

УДК 551.594

## РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В 2019–2022 гг.

© 2023 г. Е. А. Мареев<sup>а</sup>, \*, В. Н. Стасенко<sup>б</sup>, М. В. Шаталина<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

<sup>б</sup>Институт прикладной геофизики, ул. Ростокинская, 9, Москва, 129128 Россия

\*e-mail: aries@ipfran.ru

Поступила в редакцию 02.09.2023 г.

После доработки 08.11.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

Обзор содержит систематизированное описание наиболее значимых результатов работ российских ученых в области исследований атмосферного электричества в 2019–2022 гг. Он является частью Национального отчета России по метеорологии и атмосферным наукам, подготовленного для Международной ассоциации по метеорологии и атмосферным наукам (IAMAS). Отчет был рассмотрен и одобрен на XXVIII Генеральной ассамблее Международного геодезического и геофизического союза (IUGG)<sup>1</sup>. К обзору прилагается список основных публикаций российских ученых за 2019–2022 гг., посвященных исследованиям атмосферного электричества.

**Ключевые слова:** атмосферное электричество, физика молнии, разряды в атмосфере, глобальная электрическая цепь, грозопеленгация, прогноз

**DOI:** 10.31857/S0002351523070088, **EDN:** EBWMAO

### ВВЕДЕНИЕ

В данной статье представлен обзор результатов российских исследований в области атмосферного электричества в 2019–2022 гг. Атмосферное электричество было и остается одним из фундаментальных разделов физики атмосферы, привлекающих пристальное внимание в течение многих лет. В последние годы продолжали активно развиваться исследования электричества хорошей погоды, процессов электризации облаков и формирования их электрической структуры, взаимосвязи грозовой активности с другими опасными метеорологическими явлениями. Экспериментальные исследования по изучению атмосферного электричества, проводимые в российских научных центрах, ежегодно получают большой объем данных об электрическом состоянии атмосферы, вносят существенный вклад в улучшение теоретических и численных моделей различных атмосферных электрических процессов, а также моделей глобальной электрической цепи. Особое внимание привлекают экспериментальные и теоретические исследования физики

молний, как, в том числе с точки зрения важных практических приложений. Получают развитие исследования высокоэнергичных процессов, такие как вспышки рентгеновского и гамма-излучения во время грозовых событий. Большое внимание уделяется наблюдениям за грозовыми явлениями с помощью региональных и глобальных систем грозопеленгации, всестороннему анализу данных глобальных систем. Более подробно основные результаты по каждому из направлений приведены в соответствующих разделах настоящей статьи.

### 1. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО ХОРОШЕЙ ПОГОДЫ

В 2019–2022 годах продолжались исследования электрического поля хорошей погоды в различных регионах России, в частности, большое внимание уделялось суточным и сезонным вариациям электрического поля. Экспериментально исследованы различные эффекты, влияющие на поведение атмосферного электрического поля хорошей погоды в городских и сельских условиях. Известно, что многолетние наземные наблюдения за вариациями параметров атмосферного электричества являются важной экспериментальной основой современных исследований глобальной электрической цепи (ГЭЦ). Изменения электрического поля в приземном слое атмосферы в течение суток обусловлены как глобальны-

<sup>1</sup> Russian National Report: Meteorology and Atmospheric Sciences: 2019–2022: for the XXXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Berlin, Germany, July 11–20, 2023) / Ed.: I.I. Mokhov, A.A. Krivolutsky. Moscow: MAKS Press, 2023. 440 p. ISBN 978-5-317-07017-5. <https://doi.org/10.29003/m3460.978-5-317-07017-5>

ми, так и локальными факторами. В работе [Аджиев и др., 2019] представлены результаты анализа связи суточного хода характеристик солнечного ветра (скорости солнечного ветра, концентрации ионов) и напряженности электрического поля в приземной атмосфере. Для измерения суточных вариаций напряженности электрического поля атмосферы в данной работе использовался аппаратно-программный комплекс для измерения и передачи на центральный сервер значений напряженности электрического поля атмосферы на пике Чегет. Мониторинг в высокогорных регионах характерен почти полным отсутствием антропогенной составляющей в формировании электрического поля атмосферы. В [Аджиев и др., 2020, 2021] представлены данные многолетних наблюдений элементов атмосферного электричества в Приэльбрусье. Установлена глобальная репрезентативность данных измерений электрического поля. Пункты наблюдения в высокогорной зоне рекомендованы для мониторинга электрического поля атмосферы на глобальном и региональном уровнях. Показано [Аджиев и др., 2021], что локальные вариации электрического поля вызваны пространственным зарядом вблизи земной поверхности вследствие электродного эффекта и влиянием турбулентного перемешивания. Получены и исследованы аналитические решения уравнения для полного электрического тока в области формирования электродного эффекта.

С целью разделения глобальных и локальных эффектов атмосферного электричества был выполнен анализ данных измерений атмосферного электрического поля хорошей погоды в Нижнем Новгороде [Шаталина и др., 2019] и Томске [Нагорский и др., 2022]. Показано, что суточные вариации градиента потенциала электрического поля характеризуются колебаниями континентального типа с двойным максимумом и минимумом. Изучены суточные вариации атмосферного электрического поля хорошей погоды для разных сезонов года и дней недели (рабочих и выходных) в городских условиях. Наибольшие значения амплитуды поля достигаются в зимний период. Максимум напряженности поля в первой половине суток характерен для городской среды и показывает, что локальные эффекты, связанные с наличием в воздухе аэрозольных частиц, заметно влияют на формирование суточной вариации, особенно летом [Шаталина и др., 2019]. Получены оценки связи суточной и сезонной изменчивости градиента потенциала в Томске с изменчивостью некоторых геофизических величин. Показано, что доля вклада различных предикторов в изменчивость градиента потенциала, а также направление их корреляции меняется в течение суток [Нагорский и др., 2022; Pustovalov et al., 2022].

Большое внимание уделено влиянию атмосферных аэрозолей на электрическое поле атмо-

сферы, измеряемое на земной поверхности. В [Зекореев, 2022] исследовано влияние выбросов при открытых горных работах. Показано, что интенсивное пылеобразование и связанная с ним электризация аэрозольных частиц различного размера приводят к накоплению избыточного объемного заряда в приземном слое атмосферы, что способствует формированию повышенных значений электрического поля вблизи земной поверхности. Среднее значение напряженности электрического поля составило 600–700 В/м, что существенно превышает результаты измерений, проведенных на таких высотах другими исследователями в невозмущенных погодных условиях.

В последние годы активизировались теоретические исследования электрического поля атмосферы в приземном слое. Построена математическая модель механизма генерации суточных вариаций электрического поля в турбулентном приземном слое. Изучена зависимость фазового сдвига колебаний поверхностного электрического поля относительно вариаций полного тока в атмосфере от степени турбулентного перемешивания [Зайнетдинов и др., 2020]. С учетом электродного эффекта развита электродинамическая модель нестационарного турбулентно-конвективного приземного слоя. Показано, что в безаэрозольной атмосфере время установления стационарного состояния в “приэлектродном” слое составляет около 5 мин для классического слоя (характерная высота около 4–5 м), и примерно 15 мин (высота порядка около 10 м) для турбулентного слоя. В случае сильного турбулентного перемешивания масштаб распределения электрических величин увеличивается до сотен метров [Svidelsky et al., 2020].

В работах [Anisimov et al., 2021; Анисимов и др., 2022, 2022a] рассмотрены в квазистационарном приближении с учетом турбулентности электрические процессы в пограничном слое атмосферы. Результаты теоретического моделирования сравниваются с различными натурными данными по измерению электрического поля и тока. В [Anisimov et al., 2021] трехмерная модель используется для изучения пространственно-временных статистических особенностей вариаций атмосферного электрического поля и пространственного заряда. Модель представляет собой комбинацию крупновихревого моделирования, дополненную подсеточной кинематической моделью для скаляра и трехмерным уравнением Пуассона для электрического потенциала. Показано, что взаимная корреляция электрического поля в пространственно разнесенных точках, расположенных на одной прямой вблизи земной поверхности, уменьшается с увеличением расстояния с характерным масштабом в несколько десятков метров и имеет зависимость от угла между этой линией и направлением ветра. Среднее крупномасштабное горизонтальное электриче-

ское поле, определяемое через положение и амплитуду экстремумов потенциала на одной и той же высоте, зависит от высоты немонотонно, имея максимальное значение около 5 В/м. Обнаружено, что масштабные показатели структурных функций для вариаций электрического поля существенно больше, чем для вариаций пространственного заряда.

Турбулентные электрические процессы в пограничном слое атмосферы и их измерение горизонтальной пассивной кольцевой антенной, выполняющей роль коллектора атмосферного электрического тока, исследованы в электростатическом и квазистационарном приближениях [Анисимов и др., 2022, 2022a]. На основе вихреразрешающего моделирования рассчитаны вариации электрических переменных, оценены пространственные корреляционные функции и спектральная плотность флуктуаций компонент плотности атмосферного тока, а также реакция тока в коллекторе на локальные турбулентные возмущения атмосферного тока, плотность тока проводимости и мгновенное изменение глобальной разности потенциалов между ионосферой и земной поверхностью. По результатам моделирования получена оценка отношения плотности полного вертикального атмосферного электрического тока и плотности тока проводимости на высоте установки антенны, которую можно использовать для экстраполяции результатов наземных измерений внутри и за пределами пограничного слоя [Анисимов и др., 2022]. Аналитически и численно исследованы характеристики горизонтальной кольцевой пассивной антенны, используемой в качестве коллектора для долговременных обсерваторских наблюдений плотности атмосферного электрического тока. В электростатическом приближении определены пространственные распределения потенциала и электрического поля в зависимости от геометрических характеристик антенны, находящейся в однородном электрическом поле атмосферы, и рассчитаны параметры движения атмосферных ионов в ее окрестности. Установлена зависимость времени осаждения атмосферных ионов с заданной подвижностью на коллектор в зависимости от прицельного параметра и начальной высоты, определяемой этим параметром. Результаты прямых наблюдений плотности атмосферного электрического тока коллектором сравниваются с результатами синхронных наблюдений напряженности атмосферного электрического поля и электропроводности в приземном слое [Анисимов и др., 2022a].

В [Шулейкин и Шукин, 2022] предложен метод бесконтактного мониторинга геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов с земной поверхности путем анализа результатов измерения электрического поля в приземном слое. Такие геологические неоднородности характеризуются чрезмерным выбросом почвен-

ного радона в атмосферу, что является основной причиной ионизации воздуха в приземном слое. Это приводит к обратному электродному эффекту, что выявляется при анализе данных электрического поля. Аномалии градиента потенциала электрического поля наблюдались в приземном воздухе перед землетрясениями в различных регионах мира. Причиной таких аномалий, вероятно, является ионизация воздуха радоном. Влияние приземного электрического поля как предвестника землетрясений оценивалось по данным непрерывных наблюдений электрического поля на Камчатке в 1997–2002 гг. [Smirnov, 2019].

## 2. ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ

Концепция глобальной электрической цепи (ГЭЦ) объединяет все электрические процессы, происходящие в атмосфере. В последние годы интерес к изучению ГЭЦ возрастает, при этом большое внимание уделяется численному моделированию динамики ГЭЦ и ее связи с другими глобальными процессами, прежде всего с различными климатическими модами и космической погодой и климатом.

В работах [Slyunyaev et al., 2019; Кутерин и Слюняев, 2020] исследованы некоторые аспекты численных моделей ГЭЦ и ее составляющих элементов. В [Кутерин и Слюняев, 2020] обсуждается последовательное включение источников ГЭЦ ионосферной и магнитосферной природы в ее распределенные численные модели. Показано, что наиболее естественным подходом к такому включению является введение в граничные условия на внешней границе модельной атмосферы соответствующего возмущения потенциала, заданного с точностью до неизвестной константы. Работа [Harrison R. Giles et al., 2020] посвящена влиянию протяженных слоистых облаков на вертикальное распределение заряда в ГЭЦ. Расчеты и измерения показывают, что заряд на верхней границе такого облака обычно положителен, суммарный заряд внутренней части облака также положителен, а заряд на нижней границе облака отрицателен, при этом плотность заряда верхней границы больше, но имеет ту же величину ( $\sim \text{нКл м}^{-2}$ ), что и плотность заряда нижней границы облака. В глобальном масштабе общий положительный заряд, находящийся в слоистых облаках, составляет примерно  $10^5$  Кл, что в сочетании с положительным зарядом столба атмосферы над облаком (вплоть до высот ионосферы) уравнивает общий отрицательный заряд на поверхности Земли в регионах с хорошей погодой. В работе [Slyunyaev et al., 2019] анализируется и обсуждается описание генераторов ГЭЦ различных типов в непрерывных численных моделях. Поскольку формальное включение облаков, работающих в режиме источника напряжения, в современные

трехмерные модели ГЭЦ оказывается труднореализуемым, предложены два альтернативных подхода, предполагающие замену генераторов — источников напряжения эквивалентными генераторами — источниками тока.

В работе [Морозов, 2022] сделан обзор работ по влиянию электрогенераторов, действующих на высотах ионосферы и магнитосферы, на электрические поля в приземном слое. На основе решения теоретических задач даны оценки этих полей как для стационарного, так и для нестационарного случая, сигнал, передаваемый вниз к земной поверхности, зависит от частоты. Наиболее эффективно ионосферные электрические поля проникают в поверхность при низких частотах (квазистационарный случай). При этом высокочастотные поля проникают в поверхностный слой с эффективностью 1% от величины квазистационарных полей. Исследования [Ильин и др., 2019; Ilin et al., 2020; Slyunyaev et al., 2019a, 2021, 2021a] посвящены изучению вариаций ГЭЦ и их связи с климатом и геофизическими параметрами. Суточная вариация ГЭЦ моделируется с использованием модели Weather Research and Forecasting model (WRF) путем оценки вклада столбцов сетки в ионосферный потенциал (ИП) [Ильин и др., 2019]. Модельный суточный ход ИП демонстрирует устойчивые сезонные тенденции. Выбранная параметризация ИП и подход к моделированию позволяют получить хорошее согласие с экспериментально наблюдаемыми значениями.

Вклады различных регионов суши и океана в суточный ход глобальной электрической цепи исследованы в работах [Ilin et al., 2020] и [Slyunyaev et al., 2019a]. Модель предсказывает, что вклады от регионов суши имеют максимумы примерно в 14:00–18:00 по местному времени, тогда как вклады от океанов имеют максимумы примерно в 02:00–06:00 по местному времени, а различные регионы океана показывают почти одинаковый относительный суточный ход. Примечательно, что вклады районов океана с большим количеством островов имеют максимумы как в 14:00–18:00, так и в 02:00–06:00 местного времени.

В работах [Slyunyaev et al., 2021, 2021a] исследовано влияние на ГЭЦ моды Эль-Ниньо–Южное колебание (ЭНЮК), которую можно количественно охарактеризовать температурами поверхности океана (ТПО) в регионе Ниньо 3.4. В работе [Slyunyaev et al., 2021] выявлено и детально изучено влияние ЭНЮК на региональные вклады в ГЭЦ. Моделирование показывает, что вклады в ГЭЦ со стороны суши и океана откликаются на цикл ЭНЮК противоположным образом: вклад океана положительно коррелирует с ТПО Ниньо 3.4, в основном из-за увеличения конвекции над Тихим океаном, а вклад суши демонстрирует отрицательную корреляцию с ЭНЮК из-за уменьшения конвекции над Юго-Восточной

Азией и Южной Америкой. Наблюдаемые корреляции статистически значимы и хорошо заметны в десятилетнем временном масштабе; в то же время вклады в ИП за отдельные годы не всегда четко отражают соответствующие аномалии ТПО Ниньо 3.4. В работе [Slyunyaev et al., 2021a] проанализировано влияние ЭНЮК на суточную вариацию ГЭЦ. Анализ результатов моделирования показывает, что аномалии ТПО Ниньо 3.4, характеризующие фазу ЭНЮК, и аномалии относительного ИП положительно коррелируют в 09:00–15:00 UTC и отрицательно коррелируют в 18:00–23:00 UTC. Измерения электрического поля на станции “Восток” в Антарктиде показывают, что ЭНЮК действительно оказывает статистически значимое влияние на ГЭЦ, как и предсказывает моделирование. Анализ десяти зимних сезонов (октябрь–февраль 2006–2016 гг.) показывает, что форма кривой суточной вариации электрического поля на поверхности Земли существенно различается в годы Эль-Ниньо и Ла-Нинья, причем особенно выраженное отклонение наблюдается во время супер Эль-Ниньо 2015/2016 гг. Моделирование позволяет объяснить это и показывает, что наблюдаемые закономерности являются результатом изменений в глобальном распределении электрически активных облаков над Тихим океаном, Юго-Восточной Азией и Южной Америкой во время событий ЭНЮК.

В работе [Елисеев и др., 2019] авторы разработали модификацию схемы Прайса–Ринда для вычисления частоты молний, которая может быть использована при расчетах с большим шагом по времени и пространству. Продемонстрировано, что результаты расчетов характеристик молниевой активности с модифицированной схемой, проводимых с использованием климатической модели ИФА РАН, существенно лучше согласуются со спутниковыми данными по молниевой активности. Глобальное моделирование также показало, что чувствительность частоты молний к изменению приповерхностной температуры атмосферы составляет 10%/K.

Также в последние годы проводятся экспериментальные работы по изучению отдельных элементов ГЭЦ. В работе [Slyunyaev et al., 2021a] с помощью привязного аэростата, оснащенного инструментальной платформой, было исследовано высотное распределение основных величин в нижней атмосферной области ГЭЦ, объемной активности радона и концентрации аэрозольных частиц. Высотное зондирование охватывало примерно 0.5 км нижних слоев атмосферы и сопровождалось одновременными наземными измерениями. Этот метод разнесенных наблюдений позволил глубже, чем это было возможно ранее, проанализировать пространственные и временные изменения электрических величин в пограничном слое атмосферы (АПС). Оценки показы-

вают значительный вклад АПС в ГЭЦ, что необходимо учитывать при ее рассмотрении. Развитие сети мониторинга атмосферного электричества стимулирует исследования связи ГЭЦ с условиями окружающей среды [Anisimov et al., 2022].

### 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛАКАХ

Теоретические и экспериментальные исследования электрических процессов в облаках традиционно являются очень важной частью изучения атмосферного электричества. К этому разделу можно отнести широкий круг задач, включая теоретические и экспериментальные исследования возникновения и эволюции конвективных систем, моделирование и прогноз развития грозовых облаков, поиск корреляций между регистрируемыми метеорологическими данными и наблюдаемой грозовой активностью, а также влияние микрофизики облаков на наблюдаемые электрические параметры.

Прогноз грозовых явлений с использованием численных мезомасштабных моделей является одним из важнейших практических приложений моделирования электрических процессов в облаках. Описание региональной системы краткосрочного прогнозирования опасных конвективных явлений на основе модели WRF-ARW представлено в [Дементьева и др., 2020]. Предложен метод прогнозирования опасных конвективных явлений, основанный на анализе расчетных пространственных и временных распределений радиолокационной отражаемости явления и их сравнении с характерными параметрами. Метод был проверен с использованием данных сети грозоопеленгации World Wide Lightning Location Network (WWLLN) и полевых измерений квазистатического электрического поля.

Ряд работ посвящен численному моделированию конвективного облака в различных регионах. В [Lesev et al., 2021] представлена трехмерная модель конвективного облака с учетом электрических процессов. Исследованы новые аспекты механизма формирования электрического заряда и поля в облаках. В [Морозов, 2019] исследованы расчеты электрических полей, генерируемых точечными и пространственно протяженными источниками заряда, с учетом скачков электропроводности на границе “плоскопараллельная облачность—свободная атмосфера” как в стационарном, так и в нестационарном случаях. Получены асимптотические формулы, позволяющие рассчитать напряженность электрического поля в свободной атмосфере в зависимости от расстояния до источника.

Для выявления возможных связей между скоростью электризации и интенсивностью турбулентности в облаках были проведены одновременные измерения яркостной температуры и коротко-

периодных флуктуаций электрического поля. Для указанных типов событий впервые получены подробные статистические характеристики флуктуаций яркостной температуры и короткопериодических флуктуаций электрического поля. Показано, что измеренные спектральные плотности яркостной температуры атмосферы и флуктуаций электрического поля достаточно хорошо соответствуют в рассматриваемом диапазоне частот результатам представленного теоретического рассмотрения [Klimenko et al., 2022]. Разработана и реализована микроволновая диагностика разрядов, возникающих в искусственном облаке заряженных капель воды, имитирующем среду грозовых облаков. Затухание зондирующего СВЧ-излучения с длиной волны 8 мм при прохождении через искусственное электрифицированное облако измерялось с временным разрешением 10 нс. С помощью созданной микроволновой диагностики были изучены временные характеристики внутриоблачных разрядов [Богатов и др., 2022].

В [Смирнов и Сон, 2022] анализируются некоторые процессы атмосферного электричества, связанные с микрокаплями воды в атмосфере. Показано, что микрокапли приобретают заряд в процессе роста, а потеря заряда микрокаплями, происходящая на нижней границе кучевого облака, приводит к развитию пробоя в виде молнии и сопровождается быстрым (в течение нескольких минут) агрегирование микрокапель кучевого облака в капли дождя.

На основе данных MRL-5 и LS8000 о развитии 100 облаков разработана схема физико-статистической эмпирической модели развития грозовой активности в конвективных облаках. Модель может быть использована для проверки численных моделей и разработки новых методов прогнозирования и диагностики опасных погодных явлений, связанных с конвективными облаками [Михайловский и др., 2019]. Изучено развитие облака суперъячейки, существовавшего более 20 часов 19 августа 2015 г. Анализ доплеровских и поляриметрических характеристик позволил выделить область сильной конвергенции, характерной для смерча [Абшаев и др., 2020, 2022]. Рассчитана эволюция конвективного облака на Северо-Западе России (Санкт-Петербург). Получено пространственно-временное распределение основных характеристик облака, осадков и связанных с ними опасных погодных явлений в зависимости от заданного параметра. Результаты модельных расчетов для случая высоких начальных тепловых потоков удовлетворительно согласуются с данными натурных измерений [Веремей и др., 2022].

Исследованы данные о динамике напряженности электрического поля и пространственного заряда сильных гроз в разных регионах мира. Данные получены по результатам моделирования с использованием численной трехмерной неста-

ционарной модели конвективного облака, разработанной в ГГО им. А.И. Воейкова. Воспроизводится многослойная зарядовая структура облака с тонкими слоями “экранирующих” зарядов, представлена соответствующая структура напряженности электрического поля для каждой из стадий электризации [Михайловский и др., 2021]. Проведено сравнение характеристик грозовых облаков в Индии, Китае и в двух регионах России. Статистические характеристики облаков были сведены в таблицу на основе радиолокационных сканирований и сопоставлены с наблюдениями за молниями. Грозовые облака в Индии существенно отличаются от тех, что наблюдаются в других регионах. Проанализированы взаимосвязи между частотой ударов молний, объемом переохлажденных облаков и интенсивностью осадков. В большинстве случаев наблюдалась высокая корреляция между частотой ударов молнии и переохлажденным объемом [Синькевич и др., 2020; Sin'kevich et al., 2021].

#### 4. ФИЗИКА МОЛНИЙ

Исследования физики молний в России, как экспериментальные, так и теоретические, дали существенный вклад в понимание физики развития грозовых разрядов. Расчетная модель сильно-точного импульсного дугового разряда в воздухе предложена в [Bocharov et al., 2022]. В целом это 2D-модель, учитывающая газодинамику разрядного канала, реальную термодинамику воздуха в широком диапазоне давлений и температур, электродинамику разряда, включая пинч-эффект, и излучение. 1D-версия модели протестирована и проверена на основе нескольких численных и экспериментальных работ, опубликованных в последнее время. Сделан вывод, что разряды слабого и умеренного тока удовлетворительно описываются моделью. Затем модель была применена для моделирования электрического разряда в воздухе при токах 1–250 кА и характерных временах нарастания 13–25 мкс, и проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными. Продемонстрировано, что большинство характеристик разряда хорошо описывается теорией.

В серии работ [Булатов и др., 2020; Iudin et al., 2021; Syssoev and Iudin, 2021; Syssoev et al., 2020, 2021, 2022] разработана численная модель развития грозового разряда. Морфология и электрические параметры рассчитанного разрядного “дерева” зарождающегося модельного лидера молнии согласуются с современными данными о развитии грозового разряда. Численная модель с физическим временем и шагом сетки 3 м применяется для изучения развития (включая ступенчатость и ветвление) ступенчатого лидера отрицательной молнии. Асимметрия между положительными и

отрицательными стримерами учитывается за счет использования зависящих от полярности порогов поля инициирования и распространения. Подтверждено, что ступенчатый характер негативного лидера обусловлен именно этой асимметрией [Syssoev et al., 2020]. Маломасштабная транспортная модель формирования электроразрядного дерева и анализ ее реализации для характерного случая грозовых условий, представленная в [Булатов и др., 2020; Syssoev and Iudin, 2021], можно охарактеризовать следующим инновационными особенностями: отсутствие привязки к пространственной сетке, высокое пространственно-временное разрешение, учет асимметрии развития положительных и отрицательных стримеров и временной эволюции параметров разрядного канала. Используемый в данной работе критерий стримерно-лидерного перехода сформулирован в терминах температуры канала и основан на известном механизме ионизационно-перегревной неустойчивости, универсальном для искрового разряда.

Рассмотрен шумовой кинетический переход в двухкомпонентной среде, где взаимодействующие компоненты имеют контрастные времена жизни и коэффициенты диффузии. Рассматриваемая система изучается методами направленной перколяции [Iudin et al., 2021]. Показано, что диэлектрическая прочность воздуха заметно падает по сравнению с ее обычным значением. Результаты исследования могут быть важны для решения проблем инициирования и распространения грозовых разрядов, голубых стартеров и голубых джетов [Syssoev et al., 2021].

В серии работ [Базелян, 2019, 2021; Базелян и Попов, 2020; Базелян и Александров, 2022] подробно рассмотрен процесс формирования нисходящей молнии и ориентация канала нисходящего лидера, необходимые для решения прикладных задач в области молниезащиты. Показано, что необходимо учитывать механизм формирования биполярного лидера в электрическом поле грозовой тучи, при котором грозовую ячейку нельзя рассматривать как проводящий заряженный электрод. Предложен алгоритм расчета высоты ориентации молнии, заряда на единицу длины ее канала и радиуса сжатия на основе значения тока основной ступени. Предложена структура натурных исследований молнии, позволяющая накопить необходимую статистику ее токов за обозримый период при реальных материальных затратах. Доказана необходимость изучения механизма конкурирующего развития встречных разрядов на заземлителях и предложен их метод. Установлена специфика развития встречного разряда с заземленного электрода в области отрицательного ступенчатого грозового лидера. Получены аналитические выражения для оценки условий запуска встречного разряда непосредственно в стримерной форме, минуя стадию

нестационарной ультракороны, а также для определения амплитуды управляющего импульса, способного возбудить восходящую молнию с электрода стримера на данной высоте в атмосфере, свободной от заряда ультракороны. Экспериментально доказано, что последствиями воздействия таких импульсов является задержка формирования контрлидера, а не его стимуляция. Установлена причина снижения эффективности громоотводов раннего стримерного инициирования по сравнению с традиционными такой же высоты.

В 2019–2022 гг. были продолжены и развиты лабораторные исследования инициации и формирования молниевых лидерного разряда. В стримерных коронах отрицательных лидеров длинных лабораторных искр наблюдались локализованные плазменные образования, получившие название “пространственные лидеры”. В [Куцык и Бабич, 2021] обсуждается механизм формирования локальных плазменных образований, способных инициировать объемный лидер. Проанализировано формирование положительного стримера вблизи заряженных игольчатых ледяных гидрометеоров во внешнем электрическом поле, имитирующем поле грозового облака. Представлены результаты численного моделирования стримерного разряда с учетом поляризации диэлектрика и проводимости льда. Требуемые для этого значения заряда находятся в диапазоне значений, измеренных в осадках [Бабич и Бочков, 2019]. Представлена упрощенная и наглядная электротехническая модель усиления электрического поля перед распространяющимся газоразрядным плазменным каналом. Критикуется теория, развитая некоторое время назад Яковленко, доказывающая, что смещение электрического поля за счет поляризации плазмы за фронтом плоского канала достаточно для усиления поля перед фронтом. В качестве аргумента в пользу этого мнения показано на основе разработанной электротехнической модели, что для значительного усиления поля, как давно известно, площадь поперечного сечения канала должна быть значительно меньше площади газоразрядного промежутка. Обсуждается поляризационное самоускорение электронов [Babich, 2020]. Стримерная зона положительного лидера в сквозной фазе длинных искр экспериментально исследовалась двумя методами: анализом изображений стримерной зоны, полученных с помощью высокоскоростной кадрирующей камеры с усилением изображения, и микроволнового зондирования, примененного к длинным искрам. Оба метода основаны на предположении о постоянстве электрического поля и подобии всех стримеров внутри стримерной зоны. Результаты данного исследования в целом согласуются с этим предположением [Bogatov et al., 2020].

В работе [Kostinskiy et al., 2022], направленной на выявление генезиса необычных плазменных образований (НПП) в искусственных облаках заряженных капель воды, были представлены НПП, возникшие внутри исходного коронного стримерного всплеска положительной полярности, генерируемого из заземленной плоскости, до образования (или при отсутствии) связанного с ним канала горячего лидера. Возникновение НПП может быть необходимым компонентом процесса возникновения грозы. НПП могут возникать внутри первоначального стримерного всплеска короны, до развития (или при отсутствии) горячего лидерного канала. НПП содержат сегменты горячих каналов, которые формируются, возможно, из-за термоионизационной неустойчивости, на временном масштабе 1 мкс или менее и возникают вблизи границы облака, где электрическое поле максимальное.

## 5. ВЫСОТНЫЕ РАЗРЯДЫ

“Транзиентные” световые явления (transient luminous events, TLE), такие как спрайты, голубые джеты и эльфы, интенсивно изучались в течение последних трех десятилетий, и теперь многое известно об их свойствах. Исследование этих высотных разрядов российскими учеными продолжается достаточно активно. Проводятся спутниковые наблюдения, лабораторное и численное моделирование. Глобальное распределение спрайтов на основе новой параметризации и WWLLN изучается в [Evtushenko et al., 2022]. Показано, что в среднем по всему миру может быть инициировано 870 ночных спрайтов за сутки, из них 41.4% над сушей и 58.6% над океаном. Исследована годовая динамика количества спрайтов над сушей и океаном, выявлена максимальная численность событий в августе и минимум в январе и феврале.

В [Surkov and Hayakawa, 2020] рассмотрены различные типы TLE, в том числе недавно обнаруженные танцующие спрайты, гномы, ультрафиолетовые атмосферные вспышки и другие эффекты. Обсуждаются инициация спрайтов, видимая эволюция, структура стримеров и их связь с внутриоблачным процессом, с привлечением некоторых аналитических результатов и простых физических моделей TLE. Авторы акцентируют внимание на свойствах ультрафиолетовых вспышек в мезосфере, которые наблюдались на борту российских микроспутников “Университетский-Татьяна” и “Вернов”. Такую разновидность оптической вспышки авторы называют транзитным атмосферным событием, которое отличается от TLE оптической энергией, продолжительностью и другими параметрами.

Лабораторные исследования высотных разрядов — достаточно сложная и нетривиальная задача. Важнейшим фактором, определяющим дина-

мику и структуру высотных разрядов, является наличие значительной разницы атмосферного давления по их длине. В Институте прикладной физики РАН (Нижний Новгород) создана экспериментальная установка “Спрайт”. Это позволяет сформировать протяженный градиент концентрации нейтрального газа и зажечь в нем крупномасштабный электрический разряд. В работе [Евтушенко и др., 2020] представлены результаты лабораторных экспериментов, моделирующих некоторые свойства высотных разрядов, прежде всего спрайтов и гигантских джетов. Показано сходство лабораторных и натуральных разрядов, обозначены физические проблемы и возможные пути их решения методами ограниченного лабораторного моделирования.

В работе [Тарасенко и др., 2022] изучено влияние материала электродов (алюминий и нержавеющая сталь) при формировании мини-джетов на цвет импульсно-периодического диффузного разряда в воздухе, азоте и аргоне. Показано, что цвет плазмы разряда в области мини-джета соответствует цвету высотных атмосферных разрядов (красные спрайты и синие джеты) и отличается от цвета диффузных разрядов в воздухе и азоте при том же давлении.

## 6. ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

Исследование высокоэнергичных явлений в атмосфере Земли — молодая и быстро развивающаяся отрасль физики атмосферы, тесно связанная с изучением внутриоблачных и высотных разрядов. Явления возникновения потоков энергичных элементарных частиц в грозовых облаках делятся на два класса, взаимосвязь которых остается дискуссионным вопросом: гамма-вспышки земного происхождения (terrestrial gamma-ray flashes, TGF) и приземные грозы, увеличение потока энергичных частиц (thunderstorm ground enhancements, TGE). Лавины релятивистских убегающих электронов (relativistic runaway electron avalanches, RREA), возникающие в грозовых крупномасштабных электрических полях, являются одним из источников атмосферного гамма-излучения. Релятивистская обратная связь — это генерация RREA позитронами или обратным рассеянием гамма-лучей ранее произведенных RREA. В сильных электрических полях релятивистская обратная связь может сделать RREA самоподдерживающимися, что гипотетически может приводить к появлению TGF. В работе [Stadnichuk and Svehnikova, 2022] представлен кинетический подход к изучению позитронной релятивистской обратной связи, которая является преобладающей для непосредственно наблюдаемых условий внутри гроз. Выведен критерий самоподдерживающегося образования RREA по позитронной обратной

связи в грозах. Показано, что полученные условия самоподдерживающегося развития RREA не достигаются для параметров электрического поля, наблюдаемых в реальных грозовых облаках.

Изучение атмосферных явлений высоких энергий требует анализа данных о распределении облачных частиц и образуемой ими электрической структуры. В [Свечникова и др., 2020] сопоставлена информация о метеорологических условиях формирования высокоэнергичного излучения грозовых облаков, полученная из спутниковых наблюдений в инфракрасном и оптическом диапазонах. Путем сравнения данных наблюдений с результатами моделирования с использованием микрофизической параметризации для модели WRF разработана методика оценки параметров распределения заряда [Svehnikova et al., 2021].

В работе [Shepetov et al., 2021] авторы сообщают о результатах наблюдения вспышек жесткого излучения, сопровождавших грозовые разряды над горами Северного Тянь-Шаня. На высоте 3700 м были получены временные ряды интенсивности скорости счета, численные оценки абсолютного потока и энергетического распределения ускоренных электронов и гамма-лучей (20–2000) кэВ в пределах грозовых облаков и в непосредственной близости ( $\lesssim 100$  м) от места сброса. Представлены два различных типа событий радиационного излучения: относительно длительный рост интенсивности гамма-излучения с минутной длительностью (TGE), который предшествовал отрицательному изменению поля, и короткий субмиллисекундный радиационный всплеск, который сопровождался близким разрядом молнии в грозовой туче. Обнаружены также признаки генерации позитронов в грозовых облаках в момент гамма-излучения, а также модуляция скорости счета нейтронов в Тянь-Шаньском нейтронном мониторе, работавшем на расстоянии порядка (1.5–2) км от района молниевой активности.

Обзор современных наблюдений усиления нейтронного потока в грозовых облаках и во время гроз, связанного с фотоядерными реакциями за счет тормозного излучения высокоэнергичных лавин убегающих электронов, которые могут развиваться в грозовом электрическом поле, выполнен в [Бабиц, 2019]. Отмечается сложность отбора грозовых нейтронов, связанная с тем, что детекторы находятся в смешанном поле различных излучений, включающих не только нейтроны, но и первичные электроны высоких энергий и их тормозное излучение. Особое внимание уделено обнаружению в грозовом облаке и на поверхности Земли во время грозы линии аннигиляции позитрона и электрона с энергией фотона 0.511 МэВ, и фотоядерному происхождению грозовых нейтронов. Обсуждаются последствия этого открытия.



## 7. ИНТЕГРИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРОЗ

Фактических данных о влиянии опасных погодных явлений (ливней, гроз и т. д.), крупномасштабных атмосферных циркуляций и о влиянии солнечно-земных связей на суточные и сезонные вариации атмосферного электрического поля в регионах все еще недостаточно для организации надежного штормового предупреждения. В последние годы в России продолжают развиваться системы сбора и анализа данных инструментального непрерывного мониторинга грозовой активности. Мониторинг грозовой активности помогает решить множество задач: защита объектов инфраструктуры, предупреждение об опасных явлениях, связанных с интенсивными осадками, изучение условий возникновения гроз и степени их влияния на деятельность человека, а также воздействия грозы на формирование околоземного космического пространства.

В работах [Михайлов и др., 2020; Смирнов и др., 2019] обсуждаются изменения приземного электрического поля и других геофизических параметров во время зимних гроз на Камчатке. Результаты исследования особенностей спектра электромагнитных сигналов, индуцируемых вблизи разрядов между искусственной грозовой ячейкой и землей, представлены в [Temnikov et al., 2022]. Экспериментально установлено, что параметры импульсного тока, а также интенсивность, форма, спектральные характеристики наведенных электромагнитных сигналов зависят от варианта формирования разряда из искусственной грозовой ячейки (восходящий разряд, нисходящий разряд или ответный разряд). Рассмотрена роль мощных стримерных разрядов на этапе формирования главной стадии в возникновении сверхвысокочастотного диапазона наведенных электромагнитных сигналов. Рассматривается возможность применения полученных результатов для улучшения работы грозопеленгационных сетей.

Представлены результаты работ, направленных на создание многопозиционной экспериментальной сети мониторинга грозовой активности [Готюр и др., 2022]. Приведены расчеты зон равной точности для вариантов реализации угломерного и разностно-диапазонного методов определения координат. Пассивные радиотехнические средства контроля штормовой активности в ОНЧ-диапазоне рассмотрены в работе [Копонов et al., 2019]. Проведен сравнительный анализ характеристик современных российских и зарубежных систем грозопеленгации, имеющих широкое практическое применение. Оценены возможности улучшения прецизионных и вероятностных характеристик локации сильноточных составляющих молний различных типов в ОНЧ диапазоне.

Анализу данных локальных и глобальных грозопеленгационных сетей посвящено большое

количество работ. Сравнение характеристик многоточечных грозопеленгационных систем показало, что грозопеленгационные сети с базовыми расстояниями до 400 км обеспечивают эффективность регистрации всплеск молний более 90%, а отдельных грозовых разрядов — от 50 до 90% [Снегуров и Снегуров, 2019]. Показано, что грозопеленгационные сети с малыми базами имеют более высокие точностные и вероятностные характеристики по сравнению с большими базами. Применение грозопеленгационных сетей с разными дальностями, с эффективным, удобным в выборе места установки и надежными датчиками, аналогичными показателям в структуре Росгидромета, использование отечественных разработок как аппаратного, так и программного обеспечения позволяет решать задачи штормового предупреждения с точностью и вероятностными характеристиками обнаружения гроз на уровне зарубежных аналогов [Снегуров и Снегуров, 2019].

В статье [Аджиев и др., 2021] представлены результаты использования грозорегистратора LS 8000 для определения параметров грозовых разрядов положительной и отрицательной полярности на территории Северного Кавказа, ограниченной 47° с.ш., большая часть которой относится к горным регионам. Для данной территории получены средние значения амплитуды тока в каналах грозовых молний положительной и отрицательной полярности в зависимости от орографии и высоты местности над уровнем моря. Показано, что пиковые значения тока уменьшаются с увеличением высоты местности. Рассмотрена длительность нарастания тока грозового разряда до пикового значения, полученная с помощью грозорегистратора LS 8000.

Инструментальный непрерывный мониторинг грозовой активности в Якутии осуществляется с 2000-х гг. Наиболее продолжительные грозовые сезоны часто наблюдаются в южной части Якутии [Tarabukina and Kozlov, 2020]. В центральной части Якутии до 2015 г. наблюдалось небольшое увеличение продолжительности грозового сезона. Межгодовые изменения общего числа ударов молний показали периодические колебания (с периодом около трех лет) на всей территории исследований. Периоды высокой грозовой активности смешались в течение сезона от года к году, о чем свидетельствует ежемесячный ход числа ударов. В центральной части Якутии к 2015 г. соотношение грозовых ударов молний и соотношение отрицательных ударов облако-земля несколько снизилось. Получены оценки изменчивости параметров широтно-долготного распределения грозовых разрядов в десятилетнем масштабе [Тарабукина и др., 2021].

Проведен сравнительный анализ натурных данных по отражательной способности метеорологов и грозовой активности за конвективный

сезон май–сентябрь 2016 г. Оценена точность алгоритма обнаружения грозы, реализованного в радарх ДМРЛ-С. Предложен новый алгоритм, основанный на сумме положительных значений отражательной способности. С точки зрения точности и надежности алгоритм работает лучше, чем более сложные модели. Алгоритм может быть использован для обнаружения грозы по натурным или модельным данным об отражательной способности конвективной системы [Ильин и Кутерин, 2020].

Сравнение пространственной и временной изменчивости грозовой активности, связанных с лесными пожарами в ряде природно-географических зон Западной Сибири в 2016–2021 гг., выполнено в работе [Нечепуренко и др., 2022]. Исследование было основано на данных WWLLN и системы пожарной информации для управления ресурсами для теплого (апрель–октябрь) сезона. Выявлено, что области горячих точек и грозовой активности чаще всего совпадают в юго-западной части территории (близ Ханты-Мансийска и Тюмени), в горных районах (Кузнецкий Алатау, Алтай) и в северной части Казахстана. Выявленная связь молний и пожаров позволяет понять характеристики этого процесса в регионе, что будет полезно при прогнозировании потенциальной пожарной опасности в различных природных зонах. Плотность грозовых разрядов над территорией Западной Сибири, по данным WWLLN, характеризуется пространственной неоднородностью с выделением пяти основных центров. Грозовая активность за период 2016–2020 гг. на юге Западной Сибири наблюдалась с мая по сентябрь с максимумом разрядов в июле (38.3%) и минимумом в сентябре (2.5%). Получена статистически значимая связь между полями с критическими значениями индекса нестабильности К-индексом и центрами высокой плотности грозовых разрядов [Нечепуренко и др., 2022; Kharyutkina et al., 2022]. На основе данных WWLLN за 2007–2009 гг. были построены глобальные карты грозовой активности [Денисенко и Ляхов, 2021]. Ключевые особенности пространственного распределения и сезонных трендов, полученные наземными и спутниковыми методами, согласуются удовлетворительно.

Характеристики опасных метеорологических явлений в Нижнем Новгороде получены на основе натурных наблюдений электрического поля. В результате анализа экспериментальных данных по приему и регистрации квазистационарного электрического поля совместно с данными метеорологического радиолокатора была получена статистика грозовых явлений и проведена их классификация. Данные натурных наблюдений сравниваются с результатами численных расчетов на основе модели WRF [Шаталина и др., 2021]. Результаты наблюдений радиоизлучения грозовых облаков в широком диапазоне частот с высоким

временным разрешением, выполненные в Верхнем Поволжье вблизи Нижнего Новгорода, сравниваются с данными мировых и региональных сетей грозолокации [Karashtin et al., 2021].

В [Ткачев и др., 2021] характеристики грозовых ячеек изучались методом кластерного анализа. За основу были взяты данные грозопеленгационной сети “Верей-МР”, накопленные за период с 2012 по 2018 год. Сравнялось поведение гроз на всей территории Российской Федерации и на Байкальской природной территории. Установлено, что мощность гроз над Прибайкальем меньше. По результатам работы разработаны предложения для новой конфигурации грозопеленгационной сети.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2019–2022 гг. исследования атмосферного электричества в Российской Федерации продолжали активно развиваться. Выполнен широкий комплекс экспериментальных и теоретических исследований электричества хорошей погоды и влияния на него атмосферных ионов и аэрозолей. Проведены экспериментальные и теоретические исследования глобальной электрической цепи, в том числе с использованием климатических и химико-климатических моделей. Выполнен комплекс экспериментальных исследований в области физики молнии и молниезащиты. В ряде регионов России успешно продолжают исследования климатологии атмосферных электрических явлений, региональных метеорологических особенностей гроз, совершенствования методов моделирования и прогноза грозовых явлений. Проведены многочисленные лабораторные эксперименты по исследованию особенностей развития молниевых разрядов и построены новые теоретические модели различных стадий молниевых разряда и высотных разрядов.

За последние 4 года были успешно проведены конференции, посвященные проблемам атмосферного электричества: VII Международная конференция по молниезащите (Санкт-Петербург, 2022), Четвертая и Пятая Всероссийские конференции “Глобальная электрическая цепь” (Борок, Ярославская области, 2019 и 2021), VIII Открытая Всероссийская конференция по атмосферному электричеству (23–27 сентября, г. Нальчик 2019). Российские ученые приняли участие в XVII Международной конференции по атмосферному электричеству (ICAE2022, Тель-Авив, Израиль, июнь 2022 г.), которая проводится раз в 4 года и является основным международным форумом по атмосферному электричеству, а также в 27-ой Генеральной Ассамблее Международного союза геодезии и геофизики “IUGG 2019”, которая прошла г. Монреаль, Канада, с 8 по 18 июля 2019 г.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФРАН (проект №FFUF-2021-0010).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Михайловский Ю.П. и др. Исследование особенностей развития процессов электризации и градообразования в суперячейковом облаке дистанционными радиофизическими средствами // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2020. № 596. С. 96–130.
- Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Синькевич А.А. и др. Об особенностях развития суперячейкового конвективного облака в стадии максимальной грозовой активности (19 августа 2015 г., Северный Кавказ) // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 96–110.
- Аджиев А.Х., Кереева З.М., Клово А.Г. и др. Анализ данных многолетних атмосферно-электрических наблюдений на территории северо-кавказского региона Труды Военно-Космической академии им. А.Ф. Можайского // 2020. № S674. С. 75–79.
- Аджиев А.Х., Кереева З.М., Кузьмин В.А. Определение значений токов наземных молниевых разрядов на Северном Кавказе с использованием грозорегистратора LS8000 // Гидрометеорология и экология. 2021. № 64. С. 531–543.
- Аджиев А.Х., Клово А.Г., Кудринская Т.В. и др. Суточные вариации электрического поля в приземном слое атмосферы // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана 2021. Т. 57. № 4. С. 452–461.
- Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Кереева З.М. и др. Влияние солнечного ветра на динамику электрического поля в приземном слое атмосферы // Известия ЮФУ. Технические Науки. 2019. № 5. С. 114–122.
- Анисимов С.В., Галиченко С.В., Прохорчук А.А. и др. Измерения плотности атмосферного электрического тока горизонтальной кольцевой пассивной антенной в приземном слое: электростатическое приближение // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2022. Т. 65. № 10. С. 801–819.
- Анисимов С.В., Галиченко С.В., Прохорчук А.А. и др. Измерения плотности атмосферного электрического тока горизонтальной кольцевой пассивной антенной в приземном слое: квазистационарное приближение // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2022. Т. 65. № 11. С. 893–913.
- Бабич Л.П. Грозовые нейтроны // Успехи физических наук. 2019. Т. 189. № 10. С. 1044–1069.
- Бабич Л.П., Бочков Е.И. Роль заряженных ледяных гидрометеоров в иницировании молний // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2019. № 24-1. С. 198–207.
- Базелян Э.М. Механизм ориентировки и параметры молнии в молниезащите // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 3. С. 274–286.
- Базелян Э.М. Проблема управляющих воздействий на разряд молнии // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 3. С. 267–276.
- Базелян Э.М., Александров Н.Л. Электрическое поле в положительном стримере в длинных воздушных промежутках // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 7. С. 639–647.
- Базелян Э.М., Попов Н.А. Ступенчатое развитие положительной длинной искры в воздухе // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 3. С. 237–250.
- Богатов Н.А., Сысоев В.С., Сухаревский Д.И. и др. Микроволновая диагностика разрядов в искусственном облаке заряженных водяных капель // Журнал Технической Физики. 2022. № 3. С. 294–299.
- Булатов А.А., Иудин Д.И., Сысоев А.А. Самоорганизующаяся транспортная модель искрового разряда в грозовом облаке // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2020. Т. 63. № 2. С. 135–154.
- Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Торопова и др. Влияние термических неоднородностей подстилающей поверхности на образование и развитие конвективных облаков и связанных с ними опасных явлений погоды // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2022. № 606. С. 32–49.
- Готюр И.А., Коровин Е.А., Чернышев С.В. и др. Экспериментальная сеть датчиков мониторинга грозовой активности // Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2022. № S685. С. 66–74.
- Дементьева С.О., Ильин Н.В., Шаталина М.В. и др. Прогноз конвективных явлений и его верификация по данным наблюдений атмосферного электричества // Изв. РАН. Физика Атмосферы и Океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 123–129.
- Денисенко В.В., Ляхов А.Н. Сравнение наземных и спутниковых данных о пространственно-временном распределении грозовых разрядов при низкой солнечной активности // Солнечно-Земная Физика. 2021. Т. 7. № 4. С. 104–112.
- Евтушенко А.А., Гуцин М.Е., Коробков С.В. и др. Моделирование высотных разрядов на большой плазменной установке // Геомагнетизм и Аэронавигация. 2020. Т. 60. № 3. С. 345–354.
- Елисеев А.В., Плосков А.Н., Чернокульский А.В. и др. Связь частоты молний со статистическими характеристиками конвективной активности в атмосфере // Доклады Академии наук. 2019. Т. 485. № 1. С. 76–82.
- Зайнетдинов Б.Г., Клово А.Г., Кудринская Т.В. и др. Формирование суточных вариаций атмосферного электрического поля вблизи поверхности земли в различных метеорологических условиях // Труды Военно-Космической Академии им. А.Ф. Можайского. 2020. № S674. С. 176–180.
- Зекореев Р.Х. Исследование состояния электрического поля атмосферы в районе карьера открытых горных разработок // Наука. Инновации. Технологии. 2022. № 3. С. 139–158.
- Ильин Н.В., Кутерин Ф.А. Оценка точности распознавания гроз по данным доплеровского метеорологического лоатора ДМРЛ-С // Метеорология и гидрология. 2020. № 9. С. 104–112.
- Ильин Н.В., Слюняев Н.Н., Шаталина М.В. Моделирование сезонной динамики суточной вариации глобальной электрической цепи // Известия Российской Академии Наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 76–84.
- Кутерин Ф.А., Слюняев Н.Н. Учет ионосферных генераторов в численной модели глобальной электрической цепи // Геомагнетизм и аэронавигация. 2020. Т. 60. № 6. С. 768–780.
- Кузык И.М., Бабич Л.П. Нагрев локальной области ветвящегося стримера как начало объемного лидера и ступени отрицательного лидера // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 3. С. 237–243.
- Михайлов Ю.М., Смирнов С.Э., Михайлова Г.А. и др. Тропические циклоны и возможные зимние грозы

- на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. № 5. С. 655–671.
- Михайловский Ю.П., Попов В.Б., Синькевич А.А. и др. Физико-статистическая эмпирическая модель развития молниевой активности конвективных облаков // Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. № 595. С. 83–105.
- Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Веремей Н.Е. и др. Динамика электрической структуры кучево-дождевых облаков // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 5. С. 341–353.
- Морозов В.Н. Взаимодействие облачных зарядовых структур с окружающей проводящей атмосферой с неоднородной электрической проводимостью // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. № 592. С. 23–79.
- Морозов В.Н. Влияние генераторов электрического поля, действующих в верхних слоях атмосферы на электричество приземного слоя // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2022. № 605. С. 58–91.
- Нагорский П.М., Пустовалов К.Н., Смирнов С.В. Суточные и сезонные вариации невозмущенного электрического поля и их связь с изменчивостью геофизических величин на юге Западной Сибири // Труды Военно-Космической Академии им. А.Ф. Можайского. 2022. № S 685. С. 213–222.
- Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Пустовалов К.Н. и др. Грозовая активность над Западной Сибирью // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 123–134.
- Свечникова Е.К., Ильин Н.В., Мареев Е.А. Метеохарактеристика энергичных атмосферных явлений // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17. № 6(231). С. 791–802.
- Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л. и др. Строение грозового облака со смерчем и зависимость частоты молний от его характеристик // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 9. С. 705–709.
- Смирнов С.Э., Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А. и др. Особенности зимних гроз на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 6. С. 742–749.
- Смирнов Б.М., Сон Э.Е. Электрические процессы в атмосферном воздухе // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60. № 4. С. 589–624.
- Снегуров А.В., Снегуров В.С. Сравнение характеристик многопунктовых грозополенгационных систем // Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. № 595. С. 22–62.
- Тарабукина Л.Д., Козлов В.И., Иннокентьев Д.Е. Анализ 11-летней динамики пространственного распределения плотности молний в Северной Азии // Вестник КРАУНЦ. Физико-Математические Науки. 2021. № 1. С. 159–173.
- Тарасенко В.Ф., Бакиш Е.Х., Бураченко А.Г. и др. Моделирование цвета высотных атмосферных разрядов с помощью импульсно-периодического разряда в воздухе, азоте и аргоне // Оптика Атмосферы и Океан. 2022. Т. 35. № 4. С. 279–283.
- Ткачев И.Д., Васильев Р.В., Белоусова Е.П. Кластерный анализ молниевых разрядов по данным грозополенгационной сети “Веря-МР” // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 4. С. 91–98.
- 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., Мареев Е.А., Клименко В.В. и др., Экспериментальное исследование суточных и сезонных вариаций атмосферного электрического поля // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 3. С. 205–210.
- Шулейкин В.Н., Шукин Г.Г. Использование элементов приземного атмосферного электричества в задачах прикладной геофизики // Труды Военно-Космической Академии им. А.Ф. Можайского. 2022. № S 685. С. 236–244.
- Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V. et al. Mid-latitude atmospheric boundary layer electricity: A study by using a tethered balloon platform // Atmospheric Research. 2021. V. 250. P. 105355.
- Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V. et al. Small air ion statistics near the earth’s surface // Atmospheric Research. 2022. V. 267. P. 105913.
- Anisimov S.V., Galichenko S.V., Prokhorchuk A.A. et al. Statistics of variations in atmospheric electrical parameters based on a three-dimensional model and field observations // Atmospheric Research. 2021. V. 259. P. 105660.
- Babich L.P. Electrotechnique Interpretation of the Electric Field Amplification in Front of the Plasma Channel // IEEE Transactions on Plasma Science. 2020. V. 48. № 12. P. 4089–4092.
- Bocharov A.N., Mareev E.A., Popov N.A. Numerical simulation of high-current pulsed arc discharge in air // J. Physic D Applied Physics. 2022. V. 55. № 11. P. 115204.
- Bogatov N.A., Kostinskiy A.Yu., Syssoev V.S. et al. Experimental Investigation of the Streamer Zone of Long-Spark Positive Leader Using High-Speed Photography and Microwave Probing // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2020. V. 125. № 11. P. e2019JD031826.
- Evtushenko A., Ilin N., Svechnikova E. Parameterization and global distribution of sprites based on the WWLLN data // Atmospheric Research. 2022. V. 276. P. 106272.
- Harrison R. Giles, Nicoll Keri A., Mareev Evgeny et al. Extensive layer clouds in the global electric circuit: their effects on vertical charge distribution and storage // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2020. V. 476. № 2238. P. 20190758.
- Ilin N.V., Slyunyaev N.N., Mareev E.A. Toward a Realistic Representation of Global Electric Circuit Generators in Models of Atmospheric Dynamics // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2020. V. 125. № 6. P. e2019JD032130.
- Iudin D.I., Iudin F.D., Syssoev A.A. et al. Noise-induced kinetic transition in two-component environment // J. Comput Appl Math. 2021. V. 388. P. 113268.
- Karashtin A.N., Shlyugaev Y.V., Karashtina O.S. Cloud-to-ground lightning discharge indicator in the radio frequency emission of thunderclouds as observed in the Upper Volga region of Russia // Atmospheric Research. 2021. V. 256. P. 105559.
- Kharyutkina E., Pustovalov K., Moraru E. et al. Analysis of Spatio-Temporal Variability of Lightning Activity and Wildfires in Western Siberia during 2016–2021 // Atmosphere. 2022. V. 13. № 5. P. 669.
- Klimenko V.V., Lubyako L.V., Mareev E.A. et al. Ground-based measurements of microwave brightness temperature and electric field fluctuations for clouds with a dif-

- ferent level of electrical activity // *Atmospheric Research*. 2022. V. 266. P. 105937.
- Kononov I.I., Korovin E.A., Shchukin G.G. et al. Current state and prospects of development of passive radio engineering monitoring of storm activity // *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2019. V. 698. № 4. P. 044046.
- Kostinskiy A.Yu., Bogatov N.A., Syssoev V.S. et al. Unusual Plasma Formations Produced by Positive Streamers Entering the Cloud of Negatively Charged Water Droplets // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2022. V. 127. № 21. P. e2021JD035821.
- Lesev V.N., Shapovalov V.A., Ashabokov B.A. et al. 3D model of a convective cloud: the interaction of microphysical and electrical processes // *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. V. 23. № 1. P. 1–18.
- Pustovalov K., Nagorskiy P., Oglezneva M., Smirnov S. The electric field of the undisturbed atmosphere in the south of Western Siberia: a case study on Tomsk // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 614.
- Shepetov A., Antonova V., Kalikulov O. et al. The prolonged gamma ray enhancement and the short radiation burst events observed in thunderstorms at Tien Shan // *Atmospheric Research*. 2021. V. 248. P. 105266.
- Sin'kevich A., Boe B., Pawar S. et al. Investigation of Thundercloud Features in Different Regions // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. № 16. P. 3216.
- Slyunyaev N.N., Frank-Kamenetsky A.V., Ilin N.V. et al. Electric Field Measurements in the Antarctic Reveal Patterns Related to the El Niño – Southern Oscillation // *Geophysical Research Letters*. 2021. V. 48. № 21. P. e2021GL095389.
- Slyunyaev N.N., Ilin N.V., Mareev E.A. et al. The global electric circuit land–ocean response to the El Niño – Southern Oscillation // *Atmospheric Research*. 2021. V. 260. P. 105626.
- Slyunyaev N.N., Ilin N.V., Mareev E.A. Modeling Contributions of Continents and Oceans to the Diurnal Variation of the Global Electric Circuit // *Geophysical Research Letters*. 2019. V. 46. № 10. P. 5516–5525.
- Slyunyaev N.N., Kalinin A.V., Mareev E.A. Thunderstorm generators operating as voltage sources in global electric circuit models // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019. V. 183. P. 99–109.
- Smirnov S. Negative Anomalies of the Earth's Electric Field as Earthquake Precursors // *Geosciences*. 2019. V. 10. № 1. P. 10.
- Stadnichuk E., Svechnikova E. The criterion for self-sustaining production of relativistic runaway electron avalanches by the positron feedback in thunderstorms // *Atmospheric Research*. 2022. V. 277. P. 106329.
- Surkov V.V., Hayakawa M. Progress in the Study of Transient Luminous and Atmospheric Events: A Review // *Survey in Geophysics*. 2020. V. 41. № 5. P. 1101–1142.
- Svechnikova E.K., Ilin N.V., Mareev E.A. et al. Characteristic Features of the Clouds Producing Thunderstorm Ground Enhancements // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2021. V. 126. P. e2019JD030895.
- Svidelsky S.S., Litvinova V.S., Kupovykh G.V. et al. Formation of the atmospheric electrode layer structure // *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2020. № 5. P. 130–141.
- Syssoev A.A., Iudin D.I., Bulatov A.A. et al. Numerical Simulation of Stepping and Branching Processes in Negative Lightning Leaders // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2020. V. 125. № 7. P. e2019JD031360.
- Syssoev A.A., Iudin D.I. On a possible mechanism of space stem formation at the negative corona streamer burst periphery // *Atmospheric Research*. 2021. V. 259. P. 105685.
- Syssoev A.A., Iudin D.I., Iudin F.D. et al. On the Problem of Critical Electric Field of Atmospheric Air // *Atmosphere*. 2021. V. 12. № 8. P. 1046.
- Syssoev A.A., Iudin D.I., Iudin F.D. et al. Relay charge transport in thunderclouds and its role in lightning initiation // *Scientific Report*. 2022. V. 12. № 1. P. 7090.
- Tarabukina L., Kozlov V. Seasonal Variability of Lightning Activity in Yakutia in 2009–2019 // *Atmosphere*. 2020. V. 11. № 9. P. 918.
- Temnikov A., Belova O., Chernensky L. et al. Peculiarities of spectrum of electromagnetic signals induced by discharges from artificial thunderstorm cell // *Journal of Electrostatic*. 2022. V. 115. P. 103660.

## Russian Studies of Atmospheric Electricity in 2019–2022

E. A. Mareev<sup>1, \*</sup>, V. N. Stasenko<sup>2</sup>, and M. V. Shatalina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova 46, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Applied Geophysics, st. Rostokinskaya, 9, Moscow, 129128 Russia*

\*e-mail: aries@ipfran.ru

This review contains the most significant results of Russian studies in the field of atmospheric electricity in 2019–2022. It is part of the Russian National Report on Meteorology and Atmospheric Sciences to the International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences (IAMAS). The report was presented and approved at the XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)<sup>2</sup>. The review is followed by a list of the main published works on the studies of atmospheric electricity of Russian scientists in 2019–2022.

**Keywords:** atmospheric electricity, physics of lightning, atmospheric discharges, global electric circuit, lightning direction finding, forecast

<sup>2</sup> Russian National Report: Meteorology and Atmospheric Sciences: 2019–2022: for the XXXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Berlin, Germany, July 11–20, 2023) / Ed.: I.I. Mokhov, A.A. Krivolutsky. — Moscow: MAKSPress, 2023. — 440 p. ISBN 978-5-317-07017-5. <https://doi.org/10.29003/m3460.978-5-317-07017-5>