по ансамблю. Заметным изменением в отношении результатов CMIP5 является правильное воспроизведение замедления глобального потепления в 2000–2014 гг. что приписывается изменению поглощения тепла океаном и более точному описанию общего солнечного излучения в протоколе CMIP6. Модель способна воспроизвести правильное поведение глобальной средней температуры в 1980–2014 гг., несмотря на неправильные фазы индексов мультидекадного атлантического колебания (AMO) и тихоокеанского декадного колебания (PDO) в большинстве экспериментов. Пространственный характер модельного тренда средней температуры поверхности в течение последних 30 лет выглядит близко к данным ERA-Interim. Модель правильно оценивает величину стратосферного охлаждения.

В [173] тридцать моделей Проекта CMIP5 оцениваются на предмет их характеристик при воспроизведении двух мод атмосферной циркуляции в Арктике в летнее время: арктического колебания (AO) и арктического диполя (AD). Эталонные AO и AD извлекаются из набора данных ERA-Interim (1979–2016 гг.). Оценка модели проводится в течение исторического периода

(1901–2005 гг.). Модели ранжируются по методу комбинированных метрик на основе двух коэффициентов корреляции (РСС) и двух объясненных отклонений для АО и АД, соответственно. В прогнозируемый период (2006–2100 гг.) большинство моделей демонстрируют положительную тенденцию для индекса АО и отрицательную тенденцию для индекса АД летом. Модели, получившие более высокий рейтинг на основе комбинированного ранжирования метрик, показывают более высокую согласованность и меньшие значения в величинах трендов АО и АД, чем у более ранних. Прогнозируемые тенденции в АО и АД способствуют незначительному повышению, если не снижению температуры воздуха, и ускорению роста осадков в 21 веке над арктической Аляской, в противоположность тому, что над Баренцевым и Карским морями. Изменения в АО и АД являются относительно незначительными факторами, способствующими прогнозируемым изменениям температуры и осадков в Арктике, среди которых изменения в АД играют более важную роль, чем изменения в АО. Летние АО и АД оказывают большее влияние на пространственную асимметрию поля осадков, чем на поле температуры воздуха.

Как отмечено в [174], сильное зимнее потепление доминировало в последних моделях изменения климата вдоль Арктической прибрежной равнины (АСР) северной Аляски, что может быть лучше всего продемонстрировано степенью промерзания обильных мелких озер АСР.

В [175] дано описание новой модели промежуточной сложности (PlaSim-ESM-ICMMG-v.1.0), построенной путем объединения модели PlaSim с моделями океана и морского льда. Представлены результаты моделирования климата с использованием PlaSim-ICMMG-v.1.0, путем рассмотрения глобальных полей температуры приземного воздуха, осадков, температуры поверхности моря и циркуляции океана, а также проведено сравнение с результатами, полученными с использованием оригинальной версии PlaSim. PlaSim-ICMMG-v.1.0 достаточно хорошо воспроизводит основные характеристики климатической системы и демонстрирует ее полезность для моделирования такой системы. Из-за быстрого потепления в Арктике возникают серьезные проблемы, связанные с механизмами, которые регулируют динамику погоды в средних широтах. Новая модель земной системы промежуточной сложности PlaSim-ICMMG-v.1.0 может быть использована для решения этих задач.

Система уравнений для представления крупномасштабной общей циркуляции атмосферы в модели земной системы промежуточной сложности (EMIC) представлена в [176]. Эти динамические уравнения были реализованы в Aeolus 1.0, который представляет собой статистико-динамическую модель атмосферы (SDAM) и включает в себя радиационный перенос и облачные модули. Статистико-динамический подход эффективен в вычислительном отношении и, таким образом, позволяет выполнять моделирование климата в многолетнем масштабе времени, что является основной целью разработки модели. Была проведена проверка эффективности модели в воспроизведении сезонного цикла и влияния Эль-Ниньо — Южного колебания (ЭНЮК). Использован специальный алгоритм оптимизации, который аппроксимирует глобальный минимум многомерной функции. Оптимизация улучшает, в частности, представление в модели струйных течений, шторм-треков Северного полушария, а также циркуляции Хэдли.

В [177] обсуждаются некоторые аспекты взаимодействия процессов атмосферной динамики в Арктике и средних широтах в условиях глобального изменения климата и быстрого потепления в Арктике в нижнем слое тропосферы (вследствие механизма положительных обратных связей, усиление потоков атмосферного тепла и влаги в Арктику и переноса тепла течениями в океане). Одна из правдоподобных физических гипотез о влиянии потепления в Арктике на динамику атмосферы в средних и высоких широтах заключается в том, что уменьшение аномалий морского льда и снежного покрова, вызванное этим потеплением, может привести к изменениям частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений и крупномасштабной циркуляции в средних широтах и в арктическом регионе. Полярные циклоны, стратосферный вихрь, струйные потоки, североатлантические колебания — эти объекты атмосферной динамики являются предметом обсуждения в [177]. В статье также представлены результаты исследования чувствительности Северного Ледовитого океана и морского льда к изменчивости атмосферной циркуляции с учетом динамики NAO/АО.

Исследование [178] о реакции растительного покрова Сибири на изменение климата было выполнено с использованием модели поверхности суши JSBACH с атмосферными условиями, полученными из результатов моделирования INMCM4. Реакция различных типов растительности на нынешние и прогнозируемые клима-

тические условия была оценена для Сибирского региона. При моделировании будущего климата использовался сценарий RCP 8.5.

В [179] с помощью спектральной модели исследуется реакция циркуляции атмосферы на изменения климата. Показано, что при уменьшении меридионального градиента температуры происходит ослабление циркуляции Хэдли и движение ее границ к полюсам. Исследуется динамика высоты тропосферы в зависимости от температуры радиационного равновесия атмосферы. Показано, что при усилении выхолаживания в стратосфере происходит изменение термической стратификации в верхней тропосфере, где стратификация определяется радиационными процессами. В нижней тропосфере стратификация определяется радиационно-конвективными процессами и бароклинной неустойчивостью. Смена режимов термической стратификации происходит на уровне $\sigma \approx 550$ мбар. Результаты экспериментов показывают, что изменения наклона изоэнтропических поверхностей в нижней тропосфере при усилении стратосферного полярного вихря в стратосфере согласуются с теоретическими оценками.

Результаты исследования связи аномально холодных погодных режимов зимой на территории России в начале 21 века с изменениями площади морских льдов в Арктике представлены в [180]. Проведены численные эксперименты с моделью общей циркуляции атмосферы (МОЦА) с высоким горизонтальным разрешением и предписанными данными по концентрации морских льдов (КМЛ) для трех периодов в последние десятилетия, соответствующие последнему десятилетию с низкими КМЛ в Баренцевом море, периоду высоких значений индекса Северо-атлантического колебания (САК) и периоду с высокими КМЛ и низким индексом САК в 1960-е гг. Подтвержден нелинейный отклик атмосферной циркуляции на уменьшение КМЛ в Баренцевом море, ранее обнаруженный в идеализированных экспериментах с МОЦА. Дополнительные эксперименты с аномалиями КМЛ только в зимний период и с МОЦА низкого горизонтального разрешения указывают на локальный механизм отклика, связанный с вихревой активностью в атмосфере. В [181] на основе результатов численных экспериментов с МОЦА с предписанными данными по концентрации морских льдов (КМЛ) для различных периодов в последние 50 лет, было показано, что резкое уменьшение площади морских льдов в Баренцевом море в последнее десятилетие могло способствовать формированию

блокирующего антициклона южнее Баренцева моря и похолоданию над регионами Северной Евразии. Уменьшение КМЛ в предшествующий период, от второй половины 1960-х гг. до первой половины 1990-х гг., приводит к более слабому отклику противоположного знака. Полученные результаты указывают на важную роль Баренцева моря как региона с сильнейшей изменчивостью теплообмена между океаном и атмосферой в Арктике, в формировании аномальных погодных режимов на территории России.

Возможные механизмы формирования значимых погодно-климатических аномалий на территории России в последние годы и их связь с глобальными изменениями климата и естественными квазициклическими процессами обсуждаются в [182]. В том числе анализируются экстремальная жара 2010 г., наводнение на Амуре 2013 г. и аномально холодные зимы. Все анализируемые явления связаны с формированием долгоживущих блокирующих антициклонов, для которых при продолжении глобального потепления можно ожидать общее увеличение повторяемости. При определении связи таких событий с глобальным потеплением необходимо учитывать эффекты регионально и глобально климатически значимых естественных квазициклических процессов, в том числе Атлантического долгопериодного колебания, Тихоокеанской декадной осцилляции и Эль-Ниньо/Южного колебания.

В [183] по данным измерений среднесуточной приземной температуры воздуха (ПТВ) и концентрации морского льда (КМЛ) в Баренцевом море (БМ) исследованы характеристики сильных положительных и отрицательных аномалий зимней ПТВ в Москве в сопоставлении с данными по КМЛ в БМ для периода 1949–2016 гг. По данным анализа приземных обратных траекторий движения воздушных частиц выявлены наиболее вероятные пути холодных и теплых вторжений в Москву и локализованы регионы, оказывающие наибольшее влияние на сильные зимние аномалии ПТВ в Москве. Обнаружено изменение путей холодных и теплых вторжений и увеличение частоты блокирующих антициклонов в современный период 2005–2016 гг. по сравнению с периодом 1970–1999 гг. Полученные результаты свидетельствуют о влиянии сокращения зимней КМЛ в БМ в 2005–2016 гг. на сильные зимние аномалии ПТВ в Москве вследствие увеличения частоты возникновения блокирующего антициклона южнее БМ и над ним.

Исследованию влияния Атлантической мультидекадной осцилляции (Atlantic Multidecadal Oscillation, АМО) на крупномасштабную атмосферную циркуляцию в Атлантическом секторе летом в период 1950–2015 гг. посвящена работа [184]. Было показано, что в период более холодной Северной Атлантики происходило усиление летнего североатлантического колебания (NAO) со значимыми изменениями аномалий давления на уровне моря в основных центрах его действия (над Гренландией, Британскими островами). Установлено, что аномалии температуры поверхности океана, связанной с АМО в летний сезон, помимо NAO также значительно влияют на колебания центров действия «Восточная Атлантика/Западная Россия» (East Atlantic/Western Russia, EAWR). Для положительной (отрицательной) фазы АМО характерно сочетание отрицательных (положительных) значений индексов NAO и EAWR. Доминирование противоположных фаз индексов атмосферной циркуляции летом в периоды теплой Северной Атлантики и в ее более холодный период приводило к различиям в формировании регионального климата Европы.

В течение последних нескольких десятилетий наблюдается смещение к полюсу таких элементов общей циркуляции атмосферы, как ячейка Хэдли и шторм-треки. На основе результатов численного моделирования с использованием идеализированной модели климатической системы в [185] показано, что тенденция к смещению шторм-треков Северного полушария в условиях потепления климата (по сценарию RCP 8.5) к полюсам будет продолжаться. При переходе на режим доиндустриального климата активность шторм-треков, их пространственное распределение восстанавливаются не полностью. Это же можно сказать и о распределении потоков тепла и влаги. Исследования также показывают, что ячейка циркуляции Хэдли смещается к экватору в период теплой фазы ENSO, вызывая также смещение к экватору струйного течения, шторм-треков, дивергенции вихревого потока импульса. Обнаруженное в работе увеличение характерной длины вихрей, связанное с ростом частоты плавучести N в слое 850–600 гПа (характерным масштабом бароклинной неустойчивости является радиус деформации Россби $L_R \propto N$), как ожидается, будет иметь важные последствия. Например, можно предположить, что это увеличение будет способствовать смещению к полюсу струйных течений в средних широтах. Кроме того, поскольку более длинные волны в большей степе-

ни способны распространяться в стратосферу, они могут приводить к усилению циркуляции Брюера–Добсона.

Можно предположить, что усиление потепления в Арктике вызывает уменьшение меридионального градиента температуры в тропосфере и увеличение амплитуды колебания планетарных волн, что приводит к экстремальной погоде в средних широтах. Чтобы проверить эту гипотезу, в [186] изучалась реакция атмосферы на арктическое усиление в течение прогнозируемого летнего периода без морского льда с использованием атмосферной модели с заданными граничными условиями на поверхности из современной модели земной системы. Помимо стандартного моделирования глобального потепления, был также проведен эксперимент по исследованию чувствительности к морскому льду и аномалиям температуры поверхности моря в Арктике.

Авторы статьи [187] ставят проблему количественной оценки детальных прогнозов изменения климата в 21 веке по всей России, как в физическом, так и в вероятностном пространствах. Поставленная задача решается с помощью массового (50 членов) ансамблевого моделирования с использованием системы климатических моделей высокого разрешения (горизонтальное разрешение 25 км), разработанной в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.

В [188] представлены исследования влияния арктического потепления и связанного с этим сокращения морского льда на атмосферную циркуляцию Северного полушария. Обсуждаются причины возникновения чрезвычайно холодных зим на континентах средних широт, наблюдаемых в последние десятилетия на фоне потепления. Изложены несколько концепций, которые объясняют потенциальные причины возникновения этого явления. Обсуждается также вклад внутренней изменчивости атмосферы в растущую частоту холодных зим и роль Атлантических мультидекадных колебаний в сокращении арктического морского льда.

Возможности ансамбля современных глобальных климатических моделей анализируются в [189] при моделировании эволюции температуры поверхности Арктики, включая пространственную согласованность моделируемых и наблюдаемых данных. Эти результаты являются основой для вероятностного регионального прогноза изменения температуры приземного воздуха на ближайшее будущее (2021–2040 гг.).

Влияние основных пространственно-временных мод в системе океан–атмосфера Северного

полушария, характеризующих межгодовую изменчивость, на аномалии приземной температуры воздуха Восточной Европы и в странах Причерноморья в зимний период анализируется в статье [190].

На основе данных за 1920–2012 гг. о среднемесячном давлении на уровне моря в узлах регулярной сетки $5^\circ \times 5^\circ$, покрывающей всю поверхность Земли, в [191] дана оценка статистической значимости Глобальной атмосферной осцилляции (ГАО), основным региональным элементом которой является Южное Колебание в приэкваториальной зоне Тихого океана. Выявлено, что статистически значимые проявления ГАО покрывают почти весь тропический пояс, а также обнаруживаются в умеренных и высоких широтах обоих полушарий Земли.

Виртуальная исследовательская среда, предназначенная для анализа изменения климата и его влияния на Северную Евразию на основе архивов климатических данных и специальной аналитики, встроенной в веб-ГИС под названием «Климат», представлена в [192]. Описан расширенный набор аналитических процедур, связанных с анализом экстремальных климатических и метеорологических явлений.

Достижения в теории нелинейных динамических систем, детерминированных или стохастических, а также в теории нелинейных уравнений в частных производных, имеют глубокое влияние на моделирование и понимание динамики атмосферы и океана. В математической теории климата идея моделирования быстрой хаотической динамики атмосферы с помощью случайных процессов, уменьшая при этом эффективную размерность всей системы, восходит к работам Хассельмана (Hasselmann, 1976), Лейса (Leith, 1975), В.П. Дымникова (1996).

Для стохастической системы Э. Лоренца с правой частью, возмущенной белым шумом в [193] выводятся достаточные условия на параметры и правую часть для существования единственной стационарной меры. В [194] рассматривается единственная стационарная мера марковской полугруппы, определяемой решениями задачи Коши для двухслойной квазисоленидальной модели Лоренца бароклинной атмосферы на вращающейся сфере. Правая часть системы возмущается белым шумом. Приводится оценка скорости сходимости распределений всех решений из некоторого класса указанной системы к единственной стационарной мере.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В этом обзоре мы рассмотрели 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 бы невозможен без участия и поддержки со стороны большого числа российских ученых, которым мы выражаем искреннюю благодарность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Турбулентность, динамика атмосферы и климата: сборник трудов / Под ред. Голицына Г.С., Мохова И.И., Куличкова С.Н., Курганского М.В., Репиной И.А., Чхетиани О.Г. М.: Физматкнига, 2018. 586 с.
2. Kiktev D.B., Astakhova E.D., Zaripov R.B., Muravyev A.V., Smirnov A.V., Tsyrlunikov M.D. FROST-2014 Project and Meteorological Support of the Sochi-2014 Olympics // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. V. 40. № 8. P. 504–512.
3. Kiktev D., Joe P., Isaac G.A., Montani A., Frogner I.-L., Nurmi P., Bica B., Milbrandt J., Tsyrlunikov M., Astakhova E., Bundel A., Belair S., Pyle M., Muravyev A., Rivin G., Rozinkina I., Paccagnella T., Wang Y., Reid J., Nipen T., Ahn K.-D. FROST-2014: the Sochi Winter Olympics International Project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2017. V. 98. № 9. P. 1908–1929.
4. Володин Е.М., Галин В.Я., Грицун А.С. и др. Математическое моделирование Земной системы. Москва: МАКС Пресс, 2016. 328 с.
5. Динамика волновых и обменных процессов в атмосфере / Под ред. О.Г. Чхетиани, М.Е. Горбунова, С.Н. Куличкова, И.А. Репиной. М.: ГЕОС. 2017. 508 с.
6. Интенсивные атмосферные вихри и их динамика / Под ред. И.И. Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чхетиани. М.: ГЕОС. 2018. 482 с.
7. Dymnikov V.P. Dynamics of the two-dimensional ideal incompressible fluid and Casimirs // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2016. V. 52. № 4. P. 348–352.
8. Perezhgin P.A., Glazunov A.V., Mortikov E.V., Dymnikov V.P. Comparison of numerical advection schemes in two-dimensional turbulence simulation // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2017. V. 32. № 1. P. 47–60.
9. Пережогин П.А., Дымников В.П. Равновесные состояния конечномерных аппроксимаций уравнений двумерной идеальной жидкости // Нелинейная динамика. 2017. Т. 13. № 1. С. 55–79.

10. *Пережогин П.А., Дымников В.П.* Моделирование квазиравновесных состояний двумерной идеальной жидкости // ДАН. 2017. Т. 474. № 1. С. 36–40.
11. *Дымников В.П., Пережогин П.А.* О системах гидродинамического типа, аппроксимирующих уравнения двумерной идеальной жидкости // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 3. С. 272–282.
12. *Gritsun A., Lucarini V.* Fluctuations, response, and resonances in a simple atmospheric model // *Physica D*. 2017. V. 349. P. 62–76.
13. *Kalashnik M., Kurgansky M.* Nonlinear dynamics of long-wave perturbations of the Kolmogorov flow // *Ocean Dynamics*. 2018. V. 68. P. 1001–1012.
14. *Jensen A.D., Lupo A.R., Mokhov I.I., Akperov M.G., Reynolds D.D.* Integrated regional enstrophy and block intensity as a measure of Kolmogorov entropy // *Atmosphere*. 2017. V. 8. № 12. P. 237.
15. *Jensen A.D., Akperov M.G., Mokhov I.I., Lupo A.R., Sun F.* The dynamic character of Northern Hemisphere flow regimes in a near-term climate change projection // *Atmosphere*. 2018. V. 9. № 1. P. 27.
16. *Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E.* Horizontal rolls over localized heat source in a cylindrical layer // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2016. V. 316. P. 23–33.
17. *Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E.* Laboratory study of a steady-state convective cyclonic vortex // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2016. V. 142. № 698. P. 2214–2223.
18. *Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E.* Helicity of convective flows from localized heat source in a rotating layer // *Archive of Mechanical Engineering*. 2017. V. 64(2). P. 177–188.
19. *Sukhanovskii A., Evgrafova A., Popova E.* Non-axisymmetric structure of the boundary layer of intensive cyclonic vortex // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2017. V. 80. P. 12–28.
20. *Ингель Л.Х.* К теории конвективных струй и термиков в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 6. С. 676–680.
21. *Ингель Л.Х.* К нелинейной динамике турбулентных термиков в сдвиговом потоке // *Прикладная механика и техническая физика*. 2018. № 2. С. 23–30.
22. *Ингель Л.Х.* К расчету интенсивной нисходящей конвекции над «холодным пятном» на горизонтальной поверхности // *Инженерно-физический журнал*. 2018. Т. 91. № 1. С. 194–197.
23. *Калашник М.В., Курганский М.В.* Гидродинамическая неустойчивость периодической системы восходящих и нисходящих движений в атмосфере // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 11. С. 31–40.
24. *Shmerlin B., Kalashnik M., Shmerlin M.* The Formation of localized atmospheric vortices of different spatial scales and ordered cloud structures // *Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity*. 2015. V. 4. № 3. P. 313–321.
25. *Шмерлин Б.Я., Шмерлин М.Б.* Конвективная неустойчивость Рэлея в облачной среде // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2017. Т. 152. № 3. С. 589–606.
26. *Sukhanovskii A., Shchapov V., Pavlinov A., Popova E.* Laboratory model of tropical cyclone with controlled forcing // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 1128. P. 012133.
27. *Levina G.V., Montgomery M.T.* When will cyclogenesis commence given a favorable tropical environment? To the 30th anniversary of the hypothesis on the turbulent vortex dynamo and dedicated to the memory of Soviet-Russian scientist, Professor Semen Samoilovich Moiseev // *Procedia IUTAM*. 2015 V. 17. P. 59–68.
28. *Курганский М.В.* Простая гидродинамическая модель смерчеобразных вихрей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 3. С. 338–345.
29. *Lorenz R.D., Balme M.R., Gu Z., Kahanpää H., Klose M., Kurgansky M.V., Patel M.R., Reiss D., Rossi A.P., Spiga A.* History and Applications of Dust Devil Studies // *Space Science Reviews*. 2016. V. 203. P. 5–37.
30. *Kurgansky M.V., Lorenz R.D., Renno N.O., Takemi T., Gu Z., Wei W.* Dust Devil Steady-State Structure from a Fluid Dynamics Perspective // *Space Science Reviews*. 2016. V. 203. P. 209–244.
31. *Dust Devils. Space Science Series of ISSI / Eds.: Reiss D., Lorenz R., Balme M., Neakease L., Rossi A.P., Spiga A., Zarneski J.* Springer. 2017. 426 pp.
32. *Horton W., Miura H., Onishchenko O., Couedel L., Arnas C., Escarguel A., Benkadda S., Fedun V.* Dust devil dynamics // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2016. V. 121. P. 7197–7214.
33. *Onishchenko O.G., Pokhotelov O.A., Horton W., Fedun V.* Explosively growing vortices of unstably stratified atmosphere // *J. Geophys. Res.: Atmosphere*. 2016. V. 121. P. 11264–11268.
34. *Курганский М.В.* Спиральность в атмосферных динамических процессах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 147–163.
35. *Левина Г.В., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А.* Облачно-разрешающий численный анализ процесса генерации спиральности в условиях тропического циклогенеза // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 4. С. 213–222.
36. *Teimurazov A., Sukhanovskii A., Evgrafova A., Stepanov R.* Helicity sources in a rotating convection // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. V. 899. P. 022017.
37. *Мохов И.И., Акперов М.Г., Прокофьева М.А.* Циклон-антициклонная асимметрия в атмосфере в атмосфере внетропических широт Северного полушария // ДАН. 2015. Т. 462. № 6. С. 711–715.
38. *Калашник М.В., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г.* О циклон-антициклонной асимметрии в устойчи-

- востях вращающихся сдвиговых течений // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2016. № 2. С. 44–55.
39. *Калашник М.В., Нерушев А.Ф., Ивангородский Р.В.* Характерные масштабы и горизонтальная асимметрия струйных течений в атмосфере Земли // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 179–187.
 40. *Калашник М.В., Чхетиани О.Г., Чагелишвили Г.Д.* Новый класс краевых бароклинных волн и механизм их генерации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 4. С. 361–370.
 41. *Калашник М.В.* Точная модель негеострофической бароклинной неустойчивости // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 5. С. 521–532.
 42. *Калашник М.В.* О резонансном и квазирезонансном возбуждении бароклинных волн в модели Иди // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 6. С. 1–10.
 43. *Kalashnik M.V., Chkhetiani O.G.* An analytical approach to determination of optimal perturbation in the Eady model // J. Atmos. Sci. 2018. V. 75. P. 2741–2761.
 44. *Калашник М.В.* Резонансное возбуждение бароклинных волн в присутствии экмановского трения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 2. С. 127–132.
 45. *Ингель Л.Х.* Об одном типе резонансных явлений в атмосфере и водоемах // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2015. № 4. С. 37–43.
 46. *Ингель Л.Х.* Об отклике стратифицированной жидкости на резонансные воздействия // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 12. С. 143–145.
 47. *Ингель Л.Х.* О движении тяжелых частиц в смерчах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 4. С. 470–476.
 48. *Ингель Л.Х.* Обобщение модели Прандтля на случай склоновых течений с тяжелой примесью // Прикладная механика и техническая физика. 2018. № 5. С. 104–108.
 49. *Ингель Л.Х.* К теории склоновых течений // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 3. С. 686–693.
 50. *Yaroshevich M.I., Ingel L.Kh., Lysenko D.A.* On seismic manifestations of intensive atmospheric processes // American Journal of Earth Sciences. 2014. V. 1. № 5. P. 99–104.
 51. *Ингель Л.Х., Макоско А.А.* К теории атмосферных возмущений, вызываемых неоднородностями поля силы тяжести // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 4. С. 448–454.
 52. *Ингель Л.Х., Макоско А.А.* Генерация вихревого движения в атмосфере под влиянием неоднородностей поля силы тяжести // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 6. С. 635–640.
 53. *Ингель Л.Х., Макоско А.А.* Об одном механизме влияния неоднородностей поля силы тяжести на динамику атмосферы // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 9. С. 1312–1316.
 54. *Ингель Л.Х., Макоско А.А.* Возмущения геострофического течения под влиянием неоднородностей поля силы тяжести // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 5. С. 579–587.
 55. *Нигматулин Р.И.* Уравнения гидро- и термодинамики атмосферы при малых силах инерции по сравнению с силой тяжести // Прикладная математика и механика. 2018. Т. 82. Вып. 4. С. 472–484.
 56. *Калашник М.В., Чхетиани О.Г.* Об устойчивости струйных течений во вращающемся слое мелкой воды // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2016. № 5. С. 29–42.
 57. *Kalashnik M.V., Chkhetiani O.G.* Generation of gravity waves by singular potential-vorticity disturbances in shear flows // J. Atmos. Sci. 2017. V. 74. P. 293–307.
 58. *Kurgansky M.V.* On the instability of internal gravity waves propagating at small but finite angles to the vertical // Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics. 2018. V. 112. № 4. P. 265–276.
 59. *Перепелкин В.Г., Куличков С.Н., Репина И.А., Чунчужов И.П.* Экспериментальные исследования генерации инфразвука взволнованной морской поверхностью в прибрежной зоне Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 6. С. 716–728.
 60. *Klimova E.G.* Application of ensemble Kalman filter in environment data assimilation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. V. 211. P. 012049.
 61. *Tsyrlunikov M., Rakitko A.* A hierarchical Bayes ensemble Kalman filter // Physical Review D. 2017. V. 338. P. 1–16.
 62. *Tsyrlunikov M., Gayfulin D.* A limited-area spatio-temporal stochastic pattern generator for simulation of uncertainties in ensemble applications // Meteorologische Zeitschrift. 2017. V. 26. № 5. P. 549–566.
 63. *Пененко В.В., Пененко А.В., Цветова Е.А.* Вариационный подход к исследованию процессов гидротермодинамики с усвоением данных наблюдений // Прикладная механика и техническая физика. 2017. Т. 58. № 5 (345). С. 17–25.
 64. *Пененко В.В., Цветова Е.А., Пененко А.В.* Развитие вариационного подхода для прямых и обратных задач гидротермодинамики и химии атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 3. С. 358–367.
 65. *Пененко В.В., Цветова Е.А., Пененко А.В.* Методы совместного использования моделей и данных наблюдений в рамках вариационного подхода для прогнозирования погоды и качества состава атмосферы // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 13–24.
 66. *Пененко А.В., Пененко В.В., Цветова Е.А.* Последовательные алгоритмы усвоения данных в моделях мониторинга качества атмосферы на базе вариационного принципа со слабыми ограниче-

- ниями // Сиб. Журн. Вычисл. Математики. 2016. Т. 19. № 4. С. 401–418.
67. *Зарипов Р.Б., Мартынова Ю.В., Крупчатников В.Н., Петров А.П.* Анализ состояния атмосферы в Сибирском регионе с использованием модели WRF-ARW и системы трехмерного вариационного усвоения данных WRF 3D-VAR // Метеорология и Гидрология. 2016. № 12. С. 16–25.
 68. *Gayfulin D., Tsyrlunikov M., Uspensky A.* Assessment and adaptive correction of observations in atmospheric sounding channels of the satellite microwave radiometer MTVZA-GY // Pure and Applied Geophysics. 2018. V. 175. № 10. P. 3653–3670.
 69. *Bedritskii A.I., Vil'fand R.M., Kiktev D.B., Rivin G.S.* Roshydromet supercomputer technologies for numerical weather prediction // Russian Meteorology and Hydrology. 2017. V. 42. № 7. P. 425–434.
 70. *Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Alferov D.Yu., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kazakova E.V., Kirsanov A.A., Nikitin M.A., Perov V.L., Surkova G.V., Revokatova A.P., Shatunova M.V., Chumakov M.M.* The COSMO-Ru system of nonhydrostatic mesoscale short-range weather forecasting of the hydrometcenter of Russia: The second stage of implementation and development // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. V. 40. № 6. P. 400–410.
 71. *Vil'fand R.M., Kirsanov A.A., Revokatova A.P., Rivin G.S., Surkova G.V.* Forecasting the transport and transformation of atmospheric pollutants with the COSMO-ART Model // Russian Meteorology and Hydrology. 2017. V. 42. № 5. P. 292–298.
 72. *Tolstykh M.A., Geleyn J.-F., Volodin E.M., Bogoslovskii N.N., Vilfand R.M., Kiktev D.B., Krasjuk T.V., Kostykin S.V., Mizyak V.G., Fadeev R.Yu., Shashkin V.V., Shlyaeva A.V., Ezau I.N., Yurova A.Yu.* Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. V. 40. № 6. P. 374–382.
 73. *Tolstykh M.A., Fadeev R.Yu., Shashkin V.V., Goyman G.S., Zaripov R.B., Kiktev D.B., Makhnorylova S.V., Mizyak V.G., Rogutov V.S.* Multiscale global atmosphere model SL-AV: the results of medium-range weather forecasts // Russian Meteorology and Hydrology. 2018. V. 43. № 11. P. 773–779.
 74. *Tolstykh M., Shashkin V., Fadeev R., Goyman G.* Vorticity-divergence semi-Lagrangian global atmospheric model SL-AV20: Dynamical core // Geoscientific Model Development. 2017. V. 10. P. 1961–1983.
 75. *Esau I., Tolstykh M., Fadeev R., Shashkin V., Makhnorylova S., Miles V., Melnikov V.* Systematic errors in northern Eurasian short-term weather forecasts induced by atmospheric boundary layer thickness // Environmental Research Letters. 2018. V. 13. № 12. P. 125009.
 76. *Bart A.A., Starchenko A.V.* Using weather prediction data for simulation of mesoscale atmospheric processes // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2015. V. 9680. P. 1–6.
 77. *Starchenko A.V., Bart A.A., Kizhner L.I., Barashkova N.K., Volkova M.A., Zhuravlev G.G., Kuzhevskaya I.V., Terenteva M.V.* Analysis of observations and results of numerical modeling of meteorological parameters and atmospheric air pollution under weak wind conditions in the city of Tomsk // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2015. V. 9680. P. 96806Z.
 78. *Starchenko A.V., Danilkin E.A.* Large eddy simulation of turbulent flow and of pollutant transport in a street canyon // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2015. V. 9680. P. 968062.
 79. *Sitnikov G.I., Starchenko A.V., Terenteva M.V., Barashkova N.D., Volkova M.A., Kuzhevskaya I.A., Kizhner L.I.* Forecast of extreme weather conditions that promote aircraft icing during take-off or landing // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2015. V. 9680. P. 1–7.
 80. *Kalinin N.A., Shikhov A.N., Sviyazov E.M.* Simulation of snow accumulation and melt in the Votkinsk Reservoir catchment using the WRF-ARW model // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. V. 40. № 11. P. 749–757.
 81. *Kalinin N.A., Vetrov A.L., Pishchal'nikova E.V., Sviyazov E.M., Shikhov A.N.* Estimating the accuracy of the very heavy snowfall forecast in the Urals by the WRF model // Russian Meteorology and Hydrology. 2016. V. 41. № 3. P. 193–198.
 82. *Kalinin N.A., Shikhov A.N., Bykov A.V.* Forecasting mesoscale convective systems in the Urals using the WRF model and remote sensing data // Russian Meteorology and Hydrology. 2017. V. 42. № 1. P. 9–18.
 83. *Фомин В.В., Дианский Н.А.* Расчет экстремальных нагонов в Таганрогском заливе с использованием моделей циркуляции атмосферы и океана различного пространственного разрешения // Метеорология и Гидрология. 2018. № 12. С. 69–80.
 84. *Kislov A., Sokolikhina N., Semenov E., Tudrii K.* Analyzing the vortex as an integral formation: A case study for the blocking anticyclone of 2010 // Russian Meteorology and Hydrology. 2017. V. 42. P. 222–228.
 85. *Курганский М.В., Максименков Л.О., Ханаев А.А., Чхетиани О.Г.* Вертикальный поток спиральности как индекс общей циркуляции атмосферы // ДАН. 2018. Т. 479. № 4. С. 447–451.
 86. *Gushchina D., Dewitte B.* Decadal modulation of the relationship between intraseasonal tropical variability and ENSO // Climate Dynamics. 2019. V. 52. № 3–4. P. 2091–2103. doi: 10.1007/s00382-018-4235-y
 87. *Matveeva T., Gushchina D., Dewitte B.* The seasonal relationship between intraseasonal tropical variability and ENSO in CMIP5 // Geoscientific Model Development. 2018. V. 11. P. 2373–2392.
 88. *Zahn M., Akperov M., Rinke A., Feser F., Mokhov I.I.* Trends of cyclone characteristics in the Arctic and their patterns from different re-analysis data // J. Geophys. Res. Atmospheres. 2018. V. 123. № 5. P. 2737–2751.

89. Akperov M., Mokhov I., Rinke A., Dethloff K., Matthes H. Cyclones and their possible changes in the Arctic by the end of the twenty first century from regional climate model simulations // Theoretical and Applied Climatology. 2015. V. 122. P. 85–96.
90. Akperov M., Rinke A., Mokhov I.I., Matthes H., Semenov V.A., Adakudlu M., Cassano J., Christensen J.H., Dembitskaya M.A., Dethloff K., Fettweis X., Glisan J., Gutjahr O., Heinemann G., Koenigk T., Koldunov N.V., Laprise R., Mottram R., Nikiéma O., Scinocca J.F., Sein D., Sobolowski S., Winger K., Zhang W. Cyclone activity in the Arctic from an ensemble of regional climate models (Arctic CORDEX) // J. Geophys. Res. Atmospheres. 2018. V. 123. № 5. P. 2537–2554.
91. Акперов М.Г., Мохов И.И., Дембицкая М.А. Арктические мезоциклоны по спутниковым данным, данным реанализа и модельным расчетам // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 297–304.
92. Акперов М.Г., Дембицкая М.А., Мохов И.И. Циклоническая активность в Арктическом регионе по модельным расчетам и данным реанализа // Изв. РАН. Серия географическая. 2017. № 6. С. 39–46.
93. Akperov M., Mokhov I.I., Dembitskaya M.A., Parfenova M.R. Tropospheric lapse rate and its changes in the Arctic from reanalysis data // Proceedings of SPIE. 2018. V. 10833. P. 108337E.
94. Chernokulsky A., Akperov M., Podnebesnykh N.V., Mokhov I.I. Objectively and manually identified characteristics of mid-latitude storms: a comparison for Siberian region // Proceedings of SPIE. 2018. V. 10833. P. 108337D.
95. Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П. Спутниковое радиотепловидение на синоптических и климатически значимых масштабах // Исследование Земли из космоса. 2016. № 5. С. 3–9.
96. Ermakov D.M. Investigation of the features of long-term global atmospheric circulation via satellite radiothermography // Progress in Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS). 2017. P. 413–418.
97. Ермаков Д.М. Глобальная циркуляция скрытого тепла в атмосфере Земли по данным спутникового радиотепловидения // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 3–28.
98. Komatsu K.K., Alexeev V.A., Repina I. A., Tachibana Y. Poleward upgliding siberian atmospheric rivers over sea ice heat up arctic upper air // Scientific reports. 2018. V. 8. № 1. P. 2872–2872.
99. Handorf D., Dethloff K., Erxleben S., Jaiser R., Kurgansky M.V. Arctic-mid-latitude linkages in a nonlinear quasi-geostrophic atmospheric model // Advances in Meteorology. 2017. V. 2017. Article ID2691368, 9 pages.
100. Курганский М.В. Об одной оценке границы зоны режима Россби в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 3. С. 301–309.
101. Chechin D.G., Lüpkes C. Boundary-layer development and low-level baroclinicity during high-latitude cold-air outbreaks: A simple model // Boundary-Layer Meteorology. 2017. V. 162. P. 91–116.
102. Lüpkes C., Gryanik V.M. A stability-dependent parametrization of transfer coefficients for momentum and heat over polar sea ice to be used in climate models // J. Geophys. Res. Atmospheres. 2015. V. 120. P. 1–30.
103. Gryanik V., Lüpkes C. An efficient non-iterative bulk parametrization of surface fluxes for stable atmospheric conditions over polar sea-ice // Boundary-Layer Meteorology. 2018. V. 166. P. 301–325.
104. Чечин Д.Г., Заболотских Е.В., Репина И.А., Шапран Б. Влияние бароклинности и экмановского трения на приземную скорость ветра во время холодных вторжений в Арктике // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 146–157.
105. Smirnova J.E., Golubkin P.A., Bobylev L.P., Zabolotskikh E.V., Chapron B. Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data // Geophysical Research Letters. 2015. V. 42. № 13. P. 5603–5609.
106. Вереземская П.С., Степаненко В.М. Численное моделирование структуры и эволюции полярного мезоциклона в Карском море. Часть 1. Проверка модели и оценка механизмов неустойчивости // Метеорология и гидрология. 2016. № 6. С. 69–81.
107. Shestakova A.A., Toropov P.A., Stepanenko V.M., Sergeev D.E., Repina I.A. Observations and modelling of downslope windstorm in Novorossiysk // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2018. V. 83. P. 83–99.
108. Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., Chernokulsky A.V. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme // Nature Geoscience. 2015. V. 8. P. 615–620.
109. Быков А.В., Шухов А.Н. Прогноз мезомасштабных конвективных систем с применением глобальных и мезомасштабных гидродинамических моделей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 213–224.
110. Polnikov V.G., Sannasiraj S.A., Satish S., Pogarskii F.A., Sundar V. Estimation of extreme wind speeds and wave heights along the regional waters of India // Ocean Engineering. 2017. V. 146. P. 170–177.
111. Polnikov V.G., Pogarskiy F.A. Spectra of long-term series for wind speed and wave height in the Indian Ocean area // Journal of Geophysical Research. 2017. V. 122. № 1. P. 104–120.
112. Rashmi R., Polnikov V., Pogarskii F., Gomorev I., Samiksha V., Vethamony P. Long-term variability of the wind field over the Indian Ocean based on ERA-Interim reanalysis // Atmosphere–Ocean. 2016. V. 54. № 5. P. 505–518.
113. Кислов А.В., Ривин Г.С., Платонов В.С., Варенцов М.И., Розинкина И.А., Никитин М.А., Чумаков М.М.

- Мезомасштабное моделирование экстремальных ветров над Охотским морем и островом Сахалин // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 4. С. 381–385.
114. Горбатенко В.П., Громницкая А.А., Золотухина О.И. Термодинамические условия образования опасных конвективных явлений в районе космодрома «Восточный» // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 400. С. 330–336.
 115. Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Нечепуренко О.Е. Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектро радиометра MODIS в дни с грозами, над территорией Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2015. № 5. С. 10–19.
 116. Кожевников В.Н., Моисеенко К.Б., Волков Б.И. Обтекание гор при сдвиге скорости потока // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 6. С. 660–668.
 117. Кожевников В.Н., Еланский Н.Ф., Моисеенко К.Б. Вариации содержания озона и двуокиси азота в поле орографических волн над приполярным Уралом // ДАН. 2017. Т. 475. № 6. С. 691–696.
 118. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P. Satellite radiothermography of atmospheric mesoscale processes: case study of tropical cyclones // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS Archives. 2015. V. XL. № 7/W3. P. 179–186.
 119. Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушеч А.П. Анализ эволюции системы взаимодействующих тайфунов с помощью спутникового радиотепловидения // Исследование Земли из космоса. 2017. № 2. С. 77–87.
 120. Шестакова А.А., Моисеенко К.Б. Гидравлические режимы обтекания гор при сильных подветренных бурях: новороссийская и новоземельская бора и певекский южак // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 4. С. 405–416.
 121. Шестакова А.А. Волновое сопротивление при подветренных бурях в разных регионах России по результатам моделирования // Метеорология и гидрология. 2018. № 3. С. 98–104.
 122. Ефимов В.В., Комаровская О.И. Численное моделирование новоземельской бора // Метеорология и гидрология. 2018. № 1. С. 34–42.
 123. Efimov V.V., Komarovskaya O.I. Seasonal variability and hydrodynamic regimes of the Novaya Zemlya bora // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2018. V. 54. № 6. P. 581–593.
 124. Shestakova A.A., Moiseenko K.B., Toropov P.A. Hydraulic and wave aspects of Novorossiysk bora // Pure Appl. Geophys. 2018. V. 175. P. 3741.
 125. Шестакова А.А., Моисеенко К.Б., Торопов П.А. Гидродинамические аспекты эпизодов новороссийской бора 2012–2013 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 5. С. 602–614.
 126. Ефимов В.В., Михайлова Н.В. Мезомасштабный атмосферный вихрь как проявление Новороссийской бора // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 4. С. 512–522.
 127. Чернокульский А.В., Курганский М.В., Захарченко Д.И., Мохов И.И. Условия формирования и характеристики сильного смерча на Южном Урале 29 августа 2014 г. // Метеорология и гидрология. 2015. № 12. С. 29–37.
 128. Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И. Анализ изменений условий смерчегенеза в Северной Евразии с использованием простого индекса конвективной неустойчивости атмосферы // ДАН. 2017. Т. 477. № 6. С. 722–727.
 129. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 204. P. 553–567.
 130. Chernokulsky A.V., Shikhov A.N. 1984 Ivanovo tornado outbreak: determination of actual tornado tracks with satellite data // Atmospheric Research. 2018. V. 207. P. 111–121.
 131. Новицкий М.А., Шмерлин Б.Я., Петриченко С.А., Терев Л.А., Кулижникова Л.К., Калмыкова О.В. Использование индексов конвективной неустойчивости и метеорологических величин для анализа смерчопасной ситуации в Обнинске 23 мая 2013 г. // Метеорология и гидрология. 2015. № 2. С. 13–20.
 132. Новицкий М.А., Павлюков Ю.Б., Шмерлин Б.Я., Махнорылова С.В., Серебряник Н.И., Петриченко С.А., Терев Л.А., Калмыкова О.В. Башкирский смерч: возможности анализа и прогноза смерчопасной ситуации // Метеорология и Гидрология. 2016 № 10. С. 30–40.
 133. Новицкий М.А., Шмерлин Б.Я., Петриченко С.А., Терев Л.А., Калмыкова О.В. О совместном расчете полей вертикальной скорости и конвективных индексов в модели WRF для анализа и прогноза смерчопасных ситуаций // Метеорология и Гидрология. 2018. № 9. С. 14–24.
 134. Shmerlin B., Shmerlin M. Application of the hydro-mechanical model for a description of tropical cyclones motion // Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity. 2015. V. 4. № 3. P. 271–279.
 135. Новицкий М.А., Петриченко С.А., Терев Л.А. Оценка значимости учета испарения брызг в приводном слое атмосферы для расчета перемещения и интенсивности тропических циклонов // Метеорология и гидрология. 2016. № 5. С. 67–77.
 136. Ефимов В.В. Численное моделирование бризовой циркуляции над Крымским полуостровом // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана 2017. Т. 53. № 1. С. 95–106.
 137. Heiskanen J.J., Mammarella I., Ojala A., Stepanenko V., Erkkilä K.M., Miettinen H., Sandström H., Eugster W., Leppäranta M., Järvinen H., Vesala T.,

- Nordbo A.* Effects of water clarity on lake stratification and lake-atmosphere heat exchange // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120. P. 7412–7428.
138. Глазунов А.В., Степаненко В.М. Вихреразрешающее моделирование стратифицированных турбулентных течений над неоднородными природными ландшафтами // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 4. С. 403–415.
 139. Glazunov A., Rannik Ü., Stepanenko V., Lykosov V., Auvinen M., Vesala T., Mammarella I. Large-eddy simulation and stochastic modeling of Lagrangian particles for footprint determination in the stable boundary layer // *Geoscientific Model Development*. 2016. V. 9. № 9. P. 2925–2949.
 140. Барсков К.В., Глазунов А.В., Репина И.А. и др. О применимости теории подобия для устойчиво-стратифицированного атмосферного пограничного слоя над поверхностями сложной структуры // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54. № 5. С. 544–555.
 141. Vulfson A.N., Borodin O.O. Brownian ensemble of random-radius buoyancy vortices and Maxwell velocity distribution in a turbulent convective mixed-layer // *Physics of Fluids*. 2018. V. 30. № 9. P. 095103.
 142. Вульфсон А.Н., Николаев П.В. Интегральные модели конвективных термиков и струй с учетом сил давления // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53. № 4. С. 477–486.
 143. Вульфсон А.Н., Николаев П.В. Линейные аппроксимации вторых турбулентных моментов конвективного приземного слоя атмосферы в области вынужденной конвекции // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54. № 5. С. 556–565.
 144. Копров Б.М., Копров В.М., Курганский М.В., Чхетиани О.Г. Спиральность и потенциальный вихрь в приземной турбулентности // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51 № 6. С. 637–647.
 145. Копров Б.М., Копров В.М., Соленая О.А., Шишов Е.А., Чхетиани О.Г. Методика и результаты измерений турбулентной спиральности в стратифицированном приземном слое // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54. № 5. С. 525–537.
 146. Barskov K.V., Chernyshev R.V., Stepanenko V.M., Repina I.A., Artamonov A.Y., Guseva S.P., Gavrikov A.V. Experimental study of heat and momentum exchange between a forest lake and the atmosphere in winter // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. V. 96. № 1. P. 012003.
 147. Grachev A.A., Persson P.O., Uttal T., Akish E.A., Cox C.J., Morris S.M., Fairall C.W., Stone R.S., Lesins G., Makshtas A.P., Repina I.A. Seasonal and latitudinal variations of surface fluxes at two Arctic terrestrial sites // *Climate dynamics*. 2018. V. 51. № 5–6. P. 1793–1818.
 148. Repina I.A., Artamonov A.Yu., Varentsov M.I., Kozurev A.V. Experimental study of the sea surface wind drag coefficient at strong winds // *Physical Oceanography*. 2015. № 1. P. 49–58.
 149. Druzhinin O.A., Troitskaya Yu.I., Zilitinkevich S.S. Stably stratified airflow over a waved water surface. Part 1: Stationary turbulence regime // *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2016. V. 142. № 695. P. 759–772.
 150. Druzhinin O.A., Troitskaya Yu.I., Zilitinkevich S.S. Stably stratified air-flow over a waved water surface. Part 2: Wave-induced pre-turbulent motions // *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2016. V. 142. № 695. P. 773–780.
 151. Druzhinin O.A., Troitskaya Yu.I., Zilitinkevich S.S. The study of momentum, mass, and heat transfer in a droplet-laden turbulent airflow over a waved water surface by direct numerical simulation // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2018. V. 123. № 11. P. 8346–8365.
 152. Troitskaya Yu.I., Ermakova O.S., Kandaurov A.A., Kozlov D.S., Sergeev D.A., Zilitinkevich S.S. Non-monotonous dependence of the ocean surface drag coefficient on the hurricane wind speed due to the fragmentation of the ocean-atmosphere interface // *Doklady Earth Sciences*. 2017. V. 477. № 3. P. 361–366.
 153. Li D., Katul G.G., Zilitinkevich S.S. Revisiting the turbulent Prandtl number in an idealized atmospheric surface layer // *J. Atmos. Sci.* 2015. V. 72. № 6. P. 2394–2410.
 154. Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И. Особенности вихревой диффузии импульса и тепла в устойчиво стратифицированных течениях окружающей среды // *Теплофизика и аэромеханика*. 2015. № 2. С. 171–185.
 155. Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И. Турбулентная циркуляция над поверхностным источником тепла в устойчиво стратифицированной окружающей среде // *Теплофизика и аэромеханика*. 2016. № 5. С. 703–719.
 156. Курбацкая Л.И., Курбацкий А.Ф. О вычислении турбулентной скорости трения в численной модели городского острова тепла в устойчиво стратифицированной атмосфере // *Оптика атмосферы и океана*. 2016. Т. 29. № 06. С. 512–515.
 157. Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И. Явная алгебраическая модель турбулентности планетарного пограничного слоя: тестовый расчет нейтрально стратифицированного атмосферного пограничного слоя // *Теплофизика и аэромеханика*. 2017. № 5. С. 725–738.
 158. Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И. Исследование нейтрального течения Экмана с использованием алгебраической модели напряжений Рейнольдса // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54. № 4. С. 396–404.
 159. Chkhetiani O.G., Kurgansky M.V., Vazaeva N.V. Turbulent helicity in the atmospheric boundary layer // *Boundary-Layer Meteorology*. 2018. V. 168(3). P. 361–385.

160. *Kurgansky M.V.* To the theory of particle lifting by terrestrial and Martian dust devils // *Icarus*. 2018. V. 300. P. 97–102.
161. *Vorobyeva V.V., Volodin E.M.* Investigation of the structure and predictability of the first mode of stratospheric variability based on the INM RAS climate model // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2018. V. 43. № 11. P. 737–742.
162. *Варгин П.Н., Володин Е.М.* Анализ воспроизведения динамических процессов в стратосфере климатической моделью ИВМ РАН // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52. № 1. С. 3–18.
163. *Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Володин Е.М.* Анализ воспроизведения динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы в расчетах климатической модели ИВМ РАН // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 11. С. 100–109.
164. *Варгин П.Н.* Динамическое взаимодействие стратосферы и тропосферы внетропических широт в период внезапного стратосферного потепления в Арктике в январе-феврале 2017 г. // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 5. С. 5–19.
165. *Варгин П.Н., Медведева И.В.* Исследование температурного и динамического режима внетропической атмосферы Северного полушария в период внезапного стратосферного потепления зимой 2012–2013 г. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 1. С. 20–38.
166. *Vargin P.* Stratospheric polar vortex splitting in December 2009 // *Atmosphere-Ocean*. 2015. V. 53. № 1. P. 29–41.
167. *Peters D., Vargin P.* Influence of subtropical Rossby wave trains on planetary wave activity over Antarctica in September 2002 // *Tellus*. 2015. V. 67. P. 25875.
168. *Гурьянов В.В., Елисеев А.В., Мохов И.И., Переведенцев Ю.П.* Волновая активность и ее изменения в тропосфере и стратосфере Северного полушария зимой в 1979–2016 гг. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54. № 2. С. 133–146.
169. *Ivanova A.R.* Stratosphere-troposphere exchange and its specific features at extratropical latitudes // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016. V. 41. № 3. P. 170–185.
170. *Zuev V.V., Zueva N.E., Savlieva E.S.* The role of the Mt. Merapi eruption in the 2011 Arctic ozone depletion // *Atmospheric Environment*. 2017. V. 166. P. 327–333.
171. *Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V., Galin V.Y., Lykossos V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G.* Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // *Climate Dynamics*. 2017. V. 49. № 11–12. P. 3715–3734.
172. *Volodin E., Gritsun A.* Simulation of observed climate changes in 1850–2014 with climate model INMCM5 // *Earth Syst. Dynam.* 2018. V. 9. P. 1235–1242.
173. *Cai L., Alexeev V.A., Walsh J.E., UMA S. Bhatt U.S.* Patterns, impacts, and future projections of summer variability in the Arctic from CMIP5 models // *J. Climate*. 2018. V. 31. P. 9815–9831.
174. *Christopher D.A., Benjamin M.J., Engram M., Alexeev V.A., Cai L., Parsekian A., Hinkel K., Bondurant A.C., Creighton A.* Contrasting lake ice responses to winter climate indicate future variability and trends on the Alaskan Arctic Coastal Plain // *IOP Publishing, Environ. Res. Lett.* 2018. V. 13. P. 125001.
175. *Platov G., Krupchatnikov V., Martynova Yu., Borovko I., Golubeva E.* A new earth's climate system model of intermediate complexity, PlaSim-ICMMG-1.0: description and performance // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2017. V. 96. P. 012005.
176. *Totz S., Eliseev A.V., Petri S., Flechsig M., Caesar L., Petoukhov V., Coumou D.* The dynamical core of the Aeolus 1.0 statistical-dynamical atmosphere model: validation and parameter optimization // *Geoscientific Model Development*. 2018. V. 11. P. 665–679.
177. *Krupchatnikov V., Iakshina D.F., Platov G., Martynova Y., Borovko I.* On the interaction of atmospheric dynamics Arctic and midlatitudes under climate change // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018. V. 211. P. 012018.
178. *Martynova Yu.V., Krupchatnikov V.N.* Siberian vegetation cover response to projected future climate change // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018. V. 211. P. 012013.
179. *Borovko I.V., Krupchatnikov V.N.* Responses of the Hadley cell and extratropical troposphere stratification to climate changes simulated with a relatively simple general circulation model // *Numerical Analysis and Application*. 2015. V. 8. № 1. P. 23–34.
180. *Semenov V.A., Latif M.* Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966–2012 // *Environ. Res. Lett.* 2015. V. 10. P. 054020.
181. *Semenov V.A.* Link between anomalously cold winters in Russia and sea ice decline in the Barents Sea // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2016. V. 52. № 3. P. 225–233.
182. *Mokhov I.I., Semenov V.A.* Weather and climate anomalies in Russian regions related to global climate change // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016. V. 41. № 2. P. 84–92.
183. *Shukurov K.A., Semenov V.A.* Characteristics of winter surface air temperature anomalies in Moscow in 1970–2016 under conditions of reduced sea ice area in the Barents Sea // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2018. V. 54. № 1. P. 10–24.
184. *Semenov V.A., Cherenkova E.A.* Evaluation of the Atlantic Multidecadal Oscillation impact on large-scale atmospheric circulation in the Atlantic region in summer // *Doklady Earth Sciences*. 2018. V. 478. Pt. 2. P. 263–267.
185. *Martynova Yu.V., Krupchatnikov V.N.* Peculiarities of the dynamics of the general atmospheric circulation

- in conditions of the global climate change // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2015. V. 51. № 3. P. 306–317.
186. Meleshko V.P., Johannessen O.M., Baidin A.V., Pavlova T.V., Govorkova V.A. Arctic amplification: does it impact the polar jet stream? // *Tellus Series A — Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2016. V. 68. P. 32330.
 187. Kattsov V.M., Shkolnik I.M., Efimov S.V. Climate change projections in Russian regions: the detailing in physical and probability spaces // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2017. V. 42. № 7. P. 452–460.
 188. Meleshko V.P., Kattsov V.M., Mirvis V.M., Baidin A.V., Pavlova T.V., Govorkova V.A. Is there a link between Arctic Sea ice loss and increasing frequency of extremely cold winters in Eurasia and North America? Synthesis of current research // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2018. V. 43. № 11. P. 743–755.
 189. Sporyshev P.V., Kattsov V.M., Gulev S.K. Changes in surface temperature in the Arctic: accuracy of model reproduction and probabilistic prediction for the near future // *Doklady Earth Sciences*. 2018. V. 479. № 2. P. 503–506.
 190. Polonskii A.B., Kibal'chich I.A. Circulation indices and thermal regime of Eastern Europe in winter // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2015. V. 40. № 1. P. 1–9.
 191. Byshev V.I., Neiman V.G., Romsamov Yu. A., Serykh I.V., Sonechkin D.M. Statistical significance and Climatic Role of the Global Atmospheric Oscillation // *Oceanology*. 2016. V. 56. № 2. P. 165–171.
 192. Klevtsova Yu.Yu. The uniqueness of a stationary measure for the stochastic system of the Lorenz model describing a baroclinic atmosphere // *Sb. Math.* 2015. V. 206. № 3. P. 421–469.
 193. Klevtsova Yu.Yu. On the rate of convergence of the distributions of solutions to the stationary measure for the stochastic system of the Lorenz model describing a baroclinic atmosphere // *Sb. Math.* 2017. V. 208. № 7. P. 929–976.
 194. Gordov E.P., Okladnikov I.G., Riazanova A.A., Titov A.G., Gordova Yu.E. A virtual thematic research environment for analysis of climate change and its consequences for Northern Eurasia: the current state of the art and perspectives // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018. V. 211. P. 012079.

Research in Dynamic Meteorology in Russia in 2015–2018

M. V. Kurgansky^{1*}, V. N. Krupchatnikov^{2, 3**}

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

²*Siberian Regional Hydrometeorological Research Institute
Sovetskaya ul., 30, Novosibirsk, 630090, Russia*

³*Institute of Computational Mathematics
and Mathematical Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Science
pr. Akademika Lavrent'eva, 6, Novosibirsk, 630090, Russia
e-mail: *kurgansk@ifaran.ru, **vkrupchatnikov@yandex.ru*

Received: 09.07.2019

Accepted: 07.08.2019

This review outlines the most significant results of research in dynamic meteorology performed by Russian scientists in 2015–2018. 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 2015–2018.

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