

УДК 504.3.054. 541.124

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ АТМОСФЕРНОЙ ХИМИИ В 2019–2022 гг.

© 2023 г. И. К. Ларин*

*Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семенова РАН,
Ленинский пр., д. 38, корп. 2, Москва, 119334 Россия*

**e-mail: iklarin@narod.ru*

Поступила в редакцию 31.08.2023 г.

После доработки 08.11.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

Представлен краткий обзор работ российских ученых в области атмосферной химии в 2019–2022 гг., включая работы по химии тропосферы, химии озонового слоя, работы по изучению гетерофазных процессов, а также работы по химическим аспектами климата и его изменением. Обзор подготовлен в Комиссии по атмосферной химии Секции метеорологии и атмосферных наук Национального геофизического комитета.

Ключевые слова: химические процессы, гетерофазные процессы, тропосфера, стратосфера, климат

DOI: 10.31857/S0002351523070076, **EDN:** NYTADI

1. ХИМИЯ ТРОПОСФЕРЫ

Одним из основных направлений исследований в этой области является изучение элементарных химических реакций атмосферного значения, данные о которых затем используются в математических моделях атмосферы. В этой связи следует назвать работу [Ларин и др., 2019], в которой с использованием метода резонансной флуоресценции для регистрации активных химических реагентов в проточном реакторе была измерены константы скорости реакции атомов фтора с CH_3Vg в диапазоне температур 273–358 К. Показано, что измеренная константы скорости возрастают при проведении реакции при более низкой температуре, что характерно для гетерогенных реакций. Предполагается, что взаимодействие атома с CF_3Vg происходит на поверхности реактора. Наряду с методом резонансной флуоресценции для изучения химических реакций используется масс-спектральная техника. В работе [Васильев и др., 2021б] с использованием этой техники была определена константа скорости реакции бензола с атомарным фтором методом конкурирующих реакций. Исследования проводили в проточном реакторе низкого давления с масс-спектрометрическим анализом реагентов и продуктов реакции. В качестве конкурирующих реакций использованы реакции атомов фтора с циклогексаном, трифторуксусной и трихлоруксусными кислотами. Впервые определены соотношения констант скорости бензола и этих конкурирующих реакций с атомарным фтором. На

основе полученных экспериментальных данных и известных из литературы констант скорости реакции рассчитана величина константы скорости реакции атомов фтора с бензолом. В другой работе [Васильев и др., 2021а] масс-спектрографическим методом электрораспыления растворов электролитов в вакууме были получены масс-спектры отрицательных ионов водных растворов полностью нейтрализованных молекул монохлоруксусной кислоты. В работе [Васильев и др., 2019] эта техника использовалась для изучения свойств токсичных веществ. В работе описываются результаты масс-спектрометрического исследования химических веществ — хлоруксусных кислот (моноклоруксусная, дихлоруксусная, трихлоруксусная кислоты) и пиридина с применением напуска исследованных веществ в виде модулированного молекулярного пучка. Преимуществом молекулярно-пучкового напуска является сведение к минимуму образования в ходе анализа посторонних веществ, поскольку метод исключает столкновение молекул исследуемого вещества с нагретыми стенками ионного источника, на которых могут происходить реакции пиролиза и другие реакции образования новых веществ. Помимо лабораторных измерений химические реакции изучаются модельным и теоретическим путем. Так, в работе [Федотов и Кольцов, 2019] был предложен метод расчета точных кинетических автономных инвариантов многостадийных линейных химических реакций, протекающих в безградиентном реакторе через любое количество

элементарных стадий с участием произвольного числа реагентов в рамках закона действующих масс. Для динамических моделей линейных реакций всегда можно найти общие и частные аналитические решения, которые выражаются через начальные условия явным образом. Идея метода основана на выборе таких начальных условий, которые позволяют выразить неравновесные концентрации реагентов через постоянные кинетические параметры (константы скоростей стадий и скорости потока). В подобной работе [Ненайденко, 2020] рассматриваются особенности протекания химических реакций в многокомпонентных системах. Указывается, в частности, что с увеличением количества компонентов, принимающих участие в подобных реакциях, резко возрастает структурное разнообразие образующихся продуктов, которое становится практически безграничным. В другой расчетной работе [Крупнов и Погосбекян, 2019] методами квантовой механики рассчитаны переходные состояния, частоты колебаний и пути реакции $\text{CO} + \text{N}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{N}_2$. Рассмотрен как прямой, так и обратный переход атома кислорода, так и процесс, идущий через образование нескольких промежуточных комплексов. В рамках теории переходного состояния рассчитаны константы скорости прямой и обратной реакции. В работе [Денисов и Денисова, 2019] экспериментальные данные по реакциям отрыва атомов водорода от углеводородов, галогеналканов и кислородсодержащих соединений атомами кислорода (50 реакций) проанализированы в рамках модели пересекающихся парабол. Установлено влияние пяти факторов на энергию активации этих реакций: энтальпии реакции, триплетного отталкивания, электроотрицательности атомов реакционного центра, диполь-дипольного взаимодействия реакционного центра с полярными группами, π -электронов соседних ароматических колец. Важные сведения о химических процессах, протекающих в загрязненном городском воздухе, могут быть получены из данных о химическом составе и кислотности городских осадков. В качестве примера можно привести работу [Васильчук и др., 2021], в которой анализируется состав осадков, собранных на протяжении 2014–2016 гг. на территории Метеорологической станции МГУ (Москва), включая их изотопный состав. Было показано, что распределение изотопного состава осадков в Москве, наблюдаемое на протяжении 2014–2016 гг., имеет синусоидальный вид и хорошо коррелирует с изменением температуры приземного слоя воздуха. В сезонном ходе среднемесячных значений 18 O в осадках наблюдается их закономерное увеличение с января по май–июль. В течение рассматриваемого 3-летнего периода самые изотопически легкие осадки выпадали в январе, наиболее изотопически тяжелые — в летние месяцы. В аналогичной

работе [Ерёмина, 2019] химический состав осадков в Москве анализируется уже в период с 1982 по 2017 гг. Весь ряд наблюдений можно разделить на три периода, которые характеризуются кислотностью осадков, изменением минерализации и преобладанием тех или иных ионов. В 1982–1998 гг. наблюдались наиболее загрязненные атмосферные с повышенной кислотностью; в 1999–2004 гг. — практически полностью отсутствовали кислотные выпадения, и уменьшилась минерализация. Последний период 2005–2017 гг. отличается от предыдущего увеличением частоты кислотных осадков, при этом минерализация практически не изменилась, несмотря на заметное увеличение хлоридов в последние годы. Работа [Горбаренко, 2022] продолжает исследование причин климатических изменений в Московском регионе на базе наблюдений МО МГУ. Проведен анализ многолетней динамики основного климатообразующего фактора — радиационного режима атмосферы. На протяженной 65-летней периода наблюдений на фоне квазипериодических изменений отмечены значимые тенденции для всех радиационных параметров атмосферы, наиболее выраженные в зимний период. Наибольший рост на 26, 16 и 49% отмечен для среднегодовых значений и на 73, 41 и 34% для зимних значений радиационного, длинноволнового балансов и температуры поверхности почвы соответственно. В XXI веке усилились тенденции уменьшения аэрозольной мутности атмосферы, роста прямой и уменьшения рассеянной радиации. Практически вдвое увеличилась скорость повышения длинноволнового и радиационного баланса, температуры поверхности почвы. В отсутствии значительных вулканических извержений, главным естественным фактором стал “парниковый эффект” облачности. Антропогенная составляющая аэрозольной мутности в последние годы существенно снизилась, что связано с рядом мер правительства Москвы по улучшению экологии в городе. Антропогенное влияние на радиационный режим в городе проявилось в усилении длинноволновых потоков, что привело к росту интенсивности “острова тепла” в XXI веке.

В связи с актуальностью вопросов охраны окружающей среды и безопасной энергетики укажем на работу [Филиппов и Ярославцев, 2021], в которой рассматривается современное состояние перспективы развития водородной энергетики. Значительное число работ в области тропосферной химии было посвящено мониторингу загрязняющих веществ, включая продукты лесных пожаров, аэрозолей, а также малых составляющих тропосферы, таких, как озон, окись и двуокись углерода, двуокись азота и др. [Агеев и др., 2019; Агеев и Пономарев, 2020; Андреев и др., 2022; Баженов и др., 2019; Белан и др., 2020; Головкин и др., 2022; Головушкин и др., 2020; Голубков и др.,

2020; Горбаренко, 2020; Горчаков и др., 2021а, б; Груздев, 2019; Груздев и Елохов, 2021; Дембелов и Башкуев, 2022; Дементьева и др., 2020; Еланский и др., 2021, 2022; Захаров и др., 2022; Иванова, 2019; Ионов и Поберовский, 2020; Калашник, 2022; Карпов и др., 2021; Ковалев и др., 2022; Курятникова и др., 2022; Ларин и др., 2020а, 2021а; Малкарова, 2022; Мирошниченко и др., 2022; Морозов и др., 2022; Неробелов и др., 2022; Панов и Сахарова, 2022; Ракитин и др., 2021; Скороход и др., 2022; Федченко и др., 2019; Филей и др., 2022; Чеснокова и др., 2019; Чистякова и др., 2021; Чэнсюнь и др., 2022; Шаталина и др., 2019, 2021а, 2021б; Шихов и др., 2022].

2. ГЕТЕРОФАЗНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Гетерофазные процессы имеют большое значение для понимания озоносферной химии. Напомним, что именно эти процессы сыграли решающую роль в истощении озонового слоя в конце 20-го столетия и в образовании Арктической и Антарктической озоновых дыр. В последние годы в этой области были получены новые важные результаты. При этом значительное внимание уделялось процессам, протекающим в слое Юнге (нижняя и средняя стратосфера). Так, в работе [Алоян и др., 2019а] приводятся результаты 3D-моделирования пространственно-временной структуры распределения в атмосфере газовых примесей и частиц слоя Юнге в зимний период 2002 г., даны о счетных и массовых концентрациях, а также изменчивости содержания в частицах воды, серной и азотной кислот. Аналогичные задачи решались в работе [Алоян и др., 2019б].

Сульфатные частицы слоя Юнге оказывают влияние на свойства окружающей среды. В работе [Ларин и др., 2021а] авторы объясняют, каким образом это влияние изменяет атмосферное время жизни нечетного кислорода. В другой работе, [Ларин и др., 2021б], объясняется влияние сульфатных частиц на скорость разрушения озона в нижней стратосфере. Найденный в расчетах на высотах менее 16 км драматический спад скорости разрушения озона в сравнении со скоростью убыли озона, рассчитанной с участием газовых химических реакций свидетельствует об ингибирующей роли частиц аэрозоля. Причиной выступает захват из воздуха частицами аэрозоля молекул N_2O_5 . Их быстрый сток влечет за собой резкий спад концентраций компонент семейства NO_x в воздухе, а также, хотя и менее выраженное, снижение концентраций компонентов семейств HO_x и O_x , участвующих в разрушении озона.

В работе [Алоян и др., 2021] описана новая численная модель переноса и трансформации в атмосфере газовых и аэрозольных примесей с учетом процессов фотохимии, нуклеации с уча-

стием нейтральных молекул и ионов, а также конденсации/испарения и коагуляции. Полученные применительно к северному полушарию и зимнему времени результаты указывают на значимую роль процесса ионной нуклеации в формировании атмосферного аэрозоля. При этом наряду с уровнем ионизации воздуха ключевыми факторами, определяющими динамику ионной нуклеации, являются также температура и относительная влажность. В работе [Алоян и др., 2021] анализируются образцы из скважины, глубиной в 70 м, пробуренной на станции Восток (Центральная Антарктида), которые охватывают эпоху позднего голоцена (последние 2000 лет). Реконструированы климатические условия (температура воздуха и скорость снегонакопления) в окрестностях станции Восток. Полученные результаты сравниваются с опубликованными палеоклиматическими реконструкциями. В работе [Рогачев, 2019] автор объясняет, каким образом механическое воздействие может привести к гетерогенным реакциям в порошковых системах. Правда, для этого необходимо, чтобы реакция была экзотермической, т.е. шла с выделением тепла. В работе [Панченко и др., 2019] в хронологическом порядке излагается история исследований тропосферного аэрозоля в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

Для того, чтобы учитывать гетерофазные реакции в атмосферной химии, необходимо знать константы скорости гетерогенных реакций. Такие данные получают с помощью специальных лабораторных кинетических установок, в которых химическая реакция протекает не в газовой фазе, а на стенках реактора. В качестве примера можно привести работу [Ларин и др., 2021в], в которой изучалась реакция диметилсульфида с радикалами IO . Была определена температурная зависимость этой гетерогенной реакции. В работе [Ларин и др., 2020б] с использованием той же методики что и в [Ларин и др., 2021г], была изучена гетерогенная реакция сероводорода с радикалами IO .

Среди работ гетерофазной тематики определенный интерес представляют работы, в которых анализируются аэрозольные данные локального характера. Примером такой работы является работа [Ермаков и др., 2020], в которой представлены данные о сезонной изменчивости аэрозольного состава в различных районах Бельгии в 2001–2003 гг. В работе [Сакерин и др., 2019] обсуждаются аэрозольные данные, полученные на Северной Земле. Было показано, что средние значения большинства характеристик аэрозоля, измеренных в апреле–июне 2018 г., немного ниже, чем в арктическом пос. Баренцбург (арх. Шпицберген), и в несколько раз меньше, чем на юге Западной Сибири в этот же период. В работе [Ермаков и др., 2019] авторы анализируют вопрос образования сульфатов в карбонатных частицах, используя данные мониторинга атмосферы в Иркутске. Ав-

торам удалось показать, что основным источником сульфатов в карбонатных частицах в атмосфере Иркутска служит захватываемый из воздуха SO_2 . Их накопление в составе частиц вызвано гетерофазными реакциями и сопровождается замещением гидрокарбонатов (HCO_3^-) на сульфатные анионы.

Помимо описанного выше, гетерофазная химия занимается изучением реакций активных химических компонент с и покрытиями разного химического состава. Так, в работах [Зеленов и др., 2019; Зеленов и Апарина, 2021] изучался захват радикалов NO_3 покрытием из метановой сажи. На основе хроматографического и масс-спектрометрического анализов состава исходной метановой сажи и твердых продуктов ее реакции с окисляющим газофазным реагентом NO_3 было установлено, что одними из основных продуктов этой гетерогенной реакции являются производные фталевой кислоты, соединения группы парафинов и производные ацетофена.

Определенные сведения о гетерофазных процессах, протекающих в атмосфере, могут быть получены при изучении химического состава и других характеристик осадков, выпадающих на земную поверхность в виде дождя или снега. Соответствующие данные обсуждаются в работах [Власов и Еремина, 2020; Завгородняя и др., 2021]. В заключении этого раздела укажем на работу [Береснев и Васильева, 2020], в которой обсуждается предложенная ранее [Зуев и др., 2014а, б, в] гипотеза о возможности образования наночастиц черного углерода в эруптивной колонне вулканического извержения. Другие вопросы гетерофазной химии обсуждаются в работах [Бабушкин и др., 2022; Губанова и др., 2022; Козлов и Жестков, 2022; Шилин и др., 2022].

3. ХИМИЯ ОЗОНОВОГО СЛОЯ

В этой области в последнее четырехлетие был получен ряд новых результатов, как в области теории озонового слоя, так и в области наблюдений за его восстановлением после истощения в конце прошлого века под действием антропогенных факторов. Так, в работе [Никифорова и др., 2019] по данным отечественной сети фильтровых озонметров М-124 и результатам спутникового мониторинга исследована изменчивость общего озона в Арктике в зимний сезон 2015/2016 г. и установлено развитие в конце января 2016 г. первой за всю историю наблюдений озоновой минидыры. В [Криволуцкий и др., 2021] представлен обзор работ, выполненных в лаборатории химии и динамики атмосферы Центральной аэрологической обсерватории, по созданию и использованию глобальных численных моделей атмосферы. Созданные модели позволяют проводить широ-

кий спектр численных исследований, включая как температурные, так и циркуляционные эксперименты. Из модельных работ назовем работу [Варгин и др., 2021], в которой по результатам пяти 50-летних расчетов с 5-й версией совместной климатической модели ИВМ РАН, было показано, что зимние сезоны с явлением Эль-Ниньо характеризуются более высокой температурой арктической стратосферы по сравнению с сезонами с Ла-Нинья. В работе [Коленникова и др., 2021] рассматривался отклик стратосферы Арктики на климатическое явление Эль-Ниньо с учетом его восточно- и центрально-тихоокеанского типов за период 1950–2005 гг. на основе регрессионного и композитного анализа с использованием расчетов шести совместных климатических моделей проекта CMIP5 и данных реанализа. В работе [Цветкова и др., 2021] приводятся оценки химического разрушения озона в зимне-весенние сезоны для стратосферы Арктики на базе многолетних данных наблюдений вертикального распределения озона.

Проанализированы особенности и возможные причины необычайно сильного и устойчивого стратосферного полярного вихря в Арктике в зимний сезон 2019/2020 г., приведшего к рекордному за последние годы разрушению озонового слоя, и связанные с этим полярным вихрем динамические процессы. Эти данные дополняются данными работы [Баженов, 2021], в которой сообщается, что зимой-весной 2019–2020 гг. наблюдалась самая значительная озоновая аномалия в Арктике за всю историю наблюдений. Она была обусловлена необычайно сильным и продолжительным полярным вихрем, повлекшим беспрецедентное химическое разрушение озона. Анализ данных Aura OMI/MLS показал, что общее содержание озона неуклонно сокращалось и составило 230 е.Д. 18 марта в пункте Алерт, 222 е.Д. 18 марта в Эврике, 229 е.Д. 20 марта в Туле и 226 е.Д. 18 марта в Резольют. Минимальная температура была на 9–10% ниже нормы с декабря по апрель в стратосфере над Томском и Арктикой. В работе [Габис, 2021] обсуждается вопрос о том, каким образом квазидвухлетние осцилляции зонального ветра в экваториальной стратосфере могут повлиять на межгодовые изменения мощности озоновой дыры в Антарктике. Другие сведения об озоне в Антарктиде и южных морях содержатся в работах [Варгин и др., 2020; Сибир и др., 2020; Смышляев и др., 2020]. В [Трошичев и др., 2021] обсуждается влияние космической погоды на свойства атмосферы. Показано, в частности, что высокоэнергичные солнечные протоны оказывают мощное воздействие на фотохимические процессы в полярных областях и, соответственно, на атмосферную циркуляцию и планетарную облачность. Вариации солнечного УФ-излучения моделируют скорость спуска зональных ветров в экваториаль-

ной стратосфере в ходе квазидвухлетней осцилляции и контролируют, таким образом, общую продолжительность цикла и, соответственно, вариации общего содержания озона в Антарктике. В работе [Пастухова и др., 2019] с помощью химико-климатической модели ИВМ РАН-РГГМУ (ХКМ ИВМ-РГГМУ) было проанализировано действие различных факторов на общее содержание озона и эритемную УФ радиацию на территории Северной Евразии за период с 1979 по 2059 гг. Среди модельных разработок назовем работу [Нусинов и др., 2019] по созданию спектра далекого ультрафиолетового излучения Солнца в области длин волн, ответственной за диссоциацию молекулярного кислорода.

В работе [Куминов и др., 2021], описывающей ракетные средства зондирования атмосферы, было показано, что в интервале высот от 25 до 75 км тренды температуры и скорости ветра над станцией ракетного зондирования атмосферы Волгоград в 1969–1995 гг. являются нелинейными и на большинстве высот немонотонными. Обнаружено увеличение значений размаха трендовых вариаций анализируемых параметров в обозреваемом периоде с высотой: температуры — до 15–19 К в нижней и средней мезосфере, зонального компонента скорости ветра — до 15 м/с в стратопause, меридионального компонента — до 10 м/с в нижней мезосфере. Наряду с работами модельного характера значительное внимание в последние годы уделялось наблюдениям за содержанием озона и его изменчивостью. В качестве примера можно привести работу [Дворецкая и др., 2020], в которой по спутниковым данным об общем содержании озона (ОСО) за 1979–2015 гг. исследована сезонная и долговременная изменчивость количества положительных и отрицательных аномалий ОСО для Земли в целом, Северного полушария, России и широтного пояса, которому она принадлежит. Было установлено, что долговременная изменчивость ОСО существенно превышает сезонную и обусловлена самым медленным из приливных колебаний с периодом 18.6 лет.

В [Беликович и др., 2020] сообщается о наблюдениях за озоном над Нижним Новгородом зимой 2017–2018 годов. В [Кропоткина и др., 2019] были представлены результаты наземных микроволновых профилей стратосферного озона над Москвой в холодные полугодия 2014–2015 и 2015–2016 гг., и рассмотрены причины наблюдавшихся изменений озона в верхней стратосфере. Зимой 2014–2015 гг. отмечались повышенная активность планетарных волн, большие перепады температуры в начале зимы и пониженные температуры с января по март. Полярный вихрь был неглубоким и долгоживущим, в феврале–марте холодный воздух вихря находился над Москвой. Это привело к сильной отрицательной корреляции измеренного содержания озона с температу-

рой. Наибольшее содержание озона на уровне 2 мбар наблюдалось в середине марта. Напротив, в ноябре–декабре 2015 г. при меньшей активности планетарных волн возник интенсивный полярный вихрь, который был полностью разрушен мажорным финальным потеплением в начале марта 2016 г. В работе [Ларин, 2019в] излагается теория цепных процессов озоносферы, на основе которой рассчитываются время жизни нечетного кислорода и скорость разрушения озона в каталитических циклах [Ларин, 2019а, 2020б, 2020в, 2022]. Закончим раздел работой [Кашкин и др., 2022], в которой обсуждается воздействие ядерного взрыва на озон.

4. ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Работы в этой области были связаны с климатом, прогнозированием климатических изменений, парниковыми газами и сопутствующими вопросами. Хотя вопрос об антропогенных причинах изменений современного климата у большинства климатологов не вызывает сомнений, дискуссионным является вопрос о том, что происходит раньше — рост содержания парниковых газов или рост приповерхностной температуры? Этот вопрос уже обсуждался (см. 4-й раздел в [Ларин, 2019б]). Его обсуждение было продолжено в работе [Мурышев и др., 2019]. В этой работе в численных экспериментах с климатической моделью ИФА РАН и концептуальной климатической моделью климата с углеродным циклом исследован фазовый сдвиг между изменениями приповерхностной температуры и содержанием CO_2 при внешнем воздействии в виде синфазных по времени внешних эмиссий углекислого газа и метана в атмосферу. Получено, что при достаточно большом временном масштабе внешнего воздействия изменения CO_2 запаздывают от соответствующих изменений температуры. К этому нужно добавить, что (как пишут авторы) фазовый сдвиг между изменениями глобальной приповерхностной температуры и содержания CO_2 в атмосфере в общем случае не характеризует причинно-следственные связи в земной системе. Вопросы теории климата освещаются в работе [Мохов, 2019]. Ее автор — сопредседатель Научного совета РАН по проблемам климата Земли академик РАН И. И. Мохов — подробно анализирует тенденции наблюдаемых температурных вариаций, их глобальные и региональные особенности. В работе отмечается, что повышение глобальной приповерхностной температуры сопровождается быстрым ростом числа природных катастроф, в первую очередь вследствие гидрологических и метеорологических аномалий. Утверждается, что климатические аномалии последних лет свидетельствуют не только об увеличении риска экс-

тремальных региональных событий, но и о новых процессах и явлениях, характеризующих достижение определенного критического уровня климатических изменений. Согласно результатам анализа современных изменений климата с использованием модельных оценок с учетом естественных и антропогенных факторов в результате быстрого потепления в последние десятилетия земная климатическая система достигла режима, сопоставимого с режимом оптимума голоцена.

В работе [Володин, 2019] по данным доиндустриального эксперимента продолжительностью 1200 лет с климатической моделью INM-CM5 был исследован механизм естественных колебаний климата в Арктике с периодом около 60 лет. Показано, что четверть периода, предшествующего арктическому потеплению, наблюдается более интенсивный, чем обычно, приток атлантической воды в Северный Ледовитый океан, вблизи побережья и границы шельфа соленость и плотность меньше, чем обычно. В результате адвекции атлантической воды после арктического потепления вода у побережья и границы шельфа становится более соленой и тяжелой, что приводит к ослаблению потока атлантической воды и изменению фазы колебаний. Выводы подтверждаются расчетом генерации аномалий температуры, солености и расхода по различным слагаемым, а также оценкой вклада различных слагаемых в изменение фазы колебаний. В работе [Денисов и др., 2019] анализировался вклад эмиссий углекислого газа и метана с территории России в изменение глобального климата. Было показано, что учет изменений климатических условий может сильно влиять на показатели воздействия выбросов различных парниковых газов на климатическую систему, особенно на больших временных горизонтах. При принятии решений следует учитывать, что в зависимости от горизонта планирования может изменяться роль естественных потоков парниковых газов в атмосферу из наземных экосистем. В настоящее время в российских регионах наземные экосистемы, поглощая CO_2 из атмосферы способствуют замедлению роста глобальной температуры, а эмитируя CH_4 в атмосферу ускоряют потепление. При этом общий эффект естественных потоков этих парниковых газов из российских регионов в современных условиях способствует замедлению потепления. Роль этого замедляющего потепления эффекта растет в первой половине XXI века, а после достижения максимума (зависящего от сценария антропогенных выбросов) уменьшается к концу века при всех рассмотренных сценариях антропогенных воздействий в связи с ростом естественных эмиссий CH_4 и уменьшением поглощения CO_2 наземными экосистемами. В [Мохов и Смирнов, 2022a] было рассмотрено влияние антропогенных и естественных факторов на

климат полушария. На основе трехкомпонентных авторегрессионных моделей и имеющихся данных наблюдений с XIX в. оценена роль в формировании температурных трендов на разных временных горизонтах Атлантической мультidesятилетней осцилляции, Эль-Ниньо-Южного колебания, Тихоокеанской десятилетней осцилляции и Антарктической осцилляции. Отмечен существенный вклад в температурные тренды ключевых мод климатической изменчивости на сравнительно коротких интервалах длительностью в пределах двух-трех десятилетий — сопоставимый с вкладом парниковых газов и даже превышающий его. Сравниваются оценки, характеризующие особенности полярных, средних и тропических широт в Южном (ЮП) и Северном (СП) полушариях. Согласно полученным оценкам на временных интервалах от полувека и более в формировании температурных трендов разных широтных зон и для Земли в целом доминирующий вклад связан с радиационным воздействием парниковых газов в атмосфере.

В работе [Аржанов и др., 2019] был рассмотрен вопрос об устойчивости метангидратов вечной мерзлоты. Были получены результаты численного моделирования теплового режима вечной мерзлоты Западной Сибири (полуостров Ямал) и зоны стабильности гидратов метана за последние 10 тыс. лет. Получены термобарические условия стабильности и диссоциации континентальных гидратов метана. Показано, что в настоящее время в толщах вечной мерзлоты Ямала на глубинах до 150 м могут существовать реликтовые гидраты метана, которые могли “пережить” потепление в голоценовом и сохраняться при минусовых температурах в вечной мерзлоте. В [Мохов, 2022] получены оценки изменений в течение последних семи десятилетий (1950–2019 гг.) частот переходов между разными фазами процессов. С положительными (фаза Эль-Ниньо) и отрицательными (фаза Ла-Нинья) аномалиями температуры поверхности в экваториальных широтах Тихого океана связаны сильнейшие межгодовые вариации глобальной приповерхностной температуры. Выявлены существенные различия тенденций для явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья разного типа, характеризующихся аномалиями температуры поверхности в экваториальных широтах восточной (Niño3) и центральной (Niño4) областей Тихого океана. В [Мохов и Парфенова, 2022] были получены количественные оценки связи внутригодовых и межгодовых вариаций площади снежного покрова в Северном полушарии, в том числе в Евразии и Северной Америке, с изменениями приповерхностной температуры на основе спутниковых данных и данных реанализа для периода 1979–2020 гг. В [Мохов и Смирнов, 2022b] получены количественные оценки вклада антропогенных воздействий, характеризующихся изменени-

ями радиационного воздействия парниковых газов в атмосфере, и ключевых мод естественной климатической изменчивости в тренды приповерхностной температуры разных широтных зон Северного (СП) и Южного полушария (ЮП) на различных временных горизонтах с использованием данных наблюдений. Результаты анализа свидетельствуют о существенной роли изменений радиационного воздействия парниковых газов в атмосфере в формировании тренда глобальной приповерхностной температуры, усиливающейся с увеличением временного горизонта. При этом отмечены значительные различия для широтных зон ЮП и СП, связанные с влиянием разных мод естественной климатической изменчивости.

В [Анисимов и др., 2020] было рассмотрено влияние эмиссий метана из криолитзон России на глобальный климат. Установлены статистические связи их интенсивности с температурой воздуха, атмосферными осадками, мощностью сезонного слоя и температурой многолетнемерзлых грунтов. С использованием ансамблевого климатического сценария CMIP5 получен прогноз изменения эмиссии метана в криолитозоне на середину XXI в. При помощи модели земной системы INM-CM48 показано, что прогнозируемое увеличение эмиссии метана на 20 Тг/год приведет к повышению среднегодовой глобальной температуры не более чем на 0.05°C . Проведен анализ неопределенности полученных оценок и рассмотрена альтернативная концептуальная модель быстрых пороговых изменений эмиссии метана. В [Мохов и др., 2020] на основе численных расчетов с глобальной климатической моделью оценены глобальные и региональные изменения климата в голоцене. Согласно полученным результатам, современная среднегодовая глобальная приповерхностная температура в последние десятилетия превысила соответствующие значения для предыдущих 10 тыс. лет, в том числе в период так называемого “оптимума голоцена” (иначе — среднего голоцена, около 6 тыс. лет назад).

Глобальные и региональные климатические изменения и изменения характеристик углеродного цикла в последнее столетие по модельным расчетам (с учетом антропогенных воздействий) существенно отличаются от изменений в предыдущие столетия и тысячелетия, когда ключевую роль играли естественные воздействия на климатическую систему. В работе [Мохов, 2020] оцениваются особенности современных быстрых климатических изменений в Арктике и их последствий на основании результатов, полученных в последние годы. В [Мохов и Тимажев, 2019] были получены оценки изменения повторяемости атмосферных блокирований на основе ансамблевых расчетов CMIP5 с помощью современных климатических моделей общей циркуляции с использованием различных критериев детектирования атмосферных блокингов и разных RCP-сце-

нариев антропогенных воздействий для XXI в. В [Володин и Грицун, 2020] представлены результаты моделирования изменений климата в 2015–2100 гг. с помощью климатической модели ИВМ РАН INM-CM5. Показано, что летом именно на территории России температура самого жаркого месяца может расти быстрее, чем среднесезонная температура. Рассматривается изменение площади морского льда в Арктике и показано, что, согласно данным моделирования, ни при каком сценарии не происходит полного освобождения Северного Ледовитого океана ото льда в XXI в.

В [Бикташ, 2019] представлены данные анализа вариаций потока полной солнечной радиации в 17–24-м циклах солнечной активности и их связи с глобальным потеплением климата. Рассмотрено влияние галактических космических лучей и вулканической активности на климат. Показано, что температура Земли в 17–20-м циклах испытывала вариации в соответствии с ходом солнечной активности без наблюдаемого тренда: температура росла с ростом солнечной активности и спадала в солнечных минимумах. Глобальное потепление началось в 1976 г. в 21-м цикле солнечной активности. С учетом наблюдаемого тренда в 21–24-м циклах солнечной активности, изменения глобальной температуры Земли, так же как и в 17–20-м циклах, были связаны с циклическими вариациями потока полной солнечной радиации. Галактические космические лучи, изменяя прозрачность атмосферы на фоне понижений потока полной солнечной радиации, дополнительно способствовали увеличению температурных минимумов. Сильные вулканические извержения сопровождались 1–2-х годовыми понижениями температуры, которые не нарушали циклического процесса изменения климата Земли. В отсутствие трендов в космофизических факторах, влияющих на климат, процесс постепенного роста средней годовой температуры Земли в 21–24-м циклах солнечной активности объясняется антропогенным фактором. В [Володин, 2021] рассматривается изменение равновесной чувствительности модели климата INM-CM4-8 к учетверению концентрации CO_2 при изменениях в параметризации облачности в этой модели. Показано, что регулирование учета различных механизмов образования и диссипации облачности может приводить к изменению равновесной чувствительности модели в пределах от 3.6 до 8.1°C , что больше чем наполовину покрывает диапазон изменения этой величины для современных климатических моделей.

Климатические изменения, о которых говорилось выше, изменяют не только окружающую среду, но и условия жизни. Эти вопросы обсуждаются в работах [Гинзбург и Докукин, 2021; Голицын и Васильев, 2019; Ключева и др., 2020; Торжков и др., 2019]. В работе [Ларин, 2020a] рассматривается влияние глобального потепления на

скорость разрушения стратосферного озона в каталитических циклах. Другие климатические вопросы рассматриваются в работах [Володин, 2022; Гинзбург и др., 2019; Денисов и др., 2022; Зинченко и др., 2022; Куликова и др., 2022; Лысенко и др., 2022; Мохов и Тимажев, 2019; Порфирьев и др., 2022; Рыжакова и др., 2019; Семёнов, 2022; Сирин и др., 2022].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агеев Б.Г., Пономарев Ю.Н. Оценка сечения поглощения запрещенной колебательной полосы в нанопористом аэрозоле // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 2. С. 85–87.
- Агеев Б.Г., Сапожникова В.А., Груздев А.Н., Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Савчук Д.А. Сравнение характеристик остаточных газов в годичных кольцах деревьев сосны // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 2. С. 105–112.
- Алоян А.Е., Арутюнян В.О., Ермаков А.Н. Моделирование формирования слоя Юнге в северных широтах: пространственно-временная структура и состав частиц // Метеорология и гидрология. 2019. № 5. С. 5–13.
- Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О. Формирование ледяных частиц аэрозоля в нижней стратосфере // Химическая физика. 2019. Т. 38. № 1. С. 81–85.
- Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О. Моделирование влияния ионов на динамику формирования аэрозоля // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 113–119.
- Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Демин В.И., Дудорова Н.В., Еланский Н.Ф., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Коновальцева Л.В., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Оболкин В.А., Постыляков О.В., Потемкин В.Л., Савкин Д.Е., Сенник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Ходжер Т.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широков В.В., Шукуров К.А. Концентрация тропосферного озона над территорией России в 2021 г. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 7. С. 559–571.
- Анисимов О.А., Зимов А.С., Володин Е.М., Лавров С.А. Эмиссия метана в криолитозоне России и оценка ее воздействия на глобальный климат // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 131–143.
- Аржанов М.М., Малахова В.В., Мохов И.И., Парфенова М.Р. Устойчивость реликтовых метангидратов при климатических изменениях в голоцене // CITES '2019. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. 2019. Сборник тезисов. Томск, 2019. С. 128–131.
- Бабушкин П.А., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К. Спектральный анализ водного аэрозоля методом лазерно-индуцированного пробоя фемтосекундными импульсами // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 5. С. 356–360.
- Баженов О.Е. Озоновые аномалии зимой-весной 2019–2020 гг. в Арктике и над севером Евразии по данным спутниковых (AURA MLS/OMI) наблюдений // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 7. С. 524–529.
- Баженов О.Е., Ельников А.В., Сысоев Е.М. Общее содержание озона над Томском в период 1994–2017 гг.: результаты статистического анализа // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 7. С. 556–561.
- Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Складнева Т.К. Исследование взаимосвязи ультрафиолетовой радиации с метеорологическими факторами и замутнением атмосферы. Часть I. Роль общего содержания озона, облачности и аэрозольной оптической толщи // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 8. С. 649–655.
- Беликович М.В., Рыскин В.Г., Куликов М.Ю., Красильников А.А., Швецов А.А., Фейгин А.М. Микроволновые наблюдения атмосферного озона над Нижним Новгородом зимой 2017–2018 гг. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2020. Т. 63. № 3. С. 210–227.
- Береснев С.А., Васильева М.С. Гипотеза о вулканогенной саже и возможности ее наблюдательного подтверждения // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 6. С. 463–470.
- Бикташ Л.З. Влияние потока полной солнечной радиации на климат Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. 2019. Т. 59. № 3. С. 393–399.
- Варгин П.Н., Никифорова И.П., Звягинцев А.М. Изменчивость Антарктической озоновой аномалии в 2011–2018 гг. // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 20–34.
- Варгин П.Н., Калининкова И.А., Кострыкин С.В., Володин Е.М. Влияние аномалий температуры поверхности экваториальной и северной частей Тихого океана на стратосферу над Арктикой по расчетам климатической модели ИВМ РАН // Метеорология и гидрология. 2021. № 1. С. 5–16.
- Васильев Е.С., Волков Н.Д., Карпов Г.В., Морозов И.И., Особенности масс-спектрометрического анализа токсичных хлоруксусных кислот и пиридина // Химическая безопасность. 2019. Т. 3. № 9. С. 78–88.
- Васильев Е.С., Карпов Г.В., Волков Н.Д., Морозов И.И., Савилов С.В. Общность процессов гидратации хлоруксусных кислот // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 3. С. 17–22.
- Васильев Е.С., Волков Н.Д., Карпов Г.В., Морозов И.И., Нигматулин Д.Р., Сайгина Е.А., Савилов С.А., Уманский С.Я., Бутковская Н.Я. Определение константы скорости реакции бензола с атомарным фтором методом конкурирующих реакций // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 10. С. 30–35.
- Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук Дж.Ю., Ерёмкина И.Д., Блудушкина Л.Б. Вариации значений ^{18}O и водорастворимых солей в осадках Москвы в 2014–2018 гг. // Вестник Московского университета. Серия География. 2021. № 2. С. 35–43.
- Верес А.И., Екайкин А.А., Липенков В.Я., Туркев А.В., Ходжер Т.В. Первые данные о климатической изменчивости в районе ст. Восток (Центральная Антарктида) за последние 2000 лет по результатам

- изучения снежно-фирнового керна // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. С. 482–500.
- Власов Д.В., Еремина И.Д.* Влияние параметров дождей на интенсивность вымывания из атмосферы потенциально токсичных элементов в Москве // Со-временные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 25–27 ноября 2020 г. Иркутск: Издательство ИГУ, 2020. С. 380–388.
- Володин Е.М.* Механизм естественных колебаний климата в Арктике и Северной Атлантике по данным климатической модели ИВМ РАН // CITES '2019. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. 2019. Сборник тезисов. Томск, 2019. С. 39–41.
- Володин Е.М.* Равновесная чувствительность моделей климата к увеличению концентрации CO₂ в атмосфере при различных методах учета облачности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 2. С. 139–145.
- Володин Е.М.* Вероятные изменения климата в XXI веке на территории России по данным модели климата INM-CM5-0 // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 5–13.
- Володин Е.М., Грицун А.С.* Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 3. С. 255–266.
- Габис И.П.* Квазидвухлетние осцилляции зонального ветра в экваториальной стратосфере и их влияние на межгодовые изменения мощности озоновой дыры в Антарктике // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 5–15.
- Гинзбург А.С., Александров Г.А., Чернокульский А.В.* Климатические критерии необходимости превентивной адаптации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 58. № 6. С. 626–637.
- Гинзбург А.С., Докукин С.А.* Влияние теплового загрязнения атмосферы на климат города (оценки с помощью модели COSMO-CLM) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 53–66.
- Голицын Г.С., Васильев А.А.* Изменение климата и его влияние на частоту экстремальных гидрометеорологических явлений // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 9–12.
- Головко В.В., Зуева Г.А., Киселева Т.И.* Кластерный состав пыльцы анемофильных растений, поступающих в атмосферу // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35 № 6. С. 480–485.
- Головушкин Н.А., Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Нахаев М.И., Козлов В.С., Beekmann М.* Анализ содержания и эволюция коричневого углерода в дымах си-бирских лесных пожаров по данным AERONET // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 1. С. 68–74.
- Голубков Г.В., Бычков В.Л., Готовцев В.О., Адамсон С.О., Дьяков Ю.А., Родионов И.Д., Голубков М.Г.* Свечение тяжелых пылевых частиц при землетрясении // Химическая физика. 2020. Т. 39. № 4. С. 51–55.
- Горбаренко Е.В.* Радиационный климат Москвы // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 36–49.
- Горбаренко Е.В.* Экстремумы и основные тенденции в многолетней изменчивости радиационных параметров атмосферы в города Москвы // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2022. № 6. С. 90–103.
- Горчаков Г.И., Доценко О.И., Копейкин В.М., Карпов А.В., Гуцин Р.А., Горчакова И.А., Мирсаитов С.Ф., Пономарева Т.Я.* Пыльная мгла на северо-китайской равнине // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 12. С. 948–955.
- Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гуцин Р.А., Доценко О.И., Бунтов Д.В.* Вертикальное распределение алевритовых и песчаных частиц в ветро-песчаном потоке над опустыненной территорией // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 555–564.
- Груздев А.Н.* Учет автокорреляции в задаче линейной регрессии на примере анализа содержания NO₂ в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 73–82.
- Груздев А.Н., Елохов А.С.* Изменение общего содержания и распределения NO₂ по результатам 30-летних измерений на научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 99–111.
- Губанова Д.П., Чхетиани О.Г., Кудерина Т.М., Иорданский М.А., Максименков Л.О., Артамонова М.С.* Многолетняя изменчивость состава приземного аэрозоля в опустыненных и засушливых зонах юга России // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 6. С. 456–464.
- Дворецкая И.В., Крученицкий Г.М., Статников К.А.* Анализ распределения аномалий и долговременной изменчивости общего содержания озона по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. 2020. № 6. С. 19–24.
- Дембелов М. Г., Башкуев Ю. Б.* Оценка определения влагосодержания тропосферы по данным GPS-наблюдений, радиозондирования и измерений радиометром водяного пара // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 5. С. 25–31.
- Дементьева С.О., Ильин Н.В., Шаталина М.В., Мареев Е.А.* Прогноз конвективных явлений и его верификация по данным наблюдения атмосферного электричества // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 150–157.
- Денисов Е.Т., Денисова Т.Г.* Реакционная способность полярных соединений в реакциях с атомным кислородом // Кинетика и катализ. 2019. Т. 60. № 1. С. 3–10.
- Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И.* Вклад естественных и антропогенных эмиссий CO₂ и CH₄ с территории России в глобальные изменения климата в XXI веке // Доклады Российской академии наук. 2019. Т. 488. № 1. С. 74–80.
- Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И.* Модельные оценки вклада в глобальные изменения климата в XXI в. естественных и антропогенных эмиссий

- СО₂ и СН₄ в атмосферу с территории России, Китая, Канады и США // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 18–32.
- Еланский Н.Ф., Голицын Г.С., Крутцен П.Й., Беликов И.Б., Бреннинкмайер К.А.М., Скороход А.И. Наблюдение состава атмосферы над Россией: эксперименты ТРОЙКА // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 79–98.
- Еланский Н.Ф., Шилкин А.В., Пономарев Н.А., Захарова П.В., Качко М.Д., Поляков Т.И. Пространственно-временные вариации содержания загрязняющих примесей в воздушном бассейне Москвы и их эмиссии // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 1. С. 92–108.
- Ерёмина И.Д. Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденции его многолетних изменений // Вестн. Московского университета. Серия 5. География. 2019. № 3. С. 3–10.
- Ермаков А.Н., Алоян А.Е., Арутюнян В.О. Источники сульфатов в карбонатных частицах аэрозоля в городской атмосфере на примере Иркутска // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 52–61.
- Ермаков А.Н., Алоян А.Е., Арутюнян В.О. О сезонной изменчивости, фазового состояния и массовой концентрации аэрозоля в фоновой и городской атмосфере Бельгии (2001–2003 гг.) // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 66–76.
- Завгородняя Ю.А., Поповичева О.Б., Кобелев О.В., Стародымова Д.П., Шевченко В.П., Касимов Н.С. Полициклические ароматические углеводороды в снежном покрове Ямало-Ненецкого автономного округа как индикаторы влияния источников техногенных эмиссий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. С. 261–279.
- Захаров В.В., Зюзин В.В., Корсунский Б.Л., Ларикова Т.С. Термическое разложение 1-[2,2-бис(метоксинитроазокси)этил]-пиразола // Химическая физика. 2022. Т. 41 № 12. С. 7–12.
- Зеленов В.В., Апарина Е.В. Вопрос о механизме захвата О₃ на покрытие из метановой сажи // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 5. С. 55–67.
- Зеленов В.В., Апарина Е.В., Козловский В.И., Сулименков И.В., Карданский Д.А., Носырев А.Е. Твердые продукты захвата NO₃ на покрытие из метановой сажи // Химическая физика. 2019. Т. 38. № 1. С. 86–92.
- Зинченко А.В., Привалов В.И., Ивахов В.М., Парамонова Н.Н. Модельно-эмпирический расчет потоков метана и диоксида углерода из почв торфяных болот // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 59–77.
- Зуев В.В., Зуева Н.Е., Куценогий П.К., Савельева Е.С. Вулканогенный нанодисперсный углеродный аэрозоль в стратосфере // Химия в интересах устойчивого развития. 2014. Т. 22. С. 83–88.
- Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С., Шелехов А.П., Шелехова Е.А. О роли вулканогенного разогрева тропической стратосферы в формировании очагов тепла в арктических регионах // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 1. С. 69–74.
- Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С. Температурные и озоновые аномалии как индикаторы вулканогенной сажи в стратосфере // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 8. С. 698–704.
- Иванова А.Р. Мировой опыт наукастинга грозовой деятельности // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 71–83.
- Ионов Д.В., Поберовский А.В. Изменчивость содержания оксидов азота в приземном слое атмосферы по данным наблюдений в Петергофе // Метеорология и гидрология. 2020. № 10. С. 73–81.
- Калашник М.В. Волновые предвестники от движущихся осциллирующих источников // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 6. С. 617–625.
- Карпов А.В., Горчаков Г.И., Гуцин Р.А., Доценко О.И. Вертикальные турбулентные потоки пылевого аэрозоля // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 565–574.
- Кашкин В.Б., Одинцов Р.В., Рублева Т.В. Влияние ядерного взрыва на озон // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 3. С. 212–216.
- Клюева М.В., Школьник Ю.Л., Рудакова Ю.Л., Павлова Т.В., Катцов В.М. Летний туризм в контексте будущих изменений климата России: оценки по большому ансамблю условных прогнозов высокого разрешения // Метеорология и гидрология. 2020. № 6. С. 47–59.
- Ковалев Н.А., Нетягин О.В., Сажин И.В. Опыт искусственного вызывания осадков в целях тушения лесных пожаров в Сибири и на Дальнем Востоке в 2017–2021 гг.: предварительные результаты и вопросы оценки эффективности // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 71–77.
- Козлов С.Н., Жестков В.Е. Влияние состава газовой смеси на определение вероятности гетерогенной реакции Н, О и N на кварце // Химическая физика. 2022. Т. 41. № 11. С. 15–23.
- Коленникова М.А., Варгин П.Н., Гущина Д.Ю. Влияние Эль-Ниньо на стратосферу Арктики по данным моделей CMP5 и реанализа // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 5–23.
- Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.А., Черепанова Л.А., Банин М.В., Репнев А.И., Куколева А.А. Численные глобальные модели ионосферы, озоносферы, температурного режима и циркуляции для высот 0–130 км. Результаты и перспективы // Метеорология и гидрология. 2021. № 1. С. 5–16.
- Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Лукин А.Н., Игнатьев А.Н., Соломонов С.В. Особенности изменения содержания озона в верхней стратосфере над Москвой в холодные полугодия 2014–2015 и 2015–2016 гг. // Геомагнетизм и аэрномия. 2019. Т. 59. № 2. С. 227–235.
- Крупнов А.А., Погосбекян М.Ю. Анализ экспериментальных данных взаимодействия СОС с образованием СО₂ // Кинетика и катализ. 2019. Т. 60. № 2. С. 1811–1922.
- Куликова И.А., Круглов Е.Н., Хан В.Н. Оценка практической предсказуемости блокирующих антициклонов с использованием современных гидродина-

- мических моделей // Метеорология и гидрология. 2022. № 1. С. 5–23.
- Куминов А.А., Юшков В.А., Гвоздев Ю.Н., Штырков О.В., Лыков А.Д., Балугин Н.В. Метеорологическое ракетное зондирование для атмосферных исследований и мониторинга геофизической обстановки // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 21–31.
- Курятникова Н.А., Малыгина Н.С., Митрофанова Е.Ю., Атмосферное поступление и разнообразие биоаэрозолей в зимних осадках на юге Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 1. С. 19–24.
- Ларин И.К. Время жизни нечетного кислорода // Химическая физика. 2019. Т. 38. № 10. С. 65–71.
- Ларин И.К. Российские исследования в области атмосферной химии в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 66–78.
- Ларин И.К. О теории цепных процессов озоносферы // Химическая физика. 2019. Т. 38. № 5. С. 81–87.
- Ларин И.К. Влияние глобального потепления на скорость разрушения стратосферного озона в каталитических циклах // Химическая физика. 2020. Т. 39. № 4. С. 44–50.
- Ларин И.К. О разрушении атмосферного озона в O_x , NO_x , NO_2 , ClO_x , BrO_x и IO_x каталитических циклах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 195–202.
- Ларин И.К. О разрушении стратосферного озона в каталитических циклах в Северном полушарии в конце XX века // Химическая физика. 2020. Т. 39. № 3. С. 85–92.
- Ларин И.К. О разрушении озона в мезосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 2. С. 172–181.
- Ларин И.К., Спасский А.И., Трофимова Е.М. Измерение константы скорости реакции атомов хлора с CH_3Br в диапазоне температур 298–358 К методом резонансной флуоресценции атомов хлора // Химическая физика. 2019. Т. 38. № 4. С. 16–22.
- Ларин И.К., Белякова Т.И., Мессинева Н.А., Спасский А.И., Трофимова Е.М. Процессы УФ-фотолиза смеси $C_2H_2F_2BR_2$ с кислородом // Химическая физика. 2020. Т. 39. № 12. С. 3–9.
- Ларин И.К., Спасский А.И., Трофимова Е.М. Кинетика гетерогенной реакции сероводорода с оксидом йода в диапазоне температур 273–368 К // Химическая физика. 2020. Т. 39. № 10. С. 29–34.
- Ларин И.К., Алоян А.Е., Ермаков А.Н. Влияние сульфатного аэрозоля в нижней стратосферы на время жизни нечетного кислорода // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 3. С. 80–85.
- Ларин И.К., Алоян А.Е., Ермаков А.Н. Влияние частиц слоя Юнге на скорость разрушения озона в нижней стратосфере // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 5. С. 86–90.
- Ларин И.К., Белякова Т.И., Мессинева Н.А., Спасский А.И., Трофимова Е.М. Гетерогенная реакция диметилсульфида с оксидом йода в области температур 291–365 К // Кинетика и катализ. 2021. Т. 62. № 2. С. 187–197.
- Ларин И.К., Белякова Т.И., Мессинева Н.А., Спасский А.И., Трофимова Е.М. Фотолиз смеси $C_2H_2F_2BR_2$ с O_2 в диапазоне давлений кислорода 1–3.5 торр // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 10. С. 36–41.
- Лысенко С.А., Ф. Логинов В.Ф., Зайко П.О. Влияние изменений климата на биопродуктивность наземных экосистем в белорусско-украинском Полесье // Метеорология и гидрология. 2022. № 1. С. 59–71.
- Малкарова А.М. Развитие работ по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы в Гидрометслужбе России // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 5–10.
- Мирошниченко Е.А., Конькова Ю.Н., Матюшин Ю.Н., Воробьев А.Б., Иноземцев Я.О., Иноземцев А.В. Энергии перестройки циклических радикалов // Химическая физика. 2022. Т. 41. № 12. С. 3–6.
- Морозов И.И., Васильев Е.С., Волков Н.Д., Морозова О.С., Нигматулин Д.Р., Сыромятников А.Г., Савилов С.В. Реакции бензил- и гидроксизтил-радикалов с оксидом азота // Химическая физика. 2022. Т. 41. № 10. С. 16–22.
- Мохов И.И. Всероссийская конференция “Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования”, 26–28 ноября 2019 года. Москва. Сборник тезисов докладов. М.: Физматкнига, 2019. 180 с.
- Мохов И.И. Особенности современных изменений климата в Арктике и их последствий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. С. 446–462.
- Мохов И.И. Изменение частот фазовых переходов типов явлений Эль-Ниньо в последние десятилетия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 1. С. 3–9.
- Мохов И.И., Парфенова М.Р. Взаимосвязь площади снежного покрова в Северном полушарии по спутниковым данным с приповерхностной температурой // Метеорология и гидрология. 2022. № 2. С. 32–44.
- Мохов И.И., Смирнов Д.А. Эмпирические оценки вклада парниковых газов и естественной климатической изменчивости в тренды приповерхностной температуры для различных широт // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022а. Т. 503. № 1. С. 53–59.
- Мохов И.И., Смирнов Д.А. Оценки вклада мод естественной изменчивости и парниковых газов в тренды приповерхностной температуры в Южном полушарии на основе данных наблюдений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022б. Т. 58. № 2. С. 149–159.
- Мохов И.И., Тимажев А.В. Атмосферные блокирования и изменения повторяемости в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2019а. № 6. С. 5–16.
- Мохов И.И., Тимажев А.В. Интегральный индекс активности атмосферных блокирований в Северном полушарии в последнее десятилетие // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019б. Т. 58. № 6. С. 638–647.
- Мохов И.И., Елисеев А.В., Гурьянов В.В. Модельные оценки глобальных и региональных изменений

- климата в голоцене // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 490. № 1. С. 27–32.
- Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Денисов С.Н., Мохов И.И., Аржанов М.М., Тимажев А.В. Фазовый сдвиг между изменениями глобальной температуры и содержанием CO_2 в атмосфере при внешних эмиссиях парниковых газов в атмосферу // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 11–19.
- Ненайденко В.Г. На пути к молекулярной сложности. Многокомпонентные реакции, включающие пять и более компонентов // Успехи химии. 2020. Т. 89. Вып. 11. С. 1274–1336.
- Неробелов Г.М., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Филиппов Н.Н., Имхасин Х.Х., Наземные спектроскопические измерения общего содержания аммиака в районе Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 6. С. 658–668.
- Никифорова М.П., Варгин П.Н., Звягинцев А.М. Аномалии содержания озона над территорией России в зимне-весенний период 2015/16 г. // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 36–49.
- Нусинов А.А., Казачевская Т.В., Катюшина В.В. Модель потоков далекого ультрафиолетового излучения Солнца // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 3. С. 284–290.
- Панов Д.Ю., Сахарова Е.Ю. Применение данных радиолокационной съемки при составлении прогнозов урожайности зерновых культур в Новосибирской области // Метеорология и гидрология. 2022. № 6. С. 88–97.
- Панченко М.В., Кабанов М.В., Пхалагов Ю.А., Белан Б.Д., Козлов В.С., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ужесгов В.Н., Щелканов Н.Н., Польшин В.В., Терпугова С.А., Толмачев Г.Н., Яушева Е.П., Аршинов М.Ю., Симоненков Д.В., Шмаргунов В.П., Чернов Д.Г., Турчинович Ю.С., Польшин В.В., Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М. Комплексное исследование тропосферного аэрозоля в ИОА СО РАН (этапы развития) // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 9. С. 703–716.
- Пастухова А.С., Чубарова Н.Е., Жданова Е.Ю., Галин В.Я., Смышляев С.П. Численное моделирование изменения содержания озона, эритемной ультрафиолетовой радиации и УФ ресурсов над территорией Северной Евразии в XXI веке // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 20–28.
- Порфирьев Б.Н., Колпаков А.Ю., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. Оценка и прогноз издержек газодобывающего сектора Ямало-Ненецкого автономного округа, связанных с последствиями деградации многолетнемерзлых грунтов // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 96–106.
- Ракитин В.С., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Джолоа А.В., Ракитина А.В., Шилкина А.В., Кириллова Н.С., Казаков А.В. Долговременные тенденции общего содержания окиси углерода Московского мегаполиса // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 126–136.
- Рогачев А.С. Механическая активация гетерогенных экзотермических реакций в порошковых смесях // Успехи химии. 2019. Т. 88. № 9. С. 875–900.
- Рыжаскова Н.К., Рогова Н.С., Покровская Е.А., Тайлашева К.А. Влияние природно-климатических условий на значение вертикального коэффициента турбулентной диффузии для длительных периодов наблюдения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 58. № 6. С. 648–657.
- Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Козлов В.С., Круглинский И.А., Макаров В.И., Макштас А.П., Попова С.А., Радионов В.Ф., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И., Чанкина О.В., Чернов Д.Г. Результаты измерения физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля на научно-исследовательском стационаре “Ледовая база “Мыс Баранов” в 2018 г. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 6. С. 421–429.
- Семенов С.М. Парниковый эффект и современный климат // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 5–17.
- Сибир Е.Е., Радионов В.Ф., Русина Е.Н. Результаты многолетних наблюдений за общим содержанием озона в Антарктиде и над акваториями Атлантического и Южного океанов // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 33–43.
- Сирин А.А., Медведева М.А., Иткин В.Ю., Макаров Д.А., Коротков В.Н. Выявление торфяных пожаров для оценки эмиссии парниковых газов // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 33–45.
- Скороход А.И., Ракитин В.С., Кириллова В.С. Влияние мер по сдерживанию пандемии COVID-19 и метеорологических условий на состав атмосферного воздуха в Москве в 2020 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 36–46.
- Смышляев С.П., Блакитная П.А., Моцаков М.А. Численное моделирование влияния физических и химических факторов на межгодовую изменчивость содержания озона в Антарктике // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 21–32.
- Торжсков И.О., Кушнер Е.А., Константинов А.В., Королева Т.С., Ефимов С.В., Школьник И.М. Оценка ожидаемых изменений климата на лесное хозяйство // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 40–49.
- Трошичев О.А., Габис И.П., Криволицкий А.А. Влияние космической погоды на земную атмосферу // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 2. С. 177–207.
- Федотов В.Х., Кольцов Н.И. Кинетические автономные инварианты линейных химических реакций // Кинетика и катализ. 2019. Т. 60. № 6. С. 756–762.
- Федченко Л.М., Шаповалов В.А., Шериева Л.М., Лесев В.Н. Численное моделирование влияния структуры поля ветра в атмосфере на макро- и микроструктурные характеристики конвективных облаков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 58. № 6. С. 669–680.
- Филей А.А., Андреев А.И., Кучма М.О., Успенский А.Б. Применение искусственных нейронных сетей для определения общего содержания водяного пара в атмосфере по данным микроволнового радиомет-

- ра МТВЗА-ГЯ со спутника “Метеор-М” № 2-2 // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 34–45.
- Филиппов С.П., Ярославцев А.В. Водородная энергетика: перспективы развития и материалы // Успехи химии. 2021. Т. 90. Вып. 6. С. 627–643.
- Цветкова Н.Д., Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Кирюшов Б.М., Юшков В.А., Хаттатов В.У. Исследование химического разрушения озона и динамических процессов в стратосфере Арктики зимой 2019/20 г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 70–83.
- Чеснокова Т.Ю., Макарова М.В., Ченцов А.В., Воронина Ю.В., Захаров В.И., Рокотян Н.В., Langerock B. Определение содержания монооксида углерода в атмосфере из атмосферных спектров высокого разрешения // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 4. С. 257–265.
- Чистякова Н.Ф., Журавлева Н.Н., Андреев О.В., Мартюшова А.И. Природный механизм трансформации формальдегида в атмосферном воздухе города Тюмень // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 76–85.
- Чэнсюнь Ю., Чжицзянь Л., Бычков В.Л., Бычков Д.В., Голубков М.Г., Маслов Т.А., Родионов И.Д., Степанов И.Г., Уманский С.Я., Голубков Г.В. Распределение концентраций положительных и отрицательных ионов в тропосфере // Химическая физика. 2022. Т. 41. № 10. С. 28–37.
- Шаталина М.В., Мареев Е.А., Клименко В.В., Кутерин Ф.А., Николл К.А. Экспериментальное исследование суточных и сезонных вариаций атмосферного электрического поля // Известия вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 3. С. 205–210.
- Шаталина М.В., Ильин Н.В., Мареев Е.А. Характеристики опасных метеорологических явлений в Нижнем Новгороде по данным натурных наблюдений электрического поля // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 107–111.
- Шаталина М.В., Клименко В.В., Мареев Н.А. О корреляции температуры слоистой облачности и напряженности и электрического поля // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 499. № 1. С. 77–81.
- Шилин А.Г., Шилина А.С., Андреев Ю.В., Иванов В.Н., Панов В.Н., Пузов Ю.А., Савченко А.В. Исследование режимов адсорбции молекулярного йода и возможности модификации льдообразующих характеристик аэрозолей силикатной и алюмосиликатной природы соединениями йода // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 86–93.
- Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Ярынич Ю.И. Оценка конвективной неустойчивости атмосферы в случаях со шквалами, смерчами и крупным градом по данным спутниковых наблюдений и реанализа ERA5 // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 6. С. 429–435.

Russian Research in the Field of Atmospheric Chemistry in 2019–2022

I. K. Larin*

Talrose Institute for Energy Problems of Chemical Physics at Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Sciences, 38 Leninsky Ave., bld. 2, Moscow, 119334 Russia

**e-mail: iklarin@narod.ru*

A brief overview of the work of Russian scientists in the field of atmospheric chemistry in 2019–2022 is presented, including work on the chemistry of the troposphere, the chemistry of the ozone layer, work on the study of heterophase processes, as well as work on the chemical aspects of climate and its change. The review was prepared in the Commission on Atmospheric Chemistry of the Section of Meteorology and Atmospheric Sciences of the National Geophysical Committee.

Keywords: chemical processes, heterophase processes, troposphere, stratosphere, climate