

УДК 504.37,504.35,551.515

## РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ В 2015–2018 гг.

© 2020 г. Н. А. Безрукова<sup>а</sup>, \*, А. В. Чернокульский<sup>б</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Центральная аэрологическая обсерватория (ФГБУ “ЦАО”),  
ул. Первомайская, 3, г. Долгопрудный, Московская обл., 141700 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 23.03.2020 г.

После доработки 27.03.2020 г.

Принята к публикации 01.04.2020 г.

Представлены результаты российских исследований физики облаков, осадков и активных воздействий на облачные процессы в 2015–2018 гг. на основе обзора, подготовленного для Национального отчета России по метеорологии и атмосферным наукам к 27 Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (Russian National Report: Meteorology and Atmospheric Sciences: 2015-2018: for the XXVII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Mokhov I.I. and Krivolutsky A.A. eds.). Moscow: MAKS Press, 2019. 332 pp. doi:10.29003/m662.978-5-317-06182-1.).

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

DOI: 10.31857/S0002351520040021

### ВВЕДЕНИЕ

Облака играют важную роль в формировании различных типов погоды и климата и, в то же время, являются фактором неопределенности в существующих теоретических и численных моделях, в частности, процессы в облаках по-прежнему недостаточно подробно описаны в прогностических моделях погоды и климата. В разных моделях существенно различается реакция этих процессов на изменения динамических и термодинамических характеристик атмосферы. В то же время, и данные наблюдений за макро- и микрофизическими свойствами облаков существенным образом различаются между собой.

В данном обзоре представлены основные результаты российских исследований облаков и осадков за 2015–2018 гг. Обсуждаются результаты, касающиеся общих вопросов исследований облаков и осадков, в том числе конвективных, их климатологии и реакции на изменение климата, вопросов изучения микрофизических и оптических характеристик облаков, химического состава осадков, взаимодействия облаков и аэрозоля, активного воздействия на облака и осадки.

Обзор подготовлен в Комиссии по облакам и осадкам Национального геофизического комитета для Национального отчета по метеорологии и атмосферным наукам к 27 Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (г. Мон-

реаль, Канада, 08.07.2019–18.07.2019) [1]. Обзор за предыдущий период (2011–2014) представлен в [2].

### 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КЛИМАТОЛОГИИ ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ

В России в 2017 г. отмечался 100-летний юбилей появления первого отечественного оригинального “Атласа облаков” (Кузнецов В.В. Атлас облаков. Петроград: Николаевская Главная Физическая Обсерватория, 1917. 69 с.), который впоследствии неоднократно переиздавался [3]. На тот момент морфологическая классификация в атласе включала пять классов облаков: верхние, средневысокие, низкие, облака восходящих токов и приподнятый туман. Атлас сопровождался 50-ю цветными фотографическими изображениями, три из которых были сделаны при полете на воздушном шаре, что было техническим достижением на момент издания атласа. Атлас стал активно использоваться в практике наземных наблюдений за облаками [3]. В настоящее время наземные наблюдения за баллом облачности и морфологическими типами облаков приобрели новое качество: длительные наблюдения, проводимые по единой методике, позволяют выявить климатический сигнал в долгопериодной изменчивости облачного покрова. Исследования различных аспектов климатологии характеристик облаков представлены в [4–17].

В [15] на основе данных добровольных судовых наблюдений за атмосферными характеристиками, в том числе за баллом облачности, за период 1950–2011 гг. предложено трехпараметрическое распределение плотности вероятности общей и нижней облачности над поверхностью Мирового океана. Оценено пространственное распределение параметров полученного распределения. Обсуждается их роль при формировании наблюдаемых облачных условий в различных регионах Мирового океана.

В [12] впервые по данным станционных наблюдений получены оценки долгопериодных изменений облачности в арктических регионах (Норвежское, Баренцево и Карское моря) с конца XIX века. Выявлено, что среднегодовое значение общей облачности в данном регионе почти одинаково над поверхностью льда (73%) и поверхностью открытой воды (76%). В целом, облачность надо льдом имеет большую внутри- и межгодовую изменчивость. Выявлено статистически значимое сокращение общего количества облаков в середине XX столетия и увеличение в течение последних нескольких десятилетий, как для отдельных станций, так и для региона в целом. Наибольший тренд отмечается осенью – в период наибольших изменений концентрации морского льда. Выявлена долгопериодная значимая отрицательная корреляция между облачным покровом и концентрацией морского льда. Над открытой водой наблюдается одновременное увеличение повторяемости разорванной и переменной облачности (2–9 баллов), и сокращение повторяемости ясного и пасмурного неба. Эти изменения статистически значимы и, по-видимому, связаны с ростом повторяемости конвективных облаков и уменьшением слоистых.

Уменьшение доли слоисто-дождевых облаков отмечено и для Москвы по данным ежечасных визуальных наблюдений за период 1965–2016 гг. [13], которое также сопровождается уменьшением повторяемости сплошной облачности. При этом, уменьшение над Москвой количества облаков нижнего яруса (особенно ярко проявляется с 1990-х гг.) сопровождается тенденцией к увеличению количества общей облачности.

Увеличение общей облачности отмечено и над территорией Сибири на основе данных наблюдений за период 1969–2013 гг. [4–7]. При этом, основной рост выявлен до 2005 г., в 2006–2013 отмечено уменьшение облачности (в первую очередь в зимний период) [6]. Оценены также тренды количества слоистообразных облаков нижнего яруса, выделены регионы и сезоны с различными по знаку тенденциями, отмечена роль изменений нижней облачности на температурный режим региона [7]. Выделено два региона с разнонаправленной тенденцией изменения высоты нижней границы слоистообразной облачности (ВНГО): Западная Си-

бирь, где отмечается рост ВНГО (до 0.05 км/десятилетие), и Восточная Сибирь, где выявлено уменьшение ВНГО (до –0.14 км/десятилетие), при этом в осенний период ВНГО растет во всем регионе [6]. В [17] по данным наблюдений на аэродромах отмечено влияние ВНГО на горизонтальную дальность видимости: выявлено, что видимость < 100 м сопровождается ВНГО < 90 м.

Наряду с данными наземных наблюдений, для климатологических оценок также используются спутниковые данные. В [9] на основе как наземных, так и спутниковых наблюдений, а также данных реанализа, оценивается климатология и изменчивость облачности над Черным, Каспийским и Аральским морями за период 1991–2010 гг. Оценены среднегодовое количество облаков в регионе (около 49%) и годовой ход. Анализ межгодовой изменчивости показал отсутствие статистически значимых трендов во все сезоны кроме осени, когда наблюдается значимый рост (1.2%/десятилетие). С использованием других спутниковых данных в [10] для Черноморского региона для периода 1985–2009 гг., напротив, получено уменьшение количества облаков с величиной тренда – 4%/десятилетие. Выявлены четырехлетние циклы облачности. Сделано предположение о влиянии уменьшения облачности и соответствующего роста величины приходящей коротковолновой радиации на рост температуры поверхности Черного моря.

В [8] проведена климатологическая оценка количества дневной и ночной облачности и их разности по различным спутниковым данным в сопоставлении с наземными наблюдениями. Выявлено преобладание дневной облачности над сушей и над Северным полушарием в целом и преобладание ночной облачности над океаном и над Южным полушарием в целом, при этом различия между облачностью над сушей и океаном и, соответственно над Северным и Южным полушариями, сильнее проявляются в ночное время.

В [11, 14, 16] проанализировано вертикальное распределение облачности. В [14] на основе совместного использования спутниковых данных пассивного и активного дистанционного зондирования Земли оценено пространственно-временное распределение параметра перекрытия облаков  $\alpha$ , который характеризует близость перекрытия облачных слоев к максимальному ( $\alpha = 1$ ) или случайному ( $\alpha = 0$ ), а также позволяет оценить относительный вклад конвективных и слоистых облаков в общую облачность. Глобальное среднее значение параметра перекрытия облаков равно 0.26–0.36, что соответствует преобладанию случайного перекрытия облаков. Параметр  $\alpha$  меньше над океаном, чем над сушей. Максимальное перекрытие облаков преобладает в регионах с малым количеством облаков.

В [11, 16] получены оценки характеристик вертикального распределения облачных слоев, рассчитанные по данным радиозондовых наблюдений для всей Земли (1964–1998 гг.) [11] и для России (1964–2014 гг.) [16]. Облачные слои и безоблачные прослойки между ними рассчитаны на основе оценки температурно-влажностного расслоения атмосферы от поверхности Земли до 10 км. Рассчитаны средние месячные, сезонные, годовые значения числа облачных слоев, их среднеквадратических отклонений, определена амплитуда их изменений. Выявлено, что осредненная суммарная толщина облачных слоев изменяется в пределах 1.2–3.1 км. Показано, что толщина облачных слоев в 2–5 раз меньше толщины безоблачных слоев, что справедливо как для 6-километровых, так и для 1-километровых слоев.

Работы [18–52] посвящены различным аспектам климатологии осадков, в том числе экстремальных [23–26]. Обсуждается долгопериодная изменчивость осадков в различных регионах [23–25, 28, 29, 31–37] и ее причины [23, 27, 40–52].

В [19–21] статистически описаны продолжительности дождливых периодов и суммы осадков за эти периоды. В частности, в [19] для разных регионов показано, что флуктуации продолжительности дождливых периодов, измеренные в сутках, с очень высокой надежностью описываются отрицательным биномиальным распределением. С учетом этого для продолжительности дождливого периода предложены асимптотические модели распределения максимального суточного объема осадков, выпавшего за этот период [20], и отдельных квантилей этого распределения [21]. В частности, для аппроксимации максимального суточного объема осадков предложена асимптотическая модель, имеющая вид комбинации распределений Фреше и совпадающая с распределением положительной степени случайной величины, имеющей распределение Снедекора–Фишера. Адекватность предложенных моделей и методов их статистического анализа продемонстрирована на примере оценки параметров экстремального распределения по реальным данным наблюдений за осадками.

В [22] представлена климатология ливневых, обложных и морозящих осадков в Северной Евразии на основе данных наблюдений на 529 российских метеорологических станциях за период 1966–2014 гг. Осадки разного генезиса определены на основе разработанной методики с использованием срочных данных наземных наблюдений за осадками, характером погоды в срок и между сроками наблюдений, и за морфологическим типом облачности. Показано, что в среднем за год в Северной Евразии преобладают ливневые осадки (с максимумом в июле), с характерной для этого типа большой временной (внутригодовой и внутрисуточ-

ной) и пространственной изменчивостью. Максимум обложных осадков наблюдается в октябре. Показано, что на трехчасовых интервалах интенсивность ливневых осадков в 1.1–1.5 раза больше, чем обложных.

В [23–27] исследованы характеристики экстремальных осадков и их изменения. В [24] рассматриваются долгопериодные изменения некоторых характеристик экстремальных осадков на территории России по данным наблюдений на 1430 станциях за 1966–2012 гг. Количественно оценены линейные тренды характеристик экстремальных осадков, а также продолжительности периодов с осадками и без них. Предложены новые, более устойчивые статистические метрики для оценки экстремальных осадков. В целом на территории России выявлено усиление интенсивности экстремальных осадков, что повышает риск возникновения наводнений. При этом наблюдается также увеличение длительности периодов без осадков, что говорит о возможности возникновения засух. Таким образом, частота опасных гидрометеорологических явлений, связанных с избытком или же недостатком осадков, существенно увеличивается в последние десятилетия.

В [25] предложен термин “событие очень сильных осадков” (суточные суммы осадков, которые превышают пороговое значение, равное 0.999 квантилю). По данным наблюдений на 107 метеорологических станциях на европейской территории России (ЕТР) для 1966–2015 гг. обнаружены статистически значимые положительные тенденции общего количества подобных событий и связанных с ними сумм осадков, числа дней с этими событиями и числа пунктов, на которых регистрировались такие события; выявлены сезонные различия. В [26] поле осадков на юге ЕТР проанализировано с использованием “индекса концентрации осадков” по данным 42 метеорологических станций за период 1970–2010 гг. В [27] проанализированы особенности изменчивости экстремальных осадков на антарктической станции “Прогресс” с оценкой причин данной изменчивости. Установлено, что на термодинамические (нециркуляционные) процессы приходится 80% тренда экстремальных осадков.

В [23] выделены индикаторы экстремальных осадков для прибрежных регионов Европейского сектора Арктики и Черноморского побережья Кавказа – специфическая конфигурация барического поля и наличие фронтальной зоны в районе выпадения интенсивных осадков. Оценены изменения повторяемости выявленных индикаторов при потеплении климата. Показано, что в XXI в. повторяемость условий, сопровождающих случаи экстремальных осадков фронтального происхождения, увеличится летом на побережье юга Европейской России и в холодный период на Арктическом побережье.

Гололедные явления в средних широтах Северного полушария проанализированы в [28–30]. В [28] оценены такие количественные характеристики, как вес и толщина гололеда, продолжительность гололедных событий, по данным наблюдений на 958 российских станциях за период 1977–2013. Было подтверждено, что изморозь наблюдается в большинстве регионов России, однако гололедные явления наблюдаются только на ЕТР и на Дальнем Востоке. На арктическом побережье России это явление можно наблюдать даже в летние месяцы. Для большей части России выявлены статистически значимые тенденции уменьшения случаев формирования гололеда и изморози. Выявлены регионы со статистически значимыми изменениями массы гололеда. В [29] представлена климатология и изменчивость замерзающих осадков – гололеда и переохлажденной мороси – на территории Северной Евразии и Северной Америки по данным стационарных наблюдений (874 станции) за последние 40 лет. Выявлены регионы с наибольшей повторяемостью гололеда. Отмечены долгопериодные тенденции, в частности, на ЕТР и в Западной Сибири выявлен слабый рост повторяемости гололеда, при этом для России в целом отмечено сокращение частоты выпадения переохлажденной мороси.

Исследования региональных особенностей пространственного распределения осадков, а также их современные и прогнозируемые изменения представлены в работах [31–39]. В частности, в [32] проанализированы прогнозируемые изменения осадков в Арктике в XXI веке с использованием ансамбля климатических моделей CMIP5 для трех сценариев радиационного воздействия (RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5). Прогнозируется увеличение общего количества арктических осадков (до 50%). Отмечено, что наиболее “агрессивный” сценарий (RCP8.5) и модели с более высокой чувствительностью температуры к удвоению  $\text{CO}_2$ , обычно показывают более заметное увеличение осадков в Арктике. Более подробный обзор работ по изменению характеристик облаков и осадков при климатических изменениях и о роли облаков в климатической земной системе представлен в [40].

Причины изменений и изменчивости осадков оцениваются и обсуждаются в работах [41–52].

В [42, 43, 46, 52] оценивается связь осадков с циркуляционными характеристиками атмосферы. В [42] проведена оценка взаимосвязей между осадками разной интенсивности и векторным фронтогенезом. Установлено, что векторный фронтогенез является важным фактором образования осадков, следующим за конвективной неустойчивостью и наличием атмосферных фронтальных зон. Вращательный фронтогенез является наиболее информативным при разделении случаев наличия и

отсутствия осадков, в особенности сильных и очень сильных.

В [41, 45] исследована роль роста температуры поверхности Черного и Средиземного морей в усилении экстремумов осадков в прибрежных районах. Оценки получены на основе ансамбля численных экспериментов на чувствительность с использованием региональной модели WRF с явным воспроизведением конвекции. В частности, в [41] было установлено, что рост температуры поверхности Черного моря (ТПЧМ) сыграл важную роль в усилении осадков 6–7 июля 2012 года, которые привели к катастрофическому наводнению в Крымске. Показано, что зависимость величины осадков от ТПЧМ нелинейна и резкое увеличение осадков происходит при превышении порогового значения, которое было достигнуто в начале XXI века. Скачкообразное увеличение осадков связано с переходом к режиму глубокой конвекции. Еще более высокая ТПЧМ (согласно сценариями будущих климатических изменений в ближайшие 50 лет) не приведет дальнейшему росту осадков из-за уменьшения относительной влажности в приземном слое при интенсивных конвективных потоках.

Влияние крупномасштабных мод климатической изменчивости на осадки исследуется в [44, 47–50]. В [48] получены оценки вероятности аномалий осадков в весенне-летние месяцы при разных фазовых переходах для явлений Эль-Ниньо для разных российских регионов. В [49] найдены статистически значимые различия в распределении осадков на ЕТР в зависимости от фазы Атлантической мультидесятилетней осцилляции (АМО). В частности, разница осадков на ЕТР между периодами с теплой и холодной фазами АМО положительна весной и отрицательна летом. В [47] наряду с АМО, рассматривается влияние на осадки североатлантического колебания и арктической осцилляции.

Влияние урбанизации на режим формирования осадков исследовалось в [51] на примере Москвы. Проводились длительные эксперименты (десять летних сезонов) на чувствительность с использованием модели COSMO-CLM с высоким разрешением (1 км) с включенной и выключенной городской параметризацией TERRA\_URB. Сравнение экспериментов выявило существенное увеличение количества летних осадков (до +25%) над центром города и над его подветренной стороной.

## 2. КОНВЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, КОНВЕКТИВНАЯ ОБЛАЧНОСТЬ, ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ОБЛАКАХ

Конвективные процессы и конвективная облачность при достаточном их развитии сопровождаются опасными явлениями погоды. В связи

с этим, изучению этих процессов уделяется большое внимание. Различные аспекты развития конвекции, конвективных облаков и опасных погодных явлений конвективного характера исследованы в [53–106].

Теоретические работы в области исследования конвективных термиков представлены в [53–55]. В [53] рассмотрены отдельные задачи конвекции в атмосфере, для которых пространственные размеры источников плавучести и количества движения могут играть существенную роль. В [55] получены аналитические решения для различных режимов динамики термика в сдвиговом потоке с учетом тепловыделения в термике, исследовано нелинейное взаимодействие горизонтальной и вертикальной составляющих движения термика, и показано, что интенсификация вовлечения среды за счет взаимодействия термика с поперечным потоком может приводить к существенному уменьшению его подвижности.

В [56–76] исследованы различные характеристики кучево-дождевых и грозо-градовых облаков, в том числе характеристики турбулентности в облаках [60, 69, 76]. В частности, в [76] на основе самолетных наблюдений в конвективных облаках тропической зоны проанализированы спектры и коспектры турбулентных движений. Показано, что коспектры для вертикальных потоков тепла позволяют классифицировать конвективные облака по стадиям их развития и выявить стадии роста, стабилизации и диссипации облака, при этом величина перегрева облака относительно окружающего воздуха является параметром, определяющим стадию развития облака. Выявлена взаимосвязь между интегральными характеристиками турбулентности и водности (средними значениями и функциями распределений параметров) для разных стадий развития конвективных облаков.

Эффекты слияния конвективных облаков исследуются в [61, 62, 64, 66, 74, 75]. В [66] на основе радиолокационных данных о 14 случаях слияния облаков в теплый период года показано, что процесс слияния приводит к увеличению медиан в распределении следующих характеристик: высоты верхней границы облаков, высоты максимальной отражаемости, максимальной отражаемости в столбе атмосферы, максимальной интенсивности осадков, а также к уменьшению площади облаков, однако данные изменения статистически не значимы. На основе модельных расчетов [74] показано, что процесс слияния оказывает существенное влияние на эволюцию объединенного облака. В нем, по сравнению с отдельно взятым облаком, увеличиваются скорость восходящего потока, водность и интенсивность осадков. В [64] установлено двукратное увеличение площади осадков в результате слияния конвективных ячеек.

В [56] на основе экспериментальных данных и численного моделирования исследуется влияние внутренних гравитационных волн от конвективных облаков на атмосферное давление и пространственное распределение возмущений температуры. Отмечено, что продолжительность существования внутренних гравитационных волн от нагрева атмосферы при образовании конвективного облака может существенно превышать время существования облака. Показано, что форма возмущения атмосферного давления под конвективным облаком представляет из себя последовательность минимума и максимума вариации давления, при этом амплитуда максимума может превышать амплитуду минимума. Вероятным объяснением минимумов давления является нагрев воздуха за счет процессов конденсации водяного пара при образовании конвективных облаков. В свою очередь охлаждение атмосферы за счет испарения выпадающих осадков может приводить к повышению атмосферного давления.

Особенности формирования и развития градовых очагов в мощных конвективных облаках исследуются на основе радиолокационных данных [63] и модельных расчетов [67]. В частности, в [63] на основе анализа 314 градовых ячеек выявлены наиболее информативные временные характеристики развития градовых очагов, получены характеристики изменчивости объема градового очага, оценена эмпирическая зависимость максимального объема градового очага от максимальной радиолокационной отражаемости градового облака. Для исследования случая особо сильного градобития 29 мая 2012 года в Пятигорске использована трехмерная нестационарная модель конвективного облака [67]. Получены такие значения облачных характеристик, как водность, ледность, скорость вертикальных движений, проанализирована трансформация в период развития облака поля осадков и его зарядовой структуры. Выявлено расхождение оценок интенсивности осадков между результатами расчета и данными наблюдений. Отмечена взаимосвязь между динамическими, микрофизическими и электрическими характеристиками облака.

Электрические характеристики конвективных облаков также рассматриваются в [57–60, 65, 68, 69, 71–73]. В частности, в [59, 65] на основе анализа развития мощного грозо-градового облака выявлены взаимосвязи характеристик электрических разрядов облака с интенсивностью осадков, полем радиационной температуры облака, полученной по спутниковым данным [59] и с радиолокационными параметрами, полученными с помощью наземного радиолокатора [65]. Установлена тесная связь суммарного тока молний с частотой молний и рассчитан общий заряд, перенесенный отрицательными молниями из облака на землю. Установлено, что с увеличением интенсивности осадков увеличивается частота электрических

разрядов, достигая максимума при интенсивности осадков около 70 мм/ч. Выявлена тесная корреляция между масштабом неоднородности поля радиационной температуры облака и частотой электрических разрядов. Представлены регрессионные уравнения, связывающие радиолокационные критерии грозоопасности и частоту молний.

В [60, 69] впервые оценена роль турбулентности в электризацию грозового облака. Используется модель генерации крупномасштабного электрического поля в слабопроводящей среде, содержащей две фракции сталкивающихся гидрометеоров. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными. Было обнаружено, что сценарии генерации и роста электрического поля существенно различаются для механизмов индуктивного и неиндуктивного заряда. Найден диапазон параметров грозового облака (проводимости и радиуса облачных частиц), для которых электрическое поле экспоненциально растет в случае индуктивного заряда, что делает индуктивный механизм доминирующим вблизи поля пробоя в турбулентных зонах грозовых облаков.

Вариации электрического поля в приземном слое атмосферы во время прохождения кучево-дождевых облаков исследуются в [58, 68, 73]. Найдены связи между характерными особенностями выявленных вариаций градиента потенциала и конвективными облаками различного происхождения, находящимися на разных этапах своего развития. Предложена классификация типов отклика приземного электрического поля на прохождение изолированного конвективного облака. В [71, 72] проанализирован факт экспериментального наблюдения интенсивного широкополосного радишума, зарегистрированного во время прохождения атмосферного фронта. Рассмотрены интенсивность и спектр зарегистрированного излучения. Сделан вывод о присутствии во фронтальной облачности дополнительного не-теплового источника радишума. Выдвинуто предположение о том, что это могут быть множественные электрические микрозаряды на гидрометеорах в конвективном облаке.

Более подробный обзор российских исследований по атмосферному электричеству, включая исследование электрических характеристик конвективных облаков, представлен в [77].

Аспекты развития конвекции в различных регионах – от тропических до полярных широт – рассматриваются в [78–105]. Для Северной Евразии большинство региональных исследований сфокусировано на опасных явлениях погоды (ОЯП) конвективного характера, в том числе грозах [79, 81, 82, 87, 95], шквалах [92, 94, 100], смерчах [83, 85, 89–91, 93, 96, 104], комплексах событий, связанных с прохождением конвективных систем [84, 101, 105].

индексов конвективной неустойчивости [80, 83, 88, 96, 98, 99, 102, 103], в том числе их диагностической и прогностической значимости для оценки условия формирования ОЯП конвективного характера.

В [78] проанализирован случай проникающей конвекции в тропиках (для квазирегулярного облака “Гектор”) и получены оценки транспорта влаги в верхней тропосфере и нижней стратосфере по данным самолетных наблюдений и модельным оценкам. Сравнение данных показало, что в качестве порогового значения ледности облака в модели WRF лучше использовать величину 0.1 мг/кг (обычно используется величина 10 мг/кг). Получены оценки влияния проникающей конвекции на содержание влаги в нижней стратосфере. В исследуемом случае отмечен рост влагосодержания, при этом отмечено, что проникающая конвекция может приводить как к росту, так и уменьшению влагосодержания в ненасыщенном слое в зависимости от высоты этого слоя и времени с начала процесса конвекции.

В [86, 97] исследуется развитие конвективных облаков во время холодных вторжений в Черноморском регионе [97] и в Атлантическом секторе Арктики [86]. В [97] на основе спутниковых данных и результатов численного моделирования с моделью WRF определена облачная структура и рассмотрены основные составляющие баланса конвективной кинетической энергии в атмосферном пограничном слое во время интенсивного холодного вторжения над Черным морем. Обнаружено увеличение горизонтальных размеров конвективных ячеек над морем в направлении ветра. Отмечено увеличение высоты верхней границы облаков при удалении от побережья, которое корректно воспроизвелось моделью. В [86] конвективная облачность в атлантическом секторе Арктики рассматривается с точки зрения гипотезы пространственно-организованных полей конвекции. Показано, что в высоких широтах конвективная облачность имеет иную динамическую природу, обусловленную адвекцией холодного воздуха на относительно теплую поверхность во время холодных вторжений. Показано, что физические свойства облачности, например тип конвективных облаков, и ее пространственное расположение взаимосвязаны – у кромки льда (береговой линии) преобладает слабо развитая кучевая облачность (Cu hum, Cu med), организованная в конвективные валы. В то же время над открытым морем преобладает более развитая кучевая (Cu cong) и кучево-дождевая облачность, организованная в конвективные ячейки. Согласно выдвигаемой гипотезе, отступление границы льда может приводить к росту конвективной облачности.

В [105] на основе различных данных, включая данные радаров, спутников и численные расчеты,

исследован редкий случай трансформации суперячейкового облака в мезомасштабный конвективный комплекс 13 июля 2016 года. Событие сопровождалось возникновением опасных конвективных явлений, в том числе смерчей. Обсуждается возможность улучшения качества сверхкраткосрочного прогноза ОЯП конвективного характера на основе использования информации о характерных особенностях (т.н. сигнатурах) на верхней границе облака по спутниковым и радарным данным.

В [99] представлена методика идентификации смерчевых треков в лесных регионах на основе спутниковых данных. Метод позволяет объективно (вне зависимости от плотности населения и плотности наблюдательной сети) оценивать климатологию относительно сильных смерчей в лесной зоне. Метод основан на выявлении узких и вытянутых ветровалов по спутниковым данным Landsat и их дальнейшей верификации по снимкам с высоким разрешением. На основе метода получена информация о 110 смерчах в лесной зоне европейской территории России и Урала (105 из них были ранее не известны). Оценены длина, ширина и вероятная интенсивность смерчей, восстановлены даты их прохождения. Выявлена более высокая плотность смерчей в лесной зоне России, чем считалось ранее. В [98] на основе спутниковых данных Landsat уточнены также характеристики разрушительных смерчей 9 июня 1984 года во время так называемой Ивановской вспышки смерчей (tornado outbreak). Восстановлены траектории и характеристики восьми смерчей, которые существенным образом отличаются от полученных ранее оценок. Показано, что по средней интенсивности смерчей Ивановская вспышка 1984 является одной из наиболее сильных в Европе (самой сильной для событий с  $> 5$  смерчами) и находится в верхнем квартиле среди подобных событий в США.

В [89, 90, 93] рассмотрены характеристики водных смерчей над Черным морем, разработана технология мониторинга смерчеопасных ситуаций на основе радиолокационных и гронопеленгационных данных, данных спутникового зондирования и результатов численного моделирования атмосферы, предложен новый индекс смерчеопасности, учитывающий климатические особенности формирования водных смерчей в данном регионе. Исследование индексов конвективной неустойчивости для оценки условий смерчегенеза проводится также в [83, 85, 91, 96, 103], при этом в [96] выявлен рост риска смерчегенеза в Северной Евразии при современных и ожидаемых изменениях климата. Более подробный обзор российских исследований по особенностям динамики смерчей представлен в [106].

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

Микрофизические и оптические характеристики облачных сред рассмотрены в [107–117].

По данным лабораторных исследований [107] и натурных наблюдений [108] обнаружены признаки капельного упорядочивания в облачной среде. В [107] установлено, что носителями порядка являются цепочки капель микронного размера с фиксированным межкапельным расстоянием, которое увеличивается с ростом размеров капель. Предложен и численно обоснован механизм увеличения плавучести тумана в процессе конденсационного роста капель. В [108] предположена связь упорядочивания капель с порывами ветра и интенсивной турбулентностью. В частности, показано, что боковой порыв ветра приводит в группировке капель различного размера в разных слоях. Отмечено, что кластеризация облачных частиц должна учитываться при интерпретации радиолокационных данных, например соотношения между радиолокационной отражаемостью и интенсивностью выпадающих осадков.

В [109–114] исследованы оптические свойства облаков. Созданы базы данных для матриц обратного рассеяния ледяных кристаллов перистых облаков с типичными формами, в том числе гексагональными, и размерами кристаллов для разной ориентации в пространстве [110, 112, 113]. Выявлены основные физические закономерности при рассеянии света на ледяных кристаллах перистых облаков. В частности, показано, что логарифм матрицы рассеяния для деформированных гексагональных ледяных кристаллов-столбиков может быть с хорошей точностью аппроксимирован линейной функцией логарифма размера частиц [111]. В [114] рассмотрены особенности распределения размеров облачных капель во время формирования глории на основе самолетных наблюдений в умеренных и арктических широтах. Показано, что для полученных распределений размеров капель воды в облаках во время глории мода радиуса находится в диапазоне 4–14 мкм, для случаев двойной глории выявлено бимодальное распределение.

В [115–117] анализируются электрические свойства капель в облаках и тумане. В [115] показано, что электростатическое притяжение капель и их слияние могут играть значительную роль в быстром росте облачных капель до размеров дождевых капель. В [116] предложен механизм электризации воды и льда при испарении (конденсации) и выполнены оценки электрического заряда капель воды сферической формы при различной напряженности поля и различных радиусах капель.

Роль аэрозолей в облако- и осадкообразовании и аспекты взаимодействия аэрозолей и облачной среды анализируются в [118–133].

Роль аэрозолей в качестве облачных ядер конденсации исследуется [118–126]. В [123] на основе численного моделирования оценено влияние сульфатных аэрозолей на образование облаков над морем. Показано, что наряду с хлоридом натрия значимым источником ядер конденсации в тропосфере над морем также служат фотохимические превращения диметилсульфида биогенного происхождения. Согласно модельным расчетам, без учета влияния сульфатных аэрозолей формирование облачности над морем в средней и верхней тропосфере затруднено. В [119, 120, 122] оценена роль аэрозольных свойств в процессе кристаллизации капель воды. Лабораторные эксперименты показывают повышение температуры замерзания капель вследствие присутствия частиц песка, глины и сажи в аэрозоле [120, 122].

В [118, 121, 124–126] оценивается роль аэрозоля в формировании и развитии конвективных облаков. На основании данных Amazon Tall Tower Observatory обнаружены различные режимы формирования конвективных облаков и над районом Амазонки в зависимости от свойств аэрозоля и метеорологических условий [125]. В частности, показано, что основным лимитирующим фактором в образовании капель в чистых условиях является количество аэрозолей, а в загрязненных условиях (вследствие сжигания биомассы при лесных пожарах) лимитирующим фактором являются характеристики восходящего потока. В [124, 126] на основе численного моделирования исследуется взаимодействие конвективных облаков с дымовым аэрозолем. Для двух случаев в Московской и Ленинградской областях показано, что дымовое загрязнение атмосферы привело к снижению интенсивности дождя и града [124]. Напротив, в [126] для Восточной Сибири показано, что сажа и зола способствуют формированию осадков, которые при отсутствии задымления практически не выпадают. В [118, 121] анализируется влияние сильного аэрозольного загрязнения на структуру заряда кучево-дождевого облака на основе наблюдений и моделирования.

В [127–133] исследуются гигроскопические свойства аэрозолей разных фракций в различных регионах. В частности, по данным измерений характерный диапазон параметра гигроскопичности аэрозоля был определен для моды Айткена в пригороде Санкт-Петербурга [133], для грубодисперсной фракции и фракции накопления в центральной Сибири [127], а также для моды Айткена и фракции накопления в Амазонии [129]. В [130, 132] гигроскопичность дымового аэрозоля, в том числе в зависимости от его возраста, была оценена на основе экспериментов в аэрозольной камере.

В [1] представлен более подробный список российских исследований, опубликованных в 2015–2018 гг. и посвященных моделированию аэрозолей и наблюдениям за ними, анализу их оптических и физических свойств, генезиса и химического состава, диагностике пространственно-временной изменчивости в различных регионах (включая Евразию, Арктику, различные части Мирового океана и т.д.). Российские исследования радиационных свойств аэрозолей представлены также в [134].

Химический состав осадков исследовался в [135–143]. В частности, в [135] на основе анализа проб снега с 570 российских наблюдательных станций по всей России проанализированы значения pH за период 2000–2013 гг. в зимний период. Анализ выявил отсутствие масштабных процессов закисления атмосферных осадков. Однако отдельные локальные эффекты могут быть существенными: в частности, противогололедные соли могут участвовать в гетерофазных химических реакциях и приводить к появлению хлористого водорода в осадках, наблюдаемых над Москвой [136].

В [139] оценена концентрация изотопа кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  в осадках над Москвой по данным наблюдений за 2014 г. Статистически значимая положительная корреляция была обнаружена между изотопно-кислородным составом осадков и приповерхностной температурой воздуха. Анализ обратных траекторий и синоптических карт показал, что наиболее изотопно легкие осадки характерны для случаев относительно холодных воздушных масс, медленно перемещающихся над материком в течение пяти дней до выпадения осадков. Напротив, быстрый воздушный транспорт из Атлантического океана приводит к относительно постоянным значениям  $\delta^{18}\text{O}$  осадков.

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

Актуальным направлением исследований остаются вопросы точности наблюдений за характеристиками облаков и осадков.

Развиваются методы контактных наблюдений в облачной среде, выполняемые с помощью самолетных наблюдений [144–151], в том числе – на базе самолета-лаборатории ЯК-42Д “Росгидромет” [144–147] (см. также [76, 114]). Данная лаборатория используется как для научных исследований, так и для практических задач по активному воздействию на облака. Во время исследовательских полетов выполняются актинометрические измерения и проводятся исследования термодинамических характеристик атмосферы [144], состава атмосферного газа и аэрозоля [145, 146], микрофизических характеристик облаков и облакообразующего аэрозоля [76, 114, 145, 146], радиоактивно-



сти и спектральных характеристик подстилающей поверхности [147]. Полученные измерения составляют единую базу данных, которая может использоваться для валидации метеорологических и климатических моделей и других видов метеорологических наблюдений (например, спутниковых).

Самолетные исследования характеристик облаков проводились также российскими специалистами в рамках международного проекта StratoClim (<http://stratoclim.org/>) для изучения тропосферно-стратосферного взаимодействия в условиях развития облаков глубокой конвекции [148, 149] (см. также [78]). В частности, применялась измерительная система на базе российского стратосферного самолета М-55 “Геофизика”, которая включает в себя в том числе приборы для измерения концентрации озона и водяного пара в стратосфере – хемилюминесцентный озонметр FOZAN и флуоресцентный гигрометр FLASH-M55 соответственно.

В [152] рассматриваются технологии получения метеорологической информации с применением беспилотных авиационных систем. Приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на создание методов и средств метеорологических наблюдений на базе беспилотных летательных аппаратов, а также результаты измерений пространственных распределений некоторых метеорологических параметров атмосферы с помощью таких аппаратов.

В [153–163] рассматриваются различные аспекты дистанционного зондирования облаков и осадков с помощью наземных радаров.

Начиная с 2014 года в России разворачивается сеть радиолокационных систем нового поколения ДМРЛ-С [153], которая на данный момент включает 36 станций с установленными доплеровскими локаторами с двойной поляризацией (<http://meteorad.ru>). Сеть интегрирована в систему наблюдения за погодой, развернутой в ситуационном центре Росгидромета, и с 10-минутным шагом представляет информацию о верхней границе облаков, погодных явлениях и интенсивности осадков. В [154, 155] представлены особенности использования новой радиолокационной информации для улучшения качества прогноза погоды. В частности, в [154] показано, что усвоение данных ДМРЛ-С о радиальном ветре и отражаемости в численной модели прогноза погоды WRF-ARW для Московского региона позволяет более точно воспроизводить общую структуру и положение полей облаков и осадков, однако, происходит завышение интенсивности конвекции, что приводит к переоценке числа гроз и интенсивности осадков.

Особенности калибровки радарных наблюдений и их использования в прогнозе и диагностике состояния атмосферы, в том числе для оценки характеристик осадков, в том числе града, и шква-

лов, оцениваются в [156–163]. В [163] представлена система наукастинга (прогноза текущей погоды) осадков, основанная на анализе последовательных радиолокационных полей, полученных в режиме реального времени, в статистической схеме STEPS (Short-Term Ensemble Prediction System), использующей технологию оптического потока.

В [164–171] рассматриваются методы определения характеристик облаков и осадков на основе расположенных на земле устройств – широкоугольных камер и оптических дождемеров. В [168] предложен метод определения высоты нижней границы облаков по стереопаре их изображений, полученных с помощью двух цифровых фотокамер, при этом ориентация фотокамер проводится по ночным изображениям звездного неба. Для вычисления расстояния до облака используется сдвиг изображения фрагмента облака как целого, выделенного с применением методов морфологического анализа изображений. При стереобазе 60 м получена погрешность, не превышающая 10% при высоте облаков менее 4 км. В работах [167, 169, 170, 172] решается задача оценки балла облачности на основе панорамных изображений неба, полученных с помощью сверхширокоугольных линз, при этом в [167] введен индекс интенсивности серого цвета изображения, позволяющий улучшить результат определения балла облачности, кроме того на основе методов машинного обучения определяется положение диска Солнца [169] для последующего исключения результатов засветки снимка вблизи этого положения. В [172] представлен программно-аппаратный комплекс, предназначенный для проведения автоматических наблюдений за облаками в условиях морских экспедиций. Комплекс включает в себя две цифровые широкоугольные оптические камеры и использует для определения балла облачности алгоритмы, основанные на методах машинного обучения.

В [164–166, 171] представлен прошедший испытания оптический дождемер для наблюдения параметров падающих капель дождя. Предложены методы определения микроструктурных характеристик жидких осадков, вида атмосферных осадков, скорости падения дождевых капель. Получены соотношения размеров и скоростей для частиц дождевых и снеговых осадков.

Различные аспекты использования лидарного зондирования для определения характеристик облаков обсуждаются в [173–189]. Сформулированы и алгоритмизированы решения задачи рассеяния света на кристаллических ледяных частицах перистых облаков в приближении геометрической [173, 178, 180, 181] и физической [174, 175, 183] оптики. В частности, показано, что точность приближения физической оптики составляет 95% для осредненной матрицы рассеяния для частиц с параметром размера более 120 [175]. Разработанные

алгоритмы находятся в свободном доступе с открытым исходным кодом. В [179, 182, 186, 189] исследуются особенности рассеяния света на облачных каплях, а также на каплях дождя, мороси и тумана [182, 189]. В частности, в [182] исследовано поведение временной автокорреляционной функции флуктуаций рассеянного лазерного пучка (на длине волны 0.63 мкм) в дожде, мороси, тумане и дыме в зависимости от скорости ветра. Установлено, что время корреляции флуктуаций уменьшается с ростом перпендикулярной к трассе составляющей скорости ветра во всех рассмотренных видах гидрометеоров, при этом время корреляции в тумане  $>$  времени корреляции в мороси  $>$  времени корреляции в дожде.

В [190–206] развиваются алгоритмы детектирования облаков и осадков и определения их характеристик на основе спутниковых наблюдений.

В [194] для описания изображений различных типов облачности по данным MODIS предложено использовать методы текстурного анализа. Выделены наборы текстурных признаков, позволяющие идентифицировать различные типы облаков на основе нейронных сетей и методов кластерного анализа. С использованием данной методики в [197] создана статистическая модель текстуры изображений 25 разновидностей облачности по спутниковым данным MODIS с пространственным разрешением 250 м, которая позже модифицирована для 16 стандартных типов облаков по ВМО [206]. С использованием данной методики и тематических продуктов MODIS для разных типов облаков оценены одно- и двухпараметрические распределения различных параметров облачности, в том числе оптическая толщина, фазовый состав, водозапас, высота и температура верхней и нижней границы облачности [198]. Предложено использовать данную методику для идентификации атмосферных гравитационных волн [195] и определения типов атмосферных фронтов [205]. Текстурный анализ также используется в [202] при идентификации мезомасштабной облачности.

В [191] развивается многоспектральная пороговая методика, позволяющая по данным измерений сканирующих радиометров типа AVHRR (полярно-орбитальные спутники серии NOAA, Meteor) и SEVIRI (геостационарные спутники серии MSG) восстанавливать параметры облачного покрова, включая микрофизические характеристики [204], а также выделять зоны осадков и опасных явлений погоды. В [192] представлен специализированный программный комплекс “ETP”, который позволяет автоматически в круглосуточном режиме детектировать указанные параметры для Европейской территории России, в том числе в зимний период (то есть над снежной поверхностью) по данным радиометров AVHRR и SEVIRI, а

также валидировать полученные результаты классификации с данными наземных радарных наблюдений метеорологического радиолокатора и наблюдений на метеостанциях. Классификация проводится автоматически для каждого срока спутникового наблюдения, валидация – 1 раз в сутки. Комплекс может быть адаптирован и к другому схожему виду спутниковой информации (например, МСУ-ГС со спутника “Электро” или МСУ-МР со спутника “Метеор”) [199].

Некоторые другие вопросы распространения волн в облачных средах обсуждаются в [207–212]. В [211] затрагиваются вопросы распространения собственного теплового радиоизлучения дождевых осадков в микроволновом диапазоне, выявлена роль трехмерной неоднородности полей дождевых осадков в формировании поля этого излучения. В [208], предложен метод, позволяющий оценивать значение интегрального влагосодержания атмосферы по измеряемым фазовым задержкам сигнала спутников глобальной системы геопозиционирования (GPS или ГЛОНАСС). При сравнении с данными реанализа для 2014 года, точность определения среднего значения влагосодержания получена в пределах 18%.

## 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ

В исследовании облаков и осадков достоверность их воспроизведения при численном моделировании является важным аспектом как для прогнозирования, так и для оценки реакции характеристик облаков и осадков на различное внешнее воздействие.

Вопросы воспроизведения облаков и осадков в моделях общей циркуляции атмосферы и климатических моделях рассматриваются в [213–216]. В частности, в [215] представлены схемы параметризации процессов в облаках в климатической модели ИВМ РАН, в том числе параметризация для конвективной и слоистой облачности, облаков пограничного слоя, процессов вовлечения, испарения облаков, формирования и испарения осадков.

В [214] анализируется эффект от прямого воспроизведения конвекции в моделях при воспроизведении осадков в прибрежной зоне. Выявлено, что увеличение интенсивности вертикального движения и осадков в моделях, воспроизводящих конвекцию, играют важную роль в формировании существенно нелинейного отклика экстремальных осадков на увеличение температуры поверхности океана (ТПО), что не проявляется в моделях, где конвекция параметризуется, и как следствие, интенсивность осадков имеет квазилинейный отклик на увеличение ТПО.

В [213, 216] исследовано влияние модельного разрешения на воспроизведение экстремальных осадков. В [213] показано, что пространственное

разрешение влияет как на воспроизведение в модели физических процессов, так и на результаты осреднения осадков. В моделях с более грубым разрешением выявлено сглаживание локальных экстремальных осадков, в частности, в тропиках летнего полушария экстремальные осадки уменьшаются на 1/3 из-за эффекта осреднения и на 2/3 из-за более грубого представления физических процессов. Во внетропических широтах вклад воспроизведения физических процессов уменьшается до 20%, а в зимнем полушарии в высоких широтах – до нуля. Более грубое вертикальное разрешение приводит к смещению зоны максимальных экстремальных осадков в тропиках по направлению к экватору.

В [217–220] (см. также [67]) представлена численная нестационарная трехмерная модель конвективного дождевого облака в естественных условиях и при активных воздействиях. В [219] представлено описание модели, включая уравнения гидротермодинамического и микрофизического блоков, подходы по параметризации микрофизических процессов, начальные и граничные условия, численный алгоритм решения системы уравнений. Перспективы дальнейшего развития модели обсуждаются в [218]. В [220] приводятся результаты верификации модели на основе результатов самолетных исследований электризации атмосферы.

В [221] для воспроизведения конвективной облачности и полярных мезомасштабных циклонов в Арктике представлена трехмерная численная модель влажной конвекции с явным описанием жидкой и ледяной фаз и с учетом нестационарных уравнений спектра размеров облачных капель и ледяных частиц. В [222] представлен разработанный блок расчета электрических параметров грозового облака, интегрированный в региональную модель WRF. На примере мощного грозового события показано хорошее соответствие рассчитанных электрических параметров облака с экспериментальными данными, полученными на основе разнесенного приема и регистрации электрических полей.

В [223–239] представлены некоторые результаты прогнозирования облаков и осадков на основе численного моделирования, в том числе прогнозы гроз [224, 230, 238], мезомасштабных конвективных систем [231], сильных снегопадов [226–228, 236], метели [223, 234], гололедно-изморозевых отложений [237] и тумана [235].

## 6. АКТИВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЛАЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Целью активных (искусственных) воздействий на облачные процессы является уменьшение негативных проявлений облако- и осадкообразования

[217, 240–257], в том числе воздействие на облачность для стимулирования осадков [242, 244, 245, 249, 250, 254–257], превентивное воздействие на быстрорастущие конвективные облака для их разрушения и предупреждения градобитий сельскохозяйственных культур [241, 247, 249], воздействие на слоистообразную облачность и туманы для их рассеяния [240, 243]. Для оценки эффективности активных воздействий развиваются натурные исследования [247, 252, 254, 256, 257], лабораторное [248] и численное моделирование [217, 241, 242, 244, 245, 250, 251], разрабатываются новые методы и средства воздействия [240, 243, 248, 252, 256], средства контроля воздействия и методы оценки их эффективности [246, 247, 253, 255]. Кроме того, исследуется воздействие на облачные процессы для контролируемого влияния на климат Земли [251].

Для натурных исследований воздействий на облака и контроля результатов воздействия используются наземные метеорологические и радиозондовые наблюдения, данные радиолокационных и радиометрических наблюдений, спутниковые данные и специальные микрофизические измерения, проводимые самолетами-лабораториями [247, 250, 252, 254]. Поскольку экспериментальные исследования зачастую являются сложными и дорогостоящими, а определение их эффективности затруднено недостаточным объемом выборки, все большее внимание уделяется оценке эффективности активных воздействий на основе постановки и проведения экспериментов с численными моделями, в первую очередь – моделями конвективного облака [217, 241, 242, 244, 245, 250]. В частности, в серии численных экспериментов с трехмерной моделью конвективного облака [242, 250, 255] при активных воздействиях гигроскопическим, льдообразующим и комбинированными методами получены количественные оценки, указывающие на то, что максимальное увеличение количества осадков достигается при комбинированном способе воздействия и может составлять до 20%.

В [252] на основе натурального эксперимента по воздействию соевым порошком на слоисто-дождевые облака с зоной затопленной конвекции показано, что данный гигроскопический реагент может использоваться для получения дополнительных осадков из теплых конвективных облаков малой мощности, из которых при их естественном развитии осадки не выпадают или выпадает меньшее количество. В [248] для засева облаков предложено использовать новый синтезированный реагент, состоящий из ядра в виде хлорида натрия и оболочки в виде оксида титана. По данным лабораторных экспериментов данный реагент показал высокую эффективность при воздействии на облачную среду за счет синер-

гетического эффекта гидрофильной оболочки и гигроскопичного ядра.

В [257] представлены результаты комплексного исследования облаков в Индии, подвергшихся воздействию кристаллизующего реагента. Эффект воздействий определялся на основе сравнения радиолокационных характеристик облаков, подвергшихся воздействию с другими облаками, наблюдавшимися в это же время. Отмечено существенное увеличение значений максимальной отражаемости облаков после воздействий по сравнению с облаками, находящимися в естественном цикле развития, а также увеличение осадков и удельного содержания осажденного града. В процессе исследований наблюдалось слияние облаков, на которые были проведены воздействия. Показано, что процесс слияния приводит к существенному (в несколько раз) увеличению осадков.

На основе численных экспериментов с климатической моделью ИВМ РАН, проведена оценка влияния засева облаков верхнего яруса высокоэффективными облачными ядрами на климат [251]. Проведенный эксперимент показал потенциальную возможность уменьшения среднегодовой температуры на поверхности Земли на 2–4 К (в арктических районах местами на 8 К) за счет возрастания величины уходящей длинноволновой радиации вследствие уменьшения и истончения верхней облачности.

В [253] приведены оценки возможного загрязнения природной среды реагентами при использовании технологий активного воздействия на облака и осадки. Отмечено крайне низкое влияние искусственного регулирования осадков на загрязнение природной среды. В частности, показано, что количество вносимых в облака реагентов (кристаллизующих реагентов на основе иодида серебра, хладореагентов, порошкообразных реагентов) не превышает уровень поступления в атмосферу этих веществ от природных и антропогенных источников. Также не выявлены изменения режима осадков на территориях, прилегающих к районам активного воздействия по метеозащите мегаполисов.

Авторы благодарны членам Комиссии по облакам и осадкам Национального геофизического комитета, способствовавшим подготовке материала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bezrukova N.A., Chernokulsky A.V. Clouds and Precipitation. // in: Russian National Report: Meteorology and Atmospheric Sciences: 2015–2018 // Eds: XXVII Mokhov I.I. and Krivolutsky A.A. eds. Moscow: 2019. MAKS Press, 332 p. P. 99–151. <https://doi.org/10.29003/m662.978-5-317-06182-1>
2. Безрукова Н.А., Чернокульский А.В. Российские исследования облаков и осадков в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 5. С. 577–589.
3. Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А. К 100-летию издания первого отечественного атласа облаков. // Метеорология и гидрология. 2017. № 8. С. 118–119.
4. Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ильин С.Н., Ломакина Н.Я. Оценка локальных особенностей долговременного изменения облачного покрова над территорией Сибири с использованием результатов ее климатического районирования по режиму общей и нижней облачности // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 1. С. 59–65.
5. Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ломакина Н.Я. и др. Статистическая структура и долговременные изменения нижней слоистообразной облачности над регионом Сибири как основа для метеорологической поддержки решения прикладных задач. Часть 1. Статистика нижней слоистообразной облачности // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 7. С. 622–629.
6. Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ломакина Н.Я. и др. Статистическая структура и долговременные изменения нижней слоистообразной облачности над регионом Сибири как основа для метеорологической поддержки решения прикладных задач. Часть 2. Долговременные изменения нижней слоистообразной облачности // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 7. С. 630–637.
7. Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ильин С.Н., Ломакина Н.Я. О влиянии современных изменений нижней слоистообразной облачности на температурный режим приземного слоя атмосферы Сибирского региона // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 11. С. 1023–1028.
8. Чернокульский А.В. Ночная и дневная облачность по разным спутниковым данным // Изв. РАН. Серия географическая. 2015. № 6. С. 48–60.
9. Calbó J., Badosa J., González J. et al. Climatology and changes in cloud cover in the area of the Black, Caspian, and Aral seas (1991–2010): a comparison of surface observations with satellite and reanalysis products // International J. Climatology. 2016. V. 36. P. 1428–1443.
10. Кубряков А.А., Шокуров М.В., Станичный С.В. Характеристики облачности над Черноморским регионом в 1985–2009 гг. по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 41–49.
11. Черных И.В., Алдухов О.А. Долгопериодные оценки характеристик вертикального распределения облачных слоев по данным радиозондирования атмосферы // Метеорология гидрология. 2016. № 4. С. 5–17.
12. Chernokulsky A.V., Esau I., Bulygina O.N. et al. Climatology and Interannual Variability of Cloudiness in the Atlantic Arctic from Surface Observations since the Late Nineteenth Century // Journal of Climate. 2017. V. 30. № 6. P. 2103–2120.
13. Горбаренко Е.В., Шиловцева О.А., Бунина Н.А. Климатические характеристики облачности в Москве // Труды ГГО. 2017. № 585. С. 126–141.
14. Чернокульский А.В., Елисеев А.В. Климатология параметра облачного перекрытия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 1. С. 216–225.
15. Aleksandrova M., Gulev S.K., Belyaev K. Probability Distribution for the Visually Observed Fractional

- Cloud Cover over the Ocean // *J. Climate*. 2018. V. 31. P. 3207–3232.
16. Черных И.В., Алдухов О.А. Оценки облачных слоев по данным радиозондирования атмосферы за 1964–2014 гг. на российских станциях // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 3. С. 29–39.
  17. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н. Режимные характеристики условий ограниченной видимости на аэродромах азиатской части России и ближнего зарубежья // *Гидрометеорологические исследования*. 2018. № 4(370). С. 18–35.
  18. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Изменчивость испарения и осадков над океаном по спутниковым данным // *Исслед. Земли из космоса*. 2016. № 4. С. 23–34.
  19. Горшенин А.К. Анализ вероятностно-статистических характеристик осадков на основе паттернов // *Информатика и ее применения*. 2017. Т. 11. № 4. С. 38–46.
  20. Королев В.Ю., Горшенин А.К. О распределении вероятностей экстремальных осадков // *Докл. АН*. 2017. Т. 477. № 5. С. 604–609.
  21. Gorshenin A.K., Korolev V.Yu. Scale Mixtures of Frechet Distributions as Asymptotic Approximations of Extreme Precipitation // *J. Mathematical Sciences*. 2018. V. 234. № 6. P. 886–903.
  22. Чернокульский А.В., Козлов Ф.А., Золина О.Г. и др. Климатология осадков разного генезиса в Северной Евразии // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 7. С. 5–18.
  23. Матвеева Т.А., Гущина Д.Ю., Золина О.Г. Крупномасштабные индикаторы экстремальных осадков в прибрежных природно-экономических зонах европейской территории России // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 11. С. 20–32.
  24. Золина О.Г., Булыгина О.Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. Т. 1. С. 84–103.
  25. Шабанов П.А., Матвеева Т.А., Маркина М.Ю. Межгодовые изменения событий очень сильных осадков на Европейской части России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Т. 4. С. 106–123.
  26. Vyshkvarikova E., Voskresenskaya E.N., Martin-Videb J. Spatial distribution of the daily precipitation concentration index in Southern Russia // *Atmospheric Research*. 2018. V. 203. P. 36–43.
  27. Yu L., Yang Q., Vihma T. et al. Features of Extreme Precipitation at Progress Station, Antarctica // *J. Climate*. 2018. V. 31. P. 9087–9105.
  28. Bulygina O.N., Arzhanova N.M., Groisman P.Ya. Icing conditions over Northern Eurasia in changing climate // *Environmental Research Letters*. 2015. V. 10. № 2. P. 025003.
  29. Groisman P.Ya., Bulygina O.N., Yin X. et al. Recent changes in the frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia // *Environmental Research Letters*. 2016. V. 11. № 4. P. 045007.
  30. Семенов Е.К., Соколичина Н.Н., Леонов И.И., Соколичина Е.В. Атмосферная циркуляция над центром Европейской России в период ледяного дождя в декабре 2010 г. // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 5. С. 91–101.
  31. Данова Т.Е., Григорьева Е.А. Динамика атмосферных осадков юга Дальнего Востока по результатам компонентного анализа // *География и природные ресурсы*. 2015. № 3. С. 146–154.
  32. Павлова Т.В., Катцов В.М. Ожидаемые изменения осадков и испарения в Арктике в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // *Труды ГГО*. 2015. Т. 579. С. 22–36.
  33. Ашабоков Б.А., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Таубекова З.А. Тенденции изменения режимных характеристик осадков в климатических зонах юга России (1961–2011 гг.) // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 3. С. 8–28.
  34. Алешина М.А., Топоров П.А., Семенов В.А. Изменения температурно-влажностного режима на Черноморском побережье Кавказа в период 1982–2014 // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 4. С. 41–53.
  35. Евстигнеев В.П., Мишин Д.В., Остроумова Л.П. Расчет количества выпадающих на поверхность Азовского моря осадков как составляющей его водного баланса // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 8. С. 39–52.
  36. Игнатов А.В., Осипова О.П., Балыбина А.С. Пространственная структура взаимосвязей годовых сумм осадков на метеостанциях Сибири и Казахстане // *География и природные ресурсы*. 2018. № 2. С. 96–101.
  37. Сперанская Н.А., Фуксова Т.В. Многолетние изменения основных составляющих водного режима озера Ханка // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 8. С. 53–64.
  38. Сухова М.Г., Журавлева О.В. Изменения температуры воздуха и осадков в межгорных котловинах Юго-восточного и Центрального Алтая. // *Изв. РАН. Серия Географическая*. 2018. № 6. С. 93–101.
  39. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Девятова Е.В. и др. Основные режимы выпадения осадков на юге Восточной Сибири и в Монголии в июле // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31. № 6. С. 443–450.
  40. Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2015–2019 гг. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2020. Т. 56. [этот выпуск]
  41. Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D. et al. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme // *Nature Geosciences*. 2015. V. 8. P. 615–619.
  42. Комасько Н.И., Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванов А.Р. Векторный фронтотенез, как фактор формирования осадков // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 9. С. 5–19.
  43. Суковатов К.Ю., Безуглова Н.Н. Когерентные колебания атмосферных осадков холодного сезона на территории Ишимской равнины и индексы атмосферной циркуляции // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 1. С. 18–26.
  44. Черенкова Е.А., Бардин М.Ю., Золотокрылин А.Н. Статистика осадков и засух в противоположные фазы квазидвухлетней цикличности атмосферных процессов и ее связь с урожайностью на европейской территории России // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 3. С. 160–169.
  45. Volosciuk C., Maraun D., Semenov V.A. et al. Rising Mediterranean Sea Surface Temperatures Amplify

- Extreme Summer Precipitation in Central Europe // Scientific Reports. 2016. V. 6. P. 32450.
46. Piao J., Chen W., Wei K. et al. An abrupt rainfall decrease over the Asian inland plateau region around 1999 and the possible underlying mechanism // Advances in Atmospheric Sciences. 2017. V. 34. № 4. P. 456–468.
  47. Васильев Д.Ю., Бабков О.К., Кочеткова Е.С., Семенов В.А. Вейвлет и кросс-вейвлет анализ сумм атмосферных осадков и приповерхностной температуры на Европейской территории России // Изв. РАН. Серия географическая. 2017. № 6. С. 63–77.
  48. Мохов И.И., Тимажеев А.В. Оценка риска погодноклиматических аномалий в Российских регионах в связи с явлениями Эль-Ниньо // Метеорология и гидрология. 2017. № 10. С. 22–33.
  49. Черенкова Е.А. Сезонные осадки на территории восточно-европейской равнины в периоды теплых и холодных аномалий температуры поверхности Северной Атлантики // Изв. РАН. Серия географическая. 2017. № 5. С. 72–81.
  50. Черенкова Е.А., Семенов В.А. Связь зимних осадков на территории Европы с изменениями ледовитости Арктического бассейна, температуры океана и атмосферной циркуляции // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 38–52.
  51. Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia // Atmosphere. 2018. V. 9. № 2. P. 50.
  52. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Девятова Е.В., Мордвинов В.И. Динамические процессы в атмосфере, обуславливающие аномалии осадков в восточной Сибири и Монголии в летний период // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 1. С. 10–27.
  53. Ингель Л.Х. К теории конвективных струй и термик в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 6. С. 676–680.
  54. Сухов С.А., Атабиев З.М., Закирян Р.Г. Оценка параметров поднимающегося термика // Естественные и технические науки. 2017. № 6(108). С. 71–73.
  55. Ингель Л.Х. К нелинейной динамике турбулентных термик в сдвиговом потоке // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59. № 2(348). С. 23–30.
  56. Кшевещкий С.П., Куличков С.Н. Влияние внутренних гравитационных волн от конвективных облаков на атмосферное давление и пространственное распределение возмущений температуры // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 1. С. 52.
  57. Кашлева Л.В., Михайловский Ю.П., Михайловский В.Ю. Механизмы электризации облачных гидрометеоров в грозовых облаках // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 45. С. 118–131.
  58. Пустовалов К.Н., Нагорский П.М. Основные типы вариаций электрического поля при прохождении кучево-дождевых облаков различного генезиса // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 8. С. 647–653.
  59. Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Довгало Ю.А. и др. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 1. Развитие облака и формирование электрических разрядов // Метеорология и гидрология. 2016. № 9. С. 27–40.
  60. Mareev E.A., Dementyeva S.O. The role of turbulence in thunderstorm, snowstorm, and dust storm electrification // J. Geophysical Research: Atmospheres, 2017. V. 122. P. 6976–6988.
  61. Абишев А.М., Абишев М.Т., Аджиев А.Х. и др. Анализ развития и взаимодействия ячеек в грозоградовых облаках // Труды ГГО. 2017. № 586. С. 93–116.
  62. Довгало Ю.А., Веремей Н.Е., Затевахин М.А., и др. Численное моделирование слияния облаков с использованием трехмерной нестационарной модели облачной конвекции // Труды ГГО. 2017. № 584. С. 7–35.
  63. Инюхин В.С., Макитов В.С., Куцев С.А. Радиолокационные исследования формирования и развития градовых очагов в мощных конвективных облаках // Метеорология и гидрология. 2017. № 7. С. 103–111.
  64. Колбин В.А., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С. и др. Некоторые результаты исследования процесса слияния конвективных ячеек над территорией Ленинградской области // Труды ГГО. 2017. № 587. С. 47–55.
  65. Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Павар С.Д. и др. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 2. Анализ методов прогноза и диагноза электрического состояния облаков // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 31–45.
  66. Попов В.Б., А.А. Синькевич. Исследование слияния конвективных облаков на северо-западе России // Труды ГГО. 2017. № 585. С. 39–55.
  67. Синькевич А.А., Довгало Ю.А., Веремей Н.Е. и др. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 3. Численное моделирование эволюции облака // Метеорология и гидрология. 2017. № 8. С. 18–28.
  68. Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M. Response in the surface atmospheric electric field to the passage of isolated air mass cumulonimbus clouds // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2018. V. 172. P. 33–39.
  69. Деметьева С.О., Мареев Е.А. О вкладе турбулентности в электризацию грозовых облаков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 1. С. 28–35.
  70. Иванова А.Р. Обледенение двигателей самолетов в ледяных кристаллах: пути решения проблемы // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2(368). С. 95–109.
  71. Клименко В.В., Мареев Е.А. Аномальный дециметровый радишум из области атмосферного фронта. 1. Характеристики зарегистрированного радишума и метеопараметры фронтальной облачности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 2. С. 168–174.
  72. Клименко В.В., Мареев Е.А. Аномальный дециметровый радишум из области атмосферного фронта. 2. О нетепловом механизме СВЧ шума // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 4. С. 446–452.
  73. Пустовалов К.Н., Нагорский П.М. Сравнительный анализ электрического состояния приземного слоя атмосферы при прохождении кучево-дождевых облаков в теплый и холодный периоды года // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 6. С. 685–689.

74. Синькевич А.А., Попов В.Б., Тарабукин И.А. и др. Изменения характеристик конвективных облаков и выпадающих осадков при слиянии облаков // Метеорология и гидрология. 2018. № 8. С. 19–32.
75. Синькевич А.А., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Михайловский Ю.П. Слияние облаков. С-Пб: ГГО. 2018. 280 с.
76. Струнин А.М., Струнин М.А. Взаимосвязь динамической структуры и водности конвективных облаков по данным самолетных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2018. № 4. С. 29–40.
77. Мареев Е.А., Стасенко В.Н., Шаталина М.В. и др. Российские исследования в области атмосферного электричества в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 79–93.
78. Frey W., Schofield R., Hoor P. et al. The impact of overshooting deep convection on local transport and mixing in the tropical upper troposphere / lower stratosphere (UTLS). // Atmospheric Chemistry and Physics. 2015. V. 15. № 11. P. 6467–6486.
79. Аджиев А.Х., Аджиева А.А., Князева З.М., Стасенко В.Н. Территориальные особенности грозовой активности на Северном Кавказе по метеорологическим и инструментальным данным // Метеорология и гидрология. 2015. № 4. С. 46–52.
80. Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Нечепуренко О.Е. Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектро радиометра MODIS в дни с грозами, над территорией западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2015. № 5. С. 10–19.
81. Грищенко И.В., Рюмина Т.Н. Грозы на европейском севере – вероятные погодные-климатические угрозы и риски // Труды ГГО. 2015. № 576. С. 92–101.
82. Довгалюк Ю.А., Торопова М.Л., Веремей Н.Е. Исследование характеристик грозовых облаков и грозовой активности по данным наземных наблюдений и численного моделирования (на примере станции г. Санкт-Петербурга) // Труды ГГО. 2015. № 576. С. 50–61.
83. Новицкий М.А., Шмерлин Б.Я., Петриченко С.А. и др. Использование индексов конвективной неустойчивости и метеорологических величин для анализа смерчопасной ситуации в Обнинске 23 мая 2013 г. // Метеорология и гидрология. 2015. № 2. С. 13–20.
84. Черногузова Ю.Я. Возникновение опасных конвективных явлений погоды на территории Центрально-Черноземного УГМС и их прогнозирование // Труды Гидрометцентра России. 2015. № 357. С. 125–145.
85. Чернокульский А.В., Курганский М.В., Захарченко Д.И., Мохов И.И. Условия формирования и характеристики сильного смерча на Южном Урале 29 августа 2014 г. // Метеорология и гидрология. 2015. № 12. С. 29–37.
86. Эзау И.Н., Чернокульский А.В. Поля конвективной облачности в Атлантическом секторе Арктики: спутниковые и наземные наблюдения // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 2. С. 49–63.
87. Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Напряженность электрического поля атмосферы и грозовые явления на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 46–54.
88. Горбатенко В.П., Нечепуренко О.Е., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю. Верификация параметров неустойчивости атмосферы, восстановленных по данным спектро радиометра MODIS/Тerra данными аэрологического зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 7. С. 603–607.
89. Калмыкова О.В., Шершаков В.М. Общие характеристики смерчей Российской акватории Черного моря за период с 2014 по 2015 год // Труды ГГО. 2016. № 581. С. 165–175.
90. Калмыкова О.В., Шершаков В.М. Технология мониторинга смерчопасных ситуаций на российской акватории черного моря // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 93–102.
91. Новицкий М.А., Павлюков Ю.Б., Шмерлин Б.Я. и др. Башкирский смерч: возможности анализа и прогноза смерчопасной ситуации // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 30–40.
92. Поморцева А.А., Калинин Н.А. Аналитический обзор современного состояния исследований шквалов: условия возникновения, методы диагноза и прогноза // Географический вестник. 2016. № 3(38). С. 90–104.
93. Калмыкова О.В., Шершаков В.М. Индекс смерчопасности Российской акватории Черного моря // Труды ГГО. 2017. № 584. С. 142–163.
94. Песков Б.Е., Голубев А.Д., Алексеева А.А., Дмитриева Т.Г. Анализ условий возникновения сильного шквала в Курской области 3 апреля 2017 года // Труды Гидрометцентра России. 2017. № 364. С. 93–103.
95. Тарабукина Л.Д., Козлов В.И., Каримов Р.Р., Муллаяров В.А. Пространственное распределение грозовых разрядов в северной Азии // Метеорология и гидрология. 2017. № 2. С. 20–29.
96. Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И. Анализ изменений условий смерчегенеза в северной Евразии с использованием простого индекса конвективной неустойчивости атмосферы // Докл. АН. 2017. Т. 477. № 6. С. 722–727. 75
97. Яровая Д.А., Ефимов В.В. Облачные ячейки по данным спутниковых измерений и баланс конвективной энергии при вторжении холодного воздуха в атмосферу над Черным морем // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 6. С. 54–64.
98. Chernokulsky A.V., Shikhov A.N. 1984 Ivanovo tornado outbreak: determination of actual tornado tracks with satellite data // Atmospheric Research. 2018. V. 207. P. 111–121.
99. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 204. P. 553–567.
100. Калинин Н.А., Быков А.В., Пищальникова Е.В., Шихов А.Н. Анализ условий возникновения сильных шквалов в Пермском крае по данным наблюдений и результатам численного моделирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2(368). С. 7–26.
101. Кузеевская И.В., Пустовалов К.Н., Шарапова А.А. Характеристики конвективных кластеров, восстановленные по данным инструментов зондирования ATOVS // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 2. С. 69–85.

102. *Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Севастьянов В.В.* Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2(368). С. 44–59.
103. *Новицкий М.А., Шмерлин Б.Я., Петриченко С.А. и др.* О совместном расчете полей вертикальной скорости и конвективных индексов в модели WRF для анализа и прогноза смерчопасных ситуаций // Метеорология и гидрология. 2018. № 9. С. 14–25.
104. *Романский С.О., Вербицкая Е.М., Агеева С.В., Истомин Д.П.* Условия возникновения смерча в Благовещенске 31 июля 2011 г. // Метеорология и гидрология. 2018. № 9. С. 26–35.
105. *Спрыгин А.А., Прохареня М.И.* Диагноз и прогноз конвективных структур с опасными явлениями по данным моделирования и дистанционного зондирования над территорией Беларуси и центральной России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3(369). С. 6–22.
106. *Курганский М.В., Крупчатников В.Н.* Российские исследования в области динамической метеорологии в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 6–47.
107. *Шавлов А.В., Соколов И.В., Хазан В.Л., Джуманджи В.А.* Пространственная структура водяного тумана // Докл. АН. 2015. Т. 461. № 6. С. 704–709.
108. *Стерлядкин В.В.* Пространственная селекция и группировка дождевых капель по размерам при ветровых порывах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 6. С. 690–699.
109. *Borovoi A., Kustova N., Konoshonkin A.* Interference phenomena at backscattering by ice crystals of cirrus clouds // Opt. Express. 2015. V. 23. P. 24557–24571.
110. *Konoshonkin A., Wang Z., Borovoi A. et al.* Backscatter by azimuthally oriented ice crystals of cirrus clouds // Opt. Express. 2016. V. 24. P. A1257–A1268.
111. *Коношонкин А.В.* Оптические характеристики деформированных атмосферных ледяных столбиков // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 7. С. 543–551.
112. *Konoshonkin A., Borovoi A., Kustova N., Reichardt J.* Power laws for backscattering by ice crystals of cirrus clouds // Opt. Express. 2017. V. 25. P. 22341–22346.
113. *Wang Z., Borovoi A., Konoshonkin A. et al.* Extinction matrix for cirrus clouds in the visible and infrared regions // Opt. Lett. 2018. V. 43. P. 3578–3581.
114. *Колокутин Г.Э., Волков В.В.* Микрофизические механизмы возникновения глории по данным самолетных измерений // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 10. С. 840–845.
115. *Shaylov A.V., Dzhumandzhi V.A.* Metastable states and coalescence of charged water drops inside clouds and fog // J. Aerosol Science. 2016. V. 91. P. 54–61.
116. *Шавлов А.В., Джуманджи В.А., Яковенко А.А.* Заряд капель воды при испарении и конденсации // Труды ГГО. 2017. № 587. С. 56–78.
117. *Шавлов А.В., Джуманджи В.А., Яковенко А.А.* Разделение электрического заряда на фронте испарения (конденсации) воды и льда. Заряд сферических капель // Журн. технической физики. 2018. Т. 88. № 4. С. 498–506.
118. *Веремей Н.Е., Довгалоук Ю.А., Гонпалакришнан В. и др.* Численное моделирование влияния сильного аэрозольного загрязнения атмосферы на динамику электрической структуры кучево-дождевого облака // Метеорология и гидрология. 2015. № 12. С. 5–18.
119. *Голубев В.Н.* Роль аэрозольных частиц в зарождении атмосферного льда // Метеорология и гидрология. 2015. № 12. С. 19–28.
120. *Куров А.Б., Веремей Н.Е., Волков Н.Н. и др.* Влияние сажевых частиц на кристаллизацию капель воды // Труды ГГО. 2015. № 579. С. 205–213.
121. *Синькевич А.А., Павар С.Д., Веремей Н.Е. и др.* Исследование изменения электрической структуры грозового облака в условиях сильного аэрозольного загрязнения атмосферы // Труды ГГО. 2015. № 578. С. 23–46.
122. *Синькевич А.А., Павар С.Д., Куров А.Б. и др.* О влиянии аэрозолей естественного происхождения на температуру кристаллизации капель воды // Труды ГГО. 2015. № 576. С. 42–49.
123. *Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О.* Роль сульфатного аэрозоля в формировании облачности над морем // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 4. С. 402–415.
124. *Довгалоук Ю.А., Веремей Н.Е., Торопова М.Л. и др.* Влияние аэрозольного загрязнения атмосферы при лесных пожарах на эволюцию конвективных облаков и связанных с ними осадков // Труды ГГО. 2017. № 585. С. 7–38.
125. *Pöhlker M.L., Ditas F., Saturno J. et al.* Long-term observations of cloud condensation nuclei over the Amazon rain forest – Part 2: Variability and characteristics of biomass burning, long-range transport, and pristine rain forest aerosols // Atmospheric Chemistry and Physics. 2018. V. 18. P. 10289–10331.
126. *Довгалоук Ю.А., Веремей Н.Е., Торопова М.Л. и др.* Особенности эволюции конвективных облаков и осадков в условиях сильного аэрозольного загрязнения атмосферы, вызванного лесными пожарами // Труды ГГО. 2018. № 588. С. 7–27.
127. *Mikhailov E.F., Mironov G.N., Pöhlker C. et al.* Chemical composition, microstructure, and hygroscopic properties of aerosol particles at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO), Siberia, during a summer campaign // Atmospheric Chemistry and Physics. 2015. V. 15. P. 8847–8869.
128. *Рышкевич Т.И., Миронов Г.Н., Миронова С.Ю. и др.* Сравнительный анализ гигроскопических свойств атмосферных аэрозолей по данным летней и зимней экспедиций 2011 года на сибирской фоновой станции ZOTTO // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 5. С. 578–586.
129. *Pöhlker M.L., Pöhlker C., Ditas F. et al.* Long-term observations of cloud condensation nuclei in the Amazon rain forest – Part 1: Aerosol size distribution, hygroscopicity, and new model parametrizations for CCN prediction // Atmospheric Chemistry and Physics. 2016. V. 16. P. 15709–15740.
130. *Popovichcheva O.B., Persiantseva N.M., Timofeev M.A. et al.* Small-Scale Study of Siberian Biomass Burning: II. Smoke Hygroscopicity // Aerosol and Air Quality Research. 2016. V. 16. P. 1558–1568.
131. *Vlasenko S.S., Su H., Pöschl U. et al.* Tandem configuration of differential mobility and centrifugal particle mass analysers for investigating aerosol hygroscopic



- properties // Atmospheric Measurement Techniques. 2017. V. 10. P. 1269–1280.
132. *Козлов В.С., Рахимов Р.Ф., Шмаргунов В.П.* Изменчивость конденсационных свойств смешанного дыма горения биомассы на различных стадиях его эволюции // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 10. С. 846–855.
  133. *Михайлов Е.Ф., Иванова О.А., Власенко С.С. и др.* Измерения конденсационной активности ядер Айткена в пригороде Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 3. С. 370–378.
  134. *Тимофеев Ю.М., Шульгина Е.М.* Российские исследования в области атмосферной радиации в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 1. С. 3–19.
  135. *Ветров В.А., Кузовкин В.В., Манзон Д.А.* Кислотность атмосферных осадков и выпадение серы и азота на территории Российской Федерации по данным мониторинга химического состава снежного покрова // Метеорология и гидрология. 2015. № 10. С. 44–53.
  136. *Еремина И.Д., Алоян А.Е., Арутюнян В.О. и др.* Кислотность и минеральный состав осадков в Москве. Влияние противогололедных реагентов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 6. С. 700–709.
  137. *Еремина И.Д., Алоян А.Е., Арутюнян В.О. и др.* Гидрокарбонаты в атмосферных осадках в Москве: данные мониторинга и их анализ // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 3. С. 379–388.
  138. *Лаврухин Ю.Е., Дину М.И.* Роль радона в закислении атмосферных осадков // Геохимия. 2017. № 1. С. 86–91.
  139. *Чижова Ю.Н., Еремина И.Д., Буданцева Н.А. и др.* Содержание 18O в атмосферных осадках Москвы в 2014 г // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 78–90.
  140. *Семенец Е.С.* Методика определения характерной концентрации примесей в атмосферных осадках (на примере данных станций Санкт-Петербург и Воейково) // Труды ГГО. 2016. № 583. С. 197–208.
  141. *Кондратьев И.И., Муха Д.Е., Болдескул А.Г. и др.* О химическом составе атмосферных осадков и снежного покрова в Приморском крае // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 91–100.
  142. *Калинская Д.В., Вареник А.В., Папкова А.С.* Фосфор и кремний как маркеры переноса пылевого аэрозоля над Черноморским регионом // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 217–225.
  143. *Янченко Н.И., Котова Е.И.* Источники фтора в атмосферных осадках в г. Братск // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 108–112.
  144. *Живоглов Д.Н., Струнин М.А.* Измерения навигационных параметров полета и термодинамических характеристик атмосферы с помощью аппаратуры нового поколения самолета-лаборатории Як-42Д “Росгидромет” / В: Труды II-ой Всероссийской научной конференции “Экология и космос” им. академика К.Я. Кондратьева. Санкт-Петербург: Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. 2015. С. 124–130.
  145. *Базанин Н.В., Волков В.В., Ганьшин А.В. и др.* Характеристики переноса аэрозольных примесей в районе мегаполиса (г. Москва) по результатам самолетных исследований. / В: “Вопросы физики облаков. Атмосферные аэрозоли, активные воздействия. Сборник трудов памяти Н.О. Плауде”. Москва: ЦАО. 2015. С. 89–117.
  146. *Кузьмичев А.С., Бабухина Т.И., Ганьшин А.В., и др.* Измерения содержания аэрозолей в тропосфере арктического региона дистанционными и контактными методами с борта самолета-лаборатории Як-42Д “Росгидромет” // Метеорология и гидрология. 2016. № 5. С. 88–98.
  147. *Колокутин Г.Э., Фомин Б.А., Петров В.В.* Актинометрический комплекс самолета-лаборатории Як-42Д “Росгидромет” // Метеорология и гидрология. 2018. № 3. С. 114–122.
  148. *Meyer J., Rol C. f., Schiller C. et al.* Two decades of water vapor measurements with the FISH fluorescence hygrometer: a review // Atmospheric Chemistry and Physics. 2015. V. 15. No. 14. P. 8521–8538.
  149. *Afchine A., Rolf C., Costa A. et al.* Ice particle sampling from aircraft – influence of the probing position on the ice water content // Atmospheric Measurement Techniques. 2018. V. 11. P. 4015–4031.
  150. *Михайловский Ю.П.* О верификации численных моделей конвективных облаков на основе результатов самолетных исследований электризации // Труды ГГО. 2016. № 580. С. 125–138.
  151. *Торгунаков Р.Е., Михайловский Ю.П., Синькевич А.А.* Самолетные исследования напряженности электрического поля и заряда самолета в конвективных облаках на ранней стадии развития // Труды ГГО. 2017. № 587. С. 32–46.
  152. *Страшко О.В., Кузнецов И.Е., Качалкин А.Ю. и др.* Технология применения беспилотных авиационных систем для решения метеорологических задач // Авиакосмическое приборостроение. 2018. № 1. С. 42–51.
  153. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике, 2-я редакция / Под. ред. Павлюкова Ю.Б., Серебрянник Н.И., Беликова С.Г. и др. Москва: Росгидромет. 2017. 127 с.
  154. *Павлюков Ю.Б., Зарипов Р.Б., Лукьянов А.Н. и др.* Оценка информативности радиолокационных данных при анализе состояния атмосферы в Московском регионе // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 5–21.
  155. *Зарипов Р.Б., Павлюков Ю.Б., Шумилин А.А., Травов А.В.* Использование радиолокационной информации при оценке прогноза погоды с высоким разрешением // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2(368). С. 60–86.
  156. *Алексеева А.А., Песков Б.Е.* Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик дневных осадков и града по радиолокационной информации // Труды Гидрометцентра России. 2016. № 360. С. 135–148.
  157. *Абишев А.М., Абишев М.Т., Гергоков А.Х. и др.* Методы калибровки метеорологических радиолокаторов // Метеорология и гидрология. 2017. № 3. С. 14–21.
  158. *Алексеева А.А., Васильев Е.В., Бухаров В.М.* Прогноз сильных шквалов на европейской территории России и их идентификация доплеровскими

- радиолокаторами // Труды Гидрометцентра России. 2017. № 363. С. 47–64.
159. Жарашуев М.В., Макитов В.С., Кагермазов А.Х., Кулиев Д.Д. Метод калибровки локаторов сети штормооповещения // Труды ГГО. 2017. № 586. С. 164–174.
  160. Кашлева Л.В., Нго Д.Х., Михайловский Ю.П. О контроле осадков из конвективных облаков по радиолокационным параметрам // Труды ГГО. 2017. № 587. С. 105–115.
  161. Жарашуев М.В., Гергоков А.Х., Кагермазов А.Х. и др. Метод повышения эффективности сопоставления радиолокационной и наземной информации // Труды ГГО. 2018. № 588. С. 139–149.
  162. Капустин А.В., Колбин В.А., Кузнецов А.Д. и др. Оценка продолжительности осадков по радиолокационным характеристикам конвективной облачности // Труды ГГО. 2018. № 589. С. 114–124.
  163. Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. Оперативная технология наукастинга осадков на основе радарных данных и результаты верификации для теплого периода года (май–сентябрь 2017 года) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 1(367). С. 6–38.
  164. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Определение микроструктурных характеристик жидких атмосферных осадков с помощью оптического осадкомера // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 7. С. 669–672.
  165. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Определение вида атмосферных осадков по результатам оптических измерений их микроструктурных характеристик // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 8. С. 654–657.
  166. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Определение скорости падения дождевых капель при измерениях их параметров оптическим осадкомером // Измерительная техника. 2016. № 11. С. 29–32.
  167. Криницкий М.А., Сеницын А.В. Адаптивный алгоритм оценки общего балла облачности над морем по широкоугольным снимкам неба // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 341–345.
  168. Чуликов А.И., Андреев М.С., Голицын Г.С. и др. Об определении нижней границы облачности по цифровой стереосъемке с поверхности земли // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 11. С. 980–986.
  169. Криницкий М.А. Методы машинного обучения в задаче определения состояния диска солнца по широкоугольным снимкам видимой полусферы неба над океаном // Океанология. 2017. Т. 57. № 2. С. 297–302.
  170. Галилейский В.П., Елизаров А.И., Кокарев Д.В. и др. О некоторых результатах наблюдений неба на панорамно-оптической станции “TOMSKY” // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2018. № 662. С. 112–116.
  171. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Некоторые результаты натурных испытаний оптического измерителя осадков // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 4. С. 330–332.
  172. Криницкий М.А., Александрова М.П., Гулев С.К., Сеницын А.В. Облачность над океаном: современные методы исследований. Москва: Торус-Пресс, 2018. 236 с.
  173. Konoshonkin A.V., Borovoi A.G., Kustova N.V. Beam-splitting code for light scattering by ice crystal particles within geometric-optics approximation // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2015. V. 164. P. 175–183.
  174. Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Borovoi A.G. et al. Light scattering by ice crystals of cirrus clouds: comparison of the physical optics methods // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2016. V. 182. P. 12–23.
  175. Konoshonkin A.V., Borovoi A.G., Kustova N.V. et al. Light scattering by ice crystals of cirrus clouds: from exact numerical methods to physical-optics approximation // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. V. 195. P. 132–140.
  176. Veselovskii I., Goloub P., Podvin T. et al. Spectral dependence of backscattering coefficient of mixed phase clouds over West Africa measured with two-wavelength Raman polarization lidar: Features attributed to ice-crystals corner reflection // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. V. 202. P. 74–80.
  177. Wang Z., Shishko V.A., Konoshonkin A.V. et al. The study of cirrus clouds with the polarization lidar in the South-East China (Hefei) // Atmospheric and Oceanic Optics. 2017. V. 30. № 3. P. 234–235.
  178. Borovoi A.G., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Veselovskii I.A. Contribution of corner reflections from oriented ice crystals to backscattering and depolarization characteristics for off-zenith lidar profiling // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2018. V. 212. P. 88–96.
  179. Вострецов Н.А., Жуков А.Ф. Пригодность критерия аппроксимации для распределения плотности вероятностей флуктуаций излучения сфокусированного лазерного пучка в снегопадах // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 1. С. 98–99.
  180. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г. Алгоритм трассировки пучков для задачи рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах. Часть 1. Теоретические основы алгоритма // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 4. С. 324–330.
  181. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г. Алгоритм трассировки пучков для задачи рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах. Часть 2. Сравнение с алгоритмом трассировки лучей // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 4. С. 331–337.
  182. Вострецов Н.А., Жуков А.Ф. Нормированная временная автокорреляционная функция флуктуаций рассеянного излучения фокусированного лазерного пучка (0.63 мкм) в приземной атмосфере в дожде, мороси, тумане и дымке // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 5. С. 377–379.
  183. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Шишко В.А., Боровой А.Г. Методика решения задачи рассеяния света на ледяных кристаллах перистых облаков в направлении рассеяния назад методом физической оптики для лидара с зенитным сканированием // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 1. С. 40–50.
  184. Коношонкин А.В. Моделирование сигнала сканирующего лидара от монодисперсного облака квазигоризонтально ориентированных частиц // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 12. С. 1053–1060.
  185. Демин А.В., Селедкина Е.А. Повышение достоверности приема эхосигнала при определении высоко-

- ты нижней границы облаков // Навигация и гидрография. 2017. № 47. С. 85–92.
186. Жакамихов К.М., Абшаев А.М. Расчеты поляризации рассеянного света в развивающемся конвективном облаке для миллиметровых длин волн // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 22–30.
  187. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г., Jens R. Восстановление доли ориентированных атмосферных кристаллов по данным рамановского лидара и облакомера // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 7. С. 552–557.
  188. Брюханов И.Д., Зуев С.В., Самохвалов И.В. Результаты экспериментальных исследований микрофизических свойств перистых облаков и потоков солнечной радиации у земной поверхности // Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2018. № 662. С. 107–111.
  189. Вострецов Н.А. Распределение плотности вероятностей флуктуаций рассеянного излучения фокусированного лазерного пучка в приземной атмосфере в дожде, мороси, тумане // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 1. С. 24–27.
  190. Астафуров В.Г., Скороходов А.В. Классификация многоярусной облачности по данным MODIS с использованием технологии нейронных сетей и методов нечеткой логики // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 162–173.
  191. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным сканирующих радиометров полярно-орбитальных и геостационарных метеоспутников // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 5. С. 30.
  192. Волкова Е.В., Успенский А.Б., Кухарский А.В. Специализированный программный комплекс получения и валидации спутниковых оценок параметров облачности и осадков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 7–26.
  193. Чукин В.В., Мельникова И.Н., Нгуен Т.Т. и др. Диагностика ледяных ядер в облаках по данным прибора SEVIRI // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 133–142.
  194. Астафуров В.Г., Курьянович К.В., Скороходов А.В. Методы автоматической классификации облачности по спутниковым снимкам MODIS // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 4. С. 35–45.
  195. Астафуров В.Г., Скороходов А.В. Идентификация облачных проявлений атмосферных гравитационных волн над водной поверхностью по спутниковым снимкам MODIS // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 7. С. 579–584.
  196. Заболотских Е.В., Шапрон Б. Нейронно-сетевой метод оценки интенсивности дождя над океанами по данным измерений спутникового радиометра AMSR2 // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 1. С. 92.
  197. Астафуров В.Г., Курьянович К.В., Скороходов А.В. Статистическая модель текстуры изображений облачного покрова по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 53–66.
  198. Астафуров В.Г., Скороходов А.В. Статистическая модель физических параметров облачности на основе тематических продуктов MODIS // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 5. С. 66–81.
  199. Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным радиометра МСУ-МР полярно-орбитального метеоспутника “МЕТЕОР-М” №2 для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 300–320.
  200. Заболотских Е.В. Современные методы определения интегральных параметров влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 3. С. 335–342.
  201. Косторная А.А., Сапрыкин Е.И., Захватов М.Г., Токарева Ю.В. Метод дешифрирования облачного покрова по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. 2017. № 12. С. 16–24.
  202. Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е. Методика идентификации мезомасштабной облачности по спутниковым снимкам // Труды ГГО. 2017. № 585. С. 85–97.
  203. Астафуров В.Г., Скороходов А.В., Мусиенко О.П., Курьянович К.В. Статистическая модель текстуры изображений и физических параметров облачности в периоды залегания снежного покрова на территории российской федерации по данным MODIS // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 7. С. 537–541.
  204. Волкова Е.В. Определение микрофизических параметров облачного покрова по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 265–282.
  205. Скороходов А.В., Астафуров В.Г. Методика определения типов атмосферных фронтов на основе результатов классификации облачности по спутниковым данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 209–216.
  206. Скороходов А.В., Астафуров В.Г., Евсюткин Т.В. Применение статистических моделей текстуры изображений и физических параметров облаков для их классификации на спутниковых снимках MODIS // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 4. С. 43–58.
  207. Косцов В.С. Восстановление параметров облачной атмосферы по данным радиометра RPG-NATPRO // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 179–190.
  208. Куницын В.Е., Нестеров И.А., Терешин Н.А. Анализ влагосодержания атмосферы по данным приемников GPS // Журн. радиоэлектроники. 2015. № 6. С. 6–18.
  209. Нгуен Т.Т., Чукин В.В. Модель рассеяния электромагнитных волн на каплях воды и фрактальных кристаллах льда // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. № 38. С. 93–101.
  210. Бусыгин В.П., Дмитриева-Араго Л.Р., Краснокутская Л.Д., Кузьмина И.Ю. Влияние параметров облачности на характеристики оптических сигналов молний, регистрируемых с космических аппаратов // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. № 359. С. 73–89.

211. *Илюшин Я.А., Кутуза Б.Г.* Влияние пространственной структуры осадков на поляризационные характеристики уходящего микроволнового излучения атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 1. С. 83–91.
212. *Мельникова И.Н., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е.* Дистанционное зондирование оптических параметров облаков по самолетным измерениям солнечной радиации в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах // Труды ГГО. 2017. № 585. С. 98–109.
213. *Meredith E.P., Maraun D., Semenov V.A., Park W.* Evidence for added value of convection-permitting models for studying changes in extreme precipitation // J. Geophysical Research: Atmosphere. 2015. V. 120. P. 12500–12513.
214. *Volosciuk C., Maraun D., Semenov V.A., Park W.* Extreme Precipitation in an Atmosphere General Circulation Model: Impact of Horizontal and Vertical Model Resolutions // J. Climate. 2015. V. 28. P. 1184–1205.
215. Володин Е.М. *Облака и конденсация* / В: Математическое моделирование Земли системы / Володин Е.М., Галин В.Я., Грицун А.С. и др., под ред. Яковлева Н.Г. М.: МАКС Пресс, 2016. С. 58–91.
216. *Маддах М.А., Русин И.Н., Ахунд-Али А.М.* Влияние пространственного разрешения на качество воспроизведения сильных осадков в модели WRF-ARW: пример – юго-запад Ирана // Труды ГГО. 2018. № 588. С. 62–85.
217. *Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров С.А. и др.* Концепция разработки численной нестационарной трехмерной модели эволюции осадкообразующего конвективного облака в естественных условиях и при активных воздействиях // Труды ГГО. 2016. № 582. С. 7–44.
218. *Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров С.А. и др.* Перспективы развития полной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО. 2016. № 582. С. 202–213.
219. *Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Затевахин М.А. и др.* Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО. 2016. № 582. С. 45–91.
220. *Михайловский Ю.П.* О верификации численных моделей конвективных облаков на основе результатов самолетных исследований электризации // Труды ГГО. 2016. № 580. С. 125–137.
221. *Алоян А.Е., Арутюнян В.О., Ермаков А.Н.* Математическое моделирование конвективной облачности в полярных регионах // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 3. С. 222–226.
222. *Шаталина М.В., Дементьева С.О., Мареев Е.А.* Мониторинг и моделирование грозовых событий в Нижегородском регионе: интенсивная гроза 1–2 июня 2015 г. // Метеорология и гидрология. 2016. № 11. С. 81–87.
223. *Бычкова В.И., Перов В.Л., Рубинштейн К.Г.* Численное моделирование возникновения и развития снежной метели при помощи модели WRF-ARW // Труды Гидрометцентра России. 2015. № 353. С. 46–62.
224. *Губенко И.М., Рубинштейн К.Г.* Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 27–37.
225. *Ашабоков Б.А., Кагермазов А.Х., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А.* Об одном подходе к формированию начальных условий при моделировании конвективных облаков // Труды ГГО. 2016. № 582. С. 159–173.
226. *Калинин Н.А., Ветров А.Л., Пищальникова Е.В. и др.* Оценка качества прогноза очень сильного снегопада на Урале с помощью модели WRF // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 55–62.
227. *Пищальникова Е.В., Калинин Н.А., Ветров А.Л. и др.* Прогноз сильного и очень сильного снегопада на Урале на основе модели WRF // Труды Гидрометцентра России. 2016. № 359. С. 58–72.
228. *Анискина О.Г., Волобуева О.В., Мостаманди С.В. и др.* Оценка прогнозов снегопадов, составленных с помощью модели WRF на северо-западе европейской части России // Труды ГГО. 2017. № 586. С. 175–190.
229. *Гавриков А.В.* Оценка качества воспроизведения осадков над Северной Атлантикой и влияния гидростатической аппроксимации в атмосферной модели WRF-ARW // Океанология. 2017. Т. 57. № 2. С. 261–267.
230. *Губенко И.М., Рубинштейн К.Г.* Прогноз грозовой активности с помощью модели электризации кучево-дождевых облаков // Метеорология и гидрология. 2017. № 2. С. 5–19.
231. *Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В.* Прогноз мезомасштабных конвективных систем на Урале с помощью модели WRF и данных дистанционного зондирования // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 16–28.
232. *Куликова И.А., Круглова Е.Н., Киктев Д.Б., Сальников В.Г.* Практическая предсказуемость стандартизированного индекса осадков SPI на месячных и сезонных масштабах времени // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 59–74.
233. *Маддах М.А., Русин И.Н., Ахунд-Али А.М.* Оценка физических параметризаций модели WRF для моделирования сильных осадков на юго-западе Ирана // Труды ГГО. 2017. № 586. С. 191–204.
234. *Бычкова В.И., Рубинштейн К.Г.* Параметризация процессов возникновения и эволюции низовой метели // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 2. С. 143–150.
235. *Зароченцев Г.А., Рубинштейн К.Г., Бычкова В.И. и др.* Сравнение нескольких численных методов прогноза туманов // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 12. С. 981–987.
236. *Пищальникова Е.В., Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В.* Численный прогноз сильных осадков в холодный период года на территории Пермского края // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 1(367). С. 135–145.
237. *Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю., Юсупов Ю.И., Титов Д.Е.* Использование тепло-балансного метода для прогнозирования гололедно-изморозевых отложений на проводах воздушных линий электропередачи // Энергия единой сети. 2018. № 2(37). С. 42–50.
238. *Токарев В.М., Здерова М.Я., Хлучина Н.А. и др.* Оперативная технология прогноза гроз в Сибири и результаты ее испытаний // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2(368). С. 27–43.

239. Шаповалов В.А. Численное моделирование электрических процессов в грозовых облаках // Труды ГГО. 2018. № 588. С. 28–36.
240. Доронин А.П., Шукин Г.Г., Дидык О.И., Петроченко В.М. и др. Возможность рассеяния волнообразной облачности и слоистообразной облачности в северных районах Европейской территории России в интересах гидрометеорологического обеспечения // Навигация и гидрография. 2015. № 46. С. 60–69.
241. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В., Гаева З.С. и др. Численное моделирование параметров градовых облаков при воздействии кристаллизующим реагентом. Перспективы развития полной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО. 2016. № 582. С. 174–183.
242. Белова Л.К., Дрофа А.С. Исследование воздействия гигроскопическими реагентами на конвективное облако по результатам численного моделирования // Труды ГГО. 2016. № 582. С. 184–201.
243. Васильева М.А., Жохова Н.В., Палей А.А. и др. Теоретические исследования динамики аэрозольных частиц под действием неоднородного электрического поля и оценка его влияния на процессы рассеивания тумана // Труды ГГО. 2016. № 580. С. 82–98.
244. Владимиров С.А., Пастушков Р.С. Комплексный метод активных воздействий на конвективные облака с целью регулирования осадков. Трехмерное численное моделирование // Труды ГГО. 2016. № 582. С. 116–127.
245. Пастушков Р.С. Модель активных воздействий на конвективные облака льдообразующими аэрозолями. Современное состояние и перспективы развития // Труды ГГО. 2016. № 582. С. 128–158.
246. Русин И.Н., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Казанин А.Л. Оценка ресурсов влаги, доступных при активных воздействиях на конвективные облака с использованием гигроскопического реагента // Труды ГГО. 2016. № 580. С. 165–174.
247. Makitov V.S., Inyukhin V.S., Kalov H.M. et al. Radar research of hailstorm formation and development over the central part of Northern Caucasus (Russia). Organization and main results of the regional hail suppression projects // Natural Hazards. 2017. V. 88. P. 253–272.
248. Yanlong Tai Y., Liang H., Zaki A. et al. Core/Shell Microstructure Induced Synergistic Effect for Efficient Water-Droplet Formation and Cloud-Seeding Application // ACS Nano. 2017. V. 11. № 12. P. 12318–12325.
249. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Физика облаков и активных воздействий на них. Нальчик: Печатный двор. 2017. 240 с.
250. Белова Л.К., Дрофа А.С. Исследование процессов осадкообразования в конвективных облаках по результатам численного моделирования // Труды ГГО. 2017. № 585. С. 56–76.
251. Воробьева В.В., Володин Е.М. Численное моделирование воздействия на климат путем изменения свойств облаков верхнего яруса в климатической модели ИВМ РАН // Труды Гидрометцентра России. 2017. № 363. С. 5–18.
252. Дрофа А.С., Иванов В.Н., Данелян Б.Г. и др. Натурные испытания эффективности воздействия соевым порошком на облака // Труды ГГО. 2017. № 585. С. 77–84.
253. Корнеев В.П., Потанов Е.И., Шукин Г.Г. Экологические аспекты искусственного регулирования атмосферных осадков // Метеорология и гидрология. 2017. № 7. С. 112–122.
254. Струнин А.М., Струнин М.А. Определение стадии роста конвективного облака по данным самолетных наблюдений для проведения работ по активным воздействиям. /В: Труды Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Уфа: АЭТЕРНА, 2017. Т. 1. С. 197–205.
255. Белова Л.К., Дрофа А.С. Исследование эффективности воздействия гигроскопическими и льдообразующими реагентами на конвективное облако // Труды ГГО. 2018. № 589. С. 74–97.
256. Доронин А.П., Козлова Н.А., Петроченко В.М., Шукин Г.Г. Методика модифицирования переохлажденных волнистообразных облаков с целью вызывания искусственных осадков // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 53. С. 9–17.
257. Синькевич А.А., Боу Б., Михайловский Ю.П. и др. Исследование воздействий на мощные кучевые облака в Индии с целью увеличения количества осадков // Метеорология и гидрология. 2018. № 4. С. 5–17.

## Russian Studies on Clouds and Precipitation in 2015–2018

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

<sup>1</sup>Central Aerological Observatory, ul. Pervomaiskaya 3, Dolgoprudnyi, Moscow oblast, 141700 Russia

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

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

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

The results obtained in Russian studies on clouds and precipitation in 2015–2018 are presented. These results are part of the Russian National Report on Meteorology and Atmospheric Sciences that was prepared for the XXVII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Russian National Report: Meteorology and Atmospheric Sciences: 2015–2018: for the XXVII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Mokhov I.I. and Krivolutsky A.A. eds.). Moscow: MAKSS Press, 2019. 332 pp. doi:10.29003/m662.978-5-317-06182-1.).

**Keywords:** clouds, precipitation, convection, cloud microphysics, condensation nuclei, cloud and precipitation measurements, cloud modelling, weather modification