

УДК 551.576, 551.577

## РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ В 2019–2022 гг.

© 2023 г. Н. А. Безрукова<sup>а, \*</sup>, А. В. Чернокульский<sup>б, \*\*</sup>

<sup>а</sup>Центральная аэрологическая обсерватория,  
ул. Первомайская, 3, г. Долгопрудный, Московская область, 141701 Россия

<sup>б</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3., Москва, 119017 Россия

\*e-mail: bezrukova@cao-rhms.ru

\*\*e-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru

Поступила в редакцию 31.08.2023 г.

После доработки 08.11.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

Представлены результаты российских исследований облаков и осадков в 2019–2022 гг. на основе обзора, подготовленного для Национального отчета России по метеорологии и атмосферным наукам к 28-й Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики. Обсуждаются результаты, касающиеся общих вопросов наблюдений и моделирования облаков и осадков, в том числе конвективных, вопросов изучения микрофизических и оптических характеристик облаков, активного воздействия на облака и осадки.

**Ключевые слова:** облака, осадки, конвекция, микрофизика облаков, ядра конденсации, спутниковые и наземные наблюдения облаков и осадков, моделирование облаков и осадков, активное воздействие на облака и осадки

**DOI:** 10.31857/S0002351523070039, **EDN:** LGBOZB

### ВВЕДЕНИЕ

Облака и осадки играют фундаментальную роль в глобальном гидрологическом цикле, влияют на радиационный баланс планеты [IPCC, 2021]. Прогноз осадков и искусственное воздействие имеют важное практическое значение, в том числе для сельского хозяйства [Третий оценочный доклад, 2022]. С экстремальными осадками, гололедными явлениями и опасными конвективными явлениями связан существенный экономический и социальный ущерб, в частности в России в 2019–2022 гг. отмечено 800 подобных событий с ущербом [Шамин и Санина, 2022].

Несмотря на высокую фундаментальную и прикладную значимость, в области исследований облаков и осадков остается достаточно много нерешенных задач. В частности, с корректным воспроизведением облаков и их реакции на внешнее воздействие по-прежнему связаны существенные различия между глобальными климатическими моделями в оценке чувствительности климата, в том числе повышенная оценка чувствительности в моделях CMIP6 [IPCC, 2021]. Корректность моделирования процессов в облаках зависит от масштаба явлений, который существенно меньше разрешения современных моделей.

В 2019–2022 гг. теме облаков и осадков было посвящен ряд российских исследований, представленных в данном обзоре, включая исследова-

ния общих вопросов климатологии облаков и осадков, исследования конвективных процессов и явлений, микрофизики облаков, вопросов наблюдений и моделирования, а также активных воздействий на облака и осадки.

Данный обзор подготовлен в Комиссии по облакам и осадкам Национального геофизического комитета для Национального отчета по метеорологии и атмосферным наукам к 28-й Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (г. Берлин, Германия, 11–20 июля 2023) [Bezrukova and Chernokulsky, 2023]. Обзоры за предыдущие периоды представлены в [Безрукова и Чернокульский, 2016, 2020].

### 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КЛИМАТОЛОГИИ ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ

Исследуются различные аспекты общих вопросов климатологии облаков, в том числе в арктических и субарктических регионах [Черных и Алдухов, 2019; Alexandrova, 2021; Chernokulsky and Ezau, 2019; Sviashchennikov and Drugorub, 2022] и над регионами России [Астафуров и др., 2021; Дементьева и Коршунова, 2020; Иванова и Скриптунова, 2022; Скороходов, 2019; Чернокульский и др., 2022a; Shikhovtsev et al., 2022].

Впервые представлен анализ изменений характера облаков с 1936 года на основе проверенных на ошибки и исправленных рядов данных с

86 российских метеорологических станций в Арктике [Chernokulsky and Ezau, 2019]. Показано, что общая облачность в Российской Арктике увеличивается в более теплые периоды, при этом сильнее всего увеличивается конвективная облачность. Наблюдается статистическое подтверждение перехода от слоистых форм облаков к конвективным. Проанализирована связь характеристик облачности с различными модами климатической изменчивости.

Представлены новые данные о вертикальной макроструктуре облачных слоев в слое 0–10 км для различных широт земного шара [Черных и Алдухов, 2020], в том числе для российских регионов, рассчитанные на основе вертикальных профилей температуры и влажности по данным радиозондирования атмосферы для 1964–2018 гг. Отмечено, что в высоких широтах обоих полушарий и умеренных широтах северного полушария повторяемость облачных слоев возрастает от нижнего яруса к верхнему, в низких широтах она максимальная в среднем ярусе и минимальна в верхнем. Уточнены пространственно-временные особенности расслоения атмосферы на облачные и безоблачные слои. Максимально зафиксировано 20 облачных слоев. Получены долгопериодные оценки повторяемости облачных слоев с учетом количества облачности для месяцев и сезонов.

На основе станционных наблюдений для периода 1967–2019 гг. выявлен рост количества облачности во все сезоны на большей части России [Дементьева и Коршунова, 2020]. Повторяемость эпизодов с нижней облачностью выявлена и по данным аэродромных наблюдений [Иванова и Скриптунова, 2022]. В [Чернокульский и др., 2022a] по станционным наблюдениям для периода 1967–2020 гг. показан рост доли небосвода, закрытыми конвективными облаками, а по данным MODIS для 2000–2020 гг. над территорией Северной Евразии выявлен рост высоты облаков глубокой конвекции (тренд составляет 280 м/десятилетие). В [Астафуров и др., 2021] на основе спутниковых данных MODIS определены статистические характеристики текстурных признаков и физических параметров различных типов облачности для северной и южной частей Западной Сибири. Представлены классификации облачности, состоящие из 16 разновидностей для летнего периода и 12 разновидностей для зимнего периода. Установлены наиболее повторяющиеся виды облачных трансформаций и определены основные причины этих преобразований.

Исследуется характерная взаимосвязь макрофизических параметров облаков [Golitsyn et al., 2022]: в частности, близость фрактальной размерности облаков (отношение площадь–периметр) к  $4/3$  объясняется с точки зрения случайных блужданий частиц в 6-мерном пространстве скоростей и координат.

Исследуются проявления волновых возмущений в облаках [Кожевников, 2022; Скороходов,

2020]. Получены результаты исследования изменчивости характеристик внутренних гравитационных волн и их облачных проявлений по спутниковым данным HIMAWARI-8 [Скороходов, 2020]. Установлены схожие эпизоды наблюдения сигнатур внутренних гравитационных волн. Обсуждаются процессы, происходящие в системе “атмосфера–подстилающая поверхность” и их влияние на создание благоприятных условий для генерации и распространения рассматриваемых волновых процессов.

Ряд работ в 2019–2022 гг. был посвящен исследованию различных климатологических аспектов разных видов осадков, включая экстремальные, полученных по разным данным, с анализом причин их формирования и долгопериодных изменений, исследованием их статистических характеристик. В частности, долгопериодные изменения характеристик осадков исследованы в [Алешина и Семенов, 2022; Аржанова и Коршунова, 2021; Бруслова и др., 2019; Васильев и др., 2020; Хлебникова и др., 2019, 2022; Chernokulsky et al., 2019; Vyshkvarkova and Sukhonos, 2022; Wang et al., 2021].

Проанализированы тенденции изменений характеристик (число случаев, продолжительность и вес) всех видов гололедно-изморозевых отложений на территории России по данным 1338 метеорологических станций с 1984 по 2019 год [Аржанова и Коршунова, 2021]. Выявлено увеличение числа случаев, продолжительности и веса гололеда на востоке Европейской части России и севере Западной Сибири. На арктическом побережье и на юге Европейской части России выявлена тенденция уменьшения числа случаев, продолжительности и веса кристаллической изморози. В то же время рост этих характеристик отмечен на востоке европейской территории, в Западной Сибири, Амурской области и отдельных районах Чукотки. Статистически значимая тенденция увеличения числа случаев, продолжительности и веса отложения мокрого снега обнаружена на большей части России.

Оценено изменение характеристик разных видов осадков, включая ливневые, обложные и моросьящие за период с 1966 по 2016 гг. [Chernokulsky et al., 2019]. Выявлено сокращение обложных осадков и рост ливневых осадков, при этом также выявлен статистически значимый рост вклада особенно сильных ливней (95 процентиля) в общую сумму осадков (1–2%/десятилетие, на отдельных станциях до 5%/десятилетие). Наибольший рост доли сильных ливней в общей сумме осадков отмечен для Дальнего Востока, в основном из-за положительных изменений в интенсивности конвективных осадков с линейным трендом более 1 мм/день/десятилетие, что означает увеличение на 13.8% на 1°С потепления. Рост экстремальных осадков также отмечен в отдельных регионах — в Восточной Европе [Vyshkvarkova and Sukhonos, 2022] и над региона-

ми вечной мерзлоты в Сибири [Wang et al., 2021]. Увеличение повторяемости дней экстремальными осадками над российскими регионами отмечено также по данным реанализа ERA5, при этом повторяемость всех дождливых дней сокращается [Алешина и Семенов, 2022].

Оценены ожидаемые в XXI веке изменения характеристик осадков на основе результатов моделирования с использованием глобальных климатических моделей из проекта CMIP6 [Алешина и Семенов, 2022] и региональной модели Главной геофизической обсерватории [Хлебникова и др., 2019, 2022]. Согласно модельным расчетам, в ближайшие десятилетия в зимний период сохранится рост относительных сумм осадков и повторяемости экстремальных осадков на большей части территории России. Летом, напротив, для юга Европейской территории России в целом отмечается слабое уменьшение сезонных сумм осадков и количества дней с осадками [Алешина и Семенов, 2022]. Использование массовых ансамблевых расчетов с применением региональной климатической модели высокого разрешения позволяет выявить пространственные особенности изменения экстремальности режима осадков, которые целесообразно учитывать при адаптации к изменениям климата на региональном уровне [Хлебникова и др., 2022].

Характеристики снежного покрова во внетропических широтах Северного полушария исследуются в [Мохов и Парфенова, 2022; Essery et al., 2020; Santolaria-Otín and Zolina, 2020]. Получены количественные оценки связи внутригодовых и межгодовых вариаций снежного покрова в Евразии с изменениями приповерхностной температуры в Северном полушарии на основе спутниковых данных и данных реанализа для периода 1979–2020 гг. [Мохов и Парфенова, 2022]. Для периода с 2005 г. отмечено увеличение по абсолютной величине параметра чувствительности площади снежного покрова к изменению приповерхностной температуры для Евразии. В [Santolaria-Otín and Zolina, 2020] анализируется изменение площади снежного покрова и водного эквивалента снега над континентальными районами приполярной области на основе различных наблюдений и ансамбля моделей CMIP5 за период 1979–2005 гг. Выявлено, что модели CMIP5 значительно недооценивают площадь снежного покрова весной, но лучше согласуются с наблюдениями осенью. В целом, наблюдаемый годовой цикл площади снежного покрова хорошо воспроизводится ансамблем моделей CMIP5, однако для водного эквивалента снега годовой цикл в моделях значительно смещен. Большинство моделей CMIP5 показывают сокращение во времени площади снежного покрова и водного эквивалента снега, однако, значительно более слабое (и менее значимое), чем показывают наблюдения.

Исследуются условия формирования осадков и причины их долгопериодной изменчивости, в

том числе оценивается количественный вклад в усиление осадков роста глобальной или локальной температуры воздуха [Алешина et al., 2021; Hosseini-Moghari et al., 2022], температуры поверхности океана [Алешина и др., 2019; Гавриков и др., 2022; Shestakova and Toropov, 2021], состояния морского льда [Liu et al., 2022], мод климатической изменчивости [Basharin and Stankūnavičius, 2022], циркуляционных особенностей атмосферы [Антохина, 2019; Леонов и Соколик, 2021; Evstigneev et al., 2022; Kislov et al., 2022], локальных эффектов связанных с городом [Брусова и др., 2019; Ладохина и Рубинштейн, 2021] и орографией [Shestakova and Toropov, 2021].

В [Алешина et al., 2021] проверяется гипотеза об экспоненциальном росте интенсивности экстремальных осадков разных типов в связи с ростом температуры в соответствии с соотношением Клаузиуса–Клапейрона (7%/1K) для российских регионов на основе данных станционных наблюдений (за 1966–2017 гг.) и данных реанализа ERA5 (за 1979–2020 гг.). В зимний период выявлено общее увеличение экстремальных осадков всех типов в соответствии с указанным соотношением. Однако летом наблюдается пикообразная структура зависимости экстремальных осадков от температуры, особенно для ливневых осадков в южных регионах. Экстремальные осадки достигают своих пиковых значений в диапазоне температур между 15 и 20°C. При более высоких температурах интенсивность осадков начинает убывать с дальнейшим ростом температуры, что обуславливается важной ролью доступности влаги в атмосфере.

В [Shestakova and Toropov, 2021] анализируется роль влияния орографии и крупного водоема в формировании экстремальных осадков на южном побережье Каспийского моря с помощью идеализированных экспериментов с моделью WRF-ARW. Получено, что общий вклад теплого Каспийского моря и орографии в усиление осадков на юге Каспийского моря составляет в среднем около 50%, при этом эффект влияния моря без орографии не проявляется. В [Ладохина и Рубинштейн, 2021] оценено влияние Санкт-Петербурга на поле ветра и поле осадков по данным 15 станций Ленинградской обл. за период 1994–2018 гг. Выявлено увеличение количества осадков и ослабление скорости приземного ветра за пределами мегаполиса на подветренных территориях и уменьшение скорости ветра в самом мегаполисе. Похожий результат получены и для Москвы [Брусова и др., 2019], в частности показано, что сильные осадки (>10 мм/12 ч) на городских станциях Москвы выпадают чаще, чем в пригороде и на фоновых станциях.

Исследованы события экстремальных осадков европейского сектора Арктики [Kislov et al., 2022], которые классифицированы с точки зрения принадлежности к некоторому базовому распределению вероятностей, в качестве которого

использовано распределение Парето. Выявлены отклоняющиеся от базового распределения события. Определены синоптические объекты, при которых появляются сверхбольшие аномалии осадков. Наряду с [Kislov et al., 2022], вопросы статистического описания осадков исследуются в [Болгов и др., 2020; Клименко и др., 2019а, б; Korolev and Gorshenin, 2020; Korolev et al., 2019].

Вопросы анализа рядов данных по ливневым осадкам, содержащих несколько событий в году рассмотрены в [Клименко и др., 2019а]. Разработаны рекомендации по пересчету статистик рядов, содержащих нескольких событий в году, к статистикам для одного события в году. В [Korolev and Gorshenin, 2020] предложены математические модели для статистического описания максимального суточного количества осадков в течение влажного периода и общего объема осадков за влажный период. Предлагаемые модели основаны на обобщенном отрицательном биномиальном распределении продолжительности влажного периода, представляющим собой смешанное распределение Пуассона. Предложено несколько тестов на оценку аномальной экстремальности суточных осадков, общего объема осадков и интенсивности осадков [Korolev et al., 2019]. В [Болгов и др., 2020] рассматривается подход к оценке статистических характеристик сумм дождевых осадков за короткие интервалы времени. На основе результатов обработки данных плювиографических наблюдений в Московском регионе сделан вывод о существенном изменении временной структуры ливней. Более подробно временная структура ливней изучена в [Клименко и др., 2019б] на основе анализа 80-летних рядов плювиографических наблюдений в долине реки Тобол. Отмечено, что для 75% зафиксированных ливней более 50% суммы осадков выпадает в первую треть их продолжительности. Равномерное выпадение осадков характерно лишь для 5% наблюдаемых ливней. Показано удовлетворительное моделирование характеристик ливней на основе логнормального распределения.

## 2. КОНВЕКТИВНАЯ ОБЛАЧНОСТЬ, КОНВЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

Одни из наиболее опасных погодных явлений, которые приводят к существенным социально-экономическим последствиям, связаны с конвективными процессами в атмосфере — сильные ливни и грозы, град, шквалы, смерчи. В связи с этим, в 2019–22 гг. существенное число российских исследований было посвящено анализу конвективной облачности и опасных конвективных явлений, анализу электрических процессов в облаках, характерных условий и особенностей формирования и развития конвективных облаков и опасных конвективных явлений, а также диагностике отдельных особенно выдающихся событий.

Ряд работ описывает те или иные характеристики конвективных облаков и явлений, характерных непосредственно для регионов исследований. Так, различные оценки получены на основе разных данных (самолетных, спутниковых и радиолокационных наблюдений, данных грозопеленгации) для регионов Северного Кавказа [Аджиев и др., 2020; Аппаева, 2020; Жарашуев, 2021], для юга Дальнего Востока [Пермяков и др., 2022], средней полосы России [Спрыгин, 2020; Шаталина и др., 2021, Шихов и др., 2019, 2021, Shikhov et al., 2021], северо-запада Европейской части России [Михайлушкин и др., 2021; Синькевич и др., 2022], юга Западной Сибири [Нагорский и др., 2022; Нечепуренко и др., 2022; Шихов и др., 2022; Kharyutkina et al., 2022; Kuzhevskaya et al., 2021], Якутии [Tarabukina and Kozlov, 2020], а также для тропических регионов [Петров, 2021; Синькевич и др., 2021; Торопова и др., 2022; Khaykin et al., 2022].

Сравнение характеристик конвективных облаков и явлений между различными регионами (северо-запад Европейской части России, Северный Кавказ, центральная часть Индии и восток Китая) проведено в [Синькевич и др., 2020; Sin'kevich et al., 2021]. Проанализированы характеристики кучевых облаков на начальной стадии их перехода в грозовые облака. Выявлено, что единственной характеристикой облаков, которая увеличивалась при их переходе в грозовую стадию во всех регионах, была высота вершины облака. При этом максимальная отражаемость увеличивалась при переходе к грозовой стадии для облаков в российских регионах, но не менялась значительно в регионах Индии. Одним из важных отличий облаков в индийском регионе от континентальных облаков в России и Китае является более низкое содержание в индийских облаках (постмуссонного периода) крупных частиц льда, которые в значительной степени определяют отражательную способность облака выше нулевой изотермы.

Выявлен ряд других региональных закономерностей. В частности, в [Аджиев и др., 2020] за 2008–2019 гг. оценена взаимосвязь числа дней с грозой и продолжительностью гроз в регионах Северного Кавказа. Установлено, что с увеличением числа дней с грозой в год отмечается рост продолжительности грозы (3.89 ч на 1 грозовую день). Характерные распределения основных радиолокационных параметров одноячейковых градовых облаков (включая время градообразования, высоту зарождения первого радиоэха, высоту зарождения града, время жизни одноячейковых градовых облаков, скорость и расстояние их перемещения и др.) для регионов Северного Кавказа получены в [Аппаева, 2020]. В [Алита и Аппаева, 2021] оценена связь между параметрами области градообразования (высота, скорость и направление движения) в фазе обнаружения первого радиоэха и в фазе зарождения и роста града по данным радио-

локационных наблюдений МРЛ-5 за период с 2011 по 2020 гг. на Северном Кавказе, дана оценка времени между этими фазами. Выявлены наиболее вероятные скорости и направления движения данной области относительно ведущего потока. В [Синькевич и др., 2022] для северо-запада европейской части России выполнено сравнение параметров грозовых облаков и облаков без молний. С использованием нейронных сетей проведен регрессионный анализ зависимости частоты молний от радиолокационных характеристик облаков. Получено математическое выражение для расчета частоты молний на основе данных о максимальной величине дифференциальной отражаемости облака и объеме его переохлажденной части с отражаемостью не менее 35 дБЗ.

Опубликованные региональные исследования могут использоваться для оценки повторяемости опасных явлений (в частности, в целях адаптации к изменению климата). Так, в [Шихов и др., 2021] создана картографическая база данных по опасным конвективным явлениям для Центрального федерального округа РФ, которая включает сведения как о самих явлениях (более 2 тыс. событий за 2001–2020 гг. включая событий сильных ливней, крупного града, шквалов и смерчей), так и об их последствиях (ущерб, площадь вывала леса и т.д.), и условиях возникновения. В [Kuzhevskaya et al., 2021] проведена оценка временной изменчивости мезомасштабных конвективных систем (МКС), сформировавшихся над югом Западной Сибири за период 2010–2019 гг. За период исследования было зарегистрировано 279 МКС, выделены два центра с их наибольшей повторяемостью. Отмечено, что площади внутримассовых МКС меньше, чем у фронтальных, но высота верхней границы облаков выше. Площадь МКС и интенсивность связанной с ними грозовой активности оценена в [Нагорский и др., 2022]. При этом молнии в Сибири выступают важным источником лесных пожаров. Так, в [Kharyutkina et al., 2022] на основе совместного использования данных гронопеленгации о молниевой активности и спутниковых данных о пожарах показано, что на севере Западной Сибири молнии являются причиной появления более 30% лесных пожаров. Роль молниевой активности в появлении пожаров подчеркивается и в Якутии, где по данным гронопеленгации отмечается рост молниевой активности в последние годы [Tarabukina and Kozlov, 2020].

Обобщающее исследование изменений повторяемости и интенсивности конвективных опасных явлений погоды (КОЯП) на основе разных независимых источников информации, включая данные наземных наблюдений, спутниковые данные и данные реанализа, представлено в [Чернокульский и др., 2022a]. Результаты указывают на общую интенсификацию КОЯП в большинстве регионов России за исключением ряда регионов на юге европейской части России. Повторяемость умерен-

ных явлений имеет тенденцию к уменьшению, а наиболее сильных – к увеличению.

Впервые определено характерное число смерчей на территории Северной Евразии [Чернокульский и др., 2021; Шихов и др., 2022a; Chernokulsky et al., 2020; Shikhov et al., 2020]. На основе различных данных для территории Северной Евразии выявлено более 3000 событий смерчей. Показана общая недооценка числа смерчей по станционным наблюдениям и согласно данным существующей статистики: для периода 2009–2018 гг. в среднем за год в России регистрировалось более 100 смерчей, из них более 15 – значительных (со скоростью ветра более 50 м/с) и 1 – интенсивный (со скоростью ветра более 70 м/с). В некоторые годы эти значения превышают среднемноголетнее более, чем в 3 раза. Отмечено, что для территории России характерны как единичные смерчи, так и “вспышки” смерчей – случаи формирования нескольких смерчей в пределах одной системы мезо- или синоптического масштаба. Оценена повторяемость смерчей разной категории и вероятность их прохождения через точечный объект. Эти данные могут быть использованы для оценки риска смерчопасных ситуаций.

Конвективные облака являются важным звеном глобальной электрической цепи. Исследованию электрических процессов в конвективных облаках и электрической структуры этих облаков посвящены работы [Абшаев и др., 2020; Довгалюк и др., 2019, 2020; Жарашуев, 2019; Кузьмин, 2021; Михайловский и др., 2021; Морозов, 2019; Соснин и др., 2021; Kalchikhin et al., 2020; Karashtin et al., 2021; Shepetov et al., 2021; Svechnikova et al., 2021]. Проанализированы изменения характеристик атмосферного электричества во время развития конвективных облаков [Синькевич и др., 2019; Абшаев и др., 2020; Kalchikhin et al., 2020]. Установлено, что частота разрядов в конвективном облаке хорошо коррелирует с объемами переохлажденной части облака с большими значениями отражаемости [Синькевич и др., 2019], при этом происходит увеличение частоты электрических разрядов примерно через 20 мин после достижения максимальных значений объемов переохлажденных частей облака с отражаемостью, превышающей 35–55 дБЗ. Максимальное значение потока осадков предшествует максимальной частоте молний.

Исследованы вариации метеорологических и атмосферно-электрических параметров приземной атмосферы во время выпадения сильных ливней (с интенсивностью больше 5 мм/часов) [Kalchikhin et al., 2020]. Отмечено, что фронтальные ливневые осадки вызывают более сильное изменение полярной электропроводности по сравнению с ливнями, связанными с внутримассовыми конвективными облаками. Значимый рост полярной электропроводности (больше, чем в 2 раза по сравнению с обычными условиями)

отмечен для фронтальных ливневых осадков с размером капель более 4 мм. В [Довгальук и др., 2020] на основе модельных данных показано, что при учете процесса гетерогенного замерзания облачных капель отмечается более интенсивная электризация облака и разделение зарядов, при этом частота молниевых разрядов увеличивается в 2–3 раза. Наиболее мощные механизмы электризации облачных элементов связаны с взаимодействием облачных частиц с осадками (градина — ледяной кристалл, тающая градина — облачная капля, дождевая капля — облачная капля).

При этом, и сами электрические процессы могут играть существенную роль в эволюции облака и связанных с ним опасных погодных явлений. Выявлено, что коронные разряды способствуют замерзанию капель воды при меньших температурах и, следовательно, приводят к более быстрой кристаллизации конвективного облака [Довгальук и др., 2019]. Отмечено, что характер и степень влияния коронных разрядов на образование и развитие КОЯП существенно зависят от доли переохлажденной жидкой части облака от его общего объема. Если эта доля достаточно велика, интенсивность града и грозовая активность увеличиваются на десятки процентов.

Увеличение потока энергичных частиц под грозовыми облаками обусловлено размножением и ускорением частиц вторичных космических лучей в электрическом поле конвективного облака. В [Svechnikova et al., 2021] предложен новый способ оценки электрической структуры облака, создающего поток энергичных частиц, основанный на использовании наземных измерений напряженности электрического поля и потока энергичных частиц под облаком. По данным наблюдений на исследовательской станции Арагац определена двухслойная структура распределения заряда в облаке с положительным зарядом (плотностью  $0.5\text{--}5\text{ нКл/м}^3$ ) в нижнем слое в области преобладания граупеля и с отрицательным зарядом (плотностью  $-0.2\text{...}-3\text{ нКл/м}^3$ ) в верхнем слое в области преобладания снежных частиц. Вертикальное расстояние между двумя областями составляет около 1–2 км, что оказывается достаточным для создания потока энергичных частиц.

Продолжаются исследования условий формирования мощных конвективных облаков, приводящих к появлению КОЯП, при этом используется как классический синоптический анализ, так и анализ динамических и термодинамических характеристик атмосферы [Алексеева, 2019; Алексеева и Песков, 2021; Ашабоков и др., 2022; Веремей и др., 2022; Золотухина, 2020; Калинин и др., 2021; Кузнецов и др., 2020; Макитов и др., 2022; Сивков и Калинин, 2020; Шихов и др., 2022б; Abshaev et al., 2019; Kulikov et al., 2020; Shikhov et al., 2021].

Оценивается прогнозная и диагностическая сила тех или иных индексов конвективной неустойчивости. В [Алексеева, 2019] было показано,

что для прогноза шквалов наиболее информативными предикторами являются максимальная конвективная скорость и лапласиан приземного давления, который позволяет выделять зону полного отсутствия шквалов. Показано влияние скорости горизонтального переноса в средней тропосфере на увеличение (примерно на 4–4.5 м/с) максимальной скорости ветра при шквале, хотя ее вклад примерно в 4 раза меньше вклада от вертикальных конвективных скоростей и в 2–2.5 раза меньше вклада от лапласиана приземного давления. В [Калинин и др., 2021] показано, что важными факторами возникновения сильных шквалов и смерчей являются значительный контраст температуры на фронте (в среднем  $9.6^\circ\text{C}/500\text{ км}$ ), а также наличие струйного течения в нижней или средней тропосфере. В большинстве случаев для возникновения шквалов и смерчей необходимо сочетание высокого влагосодержания воздушной массы (около 40 мм), умеренной или сильной конвективной неустойчивости ( $>1000\text{ Дж/кг}$ ) и сильного сдвига ветра. Для формирования шквалов большее значение имеют влагосодержание и конвективная неустойчивость атмосферы, а для формирования смерчей — сдвиг ветра в нижнем слое. Похожий вывод о ключевой роли сдвига ветра и спиральности в формировании смерчей и термодинамической неустойчивости в формировании шквалов сделан в [Shikhov et al., 2021]. В [Ашабоков и др., 2022] на основе трехмерной модели конвективного облака отмечается уменьшение мощности выпадения градовых осадков при усилении сдвига ветра.

В [Abshaev et al., 2019] предложена двумерная математическая модель конвекции влажного воздуха в подоблачном и облачном слоях, на основе которой оценено влияние приземных параметров атмосферы на развитие конвекции и выведен критерий развития конвекции в подоблачной области. Установлено, что развитие конвекции в облачном слое зависит от абсолютных значений дефицита точки росы в приповерхностном слое и, в большей степени, от вертикальных градиентов массовой доли водяного пара. Показано, что при определенных критических значениях вертикального градиента массовой доли водяного пара наблюдается взрывной рост конвекции.

Продолжились исследования роли различных факторов в усилении конвективных явлений. В частности, в [Макитов и др., 2022] показано, что в результате слияния конвективных ячеек отмечается интенсификация микрофизических и динамических процессов, что в значительной степени способствует росту крупного града и увеличению продолжительности градовой стадии. В [Веремей и др., 2022] на основе модельных расчетов выявлена интенсификация КОЯП и конвективных облаков при начальном увеличении теплового потока от поверхности. Но дальнейшее его увеличение приводит к гораздо меньшим измене-

ниям величин, которое практически выходит на насыщение. Это связано с тем, что термическое возмущение играет роль только в подъеме термика до конвективно-неустойчивых слоев атмосферы. В дальнейшем же основным фактором, определяющим эволюцию облака, является не термическая неоднородность поверхности, а выделение теплоты при фазовых переходах. В [Кузнецов и др., 2020] показано, что в условиях значительной неустойчивости атмосферы интенсивное движение воздушных судов вблизи аэродрома может способствовать переходу кучевой облачности в кучево-дождевую.

Ряд исследований посвящен детальному анализу отдельных особенно выдающихся конвективных штормов (суперячейковых облаков и/или мезомасштабных систем), включая диагностику условий образования и развития таких штормов, возможности их моделирования и прогнозирования. Проведен анализ штормов, приведших в том числе к выпадению крупного града [Баркова и др., 2019; Абшаев и др., 2020; Бухаров и Бухаров, 2020], формированию водных или сухопутных смерчей [Попов и др., 2020; Романский и др., 2020; Синькевич и др., 2020; Chernokulsky et al., 2020; Калмыкова и др., 2021; Чернокульский и др., 2022; Шихов и др., 2020], долгоживущих шквалов [Куличков и др., 2019; Chernokulsky et al., 2022] или к разным КОЯП одновременно [Алексеева и др., 2022; Спрыгин и Вязилов, 2022; Чернокульский и др., 2022б]. Для большинства исследуемых событий отмечены условия сильной неустойчивости, выявлены экстремальные значения ряда характеристик. Например, для одного из исследуемых суперячейковых облаков отмечена скорость перемещения до 85 км/час [Абшаев и др., 2020].

В [Попов и др., 2020] по данным доплеровского поляризационного метеорологического радиолокатора, радиометра и грозопеленгатора исследуются характеристики грозового кучево-дождевого облака со смерчем, которое проходило над Финским заливом 12 августа 2018 г. Показано опускание вращательного движения в облаке перед возникновением смерча (что указывает на его природу по типу торнадо). На основе рассмотрения радиолокационных характеристик облака в момент наблюдения смерча сделан вывод, что для обнаружения смерча хорошими идентификаторами являются “столб Zdr” и область в нижней части облака с разными по направлению значениями доплеровской скорости и с большими значениями ширины спектра скоростей. По-видимому, данная особенность может использоваться для обнаружения не всех смерчей. Например, изучение радиолокационных характеристик облаков во время вспышки смерчей 16 июля 2019 г. над Черным морем [Калмыкова и др., 2021], показало, что облако со смерчем, вышедшем на берег и прошедшим существенное расстояние над сушей, по своим радиолокационным характери-

кам не отличалось от несмерчеобразующих облаков, возникавших в тот день вблизи побережья.

В [Синькевич и др., 2020] для грозового кучево-дождевого облака с водным смерчем, зафиксированным 6 августа 2018 г. над Ладожским озером, впервые применены алгоритмы классификации гидрометеоров и определения восходящих потоков по данным поляризационных характеристик, полученных радиолокатором ДМРЛ-С. С их помощью обнаружено появление крупных ледяных частиц в начале грозовой активности в облаке и зафиксирован протяженный восходящий воздушный поток, связанный со смерчем.

Впервые для территории России зафиксированы так называемые события “деречо” — долгоживущие конвективные шторма с существенной длиной и интенсивностью разрушения [Chernokulsky et al., 2022]. Два таких события произошли 27 июня и 29 июля 2010 г. на фоне рекордной жары и привели к беспрецедентному ущербу лесам с общей площадью сплошных ветровалов более 1250 км<sup>2</sup>. Длина пути повреждений превысила 500 км для одного шторма и 600 км для другого. Оба события развивались в условиях умеренной или сильной конвективной неустойчивости и чрезвычайно сильного сдвига ветра из-за наличия сильного струйного течения в средней атмосфере вблизи холодного фронта на западной периферии долгоживущих блокирующих антициклонов в даты их разрушения. Мезомасштабное моделирование ситуации с помощью модели WRF показало существенную недооценку ветрового воздействия. Важная роль блокирующих антициклонов в формировании мощных долгоживущих конвективных систем обсуждается также в [Чернокульский и др., 2022б] для события 15 мая 2021 г. Это событие также развивалось на западной периферии блокинга, но не во время разрушения (как события 2010 года), а во время его максимального развития.

### 3. МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ. ЯДРА КОНДЕНСАЦИИ. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОСАДКОВ

Изучение микрофизических свойств облаков проводится как в лабораторных, так и в натурных условиях в атмосфере, в том числе на борту летающей метеорологической лаборатории, созданной российскими учеными на базе самолета Як-42Д “Росгидромет” (СМЛ), оснащенного разнообразной измерительной аппаратурой и аппаратно-программными комплексами, позволяющими в частности регистрировать облачные частицы в диапазоне 25–6000 мкм, водность облаков и термодинамические характеристики атмосферы [Струнин, 2020; Струнин, 2021], анализировать аэрозольное загрязнение атмосферы и потоки атмосферной радиации [Волков и др., 2019]. В ходе

почти десятилетия летных работ на СМЛ накоплены уникальные экспериментальные данные о строении и свойствах облаков разных форм в разные сезоны и в разных синоптических ситуациях на мезо- и микро-масштабах. База данных зондирования облачной атмосферы со специально разработанным ПО (<http://www.cao-rhms.ru/Lnic/raboty/raboty.html>) позволяет произвести расчет реализаций пульсаций компонент скорости ветра и температуры, параметров турбулентности, микрофизических параметров, что было использовано в систематизации данных о термодинамическом строении облачной атмосферы [Волков и др., 2019; Petrov et al., 2022].

Возможности измерительной системы СМЛ позволяют изучать структуру поля ветра с высоким пространственным разрешением и определять вертикальные и горизонтальные сдвиги ветра. В частности, по данным двух исследовательских полетов максимальные значения горизонтального сдвига компонент скорости ветра достигались выше пограничного слоя и составляли 0.2 м/с/км, а вертикального сдвига 1.2 м/с/100 м. Профили энергии горизонтальных и вертикальных турбулентных пульсаций, показали, что интенсивная турбулентность нивелирует сдвиги ветра в конвективном пограничном слое атмосферы. Суммарная энергия турбулентности в пограничном слое в конвективных условиях, достигала величин 1.6–2.5 м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> [Волков и др., 2021a].

Самолетные исследования проводятся преимущественно в облачных зонах атмосферных фронтов. Так, выполнен анализ структуры сдвигов ветра и характеристик турбулентности в облачных системах теплых фронтов (Ns–As–Cs–Ci) во время полетов СМЛ в Московской воздушной зоне 17.12.2019 г. и 21.01.2021 г. [Волков и др., 2021b]. Отмечено различие форм кристаллов и их размеров в зависимости от высоты полета и типа облачности, обнаружено наличие жидкой воды в облаках всех типов, включая облака верхнего яруса. Получены распределения с высотой и типом облачности характеристик облачных частиц, значенный объемно-модальный радиуса частиц; произведен расчет водности облаков; зарегистрированы зоны жидко-капельной водности при  $T = -48^{\circ}\text{C}$  в облаках Ci верхнего яруса.

В рамках экспериментального направления в [Petrov et al., 2022] представлены результаты натурных авиационных исследований взаимосвязи микрофизических характеристик и турбулентности в переохлажденных облаках. В зонах с одновременным присутствием капель переохлажденной жидкости и кристаллов льда наблюдается анизотропия турбулентных пульсаций скоростей воздушного потока — энергия вертикальных пульсаций превышала энергию горизонтальных пульсаций, иногда более чем в 2 раза. Скорости восходящих потоков превышали 4.5 м/с, что создавало условия для подъема капель и роста жидкой фазы

в присутствии кристаллов льда. Показано, что в областях с повышенной интенсивностью турбулентности при низких температурах в облаках со смешанным фазовым составом высока опасность обледенения самолетов вследствие обнаруженного механизма роста переохлажденных капель.

На основе измерений концентраций облачных капель (диапазон 2–48 мкм), облачных кристаллов (12.5–1562.5 мкм) и частиц кристаллических осадков (50–6250 мкм) по данным измерений на СМЛ получена аппроксимация функций распределения облачных капель и ледяных кристаллов, которая может использоваться для построения численных моделей облаков и осадков и для анализа результатов активного воздействия на облака [Владимиров и др., 2021].

Наряду с самолетными измерениями микрофизические параметры облаков исследуются и на основе других наблюдений и экспериментов, в том числе лабораторных [Самохвалов и др., 2019; Gabyshev et al., 2019, 2022; Karagodin et al., 2022]. В экспериментальной работе [Gabyshev et al., 2019] конденсационный рост сферических микрокапель воды анализировался для капельных кластеров, которые удерживались в свободно левитирующем состоянии в направленном вверх потоке водяного пара. Было обнаружено, что в присутствии электростатического поля напряженностью  $1.5 \times 10^5 \text{ В м}^{-1}$  рост капель ускоряется в 1.5–2.0 раза по сравнению с условиями без внешнего электрического поля. Предположительно, молекулы воды в окружающем воздухе ускоряются благодаря наличию электрического поля. Кинетическая модель, позволяющая предсказать ускорение конденсационного роста, подтверждает справедливость этой гипотезы. Сами капли поляризованы таким образом, что в электрическом поле облегчается осаждение молекул пара. В работе [Gabyshev et al., 2022] для лучшего понимания механического движения мелких дождевых капель изучались колебания траектории одиночных сферических капель воды, левитируемых в аэродинамической трубе, при этом был заполнен экспериментальный пробел в исследованиях колебаний траектории одиночных жидких сфер микроскопических размеров при малых числах Бонда  $< 1$  и относительно низких числах Рейнольдса  $\sim 10^2$ . Было обнаружено, что исследуемые колебания удлиняют траектории, уменьшают конечную скорость мельчайших капель и заставляют капли дождя падать неравномерно даже после достижения конечной скорости.

Проведены исследования оптических и микрофизических характеристик конденсационных следов самолетов с помощью уникального высотного поляризационного лидара [Самохвалов и др., 2019]. Показано, что образующийся в атмосфере конденсационный след за самолетом через 30–40 мин после выброса из двигателей продуктов сгорания топлива состоит из мелких хаотиче-

ски ориентированных частиц льда, преимущественно столбчатой формы.

На основе спутниковых данных и ансамблевых модельных экспериментов проверена гипотеза о влиянии межпланетного магнитного поля на состояние тропосферы в полярных широтах, которое осуществляется через модулирование глобальной электрической цепи и последующее влияние заряженных частиц на скорость слияния облачных капель в облаках “хорошей погоды” [Karagodin et al., 2022]. Анализ не позволил выявить возможное влияние изменения микрофизических параметров облаков на приземную температуру воздуха и атмосферное давление в полярных регионах на фоне их существенной собственной изменчивости.

Изучается взаимодействие облачной среды и аэрозоля, в том числе гигроскопические и конденсационные свойства аэрозолей, определяющие их роль в качестве облачных ядер конденсации [Довгалюк и др., 2022; Михайлов и др., 2019; Морозов, 2022; Полькин и др., 2022; Припачкин и Будыка, 2020; Стулов и др., 2021; Mikhailov and Vlasenko, 2020; Mikhailov et al., 2021; Shuvalova et al., 2022].

Анализ самолетных и наземных измерений концентрации аэрозоля показал, что высота, с которой наблюдаются фоновые концентрации аэрозольных частиц, в теплое время года составляет 2000–3000 м, в зависимости от положения приподнятой инверсии температуры, а в холодное время года (ноябрь–март) 800–1000 м при отсутствии сильных турбулентных потоков. Получены экспериментальные данные по структуре и изменчивости приземного и тропосферного аэрозоля, включая облачные ядра конденсации (ОЯК) на наземном пункте измерения и с помощью самолета-лаборатории. Систематизированы данные о концентрациях, спектрах размеров и образцах облачных частиц в облаках различных типов и осадках в полетах 2020–2022 гг. Исследован суточный ход концентрации частиц субмикронного аэрозоля при различных синоптических ситуациях. По данным прибора CCN-200 о концентрации облачных ядер конденсации (ОЯК), и данным о тонкой структуре микронного и субмикронного аэрозоля, проведен анализ связи концентрации ОЯК с различными фракциями аэрозоля. Исследовано влияние наземных источников загрязнения (крупных населенных пунктов, промышленных объектов) на содержание аэрозоля в нижних слоях тропосферы. Исследованы характеристики облачных ядер конденсации в Московском регионе [Стулов и др., 2021]. В работе приводятся результаты измерений за 2017–2020 гг. концентрации и спектра по пересыщению облачных ядер конденсации (ОЯК) в приземном слое в Подмоскovie. Установлены среднемесячные концентрации ядер и значения параметров распределения ядер по пересыщениям для разных месяцев. Оценены преимущественные

размеры ОЯК и их распределение по фракциям частиц атмосферного аэрозоля разных размеров.

Способность вторичных аэрозолей (вторичных частиц, субчастиц) пылицы ряда растений выступать в качестве ядер конденсации оценивается в [Михайлов и др., 2019; Mikhailov et al., 2021]. Вторичные частицы получены путем водной экстракции биологического материала из пылевых зерен и последующей сушки. Параметры облачной активации определены в диапазоне размеров 20–270 нм, а также в условиях насыщения и пересыщения. Установлено, что параметр гигроскопичности изменяется в диапазоне от 0.12 до 0.13 для пересыщенных условий (пересыщение водяным паром 0.1–1.1%). Во всех исследованных образцах вторичных частиц наблюдалось резкое увеличение обводнения аэрозоля при относительно влажности выше 95%. Результаты измерений показали, что конденсационная активность вторичных пылевых аэрозолей сопоставима с конденсационной активностью вторичных органических аэрозолей и слабо зависит от типа первичной пылицы.

На основе результатов расчетов с численной нестационарной трехмерной моделью исследуется эволюция конвективного облака и осадков для случая грозы, наблюдавшейся 11 августа 2017 г. в окрестностях Пекина (Китай) на фоне сильного аэрозольного загрязнения атмосферы, при этом в модели варьировались различные микрофизические параметры капель и ледяных частиц, которые зависят от аэрозольного загрязнения атмосферы, включая параметры распределения дождевых капель и градин по размерам [Довгалюк и др., 2022]. В связи с тем, что жидкокапельная влага играет сравнительно небольшую роль в процессе эволюции конвективного облака, аэрозольное загрязнение в исследуемом случае хотя и влияет на спектр размеров дождевых капель и на переход облачных капель в дождевые, но не оказывает существенного влияния на динамические, микрофизические и электрические параметры облака. В то же время изменение спектра размеров ледяных частиц осадков в сторону уменьшения под действием повышенного аэрозольного загрязнения оказывает существенное влияние на эволюцию облака и осадков. Уменьшается количество осадков как в облаке, так и на подстилающей поверхности. Молниевая активность облака под действие аэрозольного загрязнения изменяется слабо.

Анализируется влияние локдауна в Москве весной 2020 г., введенного в связи с пандемией коронавируса, на снижение содержание ядер конденсации и связанное с этим изменение характеристик облаков [Shuvalova et al., 2022]. По данным спутниковых наблюдений MODIS исследуется концентрация облачных капель на нижней границе облаков весной 2018–2020 гг. для Московского региона. Получено, что для синоптических ситуаций с адвекцией воздуха с севера concentra-

ция облачных капель составляет  $200\text{--}300\text{ см}^{-3}$ . При этом в период локдауна при аналогичных условиях северной адвекции обнаружено снижение концентрации облачных капель на  $40\text{--}50\text{ см}^{-3}$  (на  $14\text{--}16\%$ ), при этом выявлено увеличение эффективного радиуса капель на  $8 \pm 1\%$  и уменьшение оптической толщины облаков на  $5 \pm 2\%$ .

Оптические свойства облачной среды анализируются в работах [Артюшина и др., 2020; Бусыгин и др., 2019; Галилейский и др., 2022; Коршунов и др., 2021; Самохвалов и др., 2019; Тимофеев и др., 2019, 2022; Ткачев и др., 2021; Kustova et al., 2022a, 2022b; Okamoto et al., 2019, 2020; Shishko et al., 2019, 2020; Sterlyadkin et al., 2020; Veselovskii et al., 2020; Wang et al., 2021], получен ряд важных результатов в области изучения оптики облачных частиц. В частности, получено решение задачи рассеянии света на сферических частицах, адаптированное для интерпретации лидарных сигналов [Shishko et al., 2019]. Решение получено для типичных длин волн, используемых в задачах лидарного дистанционного зондирования воды и льда. На основе совместного зондирования перистых облаков лидаром и радаром построена уникальная база данных для соотношений радарных и лидарных сигналов для разных размеров и разных типичных форм ледяных кристаллов [Wang et al., 2021]. Показано, что лидарно-радарное отношение наиболее чувствительно к размеру кристаллов, а деполяризационное отношение — к их форме. Впервые в рамках приближения физической оптики рассчитаны матрицы обратного рассеяния света для ледяных атмосферных гексагональных частиц для случая их хаотической пространственной ориентации [Тимофеев и др., 2022, Kustova et al., 2022b]. Для интерпретации данных лидарного дистанционного зондирования облаков создан банк данных матриц обратного рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах размером  $10\text{--}100\text{ мкм}$ , получены значения спектрального и линейного деполяризационного отношений [Ткачев и др., 2021], рассчитаны матрицы обратного рассеяния света для частиц нерегулярной формы [Kustova et al., 2022a].

На основе разработанных математических моделей оценен перенос коротких оптических импульсов через облачный слой в космос [Бусыгин и др., 2019], при этом в качестве основных переменных параметров облачного слоя выбраны его оптическая и геометрическая толщины в вертикальном направлении. Показано, что наличие облачного слоя приводит к формированию вторичного источника на верхней границе облака и к существенному искажению временной формы исходного импульса.

Исследуется химический состав осадков, жидких и твердых, а также снежного покрова исследуется, в том числе анализируется изотопный состав [Казанцева и др., 2020, Малыгина и др., 2020; Скакун и др., 2020; Vasil'chuk et al., 2022], кислот-

ность [Семенец и Павлова, 2019; Vlasov et al., 2021], содержание аэрозолей различного происхождения [Курятникова и др., 2022; Митяев и др., 2019; Чечко и Топчая, 2019; Topchaya and Chechko, 2022; Ukraintsev et al., 2020; Volodina et al., 2022], содержание тяжелых металлов и других токсичных элементов [Митяев и др., 2019; Ianchenko et al., 2021; Ivanchenko, 2022; Kotova and Topchaya, 2022; Krupnova et al., 2021; Opekunov et al., 2021; Topchaya and Kotova, 2022; Vlasov et al., 2020, 2021; Yakovlev et al., 2022], ароматических углеводородов [Журба и др., 2019; Тентюков и др., 2019; Khaustov and Redina, 2021; Kozhevnikov et al., 2021; Moskovchenko et al., 2022; Noskova et al., 2022]. Исследования химического состава проведены для различных регионов России, в том числе для Московского региона [Khaustov and Redina, 2021; Vasil'chuk et al., 2022; Vlasov et al., 2020, 2021], севера европейской части России [Митяев и др., 2019; Kotova and Topchaya, 2022; Kozhevnikov et al., 2021; Opekunov et al., 2021; Yakovlev et al., 2022], Балтийского региона [Семенец и Павлова, 2019; Чечко и Топчая, 2019; Topchaya and Chechko, 2022; Topchaya and Kotova, 2022], Баренцбурга (Шпицберген) [Скакун и др., 2020], Урала [Казанцева и др., 2020; Krupnova et al., 2021], севера Западной Сибири [Малыгина и др., 2020], юга Западной Сибири [Курятникова и др., 2022; Moskovchenko et al., 2022; Noskova et al., 2022; Volodina et al., 2022], юга Восточной Сибири [Журба и др., 2019; Ianchenko et al., 2021; Ianchenko, 2022], Байкальского региона [Ukraintsev et al., 2020]. Исследования позволяют уточнить для ряда крупных российских городов распределение и уровень осаждения загрязняющих веществ из атмосферы, в том числе в зависимости от расположения и интенсивности источников загрязнения, обсуждаются вопросы трансграничного переноса вредных примесей.

В [Vlasov et al., 2021] впервые оценены скорости вымывания растворимых форм потенциально токсичных элементов в дождях в Московском мегаполисе. Выявлено, что во время продолжительных дождей уровень влажного осаждения потенциально токсичных элементов резко снижается на второй и последующие дни из-за активного подоблачного вымывания аэрозолей во время первых осадков. Показано, что продолжительность сухого периода и содержание аэрозолей перед началом дождя определяют количество твердых частиц в дождевой воде, что приводит к увеличению pH дождевой воды и сильно влияет на скорость вымывания потенциально токсичных элементов преимущественно антропогенного происхождения. Также показано, что интенсивность осадков способствует увеличению скорости вымывания ряда элементов. Отмечено увеличение растворимости в дождевой воде металлов и металлоидов при снижении pH и более длительных периодах осадков и снижение растворимости при увеличении интенсивности осадков, продолжительности

предшествующего сухого периода и содержания твердых частиц в дождевой воде. Для ряда металлов и металлоидов отмечено увеличение растворимости в кислотных дождях на 20–50% по сравнению с неокислотными дождями.

В [Ianchenko et al., 2021; Ianchenko, 2022] на основе многолетних полевых исследований снежного покрова в окрестностях сибирских алюминиевых заводов исследовано распределение в снеге фтора, натрия и лития. Показано, что изменения концентраций этих элементов может быть описана экспоненциальной зависимостью от расстояния до источника. Предполагается, что осаждение аэрозолей от промышленного производства алюминия может быть достигнуто на минимальном расстоянии от заводов или в пределах территории завода путем укрупнения частиц различными технологическими методами в производстве алюминия. Установлено влияние на концентрацию фтора в снежном покрове таких сопутствующих факторов, как количество атмосферных осадков, температура воздуха и продолжительность оттепелей в период от формирования устойчивого снежного покрова до даты отбора проб.

В [Тентюков и др., 2019] обсуждается возможность загрязнения поверхности снежного покрова полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) путем осаждения мелких кристаллов ПАУ из атмосферы в составе криогидратов при образовании изморози. Процесс начинается в атмосфере при взаимодействии мелкодисперсных кристаллов ПАУ с облачными переохлажденными каплями. Благодаря наличию температурной инверсии над снежным покровом и ее осушающему воздействию на приповерхностный слой воздуха, формируется устойчивый массовый перенос водяного пара вниз к снежному покрову, что может инициировать поток тонкодисперсных криогидратов из ПАУ. В работе анализируются физические свойства снежного покрова (в верхнем 18-мм слое снега), контролируемые механизмы загрязнения снежного покрова ПАУ при образовании поверхностной изморози. Показаны некоторые микроморфологические признаки различных форм кристаллов изморози, участвующих в указанном процессе. Поскольку условия для образования поверхностного инея возникают чаще, чем для снегопадов, изморозь может быть информативным объектом тестирования при выявлении углеводородного загрязнения снежного покрова в интервалах между снегопадами.

#### 4. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ОБЛАКАМИ И ОСАДКАМИ

Продолжаются исследования, направленные на повышение точности наблюдений за различными характеристиками облаков и осадков, валидацию глобальных и региональных моделей, создание долгопериодных однородных рядов дан-

ных за характеристиками облаков и осадков, развитие методов восстановления характеристик облаков и осадков по данным дистанционного зондирования.

В работах [Волков и др., 2019, 2021; Ehrlich et al., 2019; Kalnajs et al., 2021] представлены и обсуждаются самолетные и аэростатные методы наблюдений за характеристиками облаков. Описана бортовая система сбора данных для самолета-лаборатории нового поколения Як-42Д “Росгидромет”, предназначенного для исследования атмосферы и подстилающей поверхности [Волков и др., 2019]. Приведено описание разработанного бортового измерительно-вычислительного комплекса, локальной вычислительной сети, представлено решение задач синхронизации данных высокочастотных измерений. Показаны возможности использования локальной сети для интеграции измерительных систем на борту самолета-лаборатории. Представленные в статье принципы организации единой системы сбора данных могут быть использованы для построения измерительных систем мобильных лабораторий любого класса. Рассмотрены различные конструкции датчиков и представлены алгоритмы расчета содержания мелкокапельной части и общего содержания воды [Volkov et al., 2022], получены данные о коэффициентах захвата для датчиков различной конструкции в капельных облаках и в облаках со смешанной фазой.

Представлена новая платформа для измерения профиля температуры, водяного пара и аэрозоля с разрешением 1 метр в слое тропической тропопаузы [Kalnajs et al., 2021], которая представляет собой опускающийся подвесной комплекс измерительных приборов под дрейфующим аэростатом. Система объединяет проверенные датчики водяного пара, температуры, давления, облачных и аэрозольных частиц. Продемонстрирована возможность использования данной измерительной платформы для будущих кампаний по изучению характеристик облаков в тропиках на уровне тропопаузы.

Систематизируются данные стандартных наземных и аэрологических наблюдений [Черных и Алдухов, 2020; Швець и др., 2019; Швець, 2020], данные могут представлять ценность как для анализа пространственно-временных особенностей характеристик облаков и осадков, так и использоваться для валидации сеточных продуктов, например — спутниковых данных и систем реанализа [Григорьев и др., 2022; Подлесный и др., 2022; Сеницын и Гулев, 2022; Kharyutkina et al., 2022; Lockhoff et al., 2019; Voropay et al., 2021].

Оценена ошибка воспроизведения поля осадков по данным реанализа ERA5 в сравнении с данными станционных наблюдений [Григорьев и др., 2022]. Показано, что ERA5 завышает количество осадков от 14% летом до 37% весной, при этом в зависимости от сезона ложно идентифицирует 30–40% дней без осадков. Величина случайной ошибки в среднем на треть меньше изменчивости

суточной суммы осадков, а доля дней с осадками, корректно выявленная ERA5, составляет 84–89% и в среднем меньше летом, чем в другие сезоны. В целом ERA5 демонстрирует меньшую точность для районов и сезонов с относительно малым количеством дней с осадками и количеством осадков. В [Voropay et al., 2021] предложена методика коррекции ошибки реанализа ERA5 с учетом данных наблюдений и представлена скорректированная база данных для юга Сибири.

Особенности наземных наблюдений за осадками с помощью различных приборов (в том числе осадкосборников, оптических осадкомеров и т.д.) также обсуждаются в [Аршинов и др., 2019; Екайкин и др., 2020; Жарашуев, 2019; Кальчихин и Кобзев, 2019; Кальчихин и др., 2021].

В связи с объективными трудностями проведения контактных наблюдений за облаками и осадками активно используются данные дистанционного зондирования гидрометеоров, полученные как со спутников, так и с измерительной аппаратуры, расположенной на поверхности. Среди наземных дистанционных наблюдений в качестве источника данных для оценки характеристик облаков и осадков наибольшее распространение получили метеорологические радиолокаторы [Алексеева и др., 2020, 2021; Восканян и др., 2019; Денисенков и др., 2019; Довгалаук и др., 2020; Жарашуев, 2022; Кагермазов и Созаева, 2019; Ильин и Кутерин, 2020; Клименко, 2019, 2020; Костарев и др., 2020; Созаева, 2021, 2022; Созаева и Жабоева, 2020, 2021; Синькевич и др., 2021; Шаповалов и др., 2022].

Оценен вклад различных гидрометеоров в суммарную радиолокационную отражаемость [Кагермазов и Созаева, 2019]. Показано, что при решении обратных задач теории рассеяния вкладом дождевых капель в отражаемость на длине волны 10 см можно пренебречь, а на длине волны 3.2 см этот вклад необходимо учитывать, при этом вкладом облачных капель и кристаллов на обеих длинах волн можно пренебречь. Влияние формы капель, в том числе их деформации, на их рассеивающие свойства и радиолокационную отражаемость оценено в [Созаева и Макитов, 2019; Созаева и Жабоева, 2021]. Анализ показал, что фактор формы капель не вносит заметного влияния на радиолокационную отражаемость при отсутствии электрических полей. Но при наличии электрического поля фактор формы вносит существенный вклад в радиолокационную отражаемость, и при расчете интенсивности осадков по радиолокационной отражаемости необходимо вносить соответствующую коррекцию. В [Денисенков и др., 2019] предложена методика по определению сдвига ветра на основе данных метеорологических радиолокаторов путем восстановления профиля ветра на основе использования оценок ширины спектра отражений. В [Ильин и Кутерин, 2020] предложен новый алгоритм распознавания гроз, основанный на сумме положитель-

ных значений радиолокационной отражаемости, превосходящий по оправдываемости и достоверности более сложные модели. В [Жарашуев, 2022] предложены методы оптимизации работы радиолокационной сети России, включающие в себя объектно-ориентированный подход к отображению метеорологических карт, автокалибровку радиолокационной сети по эталонному локатору и автоматическую фильтрацию аномального радиоэха.

Предложен способ оценки максимально возможных за сутки ливневых осадков на основе совместного использования наземной, аэрологической, спутниковой и радиолокационной информации [Клименко, 2020]. Оценка максимально возможных осадков проводится на примере региона Среднего Урала на основе общего влагосодержания облачных систем, описываемого с позиций их стационарности или динамики во времени, при этом отдельно рассмотрены разные способы оценки влагосодержания — на основе характеристик вертикального распределения температуры в тропосфере; скорости конвекции; высоты верхней границы облаков. Разработанная методика оценки предельных максимумов ливневых осадков может быть использована в инженерной практике.

Наряду с метеорологическими радиолокаторами развиваются методы восстановления характеристик облаков на основе других наземных дистанционных наблюдений, в том числе с помощью облачных камер [Krinititskiy et al., 2022], инфразвуковых [Сорокин и Добрынин, 2022], лидарных [Коршунов и Зубачев, 2021; Махотина и др., 2021] и микроволновых наблюдений [Аквилонова и др., 2022; Бирюков и Косцов, 2019, 2020; Быков и др., 2020; Караваев и Шукин, 2019; Караваев и др., 2022; Ростокин и др., 2019; Klimenko et al., 2022; Kostsov et al., 2020], на основе систем грозопеленгации [Аджиев и др., 2019; Жарашуев, 2022; Клещева и др., 2021; Куров и др., 2022] или совместного использования разных видов наблюдений [Спивак и др., 2022].

В [Krinititskiy et al., 2022] предложена схема оценки алгоритмов восстановления характеристик облачности на основе наземных оптических снимков с помощью широкоугольных снимков небосвода, а также представлено несколько новых алгоритмов, основанных на методах глубокого обучения. Показано, что алгоритмы, основанные на сверточных нейронных сетях, обеспечивают более высокое качество по сравнению со всеми ранее опубликованными подходами по оценке облачности на основе снимков небосвода. Выявлено значительное снижение способности к обобщению обучающих данных для случаев сильного смещения между обучающим и тестовым подмножествами изображений, что может, например, произойти в случае использования региональной выборки.

Возможности микроволновой радиометрии для экспериментальных исследований водозапаса об-

лаков, в том числе в период возникновения опасных явлений погоды, связанных с развитием конвективных облаков и грозовых процессов обсуждаются в [Караваев и др., 2022]. В [Аквилонова и др., 2022] показана возможность исследования изменчивости водозапаса разных типов облаков с 200-метровым пространственным разрешением и 10-секундным временным разрешением на основе спектральных СВЧ-радиометрических измерений в области линии поглощения водяного пара 18.0–27.2 ГГц. Временные ряды спектров значений яркостной температуры могут служить основой оперативного анализа временной изменчивости водозапаса облаков. Многочастотные микроволновые радиометрические измерения также могут использоваться в период формирования сильного дождя [Ростокин и др., 2019]. Радиометрические измерения в режиме углового сканирования позволяют восстановить пространственный градиент водозапаса облаков, например на границе “суша–море” [Kostsov et al., 2020]. Полученные средние за 7 лет микроволновых измерений значения градиента водозапаса для лета и зимы показывают наличие положительного градиента водозапаса облаков “суша–море” (большие значения над сушей, меньшие — над морем) в оба периода, что качественно согласуется с имеющимися спутниковыми данными [Бирюков и Косцов, 2020]. В [Klimenko et al., 2022] показано, что одновременные микроволновые измерения и измерения электрического поля атмосферы могут быть использованы для выявления возможных связей между скоростью электризации и интенсивностью турбулентности в облаках.

В [Клещева и др., 2021] с помощью разных статистических методов получены оценки радиусов круговой области выборки данных грозопеленгационной сети WWLLN, при которых выявлена наилучшая согласованность с числом дней с грозами по данным станционных метеорологических наблюдений. Показано, что эти радиусы для всех станций лежат в диапазоне от 12 до 36 км при среднем значении 23 км. Днем радиусы меньше по сравнению с радиусами ночью и в среднем по всем станциям составляют 21 и 26 км соответственно. Показано, что увеличение (уменьшение) радиуса выборки данных WWLLN на 1 км относительно среднего значения ведет к увеличению (уменьшению) среднегодового числа дней с молниями WWLLN относительно метеосводок на ~1 день.

Большой корпус работ посвящен развитию методов исследования характеристик облаков и осадков на основе спутниковых наблюдений. В частности, развиваются методики восстановления характеристик облаков и осадков на основе пассивных спутниковых наблюдений, в том числе с российских космических аппаратов “Метеор-М № 2”, “Электро-Л” и “Арктика-М” [Андреев и др., 2019; Андреев и Шамилова, 2021; Асмус и др., 2019; Астафуров и Скороходов, 2021; Волкова и Кухар-

ский, 2020; Волкова и др., 2021; Готюр и др., 2020; Саворский, 2022; Скороходов, 2020; Тарасов, 2020; Филей, 2019а, 2019б, 2020; Шакина и др., 2021; Шишов и Горлач, 2020; Bloschchinskiy et al., 2020; Kostsov et al., 2019; Tarasenko et al., 2022]. Активно используются методы искусственных нейронных сетей [Андреев и др., 2019; Андреев и Шамилова, 2021; Астафуров и Скороходов, 2021; Волкова и др., 2021; Готюр и др., 2020; Скороходов и Курьянович, 2022; Bloschchinskiy et al., 2020]. Например, с помощью глубокой нейронной сети предложено определять куполообразные вершины над кучево-дождевой наковальной для определения очагов кучево-дождевой облачности [Готюр и др., 2020]. Вероятность обнаружения вершин составила 50–70%, частота ложного обнаружения 45–55%. Автоматизированное обнаружение очагов глубокой конвекции также обсуждается в [Шишов и Горлач, 2020].

Ряд методик разработан для радиометра МСУ-МР, установленного на борту российского гидрометеорологического спутника “Метеор-М” № 2. В том числе, разработан алгоритм определения оптической толщины и эффективного радиуса частиц облачности [Филей, 2019а], в основе которого лежат физические принципы использования коэффициентов спектральной яркости облачности на длинах волн 0.64 и 1.68 мкм. Представлен алгоритм определения фазового состояния облачности (капельное, кристаллическое и смешанное) по коэффициентам спектральной яркости на длинах волн 1.6 и 3.7 мкм и яркостным температурам на длинах волн 11 и 12 мкм [Филей, 2019б]. На основе сопоставления с другими методиками отмечено, что наибольшие неточности наблюдались для тонкой полупрозрачной облачности из-за дополнительного излучения, идущего от подстилающей поверхности, а также для смешанной облачности в силу специфики алгоритма. Разработана методика восстановления высоты верхней границы облачности [Филей, 2020], основанная на измерениях собственного излучения облака в расщепленном окне прозрачности атмосферы на длинах волн 11 и 12 мкм. Результаты сравнения восстановленных оценок высоты верхней границы облачности по данным МСУ-МР и по данным спутникового лидара CALIOP показали высокую согласованность.

На основе использования данных различных радиометров (установленных на спутниках NOAA, Метеор-М № 2, Meteosat) разработана и внедрена в оперативную практику в ФГБУ “НИЦ “Планета” технология диагноза параметров облачного покрова, суточных, месячных и годовых сумм осадков, опасных явлений погоды [Волкова и Кухарский, 2020; Волкова и др., 2021]. В основе технологии лежат оригинальные авторские методы автоматизированного порогового попиксельного дешифрирования и классификации спутниковой информации по косвенным признакам.

Отличительной чертой являются высокие оперативность (поступление результатов дешифрирования в базу данных менее чем через 0.5 мин) и периодичность (15 мин), а также возможность комплексного анализа синоптической ситуации на большой площади. Технология испытана и внедрена в оперативную работу.

Продолжает развиваться подход классификации облачности по разным типам на основе спутниковых данных в том числе в ночное время [Скороходов, 2020; Астафуров и Скороходов, 2021]. Приведена объединенная классификация распознаваемых разновидностей облаков. Предложена статистическая модель текстуры изображений разных типов облачности и ее физических параметров на основе двухпараметрических распределений. Представлено описание алгоритма обнаружения атмосферных фронтов и определения их типов по спутниковым данным, приведены результаты его апробации для территории Западной Сибири.

Предложен алгоритм восстановления высоты нижней границы облаков на основе пассивных наблюдений из космоса, основанный на применении адаптированной самоорганизующейся карты Кохонена [Скороходов и Курьянович, 2022]. На этапе обучения нейронной сети используются данные пассивного дистанционного зондирования MODIS и лидарные наблюдения CALIOP, а при кластеризации изображений – только снимки MODIS и тематические продукты их обработки. Определены ключевые признаки кластеризации, одним из которых выступает геометрическая толщина облаков. Приведены ограничения разработанного алгоритма и перспективные направления его доработки с привлечением дополнительной информации. В целом показано, что результаты восстановления высоты нижней границы облачности по данным MODIS хорошо согласуются с измерениями CALIOP над исследуемым регионом для тонких облаков нижнего и верхнего ярусов с оптической толщиной меньше 15.

Ряд результатов получен на основе использования активных спутниковых наблюдений [Скороходов и Коношонкин, 2022], наблюдений за гравитационным полем Земли [Данилова и Онучин, 2019] и данных глобальных навигационных спутниковых систем [Хуторова и др., 2019, 2022]. Так, в [Данилова и Онучин, 2019] представлена методика оценки ежегодного пространственного распределения твердых атмосферных осадков с использованием данных спутниковых измерений за гравитационным полем Земли GRACE в ячейках координатной сетки с шагом  $1^\circ$  по широте и долготе, позволяющих рассчитывать водный эквивалент в земной толще, включая запасы воды в снежном покрове. На основе выявленных закономерностей в районе исследований и пространственной детализации возможно построение ежегодных растровых карт распределения количества твердых атмосферных осадков с простран-

ственным разрешением до 90 м. В [Хуторова и др., 2019, 2022] обсуждается принципиальная возможность мониторинга конвективных процессов с помощью приемников спутниковых навигационных систем.

## 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ

Остаются актуальными научные задачи, связанные с достоверным численным моделированием процессов формирования, роста и диссипации облаков, формирования и выпадения осадков. Решение этих задач важно как для краткосрочного и среднесрочного прогноза погоды, включая прогноз опасных явлений, связанных с осадками, так и для долгосрочного прогноза климата, учитывая, что реакция облаков на внешнее воздействие по-прежнему является основной причиной неопределенности в оценке чувствительности климата к таким воздействиям.

Различные вопросы моделирования облаков и облачных процессов в том числе в глобальных и региональных моделях климата рассматриваются в работах [Ашабоков и др., 2020; Володин, 2021; Галин и Дымников, 2019; Елисеев и др., 2019; Михайловский и др., 2019; Полюхов и др., 2022; Прессман, 2021; Lesev et al., 2021; Volodin, 2021; Yakovleva et al., 2021], моделированию осадков посвящены работы [Пискунов и др., 2022; Торопов и др., 2022].

Исследовано влияние изменений параметризации облачности на равновесную чувствительность климата в глобальной климатической модели ИВМ РАН [Volodin, 2021] – модели INM-CM4-8, обладающей самой низкой чувствительностью среди всех моделей ансамбля CMIP6. Показано, что обоснованные изменения в параметризации облачности могут приводить к изменению чувствительности в модели в пределах от 1.8 до 4.1 К, что составляет более половины интервала для ансамбля моделей CMIP6. За увеличение чувствительности отвечают три основных механизма: увеличение диссипации облачности в более теплом климате из-за увеличения дефицита водяного пара в безоблачной части ячейки, ослабление процессов образования облачности в атмосферном пограничном слое в теплом климате и быстрая реакция облаков на рост концентрации  $\text{CO}_2$  из-за изменения стратификации атмосферы. При учетверении концентрации  $\text{CO}_2$  изменения в параметризации облачности могут приводить к изменению равновесной чувствительности модели INM-CM4-8 в пределах от 3.6 до 8.1 К [Володин, 2021]. Также в модели ИВМ РАН обновлена параметризация облачно-аэрозольного взаимодействия [Полюхов и др., 2022], в которой учитывается содержание сульфатного аэрозоля. Показано, что учет сульфатного аэрозо-

ля позволяет корректно воспроизводить изменения облачного пропускания с 1980 по 2005 г. по сравнению с данными наблюдений. Среднеглобальный радиационный форсинг за счет непрямого аэрозольного воздействия составил по модельным данным  $-0.13 \text{ Вт/м}^2$  для 2005 г. относительно 1850 г.

Формулируется метод динамико-стохастической параметризации балла неконвективной облачности в модели общей циркуляции атмосферы исходя из общих предположений о распределении полей влажности внутри ячейки интегрирования [Галин и Дымников, 2019]. Сравнение результатов расчетов с данными наблюдений CALIPSO показывает разумность использования данной параметризации.

Предложена модель орографической компоненты осадков, основанная на алгоритме расчета скорости конденсации водяного пара в воздухе, вынужденно поднимающемся вдоль горного склона [Торопов и др., 2022]. В модели учтены затухание вертикальной компоненты скорости ветра, инициированной рельефом, в зависимости от стратификации, а также доля влаги, выпадающей в виде осадков, от общей массы конденсата. В качестве начальных данных применяется информация реанализа ERA5 (температура, характеристики влажности, компоненты скорости ветра). Показано, что предложенный алгоритм удовлетворительно воспроизводит синоптическую изменчивость осадков, их сезонный ход и климатическую изменчивость, а также пространственное распределение по склонам Эльбруса. Предложенная модель может применяться для расчета годовой аккумуляции на горных ледниках и в глобальных климатических моделях в качестве параметризации орографических осадков.

Развивается моделирование конвективных процессов в облаках [Елисеев и др., 2019; Михайловский и др., 2019; Ашабоков и др., 2020, 2021; Lesev et al., 2021]. В частности, в [Lesev et al., 2021] представлена трехмерная численная модель конвективного облака с учетом электрических процессов, использующая детальные микрофизические уравнения с несколькими десятками классов капель и кристаллов. Модель учитывает 61 категорию размеров капель и 75 категорий размеров кристаллов. Модель была использована для количественной оценки влияния электрических процессов на формирование осадков. Определены пространственное распределение и количественные значения объемных электрических зарядов и напряженности поля в облаке и вокруг него в последовательные моменты времени в процессе эволюции. Также продолжает развиваться трехмерная модель конвективного облака, разработанная в Главной геофизической обсерватории (см., напр. [Михайловский и др., 2019]), с помощью которой получен ряд важных оценок различных характеристик конвективных облаков (см. раздел 2).

Разработана модификация схемы Прайса–Ринда для вычисления частоты молний, которая может быть использована при расчетах с большим шагом по времени и пространству [Елисеев и др., 2019]. При таких шагах по времени и пространству показатель степени в зависимости частоты вспышек от высоты конвективных облаков оказывается меньше в 2 раза над сушей и на четверть над океаном, чем в исходном варианте схемы Прайса–Ринда. Модифицированная версия схемы внедрена в климатическую модель ИФА РАН. Результаты расчетов характеристик молниевой активности с модифицированной схемой лучше согласуются со спутниковыми данными для частоты молний, чем с исходной версией. Показано, что при глобальном потеплении (похолодании) частота молний увеличивается (уменьшается) по модельным расчетам во все сезоны. Чувствительность частоты молний к изменению приповерхностной температуры атмосферы на глобальном уровне получена равной  $10\%/K$ .

Одной из основных целей моделирования облаков и осадков является повышение качества и заблаговременности их прогноза. Значительное внимание уделяется развитию методов заблаговременного прогноза опасных конвективных явлений, учитывая отечественный и мировой опыт. Различные аспекты прогноза характеристик облаков с помощью разных моделей и методов обсуждается в [Алехин и др., 2020, 2022; Иванова, 2021; Шатунова и др., 2019]. Ряд работ посвящен прогнозированию осадков, в том числе экстремальных, как с помощью моделей (COSMO-Ru2, ПЛАВ, WRF) с целью краткосрочного и среднесрочного прогнозирования [Ветров и Костарев, 2021; Кагермазов и др., 2019; Калинин и Сивков, 2022; Калинин и др., 2019; Свиязов и Ветров, 2021; Тищенко и др., 2019; Травова и др., 2020], так и с привлечением спутниковых данных и данных метеорологических радиолокаторов с целью сверхкраткосрочного прогнозирования (наукастинга) [Иванова, 2019; Иванова и Денисенко, 2020; Муравьев и др., 2019, 2022а, 2022б, 2022в; Рубинштейн и др., 2019; Andreev et al., 2020]. Помимо прогноза сильных осадков, существенный интерес также представляет прогноз других опасных конвективных явлений [Алексеева, 2020; Алексеева и Лосев, 2019; Анискина и др., 2022; Губенко и Рубинштейн, 2020; Дементьева и др., 2020; Кагермазов и Созаева, 2020, 2022; Калинин и др., 2019; Калмыкова и др., 2019; Торопова и Русин, 2019; Торопова и др., 2022], тумана [Костромитинов и Яременко, 2022], гололедных явлений [Игнатов и др., 2020, 2022], а также общие вопросы оценки качества прогноза [Калинин и др., 2022; Кисельникова, 2021].

Прогноз характеристик облаков важен для функционирования авиации. В [Иванова, 2021] представлен обзор работ, посвященных влиянию внутриоблачного обледенения на работу авиаци-

онного транспорта. Обсуждаются проблемы наземного обледенения, приводящего к ухудшению состояния взлетно-посадочных полос и усложнению предполетных аэродромных работ. Рассматриваются причины обледенения воздушных судов в полете, средства и методы наблюдения за обледенением, подходы к прогнозированию. Анализируются методы прогноза обледенения двигателей воздушных судов в зонах высокой концентрации ледяных кристаллов. В [Игнатов и др., 2020, 2022] предложено использовать теплобалансовую модель и модель WRF-ARW для прогноза гололедных явлений и максимальной толщины гололеда. В [Алехин, 2020] обсуждается возможность использования полуэмпирического метода прогнозирования общего количества облаков в практике метеорологического обеспечения авиации, основанного на информации о дефиците точки росы. Метод прогнозирования тумана на основе модели сверточных нейронных сетей на основе данных метеорологических и аэрологических наблюдений за предшествующие 12 ч предложен в [Костромитинов и Яременко, 2022]. Показано, что описанный метод позволяет прогнозировать возникновение и рассеяние тумана, в том числе на аэродромах, с заблаговременностью от 3 до 12 ч.

Существенное влияние на авиацию оказывает грозовая активность. В [Иванова, 2019] представлен обзор работ, посвященный истории развития и современному состоянию технологий наукастинга гроз. Показаны роль информации о грозах, получаемой от различных источников — спутников, радаров, грозопеленгаторов, наземных микроволновых радиометров, и значение выходной продукции численных моделей прогноза погоды для наукастинга гроз. Обсуждаются особенности систем наукастинга грозовых штормов, используемых мировыми метеослужбами. В [Иванова и Денисенко, 2020] проанализированы ситуации с грозами на московских аэродромах с использованием карты опасных явлений ДМРЛ-С Внуково, информации установленных на аэродромах грозопеленгаторов и выходной продукции модели COSMO-Ru02 для территории Центрального федерального округа с высоким временным разрешением. Обсуждается согласованность информации о грозах, представленной различными источниками информации и возможность прогнозирования грозы на масштабах так называемого “ближнего” наукастинга (с заблаговременностью до 2 ч). В цикле работ [Муравьев и др., 2019, 2022а, 2022б, 2022в] обсуждаются результаты испытаний оперативной системы наукастинга осадков Гидрометцентра России в различные периоды года на основе на основе данных радиолокаторов на Европейской территории России. Выявлены особенности наукастинга зимних осадков в условиях их более слабой интенсивности по сравнению с летними осадками. Отмечены проблемы объектно-ориентированной

верификации прогнозов областей осадков с привлечением методов теории экстремальных величин.

Объектно-ориентированная оценка качества воспроизведения и прогнозирования осадков также проведена в [Кисельникова, 2021] для модели COSMO-Ru2 и в [Калинин и др., 2019, 2022] для модели WRF. В [Калинин и др., 2019] на примере воспроизведения сильных осадков в Пермском крае на основе модели WRF показано, что при прямом моделировании конвекции воспроизводятся локальные зоны интенсивных осадков, причем их максимальная интенсивность оказывается близкой к фактическим значениям. При моделировании с использованием любой параметризации конвекции (за исключением схемы Каина–Фритша) площадь зон осадков существенно завышается, а максимальная интенсивность занижается, что ведет к снижению числа ложных тревог при прогнозе сильных ливней. В [Рубинштейн и др., 2019] представлены результаты усвоения данных грозопеленгационных наблюдений в модели WRF. Установлено, что средние абсолютные ошибки для всех величин благодаря учету гроз уменьшаются. Показано, что при учете данных грозопеленгации конфигурация полей прогностических осадков и их интенсивность заметно приближается к наблюдаемым и в областях, где наблюдались грозы, и в областях их отсутствия. Особенно ярко это прослеживается для осадков слабой интенсивности (0–7 мм). Данные грозопеленгации также успешно используются для верификации модельного прогноза конвективных явлений [Дементьева и др., 2020]. Совместное использование модельных данных, а также данных спутниковой и радиолокационной информации (хотя и без усвоения этих данных в модели) для расчета максимальной скорости конвективных потоков в облаках рассматривается в [Алексеева и Лосев, 2019; Алексеева, 2020]. Показано, что диагностические расчеты максимальной конвективной скорости на основе спутниковой и радиолокационной информации позволяют уточнить краткосрочный прогноз опасных конвективных явлений погоды, особенно места и времени их возникновения. Предлагаемый подход используется в методах прогноза опасных конвективных явлений погоды в летний период года, внедренных в оперативную практику Гидрометцентра России.

Развивается ансамблевый подход для прогнозирования сильных осадков и грозовой деятельности. Преимущества и особенности такого подхода оцениваются в [Ветров и Костарев, 2021; Торопова и др., 2022]. Предложена техника ансамблевого мультимодельного прогнозирования сильных летних осадков в Пермском крае с заблаговременностью 15 и 27 ч по глобальным гидродинамическим моделям GFS, GEM и ICON [Ветров и Костарев, 2021]. Показано, что осреднение по ансамблю глобальных моделей приводит к существенному сокращению числа ложных тревог.

Разработана схема комбинирования глобальных моделей, заключающаяся в фильтрации прогнозов сильных дождей по модели GEM и в использовании в оставшихся точках средних значений по моделям GFS, GEM и ICON. Применение схемы позволяет повысить надежность краткосрочных прогнозов сильных фронтальных дождей летнего периода в Пермском крае в сравнении с любой из моделей в отдельности. В [Торопова и др., 2022] представлены результаты ансамблевого прогноза развития грозовых облаков с использованием модели конвективного облака малой размерности. Показано, что внесение возмущений в начальные данные приводит к развитию облаков с различными характеристиками, при этом изменения выявлены как для максимальных величин в ходе развития облака, так и в самой динамике развития ячеек при переходе в грозовую стадию. Наибольшая изменчивость отмечена для микрофизических параметров осадков и вертикальных скоростей в облаке.

Возможности и недостатки прогноза опасных конвективных явлений, включая осадки, шквалы, град, смерчи на основе тех или иных предикторов (индексов неустойчивости) обсуждаются в [Кагермазов и Созаева, 2020, 2022; Калинин и Сивков, 2022; Калмыкова и др., 2019; Торопова и Русин, 2019]. В цикле работ [Кагермазов и Созаева, 2020, 2022] предложено использовать выходные поля модели GFS NCEP с разной заблаговременностью и методы статистического анализа для прогноза града и определение его максимального размера. В [Торопова и Русин, 2019] рассмотрена задача воспроизведения стратификации атмосферы при помощи численной модели прогноза погоды WRF. Рассматриваются погрешности воспроизведения стратификации на различных вертикальных уровнях (как у земли, так и для средней и верхней тропосферы) и при различных погодных условиях (гроза и кучевая облачность “хорошей погоды”). Показано, что существуют погрешности в приземных значениях температуры и температуры точки росы, а также погрешности в оценке влажности нижней и средней тропосферы, что можно привести к ошибкам в прогнозе конвекции. В [Калмыкова и др., 2019] предложена методика автоматизированного краткосрочного прогноза смерчопасных ситуаций по данным композитного индекса неустойчивости (на основе выходных полей модели COSMO-Ru2), а также дальнейшего распознавания смерчопасных областей в реальном времени по радиолокационным и спутниковым наблюдениям. Обоснована принципиальная возможность выдачи предупреждений о возникновении водных смерчей в автоматическом режиме. Успешность использования методики также обсуждается в [Калмыкова и др., 2021].

Важной научно-практической задачей является прогноз осадков, в том числе паводкообразующих, с заблаговременностью несколько месяцев. В [Ти-

щенко и др., 2019] обсуждается возможность прогноза осадков в бассейне р. Амур с помощью модели ПЛАВ. Показано, что полученные прогностические значения сумм осадков имеют более высокую оправдываемость по сравнению с исходными прогнозами в узлах сетки. Выявлена достаточно высокая оправдываемость таких прогнозов для июля и августа — месяцев, критических для формирования паводков на р. Амур. Предложена процедура статистической коррекции месячных и сезонных прогнозов осадков по модели ПЛАВ и регрессионная схема прогноза стока р. Амур.

## 6. АКТИВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЛАКА. МЕТОДЫ, РЕАГЕНТЫ ЗАСЕВА И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

История и анализ развития работ в Гидрометслужбе России, связанных с активными воздействиями (АВ) на гидрометеорологические процессы, опубликованы в обзорах за 2019–2022 гг. [Абшаев и др., 2022; Берюлев и Данелян, 2021; Боброва, 2022; Ковалев и др., 2022; Корнеев и др., 2022; Лиев и Кушев, 2022; Малкарова, 2022; Черноус, 2022; Flossmann et al., 2019], где рассмотрены работы нескольких последних десятилетий, касающиеся предотвращения градобитий, борьбы с лавиной опасностью, с туманами и результатов исследований с целью регулирования осадков различного генезиса. Выпадение осадков регулируется во время проведения массовых культурных или спортивных мероприятий, а также для нужд сельского хозяйства — для обеспечения осадками посевных территорий. В зависимости от ситуации используется один из методов АВ: *увеличение осадков* для агропромышленного комплекса с использованием методов: микрофизического засева; динамического засева; *уменьшение осадков* с использованием методов: рассеяния слоистообразной облачности; стимулирования выпадения осадков на наветренной стороне от защищаемой территории путем засева облаков для образования “тени” осадков; интенсивного засева (“перезасева”) натекающей на защищаемую территорию осадкообразующей облачности для снижения в ней эффективности осадкообразования, а также разрушения мощных кучево-дождевых облаков динамическим способом. Данные методы разрабатываются и совершенствуются в том числе научно-исследовательскими коллективами Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) и Высогогорного геофизического института (ВГИ). В частности, в ВГИ получены научно-практические результаты в области защиты от градобития сельскохозяйственных культур, в ЦАО совершенствуется технология искусственного регулирования осадков на больших территориях в интересах агропромышленного комплекса, энергетики, дорожного и коммунального хозяйства, противопожарных работ. Исследования в области искусственного

регулирования атмосферных осадков здесь начались с 1948 г. с работ лауреата Государственной премии СССР И.И. Гайворонского. В 2022 г. отмечался юбилей (55-й год) начала проекта по борьбе с градом в нашей стране, стартовавший по постановлению Совета Министров СССР 1967 г. В связи с юбилеем, выпуски журнала “Метеорология и гидрология” №№ 7 и 8 за 2022 г., целиком посвящены вопросам АВ.

Важной составляющей в работах планирования АВ для увеличения осадков является оценка эффективности воздействия. Данная оценка включает в том числе задачу определения периодов максимального развития и продолжительности существования облачности, подходящей для выбранного метода воздействия. Предварительно анализируются климатические данные об условиях образования облаков: вертикальные профили и градиенты температуры, влажности. Фактическое состояние объекта воздействия определяют исключительно по данным самолетного зондирования: водность облаков, водозапас, фазовую структуру, высоту нижней и верхней границ облака, ветер, температурные характеристики, осадки, облечение (см. также раздел 3). При правильном выборе периода воздействия и наличия облачности, содержащей ресурс влаги достаточный для дополнительного осаднения, задача воздействия конкретным методом может быть успешно решена.

Результаты многолетних исследований ЦАО по проблеме искусственного увеличения количества осадков представлены в [Берюлев и Данелян, 2021]. Исследования проходили на специально оборудованных метеорологических полигонах, расположенных в разных географических районах, что позволило получить экспериментальное подтверждение эффективности воздействий в разных климатических зонах и разработать технологию искусственного увеличения количества осадков.

С целью увлажнения посевов зерновых, страдающих от засух в Южном регионе, Поволжье и в районах Северного Кавказа, разрабатывается методика выявления ресурсной облачности [Данелян и др., 2021a] и определяются наиболее эффективные периоды для АВ. На основе данных многолетних наблюдений показано, что учитывая условия вегетации озимой пшеницы, продолжительность периода с облачностью пригодной для АВ не превышает 11–15 дней, а ожидаемый прирост влаги в виде осадков может колебаться от 10 до 27 мм в весенне-летний период и от 6 до 25 мм в зимний.

На основе самолетного зондирования атмосферы над Москвой в [Доронин и др., 2019, 2020] даны оценки пригодности переохлажденных волнистообразных, слоистообразных и конвективных облаков для АВ над центром Европейской территории России, которые могут использоваться для планирования и проведения мероприятий по АВ на эти формы облаков. Эффективность воздействия на конвективные облака льдообразующи-

ми реагентами для увеличения осадков, с использованием трехмерной численной модели конвективного облака, рассматривается в [Дрофа и др., 2020]. На примере облачности, характерной для двух различных регионов России, выявлены условия получения максимально возможного количества дополнительных осадков, при небольших расходах реагента, включающие наличие в облаках достаточно больших площадей с переохлажденными жидко-капельными зонами, где при внесении искусственных ядер кристаллизации создаются необходимые условия эффективного преобразования облачных капель в ледяные частицы. Выявление ресурсной облачности для получения дополнительных осадков гигроскопическими реагентами предложено также в [Дрофа и др., 2022] с использованием методики мониторинга и краткосрочного прогнозирования.

Анализируется увеличение электрической активности в конвективных облаках после проведения воздействий льдообразующими кристаллизующим реагентом AgJ [Синькевич и др., 2020, 2021]. Электрическое состояние определялось на основе анализа частоты молниевых разрядов, которая рассчитывалась по радиолокационным характеристикам исследуемых облаков. Анализ свидетельствует об увеличении электрической активности в облаках после проведения АВ, которая может выражаться через увеличение частоты молний. В [Алита и Борисова, 2020; Михайловский и др., 2021] отмечено, что в целом любые воздействия на облака приводят к изменению всех процессов: электрические процессы в облаках тесно связаны с микрофизическими параметрами и динамикой облака и оказывают существенное влияние на динамику потоков и формирование осадков, в том числе и града. Представлен обзор физических гипотез, лабораторных и натурных полевых экспериментов по исследованию возможности воздействия на электрические процессы в облаках. Показано, что наиболее обоснованы теоретически и подтверждены экспериментально работы с помощью воздействия льдообразующим реагентом, который позволяет воздействовать на количество и размеры крупных ледяных частиц, а они в свою очередь, определяют интенсивность процессов электризации облака.

Исследовано влияние кристаллизующего засева на грозовые характеристики 40 градовых и градоопасных облаков [Абшаев и др., 2022]. Анализируется объем радиоэха облака с отражаемостью более 35 дБZ выше уровня нулевой изотермы. Получено, что ракетный засев градовых и градоопасных облаков кристаллизующим реагентом приводит к статистически значимым изменениям характеристик облаков: увеличению в 4.4 раза частоты внутриоблачных разрядов, увеличению в 3.7 раза частоты разрядов облако–земля отрицательной полярности и почти полному прекращению разрядов облако–земля положительной по-

лярности, что свидетельствует о возможности искусственного регулирования их грозовой активности. Строение облака и его эволюция в разные моменты времени в естественных условиях и при АВ исследуются на основе численных экспериментов с использованием разработанной модели конвективного облака [Беккиев и др., 2022]; в частности, смоделирован засев облака с использованием функций источников искусственных кристаллов, которые имитируют АВ.

Совершенствуются реагенты и технические средства для АВ [Хучунаев и др., 2020, 2021а, 2021б, 2021в; Шилин, 2021; Шилин и др., 2021а, 2021б; Шилин и Хучунаев, 2022а, 2022б]. Отмечено, что при проведении АВ на облачные системы, наличие в атмосфере электрического поля и заряда на частицах реагента может влиять на удельный выход льдообразующих ядер [Хучунаев и др., 2021в]. Это влияние необходимо учитывать при определении дозировки реагентов и эффективности воздействия. Представлены результаты исследований изменения льдообразующих свойств природных и антропогенных аэрозолей, содержащих алюмосиликаты, при воздействии йода [Шилин и др., 2022]. Показано, что пары йода могут увеличивать льдообразующую активность естественных аэрозолей, в частности имеющих в составе алюмосиликатные структуры.

Аэрозольные генераторы все чаще используются в мировой практике АВ на облака с целью искусственного регулирования осадков и предотвращения града. В [Бычков и др., 2022] приведены теоретические и экспериментальные оценки распространения реагента в пограничном слое атмосферы при работе наземных аэрозольных генераторов: концентрация йодистого серебра становится выше фоновых значений до высоты 1200 м на удалении от 3 до 9 км от места установки генератора. Эксперимент по искусственному увеличению количества осадков на территории Республики Крым показал, что при прохождении облачности над генераторами происходило увеличение высоты ее верхней границы, максимальной отражаемости и интенсивности осадков, что свидетельствует о положительном эффекте воздействия на облачность. Использование генераторов может быть дополнением к самолетному методу, особенно при проведении воздействий на облака ночью и в регионах с горным рельефом. В традиционно используемых при проведении АВ генераторах [Шилин и Хучунаев, 2022] в определенных условиях возможно вторичное воспламенение продуктов горения с практически полным выгоранием активных веществ и значительным, на несколько порядков, снижением льдообразующей активности полученного аэрозоля. Обсуждается возможность значительного сокращения этого недостатка посредством изменения как физических, так и химических свойств льдообразующего аэрозоля.

Искусственные осадки также используются для понижения класса пожароопасности: впервые Центральной аэрологической обсерваторией было выполнено экспериментальное применение современной технологии искусственного увеличения атмосферных осадков в целях увлажнения обширных территорий Республики Саха (Якутия) для понижения класса пожароопасности на этих территориях. Авиационные работы осуществлялись с применением самолетов–лабораторий Як-42Д “Росгидромет” и Ан-30М в период с 14 мая по 09 августа 2022 г. Было выполнено 27 полетов с общим налетом 142 ч. 42 мин. На фоне применения технологии искусственного увеличения атмосферных осадков [Берюлев и Данелян, 2021] в целях предупреждения возникновения пожаров и предупреждения увеличения класса пожароопасности, количество пожаров на территории Республики Саха (Якутия) в 2022 г. по сравнению 2021 годом уменьшилось в 2.8 раз, площадь, пройденная огнем всех пожаров, уменьшилась в 17 раз, при этом количество дней с наивысшим классом пожарной опасности в 2022 г. по сравнению с 2021 г. уменьшилось в 4.08 раза, а по сравнению со средним многолетним за период с 2017 по 2021 гг. в 2.3 раза. В целом отмечается высокая эффективность АВ для снижения пожарной опасности; в 2017–2021 гг. на большей части Сибири и Дальнего Востока фактическая сумма осадков в 1.4–1.5 раза превышала ожидаемое количество осадков, осредненное по данным прогностических моделей [Ковалев и др., 2022].

Важным направлением АВ является борьба с градобитием. Краткие сведения по истории развития противогорадовых работ в СССР и Российской Федерации представлены в [Абшаев и др., 2022; Лиев и Кушев, 2021], включая основные положения применяемой в настоящее время автоматизированной ракетной технологии предотвращения града, характеристики современной системы противогорадовой защиты на Северном Кавказе, результаты оценки ее эффективности, основные проблемы и рекомендации по дальнейшему совершенствованию. В направлении исследования механизмов образования града и градозащиты имеют место научные дискуссии об используемых методах и производимом ими эффекте, рассматриваются технические проблемы, анализируются статистические характеристики эффекта воздействия. Отдельные недостатки градозащиты связываются как с организационно-техническими причинами, так и с несоответствием концепции ускорения осадкообразования физике образования и развития конвективных облаков. Отмечена возможность объяснения эффекта градозащиты полной кристаллизацией облачной влаги. Анализ экономической эффективности противогорадовых работ за 2016–2020 гг. представлен в [Лиев и Кушев, 2021].

Предложена концепция расположения дополнительно мобильных пунктов воздействия на градовые процессы [Жарашуев, 2022] с целью выявления слабых мест, обусловленных неподвижностью стационарных пунктов, на основе анализа годовых отчетов Ставропольской военизированной службы за 2010–2019 гг. Разработаны методы и программы для оптимизации порядка радиолокационных наблюдений при противоградовых работах на основе метода автоматической идентификации конвективных ячеек и контроля их параметров [Кузнецов и др., 2019]. Ведутся работы в области математического моделирования, моделируется размер градин при воздействии на облака.

Результаты работ в борьбе с лавинами и многолетние экспериментальные исследования в высокогорных условиях помогли разработать технологию предупредительного спуска снежных лавин на основе прогноза лавиноопасности, диагноза состояния снега и с использованием динамического воздействия на устойчивость снега [Аджиев, 2022]. В [Черноус, 2022] проанализирован 90-летний опыт предупредительного спуска лавин в Хибинах и аналогичные методы работ в других регионах, которые основаны на воздействии взрывов, нарушающих устойчивость снежного покрова. Разные авторы, обсуждая состояние проблемы, считают, что несмотря на длительный опыт, научная основа этих методов все еще развита недостаточно. Недостаточная изученность механизмов возникновения лавин, а также большая пространственная изменчивость свойств снега, и его устойчивость в лавинном очаге, являются основными препятствиями для решения этих проблем. В [Боброва, 2022] изложена 70-летняя история исследования лавин на Сахалине, основные этапы противолавинной деятельности, создание специальных организаций и структур, деятельность которых направлена на снижение лавинной опасности. Задачи исследования лавинной опасности также решаются с помощью моделирования: в [Болгов, 2022] приведено описание трехмерной модели движения лавин — представлены предварительные результаты моделирования движения лавины применительно к реальному рельефу местности лавиноопасного участка на территории горнолыжного курорта Приэльбрусья.

Продолжается исследование процессов образования и рассеяния туманов, изучение статистических данных о повторяемости и интенсивности туманов, особенно в районах ключевых транспортных узлов, крупных технических сооружениях, близ аэродромов и на магистралях [Алексеева и др., 2022; Баззаев и др., 2021; Данелян и др., 2021б]. Подобные исследования базируются на механизме укрупнения в тумане частиц гигроскопических реагентов, генерируемых пиротехническими изделиями. Разрабатываются автоматизированные системы рассеяния переохлажденных туманов хладореагентами (жидкий азот, жидкая

углекислота). В НПО “Тайфун” и Институте прикладной геофизики развивается способ рассеяния теплых туманов путем использования сеточных электрофильтров [Андреев и др., 2021]. В [Алексеева и др., 2022] исследуется возможность экспериментальной проверки влияния ионного ветра на инициацию движения в первоначально неподвижном теплом тумане в замкнутом объеме.

Наряду с изучением искусственного регулирования атмосферных осадкообразующих процессов проводились исследования возможности воздействия на природный аридный ландшафт с целью увеличения или создания искусственных осадков. Моделирование на основе региональной модели WRF [Mostamandi et al., 2022] показало, что с помощью геоинженерных методов (например, лесоразведением), можно, изменяя характеристики подстилающей поверхности, менять бризовую циркуляцию и, как следствие, влиять на осадки. Согласно полученным оценкам, понижение альбедо поверхности до 0.2 над прибрежными равнинами увеличивает приземную температуру воздуха на 1–2 К, что вследствие усиления температурного контраста между морем и сушей и интенсификации бриза, может увеличить влажность воздуха (отношение смеси) в пограничном слое выше 3 км на ~0.5 г/кг, усилить вертикальное перемешивание в планетарном пограничном слое сгенерировать дополнительно 1.5 Гт дождевой воды, что эквивалентно годовому потреблению пяти миллионов человек. По мнению авторов, внедрение такой формы региональной геоинженерии наряду с использованием передовых методов сбора и хранения пресной воды, сможет решить задачу адаптации засушливых прибрежных районов к условиям нехватки пресной воды.

Очевидно, что подобные работы выдвигают совершенно новую парадигму — новую модель рациональной деятельности, ставящей перед научным сообществом новые задачи, решение которых позволит создавать осадки искусственно, не ограничиваясь только усилением их природной интенсивности. Как считают авторы, наблюдаемый прогресс в понимании облачных процессов и явные достижения в исследованиях по усилению осадков, с одной стороны побуждают к расширению подобных исследований от масштаба облака до попыток воздействия на облачность в масштабе водосбора на земле, с другой стороны указывают на пробелы в наших знаниях, которые должны стать актуальными темами дальнейших исследований для продвижения вперед в создании искусственных осадков [Abshaev et al., 2020, 2022; Flossman et al., 2019; Liang et al., 2019]. В частности, на основе численных экспериментов оценивается возможность достижения уровня конденсации от воздействия искусственной горячей струей за счет введения в струю гигроскопических аэрозолей (предлагается использовать двухслойный аэрозоль  $\text{NaCl/TiO}_2$ , способный по-

глошать водяной пар в количестве, значительно превышающем его массу) с дальнейшим восполнением струи теплом конденсации водяного пара, что позволит расширить границы благоприятных условий для создания искусственных облаков при вертикальном градиенте температуры  $>8^\circ\text{C}/\text{км}$ , достаточно слабом ветре в подоблачном слое и при влажности воздуха от 65% [Abshaev et al., 2019, 2022]. Данный совместный проект ученых из России и ОАЭ рассматривался на 6-м Международном форуме по увеличению осадков (<https://iref.ae/>) и вызвал большой интерес в научном сообществе. Запланированные авторами полевые эксперименты помогут проверить модельные расчеты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Синькевич А.А. и др. Исследования влияния кристаллизующего засева на грозовую активность конвективных облаков // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 46–58.
- Абшаев А.М., Аджиев А.Х., Веремей Н.Е. и др. Развитие электризации конвективного облака по данным эмпирической и численной моделей // Труды ВКА им. Можайского. 2020. № S674. С. 68–74.
- Абшаев М.Т., Абшаев А.А., Синькевич А.А. и др. Об особенностях развития суперячейкового конвективного облака в стадии максимальной грозовой активности (19 августа 2015 г., Северный Кавказ) // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 96–110.
- Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Циканов Х.А. Защита сельскохозяйственных растений от градобития на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 11–27.
- Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Михайловский Ю.П. и др. Исследование особенностей развития процессов электризации и градообразования в суперячейковом облаке дистанционными радиофизическими средствами // Труды ГГО. 2020. № 596. С. 96–130.
- Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Кулиев Д.Д. и др. Аппаратно-программный комплекс для мониторинга электрических и грозовых явлений в атмосфере // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. № 4(36). С. 5–11.
- Аджиев А.Х., Докукин М.Д., Кондратьева Н.В., Кумукова О.А. Активные воздействия на снежные лавины. Результаты исследований и оперативно-производственных работ // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 5–13.
- Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Гятов Р.А., Керефова З.М. Взаимосвязь числа дней с грозой и продолжительности гроз по данным визуальных и инструментальных наблюдений // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2020. № 3(207). С. 30–36.
- Аквилонова А.Б., Егоров Д.П., Кутуза Б.Г., Смирнов М.Т. Изучение характеристик облачной атмосферы по результатам измерений спектров ее нисходящего СВЧ-излучения в области резонансного поглощения водяного пара 18.0–27.2 ГГц // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 66–77.
- Алексеева А.А. Особенности условий возникновения активной конвекции с сильными шквалами // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2(372). С. 41–58.
- Алексеева А.А. Способы оценки максимальной конвективной скорости в диагностике и прогнозе опасных конвективных явлений погоды // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2(376). С. 6–22.
- Алексеева А.А., Бухаров В.М., Васильев Е.В., Лосев В.М. Диагностика шквалов в снежных зарядах по данным доплеровских метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3(377). С. 6–18.
- Алексеева А.А., Бухаров В.М., Лосев В.М. Диагноз сильных шквалов на основе данных ДМРЛ-С и результатов численного моделирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 3(381). С. 6–23.
- Алексеева А.А., Бухаров В.М., Лосев В.М. Конвективный шторм в Московском регионе 28 июня 2021 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 1(383). С. 22–42.
- Алексеева А.А., Лосев В.М. Прогноз опасных конвективных явлений погоды в летний период года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4(374). С. 127–143.
- Алексеева А.А., Песков Б.Е. Физико-синоптические предикторы, определяющие формирование сильных ливневых осадков // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 3(381). С. 24–43.
- Алексеева А.В., Давыдов В.Е., Зинкина М.Д. и др. Лабораторный эксперимент по исследованию воздействия ионного ветра коронного разряда на теплый туман в замкнутом объеме // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 120–124.
- Алехин С.Г. Полуэмпирический метод краткосрочного прогнозирования общего количества облаков // Труды ВКА им. Можайского. 2020. № 672. С. 148–157.
- Алехин С.Г., Иванов Р.Д., Шемелов В.А. Метод построения прогностических уравнений для определения высоты нижней границы облачности на основе полуэмпирических зависимостей // Труды ВКА им. Можайского. 2022. № 684. С. 62–68.
- Алешина М.А., Семенов В.А. Изменения характеристик осадков на территории России в XX–XXI вв. по данным ансамбля моделей CMIP6 // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8. № 4. С. 424–440.
- Алешина М.А., Семенов В.А., Чернокульский А.В. Исследование роли глобальных и региональных факторов в изменении экстремальности летних осадков на Черноморском побережье Кавказа по результатам экспериментов с моделью климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2019. Т. 3. С. 59–75.
- Алига С.Л., Аннаева Ж.Ю. О пространственной эволюции области градообразования в одноячейковых градовых облаках // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2021. № 601. С. 116–124.
- Алига С.Л., Борисова Н.А. Разработка концепции расположения мобильных пунктов воздействия на градовые процессы // Труды ГГО. 2020. № 599. С. 151–161.
- Андреев А.И., Шамилова Ю.А. Детектирование облачности по данным КА Himawari-8 с применением сверточной нейронной сети // Исследование Земли из космоса. 2021. № 2. С. 42–52.

- Андреев А.И., Шамилова Ю.А., Холодов Е.И. Применение сверточной нейронной сети для детектирования облачности по данным прибора МСУ-МР спутника “Метеор-М” № 2 // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 44–53.
- Андреев Ю.В., Васильева М.А., Иванов В.Н. и др. Результаты экспериментальных исследований по рассеиванию теплых туманов с использованием сетчатых электрофильтров // Метеорология и гидрология. 2021. № 11. С. 123–130.
- Анискина О.Г., Стогниева В.В., Толстоброва Н.Б. Прогноз гроз с помощью мезомасштабных гидродинамических моделей // Труды ВКА им. Можайского. 2022. № S685. С. 6–10.
- Антохина О.Ю. Атмосферные осадки в бассейне реки Селенга и крупномасштабная циркуляция атмосферы над Евразией в июле // География и природные ресурсы. 2019. № 4(158). С. 104–115.
- Аппаева Ж.Ю. Результаты статистических исследований основных характеристик грозно-градовых облаков по данным радиолокационных наблюдений // Труды ГГО. 2020. № 598. С. 188–196.
- Аржанова Н.М., Коршунова Н.Н. Оценка многолетних изменений характеристик гололедно-изморозевых отложений на территории России // Труды ВНИИГМИ. 2021. № 188. С. 18–29.
- Артюшина А.В., Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М. Влияние 3D эффектов облаков на интенсивность солнечного излучения в схеме лимбового зондирования Земли: результаты численных экспериментов // Труды ВКА им. Можайского. 2020. № S674. С. 87–91.
- Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К. и др. Автоматические осадкосборники // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 118–123.
- Асмус В.В., Иоффе Г.М., Крамарева Л.С. и др. Космический мониторинг опасных природных явлений на территории России // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 20–32.
- Астафуров В.Г., Скороходов А.В. Использование результатов классификации облачности по спутниковым данным для решения задач климатологии и метеорологии // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 57–70.
- Астафуров В.Г., Скороходов А.В., Курьянович К.В. Статистические модели характеристик облачности над Западной Сибирью в летний период по данным MODIS // Метеорология и гидрология. 2021. № 11. С. 20–35.
- Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов В.А. и др. Численное моделирование влияния структуры поля ветра в атмосфере на макро- и микроструктурные характеристики конвективных облаков // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 6. С. 669–680.
- Ашабоков Б.А., Хибиев А.Х., Шхануков–Лафишев М.Х. Метод суммарной аппроксимации для уравнения, описывающего процессы дробления и замерзания капель в конвективных облаках // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2020. Т. 60. № 9. С. 1566–1575.
- Баззаев Т.В., Владимиров С.А., Кочетов Н.М. и др. Способ укрупнения частиц гигроскопических реагентов, генерируемых пиротехническими изделиями для задач рассеяния теплых туманов // в: Всероссийская конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 08–10 сентября 2021 г. Сб. научн. тр. Нальчик, 2021 г. С. 302–307.
- Бареева М.В., Инюхин В.С., Калов Х.М. и др. Радиолокационные исследования интенсивного градового процесса, развивавшегося над центральной частью Северного Кавказа 07.06.2012. // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. 2019. Т. 19. № 2. С. 64–78.
- Безрукова Н.А., Чернокульский А.В. Российские исследования облаков и осадков в 2011–2014 гг. // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 5. С. 577–589.
- Безрукова Н.А., Чернокульский А.В. Российские исследования облаков и осадков в 2015–2018 гг. // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 397–417.
- Беккиев К.М., Шаповалов В.А., Шериева М.А., Лесев В.Н. Математическая модель конвективного облака в работах по активному воздействию на град // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 28–38.
- Берюлев Г.П., Далеян Б.Г. Искусственное увеличение количества осадков. Результаты исследований и оперативно-производственных работ // Метеорология и Гидрология. 2021. № 9. С. 32–45.
- Бирюков Е.Ю., Косцов В.С. Использование линейных регрессионных соотношений, полученных на основе модельных и экспериментальных данных, для определения водозапаса облаков из наземных микроволновых измерений // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 5. С. 386–394.
- Бирюков Е.Ю., Косцов В.С. Применение регрессионного алгоритма к задаче исследования горизонтальной неоднородности водозапаса облаков по наземным микроволновым измерениям в режиме углового сканирования. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 8. С. 613–620.
- Боброва Д.А., Казакова Е.Н. История исследования лавинных процессов на острове Сахалин // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 112–119.
- Болгов М.В., Трубецкова М.Д., Харламов М.А. Об оценках статистических характеристик дождевых осадков в Московском регионе // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 77–85.
- Болгов Ю.В. Математическое моделирование динамики снежных лавин с использованием клеточных автоматов. // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 26–33.
- Бурсова Н.Е., Кузнецов И.Н., Нахаев М.И. Особенности режима осадков в Московском регионе в 2008–2017 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 1(371). С. 127–142.
- Бусыгин В.П., Краснокутская Л.Д., Кузьмина И.Ю. Перенос оптического излучения подоблачных полней в космос Кузьмина // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 85–93.
- Бухаров М.В., Бухаров В.М. Анализ быстро растущей мезомасштабной системы глубокой конвекции по картам спутникового диагноза // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2(376). С. 23–38.
- Быков В.Ю., Ильин Г.Н., Караваев Д.М., Шукин Г.Г. СВЧ радиометрические измерения содержания парообразной и жидкокапельной влаги в тропосфере // Труды ВКА им. Можайского. 2020. № S674. С. 128–132.

- Бычков А.А., Петрунин А.М., Частухин А.В. и др. Перспективы применения наземных генераторов в работах по воздействию на облака // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 78–85.
- Васильев Д.Ю., Кучеров С.Е., Семенов В.А., Чибилев А.А. Реконструкция атмосферных осадков по радиальному приросту сосны обыкновенной на Южном Урале Чибилев // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 490. № 1. С. 37–42.
- Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Торопова М.Л. и др. Влияние термических неоднородностей подстилающей поверхности на образование и развитие конвективных облаков и связанных с ними опасных явлений погоды // Труды ГГО. 2022. № 606. С. 32–49.
- Ветров А.Л., Костарев С.В. Возможность использования ансамблевого мультимодельного прогноза сильных осадков для территории Пермского края на примере лета 2019 г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 7. С. 35–49.
- Владимиров С.А., Кирилин Д.В., Крутиков Н.О., Пастушков Р.С. Аппроксимация функций распределения облачных капель и ледяных кристаллов по данным измерений микрофизического комплекса самолета-лаборатории ЯК-42Д “Росгидромет” для построения численных моделей облаков и осадков и активных воздействий на них. // Всероссийская открытая конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 8–10 сентября 2021 г. Сб. науч. тр., Нальчик, 2021б. С. 8–12.
- Волков В.В., Кирилин Д.В., Петров В.В., Струнин А.М. Исследование микрофизических характеристик зимних облаков теплого фронта с борта самолета-лаборатории ЯК-42Д “Росгидромет” // Всероссийская открытая конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 8–10 сентября 2021 г. Сб. науч. тр., Нальчик, 2021б. С. 68–73.
- Волков В.В., Колокутин Г.Э., Струнин М.А., Базанин Н.В. Бортовая система сбора данных самолета-лаборатории для исследования атмосферных процессов. // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 3. С. 104–110.
- Волков В.В., Струнин М.А., Струнин А.М. Определение сдвига ветра и интенсивности турбулентности по данным самолета-лаборатории Як-42Д “Росгидромет”. // Метеорология и гидрология. 2021а. № 9. С. 117–129.
- Волкова Е.В., Андреев А.И., Косторная А.А. Мониторинг характеристик облачного покрова и осадков по данным полярно-орбитальных и геостационарных спутников // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 45–56.
- Волкова Е.В., Кухарский А.В. Автоматизированная технология диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды для Европейской территории России по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat MSG // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 4(378). С. 43–62.
- Володин Е.М. Равновесная чувствительность модели климата к увеличению концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере при различных методах учета облачности // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 139–145.
- Восканян К.Л., Макарян И.С., Крюкова С.В. и др. Сопоставление эффективности обнаружения метеорологических объектов двумя доплеровскими радиолокаторами на территории Ленинградской области // Труды ГГО. 2019. № 592. С. 80–97.
- Гавриков А.В., Золина О.Г., Разоренова О.А. и др. Экстремальные осадки в июне 2021 г. над Черным морем в контексте их долгопериодной климатической изменчивости // Океанология. 2022. Т. 62. № 3. С. 357–364.
- Галилейский В.П., Гришин А.И., Елизаров А.И. и др. Экспериментальное исследование отражения светового излучения от кристаллических частиц в нижней тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 11(406). С. 918–922.
- Галин В.Я., Дымников П.В. Динамико-стохастическая параметризация облачности в модели общей циркуляции атмосферы // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 3–8.
- Готюр И.А., Мешков А.Н., Рудь М.Ю., Яременко И.А. Метод поиска очагов кучево-дождевой облачности по данным космических аппаратов гидрометеорологического назначения с применением технологий искусственных нейронных сетей // Труды ВКА им. Можайского. 2020. № S674. С. 146–151.
- Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Степаненко В.М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Т. 86. № 3. С. 435–446.
- Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Тестирование комплексного метода прогноза молниевой активности // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 12(383). С. 949–957.
- Данелян Б.Г., Банкова Н.Ю., Хижняк А.Н., Ломакин И.В. Анализ повторяемости дней с туманами в крупных аэропортах юга России для планирования и разворачивания работ по активным воздействиям (рассеяние туманов, регулирование осадков) // в: Всероссийская конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 08–10 сентября 2021 г. Сб. научн. тр. Нальчик, 2021г. С. 298–302.
- Данелян Б.Г., Кирилин Д.В., Колокутин Г.Э., Спрыгин А.А. Ресурсная облачность для активных воздействий в основных районах агропроизводства европейской части России // в: Всероссийская конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 08–10 сентября 2021 г. Сб. научн. тр. Нальчик, 2021 г. С. 281–286.
- Данилова И.В., Онучин А.А. Оценка пространственного распределения твердых атмосферных осадков в таежной зоне бассейна реки Енисей с использованием спутниковых данных // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 103–112.
- Дементьева С.О., Ильин Н.В., Шаталина М.В., Мареев Е.А. Прогноз конвективных явлений и его верификация по данным наблюдений атмосферного электричества // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 150–157.
- Дементьева Т.В., Коршунова Н.Н. Эмпирико-статистический анализ количества общей облачности и облачности нижнего яруса на территории России // Труды ВНИИГМИ. 2020. № 187. С. 197–204.
- Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Шукин Г.Г. Распознавание сдвига ветра по данным метеорологического

- радиолокатора // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 109–118.
- Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А. и др. Влияние сильного аэрозольного загрязнения воздуха на эволюцию конвективных облаков во время грозы в Китае по результатам трехмерного численного моделирования // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 55–67.
- Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А. и др. Численное моделирование эволюции и электрической структуры кучево-дождевого облака на северо-западе России // Метеорология и гидрология. 2020. № 4. С. 33–41.
- Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А. Исследование механизмов электризации и связи частоты электрических разрядов с радиолокационными характеристиками грозового облака в Китае // Метеорология и гидрология. 2020. № 10. С. 63–72.
- Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Торопова М.Л. и др. Численное моделирование влияния электрических процессов на формирование опасных явлений погоды, связанных с конвективными облаками // Труды ГГО. 2019. № 595. С. 63–82.
- Доронин А.П., Козлова Н.А., Петроченко В.М. Оценки пригодности переохлажденной облачности к рассеянию над центральным районом европейской территории России в интересах решения прикладных задач // Труды ВКА им. Можайского. 2019. № 671. С. 163–171.
- Доронин А.П., Петроченко В.М., Гончаров И.В. и др. Оценки пригодности к рассеянию волнистообразных и слоистообразных облаков в Северо-западном районе европейской территории России в интересах гидрометеорологического обеспечения // Навигация и гидрография. 2020. № 59. С. 70–80.
- Дрофа А.С. Об эффективности воздействия льдообразующими реагентами на конвективные облака // Труды ГГО. 2020. № 597. С. 34–50.
- Дрофа А.С., Козлов С.В., Спрыгин А.А. Прогноз ресурсной конвективной облачности для активных воздействий // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 51–60.
- Екайкин А.А., Тебенькова Н.А., Липенков В.Я. и др. Недоценка скорости снегонакопления в центральной части Антарктиды (станция Восток) по данным речных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 114–125.
- Елисеев А.В., Плосков А.Н., Чернокульский А.В., Мохов И.И. Связь частоты молний со статистическими характеристиками конвективной активности в атмосфере // Доклады Академии наук. 2019. Т. 485. № 1. С. 76–82.
- Жарашуев М. Измерение осадков с увеличенной площадью водосборника // Русский инженер. 2019. № 3(64). С. 45–48.
- Жарашуев М.В. Методика автоматизированного статистического анализа разрядов “облако – земля” для территории Северного Кавказа // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 111–116.
- Жарашуев М.В. Оптимизация работы радиолокационной сети Российской Федерации // Труды ГГО. 2022. № 606. С. 145–151.
- Жарашуев М.В. Сопоставление статистических данных грозовой и градовой активности на территории Северного Кавказа // Труды ГГО. 2021. № 603. С. 145–154.
- Жарашуев М.В. Статистический анализ повторяемости молниевых разрядов типа “облако – облако” на территории северокавказских республик и Ставропольском крае // Труды ГГО. 2019. № 595. С. 145–152.
- Журба О.М., Алексеев А.Н., Шаяхметов С.Ф., Меринов А.В. Исследование полициклических ароматических и нефтяных углеводородов в снеговом покрове на урбанизированной территории // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 10. С. 1037–1042.
- Золотухина О.И. Термодинамические условия образования опасных конвективных явлений в районе космодрома “Восточный” // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. 2020. № S674. С. 181–187.
- Иванова А.Р. Влияние обледенения на функционирование авиационного транспорта: состояние вопроса и проблемы прогнозирования // Метеорология и гидрология. 2021. № 7. С. 59–78.
- Иванова А.Р. Мировой опыт наукастинга грозовой деятельности // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 71–83.
- Иванова А.Р., Денисенко И.А. О возможности наукастинга гроз на московских аэродромах с использованием радарной и грозопеленгационной информации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1(375). С. 142–161.
- Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Динамика эпизодов низкой облачности и ограниченной видимости на аэродромах Российской Федерации в период 2001–2020 гг // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 2(384). С. 53–68.
- Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Юсупов Ю.И. Прогноз максимальной толщины гололедных отложений Юсупов // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 5(400). С. 408–413.
- Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Юсупов Ю.И. Численные эксперименты по прогнозу гололедных явлений // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 9. С. 735–741.
- Ильин Н.В., Кутерин Ф.А. Оценка точности распознавания гроз по данным доплеровского метеорологического лоатора ДМРЛ-С // Метеорология и гидрология. 2020. № 9. С. 104–112.
- Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т. Оценка вклада различных гидрометеоров в суммарную радиолокационную отражаемость в градовых облаках // Труды ГГО. 2019. № 594. С. 107–119.
- Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т. Прогноз града и оценка его размера на основе глобальной математической модели атмосферы // Труды ВКА им. Можайского. 2022. № S685. С. 133–140.
- Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т. Прогноз града с заблаговременностью до трех суток по выходным данным глобальной модели атмосферы // Труды ГГО. 2020. № 598. С. 204–214.
- Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т., Жарашуев М.В. Прогноз паводкообразующих осадков на территории Северного Кавказа с использованием глобальной модели атмосферы // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 80–86.
- Казанцева А.С., Кадебская О.И., Дублянский Ю.В., Катаев В.Н. Результаты мониторинга изотопного состава атмосферных осадков на территории Северного и Среднего Урала // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 87–94.
- Калинин Н.А., Быков А.В., Шихов А.Н. Объектно-ориентированная оценка краткосрочного прогноза

- конвективных опасных явлений погоды в Пермском крае по модели WRF // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 3(398). С. 232–240.
- Калинин Н.А., Сивков Б.А. Численный прогноз летних осадков разной интенсивности с использованием модели WRF и индексов неустойчивости атмосферы // Географический вестник. 2022. № 3(62). С. 92–108.
- Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Ажигов И.О. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов и смерчей на Европейской территории России // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 1. С. 62–69.
- Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Тарасов А.В. Анализ результатов численного прогноза ливневых осадков по модели WRF с применением различных параметризаций конвекции (на примере территории Пермского края) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 3(373). С. 43–59.
- Калинин Н.А., Шихов А.Н., Чернокульский А.В. и др. Условия возникновения сильных шквалов и смерчей, вызывающих крупные ветровалы в лесной зоне европейской части России и Урала // Метеорология и гидрология. 2021. № 2. С. 35–49.
- Калмыкова О.В., Федорова В.В., Фадеев Р.О. Анализ условий возникновения вспышки смерчей над Черным морем 16 июля 2019 г. и оценка успешности прогноза // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 1(379). С. 112–129.
- Калмыкова О.В., Шершаков В.М., Новицкий М.А., Шмерлин Б.Я. Автоматизированный прогноз смерчей у Черноморского побережья России: первый опыт и оценка его результативности // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 84–94.
- Кальчихин В.В., Кобзев А.А. Определение параметров опасных метеорологических явлений, связанных с выпадением осадков, с использованием оптического осадкомера // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 10. С. 867–869.
- Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Тихомиров А.А., Филатов Д.Е. Метод поэлементной калибровки оптико-электронного измерителя атмосферных осадков // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 10(393). С. 812–816.
- Караваяев Д.М., Лебедев А.Б., Шукин Г.Г., Ильин Г.Н. Перспективы применения методов наземной микроволновой радиометрии для синоптического анализа атмосферных фронтов и прогноза опасных явлений погоды // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 56–65.
- Караваяев Д.М., Шукин Г.Г. Исследование вариаций влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков методом микроволновой радиометрии // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 11. С. 930–935.
- Кисельникова В.З. Объектно-ориентированная оценка качества прогноза осадков для теплого периода (май–сентябрь) 2016–2020 гг. по модели COSMO-Ru2 // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2(380). С. 43–51.
- Клещева Т.И., Поталова Е.Ю., Пермяков М.С. Сравнение данных глобальной сети локализации молний WWLLN и стандартных наблюдений на метеостанциях юга Дальнего Востока России // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 89–98.
- Клименко Д.Е. Исследование пространственной редукции ливней Урала на основе радиолокационной информации // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 78–91.
- Клименко Д.Е. Оценка предельных максимумов дождей осадков физическими методами на основе спутниковых и радиолокационных данных наблюдений (на примере Среднего Урала) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 4. С. 443–452.
- Клименко Д.Е., Черепанова Е.С., Кузнецова Т.В. Оценка и картографирование параметров паводкоформирующих ливней в бассейне реки Тобол // География и природные ресурсы. 2019б. № 3. С. 165–172.
- Клименко Д.Е., Черепанова Е.С., Кузьминых А.Ю. Оценка параметров распределений экстремальных ливней при учете нескольких событий в году // Водные ресурсы. 2019а. Т. 46. № 4. С. 438–446.
- Ковалев Н.А., Нетягин О.В., Сажин И.В. Опыт искусственного увеличения осадков в целях тушения лесных пожаров в Сибири и на Дальнем Востоке в 2017–2021 гг.: предварительные результаты и вопросы оценки эффективности // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 71–77.
- Кожеевников В.Н. Облака как проявление волновых возмущений над горными хребтами // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 2. С. 138–148.
- Корнеев В.П., Колосков Б.П., Бычков А.А. и др. Активные воздействия на облака с целью улучшения условий погоды в мегаполисах. // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 61–70.
- Коришунов В.А. Многократное рассеяние в перистых облаках и его учет при интерпретации лидарных измерений в стратосфере // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 12(395). С. 969–975.
- Коришунов В.А., Зубачев Д.С. Параметры перистых облаков по данным лидарных измерений в Обнинске // Труды ГГО. 2021. № 602. С. 68–78.
- Костарев С.В., Ветров А.Л., Сивков Б.А., Поморцева А.А. Исследование радиолокационных характеристик облачных систем при выпадении сильных дождей // Географический вестник. 2020. № 3(54). С. 113–124.
- Костромитинов А.В., Яременко И.А. Метод прогнозирования тумана с использованием сверточных нейронных сетей // Труды ВКА им. Можайского. 2022. № S685. С. 186–193.
- Кузнецов А.Д., Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Моделирование размера градин при активных воздействиях на облака // Труды. 2019. № 595. С. 132–144.
- Кузнецов А.Д., Лялюшкин А.С., Михайлушкин С.Ю. О влиянии движения воздушных судов на развитие кучево-дождевой облачности // Труды ГГО. 2020. № 599. С. 162–175.
- Кузьмин В.А. Исследование напряженности электрического поля атмосферы при грозах // Труды ГГО. 2021. № 601. С. 104–115.
- Куличков С.Н., Чунгузов И.П., Попов О.Е. и др. Внутренние гравитационные и инфразвуковые волны во время урагана в Москве 29 Мая 2017 г // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 2. С. 32–40.
- Куров А.Б., Геккиева Ж.М., Синькевич А.А. и др. Исследование особенностей работы грозопеленгационной системы Blitzortung // Труды ГГО. 2022. № 606. С. 50–62.
- Курятникова Н.А., Малыгина Н.С., Митрофанова Е.Ю. Атмосферное поступление и разнообразие биоаэрозолей в зимних осадках на юге Западной Си-

- бири // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 1(396). С. 19–24.
- Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г. Анализ влияния мегаполиса Санкт-Петербург на осадки и ветер для валидации численного прогноза погоды // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 1(384). С. 36–45.
- Леонов И.И., Соколичина Н.Н. Условия формирования ледяного шторма во Владивостоке в ноябре 2020 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 4(382). С. 69–83.
- Лиев К.Б., Куцев С.А. Анализ экономической эффективности противоработ в Российской Федерации // Труды ГГО. 2021. № 602. С. 124–133.
- Макитов В.С., Инюхин В.С., Куцев С.А., Лиев К.Б. Формирование градового облака при слиянии конвективных ячеек // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58, № 4. С. 448–455.
- Малкарова А.М. Развитие работ по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы в Гидрометслужбе России // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 5–10.
- Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Агбалян Е.В., Папина Т.С. Изотопный состав и регионы-источники зимних осадков в Надымской низменности // Лед и снег. 2020. Т. 60. № 1. С. 98–108.
- Махотина И.А., Чечин Д.Г., Макшас А.П. Радиационный эффект облачности над морским льдом в Арктике во время полярной ночи по данным дрейфующих станций “Северный Полюс”-37, 39, 40 // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 514–525.
- Митяев М.В., Герасимова М.В., Рыжик И.В., Ишкулова Т.Г. Нерастворимые фракции аэрозолей и тяжелых металлов в свежеснеге на северо-западе Кольского полуострова в 2018 г. // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 3. С. 307–318.
- Михайлов Е.Ф., Иванова О.А., Небосько О.А. и др. Вторичные аэрозоли пылцы как атмосферные ядра конденсации // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 4. С. 64–72.
- Михайловский Ю.П., Попов В.Б., Синькевич А.А. и др. Физико-статистическая эмпирическая модель развития молниевой активности конвективных облаков // Труды ГГО. 2019. № 595. С. 83–105.
- Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Абшаев А.М., Торопова М.Л. О методах воздействия на электрические процессы в облаках // Труды ГГО. 2021. № 602. С. 6–22.
- Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Веремей Н.Е. и др. Динамика электрической структуры кучево-дождевых облаков // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 5. С. 341–353.
- Михайлушкин С.Ю., Глибчук С.А., Заморин И.С. и др. Мезомасштабные особенности распределения радиолокационных характеристик кучево-дождевых облаков и их связь с приземными метеорологическими параметрами // Труды ГГО. 2021. № 603. С. 130–144.
- Морозов В.Н. Взаимодействие облачных зарядовых структур с окружающей проводящей атмосферой с неоднородной электрической проводимостью // Труды ГГО. 2019. № 592. С. 23–79.
- Морозов В.Н. Влияние облаков и аэрозольных частиц на распределение электрической проводимости в атмосфере // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2022. № 606. С. 78–93.
- Мохов И.И., Парфенова М.Р. Взаимосвязь площади снежного покрова в Северном полушарии по спутниковым данным с приповерхностной температурой // Метеорология и гидрология. 2022. № 2. С. 32–44.
- Муравьев А.В., Бундель А.Ю., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. Верификация радиолокационного наукастинга областей осадков значительной площади с помощью обобщенного распределения Парето. Часть 1: элементы теории и методы оценки параметров // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022б. № 3(385). С. 6–41.
- Муравьев А.В., Бундель А.Ю., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. Верификация радиолокационного наукастинга областей осадков значительной площади с помощью обобщенного распределения Парето. Часть 2: приложение к прогнозам в теплый и холодный периоды 2017–2018 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022в. № 3(385). С. 42–77.
- Муравьев А.В., Бундель А.Ю., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. Опыт пространственной верификации радиолокационного наукастинга осадков: определение и статистика объектов, ситуаций и условных выборок // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022а. № 2(384). С. 6–52.
- Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В., Зайченко М.Ю. Оперативная технология наукастинга осадков на основе радиолокационных данных и сравнительные результаты точечной верификации для теплового и холодного периодов года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2(372). С. 12–40.
- Нагорский П.М., Жуков Д.Ф., Картавых М.С. и др. Характеристики и структура мезомасштабных конвективных систем над Западной Сибирью по данным дистанционных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 45–55.
- Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Пустовалов К.Н., Громова А.В. Грозовая активность над Западной Сибирью // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 123–134.
- Пермяков М.С., Клещева Т.И., Поталова Е.Ю. и др. Локальные особенности грозовой активности на юге Дальнего Востока России // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 101–111.
- Петров В.В. Микрофизические и термодинамические характеристики тропических конвективных облаков (по результатам исследований на Кубе) // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 84–94.
- Пискунов В.Н., Гайнуллин К.Г., Петров А.М. и др. Моделирование кинетики формирования осадков в смешанном облаке // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 4. С. 438–447.
- Подлесный С.В., Девятова Е.В., Саункин А.В., Васильев Р.В. Сопоставление методов определения облачного покрова над Байкальской природной территорией в декабре 2020 г // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 4. С. 102–109.
- Полькин В.В., Панченко М.В., Терпугова С.А. Конденсационная активность частиц атмосферного аэрозоля разного размера по данным фотоэлектрического счетчика Терпугова // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 12(395). С. 956–964.
- Полюхов А.А., Чубарова Н.Е., Володин Е.М. Влияние учета непрямого эффекта сульфатного аэрозоля на радиацию и облачность по данным климатической

- модели ИВМ РАН // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 5. С. 566–575.
- Попов В.Б., Синькевич А.А., Янг Д. и др. Характеристики и структура кучево-дождевого облака с водяным смерчем над Финским заливом // Метеорология и гидрология. 2020. № 9. С. 5–16.
- Прессман Д.Я. К аппроксимации уравнений модели облачной атмосферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 11. С. 5–19.
- Припачкин Д.А., Будыка А.К. Влияние параметров аэрозольных частиц на их вымывание из атмосферы дождевыми каплями // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 203–209.
- Романский С.О., Вербицкая Е.М., Суляндзига П.Б. Результаты численного моделирования формирования и развития интенсивной конвекции, вызвавшей смерч в Благовещенске 31 июля 2011 г // Метеорология и гидрология. 2020. № 6. С. 25–35.
- Ростокин И.Н., Ростокина Е.А., Федосеева Е.В., Шуккин Г.Г. Многочастотные микроволновые радиометрические исследования радиотеплового излучения конвективной облачности в условиях формирования и развития опасных атмосферных метеоявлений // Труды ВКА им. Можайского. 2019. № 670. С. 140–145.
- Рубинштейн К.Г., Губенко И.М., Игнатов Р.Ю. и др. Эксперименты по усвоению данных сети грозоупреждения // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 11. С. 936–941.
- Саворский В.П. Коррекция оценок водозапаса облачности по данным спутникового мониторинга. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 78–86.
- Самохвалов И.В., Брюханов И.Д., Шишко В.А. и др. Оценка микрофизических характеристик конденсационных следов самолетов по данным поляризационного лидара: теория и эксперимент. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 3. С. 193–201.
- Связов Е.М., Ветров А.Л. Численное моделирование сильных летних осадков при различных вариантах шага регулярной сетки // Географический вестник. 2021. № 4(59). С. 73–83.
- Семенец Е.С., Павлова М.Т. Кислотность атмосферных осадков, выпадающих на территории Северо-Западного федерального округа // Труды ГГО. 2019. № 593. С. 99–115.
- Сивков Б.А., Калинин Н.А. Особенности термодинамического состояния атмосферы при сильных осадках на территории Пермского края // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1(375). С. 83–95.
- Синицын А.В., Гулев С.К. Сравнение натурных и спутниковых данных об общем балле облачности для Атлантического океана в период 2004–2014 гг. // Океанология. 2022. Т. 62. № 1. С. 5–13.
- Синькевич А.А., Боу Б., Михайловский Ю.П., Богданов Е.В. Изменение электрического состояния конвективных облаков при воздействиях с самолета кристаллизующим реагентом // Труды ГГО. 2020. № 596. С. 131–147.
- Синькевич А.А., Боу Б., Павар С.Д. и др. радиолокационных и электрических характеристик грозových облаков при воздействии на них кристаллизующим реагентом (штат Карнатака, Индия) // Метеорология и гидрология. 2021. № 8. С. 112–122.
- Синькевич А.А., Куров А.Б., Михайловский Ю.П. и др. Исследование характеристик грозových облаков на Северо-Западе России с использованием нейронных сетей // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 12(407). С. 1008–1014.
- Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Матросов С.Ю. и др. Связь структуры конвективных облаков с частотой молний по результатам радиофизических измерений // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 37–51.
- Синькевич А.А., Попов В.Б., Абшаев А.М. и др. Радиолокационные характеристики конвективных облаков разных регионов при переходе в грозовую стадию // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 12. С. 932–936.
- Синькевич А.А., Попов В.Б., Михайловский Ю.П. и др. Характеристики кучево-дождевого облака с водяным смерчем над Ладожским озером по данным дистанционных измерений // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 2. С. 153–158.
- Синькевич А.А., Торопова М.Л., Михайловский Ю.П. и др. Особенности взаимосвязей электрических и радиолокационных параметров грозových облаков в Индии (натурные исследования) // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 99–106.
- Скаун А.А., Чихачев К.Б., Екайкин А.А. и др. Изотопный состав атмосферных осадков и природных вод в районе Баренцбурга (Шпицберген) // Лед и снег. 2020. Т. 60. № 3. С. 379–394.
- Скорыходов А.В. Изменчивость характеристик облачности по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 34–43.
- Скорыходов А.В. Исследование изменчивости характеристик облачных проявлений внутренних гравитационных волн в течение времени их существования на основе спутниковых данных HIMAWARI-8 // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 186–194.
- Скорыходов А.В. Классификация облачности в ночное время суток по спутниковым данным VIIRS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 240–251.
- Скорыходов А.В., Коношонкин А.В. Статистический анализ характеристик зеркально отражающих слоев в облаках верхнего яруса над Западной Сибирью по спутниковым данным MODIS // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 9(404). С. 711–716.
- Скорыходов А.В., Курьянович К.В. Использование данных CALIOP для оценки высоты нижней границы облаков на спутниковых снимках MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 43–56.
- Созаева Л.Т. О возможности применения сфероидальной модели частиц для расчета характеристик рассеяния радиоволн от удлиненных облачных кристаллов // Труды ГГО. 2022. № 606. С. 133–144.
- Созаева Л.Т. Обратное рассеяние радиоволн на сфероидальных дождевых каплях // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 8–9. С. 732–737.
- Созаева Л.Т., Жабоева М.М. Обратное рассеяние радиолокационного излучения облачными и дождевыми каплями // Труды ГГО. 2020. № 599. С. 140–150.
- Созаева Л.Т., Жабоева М.М. Оценка влияния деформации капель на определение интенсивности осадков

- радиолокационным методом / Л. Т. Созаева, М. М. Жабоева // Труды ГГО. 2021. № 602. С. 104–115.
- Сорокин А.Г., Добрынин В.А. О методике исследования инфразвуковых волн от гроз // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 1. С. 62–69.
- Соснин Э.А., Кузнецов В.С., Панарин В.А. Энерговыделение в грозовом облаке, необходимое для образования транзитных световых явлений средней атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 8(391). С. 617–620.
- Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Рябова С.А. Комплексный прогностический признак опасных атмосферных явлений // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 504. № 1. С. 69–74.
- Спрыгин А.А., Вязилов А.Е. Исследование мезомасштабной конвективной системы в центральных районах ЕТР 7 августа 2021 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 2(384). С. 69–91.
- Струнин М.А. Методы исследования термодинамического состояния атмосферы с помощью самолета-лаборатории. Москва: Печатный салон Шанс, 2020, 212 с.
- Струнин М.А. Оценка точности температурно-ветровых измерений в системе AMDAR по данным, полученным с помощью самолета-лаборатории Як-42Д “Росгидромет” // Метеорология и гидрология. 2020. № 8. С. 102–117.
- Стулов Е.А., Сосникова Е.В., Кирич Д.В., Монахова Н.А., Поздеев В.Н. Исследование характеристик облачных ядер конденсации в Московском регионе. // Всероссийская открытая конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 8–10 сентября 2021 г. Сб. науч. тр., Нальчик, 2021, С. 63–68.
- Тарасов А.В. Оценка точности алгоритмов выделения маски облачности по данным Sentinel-2 и Planet-Score. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 26–40.
- Тентюков М.П., Габов Д.Н., Симоненков Д.В., Языков Е.Г. Загрязнение поверхности снега полициклическими ароматическими углеводородами при образовании изморози // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 4. С. 483–493.
- Тимофеев Д.Н., Коношонкин А.В., Кустова Н.В. и др. Оценка влияния поглощения на рассеяние света на атмосферных ледяных частицах для длин волн, характерных для задач лазерного зондирования атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 5. С. 381–385.
- Тимофеев Д.Н., Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Шишко В.А. Характеристики обратного рассеяния света атмосферных ледяных гексагональных частиц искаженной формы в рамках приближения физической оптики // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 1(396). С. 37–41.
- Тищенко В.А., Хан В.М., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Прогнозирование осадков и температуры в бассейне реки Амур на месячных и сезонных интервалах времени // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 24–39.
- Ткачев И.В., Тимофеев Д.Н., Кустова Н.В., Коношонкин А.В. Банк данных матриц обратного рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах размерами 10–100 мкм для интерпретации данных лазерного зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 3(386). С. 199–206.
- Торопов П.А., Шестакова А.А., Ярынич Ю.И., Кутузов С.С. Моделирование орографической составляющей осадков на примере Эльбруса // Лед и снег. 2022. Т. 62. № 4. С. 485–503.
- Торопова М.Л., Михайловский Ю.П., Веремей Н.Е. и др. Ансамблевый прогноз развития грозовой облачности на северо-западе ЕТР и верификация результатов моделирования // Труды ГГО. 2022. № 606. С. 7–31.
- Торопова М.Л., Русин И.Н. Воспроизведение стратификации атмосферы с целью прогноза конвективных явлений при помощи мезомасштабной модели WRF-ARW / М.Л. Торопова, И.Н. Русин // Труды ГГО. 2019. № 593. С. 160–176.
- Торопова М.Л., Синькевич А.А., Павар С. и др. Характеристики грозных облаков муссонного и постмуссонного периодов в Индии / М.Л. Торопова, А.А. Синькевич, С. Павар [и др.] // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 68–79.
- Травова С.В., Толстых М.А., Шашкин В.В. Оценка прогноза сильных осадков по данным оперативной глобальной модели атмосферы ПЛАВ20 // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1(375). С. 96–112.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. Санкт-Петербург: Научное издание, 2022. 676 с.
- Филей А.А. Восстановление высоты верхней границы облачности по данным спутникового прибора МСУ-МР КА “Метеор-М” N 2-2 // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 12(383). С. 918–925.
- Филей А.А. Восстановление оптической толщины и эффективного радиуса частиц облачности по данным дневных измерений спутникового радиометра МСУ-МР // Оптика атмосферы и океана. 2019а. Т. 32. № 8. С. 650–656.
- Филей А.А. Определение фазового состояния облачности по данным спутникового радиометра МСУ-МР космического аппарата “Метеор-М” № 2 // Оптика атмосферы и океана. 2019б. Т. 32. № 5. С. 376–380.
- Хлебникова Е.И., Рудаков Ю.Л., Школьник И.М. Изменение режима атмосферных осадков на территории России: результаты регионального климатического моделирования и данные наблюдений // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 5–16.
- Хлебникова Е.И., Школьник И.М., Рудаков Ю.Л. Климатические изменения характеристик редких экстремумов атмосферных осадков: результаты регионального моделирования для территории России // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 42–53.
- Хуторова О.Г., Близоруков А.С., Дементьев В.В., Хуторов В.Е. Зондирование мезомасштабной структуры тропосферы в периоды прохождения атмосферных фронтов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 254–262.
- Хуторова О.Г., Маслова М.В., Хуторов В.Е. О мониторинге конвективных процессов с помощью приемников спутниковых навигационных систем // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 6(401). С. 505–509.
- Хучунаев Б.М., Байсиев Х.М., Геккиев С.О. Лабораторные исследования повышения льдообразующей эффективности пиротехнических составов на основе

- АД1 // Наука. Инновации. Технологии. 2021а. № 2. С. 125–140.
- Хучунаев Б.М., Байсиев Х.М., Геккиева С.О., Будаев А.Х. Экспериментальные исследования льдообразующей эффективности пиротехнического состава АД1 с добавками цинка // Труды ГГО. № 597. 2020. С. 51–60.
- Хучунаев Б.М., Геккиева С.О., Будаев А.Х. Методы определения льдообразующей эффективности противогололедных изделий на лабораторных установках // Наука. Инновации. Технологии. 2021б. № 3. С. 105–118.
- Хучунаев Б.М., Геккиева С.О., Будаев А.Х. Лабораторные исследования влияния напряженности электрического поля на удельный заряд на частицах реагента, образующихся при возгонке пиротехнических составов // Наука. Инновации. Технологии. 2021в. № 4. С. 209–226.
- Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А. и др. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. 2022а. № 5. С. 27–41.
- Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И. и др. Смерчи в российских регионах // Метеорология и гидрология, 2021. № 2. С. 17–34.
- Чернокульский А.В., Шихов А.Н., Ажигов И.О. и др. Шквалы и смерчи на европейской части России 15 мая 2021 г.: диагностика и моделирование // Метеорология и гидрология. 2022б. № 11. С. 71–90.
- Черноус П.А. Опыт предупредительного спуска лавин в Хиби́нах. Проблемы и перспективы // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 14–25.
- Черных И.В., Алдухов О.А. Годовой ход параметров сплошных облачных слоев над Арктикой на фоне их глобальных оценок по многолетним радиозондовым данным // Труды ВНИИГМИ 2019. № 185. С. 115–135.
- Черных И.В., Алдухов О.А. Долгопериодные оценки числа облачных слоев по данным радиозондирования атмосферы за 1964–2017 гг. в разных широтных зонах // Метеорология и гидрология. 2020. № 4. С. 18–32.
- Черных И.В., Алдухов О.А. Описание базы данных “Срочные данные о границах облачных слоев, восстановленных по результатам радиозондовых наблюдений температуры и влажности на 58 станциях территории Российской Федерации и соседних регионов” // Труды ВНИИГМИ. 2020. № 186. С. 21–34.
- Чечко В.А., Топчая В.Ю. Распределение и состав аэрозольных частиц в дождевых осадках на побережье в Калининградской области // Метеорология и гидрология. 2019. № 5. С. 32–39.
- Шакина Н.П., Горлач И.А., Скриптунова Е.Н. Использование спутниковых данных о конвективной облачности для анализа летних происшествий и их предупреждения // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 94–101.
- Шамин С.И., Санина А.Т. Основные тенденции появления опасных гидрометеорологических явлений, нанесших ущерб на территории Российской Федерации // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных. 2021. № 188. С. 154–166.
- Шановалов А.В., Шановалов В.А., Стасенко В.Н., Лесев В.Н. Применение радиолокационных и гнорегистрационных данных и результатов численного моделирования для исследования связи “полная молниевая активность — опасные явления погоды” // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 59–68.
- Шаталина М.В., Ильин Н.В., Мареев Е.А. Характеристики опасных метеорологических явлений в Нижнем Новгороде по данным натурных наблюдений электрического поля // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 107–111.
- Шатунова М.В., Хлестова О.Ю., Чубарова Н.Е. Прогноз микрофизических и оптических характеристик крупномасштабной облачности и ее радиационного воздействия с помощью мезомасштабной модели численного прогноза погоды COSMO // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 10. С. 824–831.
- Швец Н.В. Интенсивность осадков: методы измерений, базы данных наблюдений, использование данных интенсивности осадков в исследовании климата и для решения прикладных задач // Труды ВНИИГМИ 2020. № 186. С. 69–89.
- Швец Н.В., Разуваев В.Н., Катина С.П. Специализированный массив данных числа дней с осадками  $\geq 1$  мм // Труды ВНИИГМИ. 2019. № 185. С. 67–76.
- Шилин А.Г. Исследование функционирования льдообразующих средств активных воздействий в реальных условиях применения // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2021б. № 4 (212). С. 69–73.
- Шилин А.Г. Исследование эффективности автономных пиротехнических генераторов льдообразующего аэрозоля в различных условиях // Труды ГГО. 2021а. № 602. С. 79–91.
- Шилин А.Г., Хучунаев Б.М. Возможности увеличения эффективности пиротехнических генераторов льдообразующего аэрозоля // Наука. Инновации. Технологии. 2022а. № 1. С. 87–110.
- Шилин А.Г., Хучунаев Б.М. Особенности формирования льдообразующего аэрозоля, образованного при горении пиротехнического состава в тракте сопла Лаваля // Метеорология и гидрология. 2022б. № 7. С. 94–100.
- Шилин А.Г., Хучунаев Б.М., Будаев А.Х. Влияние растворимых соединений йода на эффективность льдообразующего аэрозоля // Труды ГГО. 2021. № 602. С. 92–103.
- Шилин А.Г., Шилина А.С., Андреев Ю.В. и др. Исследование режимов адсорбции молекулярного йода и возможности модификации льдообразующих характеристик аэрозолей силикатной и алюмосиликатной природы соединений йода // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 86–93.
- Шихов А.Н., Абдуллин Р.К., Чернокульский А.В. и др. Создание картографической базы данных и веб-сервиса “Конвективные опасные метеорологические явления на территории Центрального федерального округа” // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2021. Т. 27. № 3. С. 120–135.
- Шихов А.Н., Калинин Н.А., Быков А.В. и др. Смерчи в условиях слабой конвективной неустойчивости атмосферы: анализ двух случаев на востоке европейской территории России // Современные про-

- блемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 255–268.
- Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Ажигов И.О. Пространственно-временное распределение ветровалов в лесной зоне Западной Сибири в 2001–2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022а. Т. 19. № 3. С. 186–202.
- Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Ажигов И.О. Идентификация мезомасштабных конвективных облачных систем со смерчами по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 223–236.
- Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Ярынич Ю.И. Оценка конвективной неустойчивости атмосферы в случаях со шквалами, смерчами и крупным градом по данным спутниковых наблюдений и реанализа ERA5 // Оптика атмосферы и океана. 2022б. Т. 35. № 6(401). С. 429–435.
- Шишов А.Е., Горлач И.А. Алгоритм распознавания и мониторинга облачности глубокой конвекции по данным МИСЗ на основе целочисленного программирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2(376). С. 39–59.
- Abshaev M.T., Abshaev A.M., Aksenov A.A et al. CFD simulation of updrafts initiated by a vertically directed jet fed by the heat of water vapor condensation. // Scientific Reports. 2022. V. 12. P. 9356. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13185-2>
- Abshaev M.T., Abshaev A.M., Zakinyan R.G., et al. Investigating the feasibility of artificial convective cloud creation // Atm. Res. 2020. V. 243. P. 104998. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104998>
- Abshaev M.T., Zakinyan R.G., Abshaev A.M. et al. Atmospheric conditions favorable for the creation of artificial clouds by a jet saturated with hygroscopic aerosol // Atm. Res. 2022. V. 277. P. 106323. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106323>
- Abshaev M.T., Zakinyan R.G., Abshaev A.M. et al. Influence of Atmosphere Near-Surface Layer Properties on Development of Cloud Convection. // Atmosphere. 2019. V. 10. P. 131. <https://doi.org/10.3390/atmos10030131>
- Aleksandrova M. Cloudiness over the oceans at subarctic latitudes as a visible part of atmospheric moisture transport // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. V. 21. № 1. P. ES1004. <https://doi.org/10.2205/2020ES000738>
- Aleshina M.A., Semenov V.A., Chernokulsky A.V. A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data // Environmental Research Letters. 2021. V. 16. P. 105004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1cba>
- Andreev A.I., Pererva N.I., Kuchma M.O. Development of precipitation nowcasting method using geostationary satellite data // Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2020. V. 17. № 6. P. 18–22. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-6-18-22>
- Basharin D., Stankūnavičius G. European precipitation response to Indian ocean dipole events // Atmospheric Research. V. 273. 2022. P. 106142. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106142>
- Bezrukova N.A., Chernokulsky A.V. Clouds and Precipitation // in: Russian National Report: Meteorology and Atmospheric Sciences: 2019–2022 (Mokhov I. I. and A.A. Krivolutsky eds.), Moscow: MAKSS Press, 2023. 440 p. P. 86–150. <https://doi.org/10.29003/m3460.978-5-317-07017-5>
- Bloshchinskiy V.D., Kuchma M.O., Andreev A.I., Sorokin A.A. Snow and cloud detection using a convolutional neural network and low-resolution data from the Electro-L № 2 Satellite // Journal of Applied Remote Sensing. 2020. V. 14(3). P. 034506. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.034506>
- Chernokulsky A., Esau I. Cloud cover and cloud types in the Eurasian Arctic in 1936–2012 // International Journal of Climatology. 2019. V. 39(15). P. 5771–5790. <https://doi.org/10.1002/joc.6187>
- Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., et al. Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era // Monthly Weather Review. 2020. V. 148(8). P. 3081–3110. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0251.1>
- Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Azhigov I. Satellite-Based Study and Numerical Forecasting of Two Tornado Outbreaks in the Ural Region in June 2017 // Atmosphere. 2020. V. 11. P. 1146. <https://doi.org/10.3390/atmos11111146>
- Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., et al. Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010 // Atmospheric Research. 2022. V. 267. P. 105928. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105928>
- Chernokulsky A.V., Kozlov F.A., Zolina O.G., et al. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // Environmental Research Letters. 2019. V. 4. № 4. P. 045001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82>
- Ehrlich A., Wendisch M., Lüpkes C., et al. A comprehensive in situ and remote sensing data set from the Arctic CLOUD Observations Using airborne measurements during polar Day (ACLOUD) campaign. // Earth Syst. Sci. Data. 2019. V. 11. P. 1853–1881. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1853-2019>
- Essery R., Kim H., Wang L., et al. Snow cover duration trends observed at sites and predicted by multiple models // The Cryosphere. 2020. V. 14, P. 4687–4698. <https://doi.org/10.5194/tc-14-4687-2020>
- Evshtigeev V.P., Naumova V.A., Voronin D.Y. et al. Severe Precipitation Phenomena in Crimea in Relation to Atmospheric Circulation // Atmosphere. 2022. V. 13. P. 1712. <https://doi.org/10.3390/atmos13101712>
- Flossmann A.I., Manton M., Abshaev A. et al. Review of Advances in Precipitation Enhancement Research. // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2019. V.100(8). P. 1465–1480. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0160.1>
- Gabyshev D.N., Fedorets A.A., Aktaev N.E., et al. Acceleration of the condensational growth of water droplets in an external electric field // Journal of Aerosol Science. 2019. V. 135. P. 103–112.
- Gabyshev D.N., Szakáll M., Shcherbakov D.V. et al. Oscillatory Signatures in the Raindrop Motion Relative to the Air Medium with Terminal Velocity // Atmosphere 2022, 13, 1137. <https://doi.org/10.3390/atmos13071137>
- Golitsyn G.S., Chkhetiani O.G., Vazaeva, N.V. Clouds and Turbulence Theory: Peculiar Self-Similarity, 4/3 Fractal Exponent and Invariants. // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2022. V. 58. P. 645–648.
- Hosseini-Moghari S.-M., Sun S., Tang Q., Groisman P.Ya. Scaling of precipitation extremes with temperature in

- China's mainland: Evaluation of satellite precipitation data // *Journal of Hydrology*. 2022. V. 606. P. 127391. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127391>
- Ianchenko N.I. Features of the fluoride behavior in the snow cover under the action of technological and weather conditions // *Pure and Applied Chemistry*. 2022. V. 94. № 9. P. 1071–1077. <https://doi.org/10.1515/pac-2021-0901>
- Ianchenko N.I., Talovskaya A.V., Zanin A.A. Comparative assessment of fluorine, sodium, and lithium distributions in snow cover in Siberia // *Pure and Applied Chemistry*. 2022. V. 94. № 3. P. 261–267. <https://doi.org/10.1515/pac-2021-0319>
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson–Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kalchikhin V., Kobzev A., Nagorskiy P. et al. Connected Variations of Meteorological and Electrical Quantities of Surface Atmosphere under the Influence of Heavy Rain // *Atmosphere*. 2020. V. 11. P. 1195. <https://doi.org/10.3390/atmos11111195>
- Kalnajs L.E., Davis S.M., Goetz J.D. et al. A reel-down instrument system for profile measurements of water vapor, temperature, clouds, and aerosol beneath constant-altitude scientific balloons // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14. P. 2635–2648. <https://doi.org/10.5194/amt-14-2635-2021>
- Karagodin A., Rozanov E., Mironova I. On the Possibility of Modeling the IMF By-Weather Coupling through GEC-Related Effects on Cloud Droplet Coalescence Rate // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 881. <https://doi.org/10.3390/atmos13060881>
- Karashtin A.N., Shlyugaev Yu.V., Karashtina O.S. Cloud-to-ground lightning discharge indicator in the radio frequency emission of thunderclouds as observed in the Upper Volga region of Russia // *Atmospheric Research*. 2021. V. 256. P. 105559. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105559>
- Kharyutkina E., Pustovalov K., Moraru E., Nechepurenko O. Analysis of Spatio-Temporal Variability of Lightning Activity and Wildfires in Western Siberia during 2016–2021 // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 669. <https://doi.org/10.3390/atmos13050669>
- Khaustov A., Redina, M. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Snow Cover of Moscow (Case Study of the RUDN University Campus) // *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2021. V. 41(5). P. 1030–1041. <https://doi.org/10.1080/10406638.2019.1645707>
- Khaykin S.M., Moyer E., Krämer M. et al. Persistence of moist plumes from overshooting convection in the Asian monsoon anticyclone // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22. P. 3169–3189. <https://doi.org/10.5194/acp-22-3169-2022>
- Kislov A., Matveeva T., Antipina U. Precipitation Extremes and Their Synoptic Models in the Northwest European Sector of the Arctic during the Cold Season // *Atmosphere*. 2022, 13, 1116. <https://doi.org/10.3390/atmos13071116>
- Klimenko V.V., Lubyako L.V., Mareev E.A., Shatalina M.V. Ground-based measurements of microwave brightness temperature and electric field fluctuations for clouds with a different level of electrical activity // *Atmospheric Research*. 2022. V. 266. P. 105937. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105937>
- Korolev V., Gorshenin A. Probability Models and Statistical Tests for Extreme Precipitation Based on Generalized Negative Binomial Distributions // *Mathematics*. 2020. V. 8. P. 604. <https://doi.org/10.3390/math8040604>
- Korolev V., Gorshenin A., Belyaev K. Statistical Tests for Extreme Precipitation Volumes // *Mathematics*. 2019. V. 7. P. 648. <https://doi.org/10.3390/math7070648>
- Kostsov V.S., Ionov D.V., Kniffka A. Detection of the cloud liquid water path horizontal inhomogeneity in a coastline area by means of ground-based microwave observations: feasibility study // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. P. 4565–4587. <https://doi.org/10.5194/amt-13-4565-2020>
- Kostsov V.S., Kniffka A., Stengel M., Ionov D.V. Cross-comparison of cloud liquid water path derived from observations by two space-borne and one ground-based instrument in northern Europe // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. V. 12. P. 5927–5946. <https://doi.org/10.5194/amt-12-5927-2019>
- Kotova E.I., Topchaya V.Yu. Chemical and algological composition of the snow cover at the mouth of the Onega River (White Sea basin) // *Pure and Applied Chemistry*. 2022. V. 94. № 3. P. 291–295. <https://doi.org/10.1515/pac-2021-0309>
- Kozhevnikov A.Y., Falev D.I., Sypalov S.A. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow cover of the northern city agglomeration // *Sci Rep*. 2021. V. 11. P. 19074. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98386-x>
- Krinititskiy M., Aleksandrova M., Verezemskaya P. et al. On the Generalization Ability of Data-Driven Models in the Problem of Total Cloud Cover Retrieval // *Remote Sens*. 2021. V. 13. P. 326. <https://doi.org/10.3390/rs13020326>
- Krupnova T.G., Rakova O.V., Struchkova G.P. et al. Insights into Particle-Bound Metal(loid)s in Winter Snow Cover: Geochemical Monitoring of the Korkinsky Coal Mine Area, South Ural Region, Russia // *Sustainability*. 2021. V. 13. P. 4596. <https://doi.org/10.3390/su13094596>
- Kulikov M.Y., Belikovich M.V., Skalyga N.K. et al. Skills of Thunderstorm Prediction by Convective Indices over a Metropolitan Area: Comparison of Microwave and Radiosonde Data // *Remote Sens*. 2020. V. 12. P. 604. <https://doi.org/10.3390/rs12040604>
- Kustova N., Konoshonkin A., Shishko V. et al. Coherent Backscattering by Large Ice Crystals of Irregular Shapes in Cirrus Clouds. // *Atmosphere*. 2022a. V. 13. P. 1279. <https://doi.org/10.3390/atmos13081279>
- Kustova N., Konoshonkin A., Shishko V. et al. Depolarization Ratio for Randomly Oriented Ice Crystals of Cirrus Clouds // *Atmosphere*. 2022b. V. 13. P. 1551. <https://doi.org/10.3390/atmos13101551>
- Kuzhevskaya I.V., Zhukova V.A., Koshikova T.S. et al. The spatio-temporal distribution of mesoscale convective complexes over the Southeastern Western Siberia // *Geosphere Research*. 2021. № 3. P. 115–124.
- Lesev V. N., Shapovalov V. A., Ashabokov B. A. et al. 3D model of a convective cloud: the interaction of microphysical and electrical processes // *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. V. 23(1). P. 1–18. <https://doi.org/10.17654/HM023010001>

- Liang, Abshaev M., Abshaev A. et al. Water vapor harvesting nanostructures through bioinspired gradient-driven mechanism // *Chem. Phys. Let.* 2019. V. 728. P. 167–173. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2019.05.008>
- Liu Y., Zhu Y., Wang H., et al. Role of autumn Arctic Sea ice in the subsequent summer precipitation variability over East Asia // *International Journal of Climatology*. 2020. V. 40. P. 706–722. <https://doi.org/10.1002/joc.6232>
- Lockhoff M., Zolina O., Simmer C., Schulz J. Representation of Precipitation Characteristics and Extremes in Regional Reanalyses and Satellite- and Gauge-Based Estimates over Western and Central Europe // *J. Hydrometeorol.* 2019. V. 20. P. 1123–1145. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0200.1>
- Mikhailov E.F., Pöhlker M.L., Reinmuth-Selzle K. et al. Water uptake of subpollen aerosol particles: hygroscopic growth, cloud condensation nuclei activation, and liquid–liquid phase separation // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21. P. 6999–7022. <https://doi.org/10.5194/acp-21-6999-2021>
- Mikhailov E.F., Vlasenko S.S. High-humidity tandem differential mobility analyzer for accurate determination of aerosol hygroscopic growth, microstructure, and activity coefficients over a wide range of relative humidity // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. P. 2035–2056. <https://doi.org/10.5194/amt-13-2035-2020>
- Moskovchenko D., Pozhitkov R., Lodygin E., Toptygina M. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Snow Cover in the City of Tyumen (Western Siberia, Russia) // *Toxics*. 2022. V. 10. P. 743. <https://doi.org/10.3390/toxics10120743>
- Mostamandi S., Predybaylo E., Osipov S., et al. Sea Breeze Geoenvironment to Increase Rainfall over the Arabian Red Sea Coastal Plains // *Journal of Hydrometeorology*. 2022. V. 23(1). P. 3–24. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0266.1>
- Noskova T.V., Lovitskaya O.V., Panina M.S. et al. Organic carbon in atmospheric precipitation in the urbanized territory of the South of Western Siberia, Russia // *Pure and Applied Chemistry*. 2022. V. 94. № 3. P. 309–315. <https://doi.org/10.1515/pac-2021-0321>
- Okamoto H., Sato K., Borovoi A. et al. Interpretation of lidar ratio and depolarization ratio of ice clouds using spaceborne high-spectral-resolution polarization lidar // *Opt. Express*. 2019. V. 27. P. 36587–36600. <https://doi.org/10.1364/OE.27.036587>
- Okamoto H., Sato K., Borovoi A. et al. Wavelength dependence of ice cloud backscatter properties for spaceborne polarization lidar applications // *Opt. Express*. 2020. V. 28. P. 29178–29191. <https://doi.org/10.1364/OE.400510>
- Opekunov A.Y., Opekunova M.G., Kukushkin S.Y. et al. Mineralogical–Geochemical Characteristics of the Snow Cover in Areas with Mining and Ore-Processing Facilities. // *Geochem. Int.* 2021. V. 59. P. 711–724. <https://doi.org/10.1134/S0016702921060070>
- Petrov V.V., Bazanin N.V., Kirin D.V. et al. Relationship Between Microphysical Characteristics and Turbulence in Winter Clouds // in: *Physics of the Atmosphere, Climatology and Environmental Monitoring. Modern Problems of Atmospheric Physics*. Springer, 2022. P. 269–275.
- Santolaria-Otín M., Zolina O. Evaluation of snow cover and snow water equivalent in the continental Arctic in CMIP5 models // *Climate Dynamics*. 2020. V. 55. P. 2993–3016. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05434-9>
- Shepetov A., Antonova V., Kalikulov O. et al. The prolonged gamma ray enhancement and the short radiation burst events observed in thunderstorms at Tien Shan // *Atmospheric Research*. 2021. V. 248. P. 105266. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105266>
- Shestakova A.A., Toropov P.A. Orographic and lake effect on extreme precipitation on the Iranian coast of the Caspian Sea: a case study // *Meteorology and Atmospheric Physics*. 2021. V. 133. P. 69–84. <https://doi.org/10.1007/s00703-020-00735-4>
- Shikhov A., Chernokulsky A., Kalinin N. et al., Climatology and Formation Environments of Severe Convective Windstorms and Tornadoes in the Perm Region (Russia) in 1984–2020 // *Atmosphere*. 2021. V. 12. P. 1407. <https://doi.org/10.3390/atmos12111407>
- Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Azhigov I.O., and Semakina A.V. A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986–2017 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2020. V. 12. P. 3489–3513. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3489-2020>
- Shikhovtsev A.Y., Kovadlo P.G., Khaikin V.B., Kiselev A.V. Precipitable Water Vapor and Fractional Clear Sky Statistics within the Big Telescope Alt-Azimuthal Region // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. P. 6221. <https://doi.org/10.3390/rs14246221>
- Shishko V., Konoshonkin A., Kustova N. et al. Coherent and incoherent backscattering by a single large particle of irregular shape // *Opt. Express*. 2019. V. 27. P. 32984–32993. <https://doi.org/10.1364/OE.27.032984>
- Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Timofeev D.N. Light scattering by spherical particles for data interpretation of mobile lidars // *Optical Engineering*. 2020. V. 59(8). P. 083103. <https://doi.org/10.1117/1.OE.59.8.083103>
- Shuvalova J., Chubarova N., Shatunova M. Impact of Cloud Condensation Nuclei Reduction on Cloud Characteristics and Solar Radiation during COVID-19 Lockdown 2020 in Moscow // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 1710. <https://doi.org/10.3390/atmos13101710>
- Sin'kevich A., Boe B., Pawar S. et al. Investigation of Thundercloud Features in Different Regions // *Remote Sens.* 2021. V. 13. P. 3216. <https://doi.org/10.3390/rs13163216>
- Sterlyadkin V.V. Some Aspects of the Scattering of Light and Microwaves on Non-Spherical Raindrops // *Atmosphere*. 2020. V. 11. P. 531. <https://doi.org/10.3390/atmos11050531>
- Svechnikova E.K., Ilin N.V., Mareev E.A., Chilingarian A.A. Characteristic features of the clouds producing thunderstorm ground enhancements // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2021. V. 126. P.e2019-JD030895. <https://doi.org/10.1029/2019JD030895>
- Sviashchennikov P., Drugorub A. Long-term trends in total cloud cover in the Arctic based on surface observations in 1985–2020 // *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*. 2022. V. 22. P. 33–43. <https://doi.org/10.12775/bgeo-2022-0003>
- Tarabukina L., Kozlov V. Seasonal Variability of Lightning Activity in Yakutia in 2009–2019 // *Atmosphere*. 2020. V. 11. P. 918. <https://doi.org/10.3390/atmos11090918>

- Tarasenkov M.V., Engel M.V., Zonov M.N., Belov V.V.* Assessing the Cloud Adjacency Effect on Retrieval of the Ground Surface Reflectance from MODIS Satellite Data for the Baikal Region // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 2054.  
<https://doi.org/10.3390/atmos13122054>
- Topchaya V.Yu., Chechko V.A.* Study of insoluble atmospheric material of the snow cover of the coastal zone of the southeastern Baltic Sea // *Regional Studies in Marine Science*. 2022. V. 52. P. 102399.  
<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102399>
- Topchaya V.Yu., Kotova, E.I.* Composition of rainfall in the coastal zone of the Kaliningrad region of the Russian Federation (based on data from 2019) // *Pure and Applied Chemistry*. 2022. V. 94. № 3. P. 285–290.  
<https://doi.org/10.1515/pac-2021-0302>
- Ukrainsev A.V., Plyusnin A.M., Zaikovskii V.I.* Morphology and chemical composition of dispersed particles in the snow cover of burnt forest areas in Western Transbaikalia (Russia) // *Applied Geochemistry*. 2020. V. 122. P. 104723.  
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104723>
- Vasil'chuk Y., Chizhova J., Budantseva N. et al.* Stable isotope composition of precipitation events revealed modern climate variability // *Theor Appl Climatol*. 2022. V. 147. P. 1649–1661.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-021-03900-w>
- Veselovskii I., Hu Q., Goloub P. et al.* Combined use of Mie–Raman and fluorescence lidar observations for improving aerosol characterization: feasibility experiment // *Atmos. Meas. Tech*. 2020. V. 13. P. 6691–6701.  
<https://doi.org/10.5194/amt-13-6691-2020>
- Vlasov D., Vasil'chuk J., Kosheleva N., Kasimov N.* Dissolved and Suspended Forms of Metals and Metalloids in Snow Cover of Megacity: Partitioning and Deposition Rates in Western Moscow // *Atmosphere*. 2020. V. 11. P. 907.  
<https://doi.org/10.3390/atmos11090907>
- Vlasov D.V., Kasimov N.S., Eremina I.D., et al.* Partitioning and solubilities of metals and metalloids in spring rains in Moscow megacity // *Atmospheric Pollution Research*. 2021. V. 12. № 1. P. 255–271.  
<https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.09.012>
- Volkov V.V., Petrov V.V., Krutikov N.O.* Measurement of Cloud Water Content from a Research Aircraft. // in: *Physics of the Atmosphere, Climatology and Environmental Monitoring. Modern Problems of Atmospheric Physics*. Springer. 2022. P. 339–346.
- Volodin E.* The mechanisms of cloudiness evolution responsible for equilibrium climate sensitivity in climate model INM-CM4-8 // *Geophysical Research Letters*. 2021. V. 48. P. e2021GL096204.  
<https://doi.org/10.1029/2021GL096204>
- Volodina D.A., Talovskaya A.V., Devyatova A.Yu. et al.* Elemental composition of dust aerosols near cement plants based on the study of samples of the solid phase of the snow cover // *Pure and Applied Chemistry*. 2022. V. 94. № 3. P. 269–274.  
<https://doi.org/10.1515/pac-2021-0315>
- Voropay N., Ryazanova A., Dyukarev E.* High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia // *Atmospheric Research*. 2021. V. 254. P. 105528.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105528>
- Vyshkvarkova E., Sukhonos O.* Compound Extremes of Air Temperature and Precipitation in Eastern Europe. // *Climate*. 2022. V. 10. P. 133.  
<https://doi.org/10.3390/cli10090133>
- Wang Z., Shishko V., Kustova N. et al.* Radar-lidar ratio for ice crystals of cirrus clouds // *Opt. Express*. 2021. V. 29. P. 4464–4474.  
<https://doi.org/10.1364/OE.410942>
- Wang, P., Huang, Q., Tang, Q., et al.* Increasing annual and extreme precipitation in permafrost-dominated Siberia during 1959–2018 // *Journal of Hydrology*. 2021. V. 603. P. 126865.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126865>
- Yakovlev E., Druzhinina A., Zykova E. et al.* Assessment of Heavy Metal Pollution of the Snow Cover of the Severodvinsk Industrial District (NW Russia). // *Pollution*. 2022. V. 8(4). P. 1274–1293.  
<https://doi.org/10.22059/poll.2022.341500.1438>
- Yakovleva V., Zelinskiy A., Parovik R. et al.* Model for Reconstruction of  $\gamma$ -Background during Liquid Atmospheric Precipitation // *Mathematics*. 2021. V. 9. P. 1636.  
<https://doi.org/10.3390/math9141636>

## Russian Studies on Clouds and Precipitation in 2019–2022

N. A. Bezrukova<sup>1, \*</sup> and A. V. Chernokulsky<sup>2, \*\*</sup>

<sup>1</sup>Central Aerological Observatory, Dolgoprudnyi, Pervomaiskaya 3, Moscow oblast, 141701 Russia

<sup>2</sup>Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Pyzhevsky per., 3, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

\*e-mail: bezrukova@cao-rhms.ru

\*\*e-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru

Results of Russian studies on cloud physics, precipitation, and weather modification in 2015–2018 are presented based on a survey prepared for the Russian National Report on Meteorology and Atmospheric Sciences to the 28th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics. Results concerning general issues of observation and modeling of clouds and precipitation, including convective clouds, issues of studying microphysical and optical characteristics of clouds, and weather modification are discussed.

**Keywords:** clouds, precipitation, convection, cloud microphysics, condensation nuclei, satellite and ground-based measurements of clouds and precipitation, cloud and precipitation modeling, weather modification