

УДК 551.594

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В 2015–2018 гг.

© 2019 г. Е. А. Мареев^{1*}, В. Н. Стасенко², М. В. Шаталина¹, С. О. Дементьева¹,
А. А. Евтушенко¹, Е. К. Свечникова¹, Н. Н. Слюняев¹

¹Институт прикладной физики РАН
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

²Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»
123242, Москва, Большой Предтеченский пер., 7

*E-mail: mareev@appl.sci.nnov.ru

Поступила в редакцию 12.07.2019 г.

Принята к печати 07.08.2019 г.

Обзор содержит наиболее значимые результаты работ российских ученых в области исследований атмосферного электричества в 2015–2018 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 XXVII Генеральной ассамблее Международного геодезического и геофизического союза (IUGG)¹. К обзору прилагается список основных публикаций российских ученых за 2015–2018 гг., посвященных исследованиям атмосферного электричества.

Ключевые слова: атмосферное электричество, физика молнии, разряды в атмосфере, глобальная электрическая цепь, гронопеленгация, прогноз.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-351555679-93>

ВВЕДЕНИЕ

В данной публикации сделан обзор результатов российских исследований в области атмосферного электричества в 2015–2018 гг. Атмосферное электричество было и остается одной из фундаментальных проблем физики атмосферы, привлекающих пристальное внимание в течение многих лет. В последние годы продолжают развиваться многие направления физики электричества хорошей погоды, процессов электризации облаков и формирования их электрической структуры, исследования взаимосвязи грозовой активности с другими опасными погодными явлениями. Экспериментальные исследования по изучению атмосферного электричества, проводимые в российских научных центрах, вносят существенный вклад в улучшение теоретических и численных моделей различных электрических процессов в атмосфере, а также моделей глобальной электрической цепи. Получены новые данные в области физики молний, включая новые результаты о строении лидерных и стримерных разрядов. Много внимания уделяется исследованию высокоэнергичных процессов, таким, как вспышки рентгеновского и гамма излучения во время грозы. Продолжаются исследования молниевой активности из космоса с помощью предназначенных для этого микроспутников. Следует особо отметить большое внимание, которое уделялось лабораторному исследованию атмосферных разрядов различных типов. Более подробно основные результаты по каждому из направлений приведены в соответствующих разделах настоящей статьи.

1. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО ХОРОШЕЙ ПОГОДЫ

В 2015–2018 гг. в России продолжалось активное изучение электричества хорошей погоды. Проявляется повышенный интерес к процессам, происходящим в конвективном атмосферном пограничном слое, что обусловлено необходимостью фундаментальных исследований формирования облачности, электрических эффектов, связанных с промышленными и природными аэрозолями. Длительные наблюдения

¹ Russian National Report/ Meteorology and Atmospheric Sciences. 2015–2018 / Eds: I.I. Mokhov, A.A. Krivolysky. National Geophysical Committee RAS. Moscow: MAX Press, 2019 – 332 p.

атмосферного электрического поля позволяют выявить основные особенности суточных и сезонных вариаций [1], исследовать влияние конвекции на электрическую проводимость в приземном слое [2], оценить влияние аэрозольного и радиоактивного загрязнений атмосферы [3], экспериментально исследовать изменчивость вертикальных атмосферных электрических токов в приземном слое [4].

По результатам анализа данных длительных наблюдений атмосферного электрического поля в г. Якутске, установлено, что суточный ход имеет два максимума в весенние, летние и осенние месяцы, при этом в зимние месяцы суточный ход имеет один максимум и один минимум. Сезонный ход среднемесячных значений напряженности поля имеет максимумы в весенние и осенние месяцы и минимумы, которые приходятся на летние и зимние месяцы. В вариациях среднемесячных значений напряженности электрического поля за пятилетний период наблюдается тенденция к уменьшению амплитуды сезонных вариаций напряженности поля и общих значений величины напряженности поля [1].

На основе данных мониторинга электрических величин приземного слоя атмосферы, проведенных в г. Томск в 2006–2017 гг., исследованы их медленные вариации, связанные с прохождением кучево-дождевых облаков и сопутствующих атмосферных явлений в теплый и холодный периоды года. Проведен статистический анализ медленных вариаций градиента потенциала электрического поля. Показано, что распределение общей длительности медленных вариаций градиента потенциала описывается степенным распределением, причем полученное распределение в теплый период года аппроксимируется двумя участками, а в холодный период — одним [5].

В работе [6] с использованием результатов натурных наблюдений выявлены закономерности суточной динамики скейлинговых и энергетических характеристик аэроэлектрического поля при различных состояниях приземной атмосферы. Показано, что короткопериодные аэроэлектрические пульсации в диапазоне частот $\Delta f = 0.001\text{--}1$ Гц обладают свойством самоподобия и фрактальной размерностью $D = 1.1\text{--}1.8$. Обнаружены участки с перемежаемостью на временных интервалах, характеризующихся сменой стратификации атмосферного пограничного слоя. Показано, что перемежаемость аэроэлектрического поля характеризуется мультифрактальностью с шириной спектра, существенно отличной от нуля, негауссовостью

распределения приращений поля, изменением показателей спектральной плотности от -2.3 до -4 для $\Delta f = 0.01\text{--}1$ Гц.

Проведены исследования влияния солнечной активности на вариации электрического поля в приземном слое атмосферы. На основании атмосферно-электрических наблюдений в высокогорных условиях Приэльбрусья установлено проявление форбуш-эффекта в вариациях электрического поля. Исследована связь электрического поля с солнечной и геомагнитной активностью [7].

Большое внимание уделяется разработке теоретических и численных моделей формирования структуры электродного слоя в приземной атмосфере, в частности, влияния аэрозолей и конвекции на проводимость приземного слоя. В работе [8] на основании анализа результатов натурных наблюдений и численного моделирования установлено, что развитие конвекции в атмосферном пограничном слое приводит к уменьшению электрической проводимости вблизи поверхности земли. Показано, что связанное с конвекцией усиление генерации турбулентности, сопровождающееся увеличением турбулентной кинетической энергии и дисперсии флуктуаций вертикальной скорости, способствует более интенсивному вертикальному перемешиванию радона и радиоактивных дочерних продуктов. Выполнены оценки варибельности электрической проводимости и напряженности аэроэлектрического поля, определяемых эмиссией радона, ионизацией воздуха, разделением зарядов на неоднородностях электрической проводимости, турбулентным транспортом радиоактивных элементов и объемных электрических зарядов [2].

В работах [9–11] рассмотрена электродинамическая модель горизонтально-однородного свободного от аэрозоля приземного слоя, состоящая из уравнений баланса для положительных и отрицательных легких ионов (аэроионов) и уравнения Пуассона. Получены аналитические выражения для стационарных распределений концентраций аэроионов, электрического поля и плотности электрического заряда в приближениях классического и турбулентного электродного эффекта [9]. Установлено, что высота классического электродного слоя в свободной от аэрозоля атмосфере составляет около 10 м, а его структура в основном определяется электрическим полем. При усилении электрического поля высота электродного слоя и, следовательно, масштаб распределения электрических

величин увеличиваются. При переходе к турбулентному режиму в приземной атмосфере высота электродного слоя увеличивается и достигает нескольких десятков метров [10]. Высота турбулентного электродного слоя определяется как электрическим полем, так и степенью турбулентного перемешивания. Усиление внешнего электрического поля ослабляет влияние турбулентности. Получены распределения электрических характеристик приземного слоя в зависимости от значений концентрации аэрозольных частиц в атмосфере и степени турбулентного перемешивания [11].

2. ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ

Концепция глобальной электрической цепи (ГЭЦ) играет фундаментальную роль в исследованиях атмосферного электричества, поскольку она объединяет все электрические процессы, происходящие в атмосфере, в единую концепцию. В последние годы интерес к изучению ГЭЦ постепенно увеличивается. Большое внимание в настоящее время уделяется численному моделированию ГЭЦ. Обычно входные данные моделей ГЭЦ состоят из распределений проводимости и плотности тока источника (представляющих разделение зарядов внутри грозы и электрифицированных ливневых облаков), поэтому параметризация этих величин является наиболее важной частью каждой модели ГЭЦ. В [12] была предложена новая параметризация проводимости на разных стадиях солнечного цикла, которая использовалась для оценки изменения параметров ГЭЦ из-за крупномасштабных изменений проводимости, связанных с солнечной активностью. Задача параметризации тока источника, соответствующего электрифицированным облакам разных типов, была рассмотрена в [13], а в [14] была предпринята попытка ввести дополнительные токи источника сейсмической природы. Проблема согласования теоретических предсказаний параметров ГЭЦ с наблюдениями обсуждалась в [15].

Гораздо более общие проблемы, касающиеся уравнений ГЭЦ, в которых используются ионосферные генераторы и анизотропная проводимость, были проанализированы с математической точки зрения в [16]. Авторы показали, что как квазистационарные, так и стационарные задачи, описывающие ГЭЦ с различными граничными условиями, корректны и удобны для реализации в численных моделях. Дальнейший анализ различных граничных условий на вер-

хней границе атмосферы был проведен в [17], наряду с оценками возмущений, вызванных грозой в ее точке магнитного сопряжения. В [18] рассматривалась реализация грозowych напряжений в численных моделях ГЭЦ, что особенно важно для задачи теоретического объяснения изменения ГЭЦ в масштабе 11-летних солнечных циклов [12]. Роль орографии Земли в анализе ГЭЦ обсуждалась в [19].

Другим важным направлением исследований является взаимодействие ГЭЦ с ионосферными и литосферными процессами. Проникновение нестационарных ионосферных электрических полей в нижнюю атмосферу было проанализировано в [20]. Связанная с этим проблема моделирования проникновения электрического поля из земли в ионосферу была рассмотрена в [21, 22]. Электрические поля на ионосферных высотах, создаваемые грозowymi генераторами, были оценены в [23]. Проблема взаимодействия литосферы и ионосферы, особенно в контексте землетрясений, была проанализирована и обсуждена в [24, 25].

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛАКАХ

Описание, моделирование и наблюдения электрических процессов в облаках являются важной составляющей исследований атмосферного электричества. Изучение электрических процессов в облаках охватывает широкий спектр задач, включающих теоретическое и экспериментальное исследование возникновения и эволюции конвективных систем, моделирование и прогноз развития грозowych облаков, поиск корреляций между регистрируемыми метеорологическими данными и наблюдаемой молниевой активностью.

Прогноз грозowych событий с помощью численных мезомасштабных моделей является одним из наиболее важных практических приложений моделирования электрических процессов в облаках. В работе [26] представлены статистические оценки 26 индексов неустойчивости атмосферы, широко используемых в мировой практике для прогноза грозовой активности, а также предложен новый индекс прогноза грозы с учетом вертикальной составляющей скорости ветра. В работе [27] также рассмотрены современные методы прогноза гроз с использованием численных моделей. Проведенный в цитируемой работе анализ возможности применения индекса молниевой активности LPI

для прогноза возникновения молниевых вспышек показал ряд недостатков, которые приводят к ухудшению достоверности прогноза при использовании косвенных индексов, вследствие чего был предложен новый алгоритм предсказания молниевой активности, основанный на прямом расчете электрического поля. Характерные значения электрических параметров, полученные с использованием разработанной параметризации, показали хорошую корреляцию с данными натурных измерений электрического поля и потенциалов в грозовых облаках. В работе [28] представлены результаты исследования мощного грозового события 1–2 июня 2015 г. на территории Нижегородской области с помощью численной модели WRF и разработанной в [27] параметризации электрических процессов. Показаны хорошее совпадение результатов моделирования радиолокационной отражаемости с данными метеорологического радиолокатора и соответствие рассчитанных электрических параметров данным разнесенного приема и регистрации электрических полей. В работе [29] представлена модель электризации кучево-дождевых облаков, использующая результаты прогноза с помощью численной мезомасштабной модели WRF-ARW в качестве входных данных и позволяющая прогнозировать параметры электрического поля в атмосфере, и проведено сравнение результатов прогноза с наблюдаемыми грозовыми очагами. При помощи численного моделирования также проведено исследование влияния гроз в бассейне Черного моря на химический состав атмосферы [30]. Установлено, что изменения поля температуры, связанные с грозовой активностью, выше в континентальной части региона, чем над водной поверхностью. В работе [31] представлены результаты моделирования влияния аэрозольного загрязнения воздуха на мощное конвективное облако, его электрическую структуру и осадки. Продемонстрировано влияние аэрозольных примесей на динамические, микрофизические и электрические характеристики облака. Показано, что общее число ледяных кристаллов и градовых зародышей резко увеличивается (примерно в 5 и 2 раза соответственно), максимальная интенсивность ливня увеличивается в 1.4 раза, а сумма осадков — в 1.8 раза. Увеличенная концентрация естественного аэрозоля с льдообразующими свойствами изменяет пространственное распределение зарядов в облаке и создает инверсную электрическую структуру.

Особый интерес в рамках проблемы электризации облаков представляет экспериментальное и теоретическое изучение процессов электризации в интенсивных потоках пыли, песка или снега, в том числе эффектов, связанных с турбулентным перемешиванием частиц. Для проведения экспериментальных измерений флуктуаций электрического тока сальтации и концентрации сальтирующих песчинок, а также турбулентных пульсаций скорости ветра, был создан аппаратный комплекс, позволивший выполнить синхронные измерения указанных параметров на опустыненной территории в Калмыкии [32]. Данные измерения позволили впервые получить распределение удельного заряда сальтирующих песчинок — при среднем значении 48.5 мкКл/кг удельный заряд менялся от 10 до 150 мкКл/кг. Также были установлены закономерности трансформации статистических характеристик вариаций таких параметров, как скорость ветра, концентрация песчинок, плотность электрического тока сальтации, обусловленной нелинейными процессами в ветропесчаном потоке. Выполненная в работе [33] скоростная видеосъемка ветропесчаного потока позволила обнаружить квазигоризонтальные траектории песчинок в нижнем миллиметровом слое сальтации, на основе чего была предложена модель профиля ветра для условий стационарной сальтации.

Кроме того, в 2017–2018 гг. большое внимание было уделено изучению влияния турбулентности на процессы электризации частиц в атмосфере. В работе [34] проведено теоретическое исследование вклада турбулентности в электризацию грозовых облаков, метелей и пылевых бурь, и предложена модель генерации крупномасштабного электрического поля в слабопроводящей среде, содержащей два типа частиц, заряжающихся при соударениях. Обнаружено, что влияние турбулентности существенно отличается в случае индукционного и безындукционного механизмов разделения зарядов. Однако при обоих механизмах турбулентность инициирует дополнительный рост крупномасштабного электрического поля в рассмотренных системах, что является существенным эффектом особенно в случае электрического поля, близкого к пробойному значению. Работы [35, 36] посвящены более детальному исследованию влияния турбулентности на электризацию грозовых облаков. Выполненные в данных работах аналитические оценки возмущений электрических параметров грозового облака, обусловленных турбулентны-

ми эффектами, при различных характеристиках турбулентности и гидрометеоров были использованы для совершенствования параметризации электрических процессов и численного моделирования грозовых событий. Детальное сравнение результатов численного моделирования грозовых событий без учета и с учетом турбулентных эффектов позволило выявить ряд характерных особенностей в изменении распределений электрических параметров грозового облака.

4. ФИЗИКА МОЛНИЙ

В последние годы в России проводились активные экспериментальные и теоретические исследования в области физики молнии. Так, на площадке Комплексного высоковольтного стенда ВНИЦ ВЭИ (г. Истра) продолжались эксперименты по инициации восходящих и нисходящих лидеров при развитии длинной искры с использованием высоковольтного генератора импульсных напряжений, а также с помощью искусственного заряженного облака водного аэрозоля [37]. С помощью уникального высоковольтного оборудования (генератор импульсных напряжений до 6 МВ) и скоростной камеры с экспозицией от 0.2 нс впервые получены детальные изображения стримерных вспышек скачков положительного и отрицательного лидеров длинной искры [38]. Обнаружено сходство формы и структуры стримерных вспышек лидеров обеих полярностей в противоположность существовавшему доньше представлению об их различии. Обнаружена схожесть формы канала скачка положительного лидера с каналами длинных стримеров, что позволило выдвинуть гипотезу о формировании скачка положительного лидера в канале стримера, в отличие от скачка отрицательного лидера, формируемого в процессе роста пространственного лидера [39]. Также впервые были получены детальные оптические и ИК изображения области контакта положительного и отрицательного лидеров и сквозной фазы на основе модельных экспериментов с использованием отрицательного заряженного облака. Установлено, что скорости положительных и отрицательных лидеров внутри общей стримерной зоны совпадают и увеличиваются с ростом силы тока. Полученные результаты важны для решения фундаментальных проблем динамики главной стадии молнии [40]. В работе [41] впервые продемонстрирована возможность инициирования электрических разря-

дов арбалетным болтом (снарядом), движущимся в электрическом поле облака отрицательно заряженных капель воды.

В работах [42–45] приводятся результаты экспериментальных исследований формирования восходящих лидеров с моделями молниеотводов и защищаемых объектов при воздействии искусственного грозового облака отрицательной полярности. Выявлены два варианта развития восходящего лидера: непрерывный и с остановкой в промежутке. Установлено, что среднее значение тока восходящего лидера для случая непрерывного развития лидера в промежутке в 1.4 раза больше, чем для случая, где имеет место остановка лидера. Найдено, что встречный нисходящий лидер из искусственного грозового облака в целом отклоняется от вертикали больше, чем восходящий лидер с модели молниеотвода или объекта [42]. Показано существенное влияние формы и размеров моделей молниеотводов и объектов на вероятность их поражения разрядом из облака. Определены оптимальные размеры стержневых и тросовых молниеотводов, обеспечивающие опережающий старт с них восходящих лидеров по сравнению с формированием восходящих лидеров с защищаемых объектов. Анализ некоторых экспериментальных данных показал, что высокие частоты (до нескольких сотен МГц) в спектре сигналов, регистрируемых антеннами, проявляются в случаях, когда мощная стримерная корона формируется с части канала главного разряда вблизи границ заряженного и часто соответствуют облачной части формирования разряда [43]. Экспериментально показано, что группы крупных гидрометеоров различной формы значительно увеличивают вероятность инициирования канального разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей, особенно при положительной полярности облака [44, 45]. Полученные результаты могут быть использованы при разработке метода целенаправленного искусственного инициирования молнии между грозовым облаком и землей.

Также активно обсуждаются фундаментальные проблемы физики молнии и последние достижения инструментальной (прежде всего спутниковой) регистрации разрядных явлений в атмосфере [46]. Формирование в грозовом облаке плазменных образований с параметрами, необходимыми для зарождения и развития молниевых разрядов, рассматривается как индуцированный электростатическим шумом неравновесный фазовый переход [47]. В рамках новой трехмерной модели развития молнии, включающей

двунаправленное распространение разряда, его динамическое вероятностное ветвление и возможность одновременного роста и/или распада периферийных ветвей, а также впервые учитывающей эволюцию проводимости, продольного электрического поля и тока разрядных каналов, продемонстрировано доминирующее влияние нижнего слоя положительного заряда на типологию и динамику молниевых разрядов в грозовом облаке [48].

Впервые предложена последовательная теоретическая модель, способная объяснить близкие к логнормальным распределения пиковых токов в молниевых разрядах облако–земля, наблюдаемые при измерениях токов естественных и триггерных молний [49]. Согласно модели, распределения пиковых токов первых и последующих компонент молниевых вспышек не являются строго логнормальными, но близки к таковым в определенном диапазоне значений. В области экстремально больших пиковых токов (порядка и более 100 кА) распределение может существенно отличаться от логнормального, что важно учитывать при решении задач молниезащиты.

Особое внимание уделено исследованию такого относительно недавно открытого явления, как компактный внутриоблачный разряд в грозовом облаке. В работе [50] развивается гипотеза, согласно которой компактный внутриоблачный разряд является следствием развития лавин релятивистских убегающих электронов высоких энергий, инициируемых широким атмосферным ливнем, и пробоя на убегающих электронах. Проведено численное моделирование развития положительного стримера вокруг капель заряженной воды при атмосферном давлении, типичном для высоты грозового облака и на различных фоновых полях, размерах капель и зарядах [51].

В работах [52, 53] предложена новая фрактальная модель компактного внутриоблачного разряда, рассматривающая его как результат взаимодействия двух (или более) биполярных стримерных структур, формирующихся в сильном крупномасштабном электрическом поле грозового облака. Показано, что одиночная биполярная стримерная структура по мере своего развития накапливает вблизи своих концов значительные электрические заряды разного знака. Исследованы особенности электромагнитного излучения компактного внутриоблачного разряда в рамках предложенной модели. Показано, что высокочастотное излучение на

предварительной стадии компактного разряда пренебрежимо мало по сравнению с излучением на основной стадии. Также установлено, что на предварительной стадии разряда всплеск высокочастотного излучения хорошо коррелирует с максимумом импульса низкочастотного электрического поля, а спектр высокочастотного излучения имеет степенной вид с показателем, лежащем в интервале от -2 до -1 .

Схема природных пожаров климатической модели Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН) расширена учетом влияния молниевой активности и плотности населения на частоту возгораний и подавление пожаров [54]. С использованием КМ ИФА РАН проведены численные эксперименты в соответствии с условиями проекта сравнения климатических моделей CMIP5 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 5). Частота молниевых вспышек задавалась в соответствии со спутниковыми данными LIS/OTD. В результате проведенных расчетов оказалось, что доминирующую роль в возникновении природных пожаров играют антропогенные возгорания, за исключением регионов субполярных широт и в меньшей степени тропических и субтропических регионов. Учет связи числа пожаров с молниевой активностью и плотностью населения в модели усиливает влияние характеристик природных пожаров на изменения климата в тропиках и субтропиках по сравнению с версией КМ ИФА РАН без учета влияния источников возгорания на крупномасштабные характеристики природных пожаров.

5. ВЫСОТНЫЕ РАЗРЯДЫ

Исследование высотных разрядов российскими учеными продолжается достаточно активно. Проводятся спутниковые наблюдения, лабораторное и численное моделирование. Изучению вопросов инициации спрайтов посвящена работа [55]. Сферическая плазменная неоднородность, находящаяся на мезосферных высотах в квазиэлектростатическом поле грозовой тучи, рассматривается в качестве возможной причины образования спрайта. В предположении, что проводимость плазменного образования контролируется процессами ударной ионизации и прилипания электронов к нейтральным молекулам, развивается простая полуаналитическая модель ионизационной неустойчивости в квазиэлектростатическом поле. В работе [56] предложена численная радиально-симметрич-

ная самосогласованная модель спрайта на высотах от 60 до 90 км. Проведен анализ возмущения концентрации ионов, электронов, нейтральных частиц и интенсивности эмиссии фотонов на высотах мезосферы для спрайта в ночных условиях. Показано, что вследствие быстрого вытеснения электрического поля в верхней части диффузной области спрайта наблюдается тороидальная структура электрического поля и излучения спрайта. На высотах 83–87 км происходит уменьшение концентрации электронов, связанное с возрастанием роли диссоциативного прилипания к молекулярному кислороду, что существенно уменьшает проводимость на этих высотах. В работе [57] рассмотрено влияние грозовой активности на плазмохимические процессы в воздухе на высотах 95–100 км. Показано, что электрические поля облаков, заряженных униполярно после разрядов молнии, приводят к возрастанию концентрации электронов на этих высотах, что должно приводить к заметному увеличению ошибок позиционирования глобальных спутниковых систем.

Серия статей посвящена выводу на орбиту микроспутника «Чибис-М»: разработано универсальное транспортно-пусковое устройство для запуска микроспутников с массой 40–50 кг; впервые отработана схема увеличения высоты орбиты грузового корабля «Прогресс» для вывода микроспутников на орбиту после выполнения им основной задачи — доставки грузов на МКС, что обеспечило значительный экономический эффект; разработан полнофункциональный МС-комплекс; отработаны циклы его испытаний и схемы управления полетом космического аппарата [58–60]. Перспективы изучения при помощи спутников низкочастотных электромагнитных полей, генерируемых как обычными молниями в тропосфере, так и стратосферными и мезосферными электрическими разрядами типа спрайт и голубой джет анализируются в [61], определяются уровни чувствительности приборов, необходимых для регистрации различных эффектов воздействия разрядов на атмосферу. Результаты наблюдений, полученные со спутника «Вернов», в сравнении с данными со спутников «Университетский-Татьяна-1.2» анализируются в [62].

Лабораторное моделирование высотных разрядов проводится двумя российскими группами. В Институте прикладной физики РАН создана установка для экспериментального исследования высоковольтных разрядов в газе с градиентом давления [63], показана возможность

моделирования спрайтов и джетов в градиенте давления в импульсном режиме на большой плазменной установке. Возможность применения для моделирования высотных разрядов с помощью так называемого «апокампического» разряда обсуждается в ряде работ [64, 65].

6. ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

Изучение высокоэнергичных явлений в атмосфере Земли — молодой и стремительно развивающийся раздел атмосферной физики, тесно связанный с исследованием высотных разрядов. Феномены возникновения потоков энергичных элементарных частиц в грозовых облаках делятся на два класса, соотношение и взаимосвязь которых остается дискуссионным вопросом: гамма-вспышки земного происхождения (terrestrial gamma-ray flashes, TGF) и приземные грозовые увеличения потока энергичных частиц (thunderstorm ground enhancements, TGE).

Для получения дополнительных сведений о TGF научным коллективом ИЯФ РАН и ИКИ РАН применен комплекс аппаратуры РЭЛЕК на спутнике «Вернов». Обработка данных со спутника «Вернов» привела к составлению каталога всплесков гамма-излучения земного происхождения, опубликованного в [66]. TGF, входящие в каталог, имеют характерную длительность ~400 мкс, за которые фиксируются 10–40 гамма-квантов. Для каждого гамма-всплеска приводятся временные профили, спектральные характеристики и географическое положение, а также результат сопоставления с показаниями других приборов, установленных на спутнике «Вернов». Обсуждается кандидат в гамма-всплески земного происхождения, зарегистрированный в приполярной области над Антарктидой.

Развитие методов обработки данных об энергичных событиях в земной атмосфере отражено в публикации [67], где изложены результаты комплексного исследования архивных наблюдательных данных гамма-спектрометра SPI, накопленных за 7 лет работы обсерватории INTEGRAL. Отдельно обсуждены проблемы обработки массивов натурных данных, в том числе алгоритма поиска и методики автоматической классификации обнаруженных событий (гамма-всплески как земного, так и космического происхождения) на основе комплекса критериев.

В работе [68] сопоставлено расположение географических областей избытка/дефицита TGF

с расположением областей повышенной концентрации тропосферных примесей. В качестве меры загрязнения тропосферы были использованы данные инструмента OMI (KNMI/NASA) о содержании диоксида азота NO_2 в тропосфере. Показано, что содержание NO_2 в «зонах дефицита» TGF вдвое превышает соответствующее значение в «зонах избытка» TGF. Дополнительный анализ распределения концентрации NO_2 вокруг локаций TGF с высоким пространственным разрешением на основе радиоданных WWLLN (World Wide Lightning Location Network) показал отсутствие особенностей в распределении NO_2 на масштабе десятков километров, характерных для городских агломераций.

Состояние мировых исследований в области потоков энергичных частиц (TGEs), зарождающихся в грозовых облаках и регистрируемых наземными детекторами, определяется деятельностью, ведущейся на исследовательской станции Арагац. Огромный массив наблюдательных данных об энергичных атмосферных явлениях проанализирован в работах [69–72], краткие результаты которых состоят в следующем. Показано, что почти всегда TGE прерывается после молниевой вспышки, произошедшей в том же грозовом облаке. Анализ спектра регистрируемых наземными детекторами частиц показал, что сразу после молниевой вспышки исчезает высокоэнергичная часть TGE. Уменьшение плотности потока энергичных частиц от грозового облака на масштабе миллисекунд совпадает с молниевой вспышкой [71].

Ключевой вопрос атмосферной физики — проблема инициации молниевых разрядов — подпитан новыми свидетельствами, полученными из наблюдений TGE. Временное разрешение использованной аппаратуры позволило связать динамику потока энергичных частиц с перераспределением зарядов внутри грозового облака. В работе [70] на основе рассмотрения в рамках модели лавин релятивистских убегающих электронов утверждается, что развитие события TGE в грозовом облаке благоприятствует инициации отрицательного молниевых разряда типа «облако–земля». Теоретические аспекты физики потоков энергичных частиц от грозовых облаков рассмотрены в работе [72], где утверждается достаточность для объяснения наблюдательных данных модели лавин релятивистских убегающих электронов без предложенного Двайером механизма релятивистской обратной связи.

Многолетний цикл экспериментальных работ по исследованию вариаций вторичных ча-

стиц космических лучей во время гроз, проводимых на установке «Ковер» БНО ИЯИ РАН, обеспечил основания предположить возможность протекания в атмосфере электрического пробоя на убегающих электронах в припороговом режиме [73, 74]. Пробой характеризуется наличием электрического поля в стратосфере с разностью потенциалов ~ 100 МВ [74]; в поле лавинообразно размножаются убегающие электроны, генерирующие гамма-кванты с энергией до 30 МэВ. Более известным аналогом предполагаемого разряда является тлеющий разряд несамостоятельного типа. В [73] рассматривается переход разряда в самостоятельное состояние путем «циклической генерации» тормозных фотонов. Область пробоя обсуждаемого типа, с большей вероятностью образующаяся в стратосфере между верхним зарядом грозового облака и ионосферой, должна сопровождаться свечением и возмущать электрическое и магнитное поле с характерным временем в несколько минут, что положено в основу принципа обнаружения разряда по данным измерений. Установлена корреляция продолжительного непрерывного свечения грозовых облаков с аномальным возмущением вторичных частиц космических лучей, регистрируемых на уровне земли. Описан случай прерывания глобальных микропульсаций геомагнитного поля в результате медленно протекающего пробоя стратосферы на убегающих электронах в припороговом режиме [73]. Зарегистрировано взаимодействие грозового фронта с высыпанием протонов в атмосферу из радиационного пояса Земли, вследствие сейсмической активности, отдельно обсуждено влияние сейсмической активности на свечение ночного неба [74].

Измерения приземных потоков энергичных частиц, производимые на станции Тянь-Шань, привели к получению новых сведений о широких атмосферных ливнях и энергичном излучении молниевых разрядов [75–77]. Изучен энергетический спектр частиц широкого атмосферного ливня в диапазоне 10^{14} – 10^{17} эВ. Показано, что высокоэнергичное излучение молниевых разрядов наблюдается в течение 10 с после вспышки; одновременно обнаружены гамма-излучение, энергичные электроны и нейтроны [76]. Получены временные ряды порожденного атмосферными разрядами потока нейтронов с помощью детекторов, расположенных на поверхности, а также — под землей [75, 77]. Существенная часть нейтронов излучается в короткий промежуток времени сразу после разряда (200–400 мкс).

Величина временного промежутка позволяет предположить, что нейтроны в основном генерируются в плотной среде (предположительно в почве). Наблюдения на высокогорной станции Тянь-Шань позволили одновременно зарегистрировать излучение в радиочастотном (0.1–30 МГц), инфракрасном (610–800 нм), ультрафиолетовом (240–380 нм) и мягком рентгеновском (0.1–4 МэВ) диапазонах [77]. Следующим шагом в исследовании грозовых процессов на станции Тянь-Шань стала регистрация оптического, радио- и гамма-излучения, испущенного во время яркой стадии молниевых разрядов. В течение сезона 2016 г. было зарегистрировано несколько сотен всплесков оптического излучения, обусловленных ночными молниями ~30 грозовых событий, на расстоянии 3–10 км от источника. Продемонстрирована важность наблюдения молниевых разрядов в широком диапазоне энергий для проверки и сравнения следствий различных теоретических моделей атмосферных разрядов, особый интерес среди которых представляет так называемый «темный разряд» («темная молния»), предположение о существовании которого основано на модели лавин релятивистских убегающих электронов. Детальное выяснение взаимосвязи потоков энергичных частиц и молниевых разрядов, а также возможных условий развития «темного разряда» — направление будущих исследований, опирающихся на ансамбль данных об энергичных событиях, который продолжает пополняться благодаря наблюдениям на высокогорных станциях Арагац и Тянь-Шань.

Обогащают набор данных об энергичных событиях в атмосфере также и наблюдения усиленных электрическим полем грозовых облаков потоков нейтронов — одной из основных компонент вторичных космических лучей. Получены предварительные результаты исследований с помощью созданного в ИКФИА СО РАН комплекса приборов для синхронной регистрации вариаций потока нейтронов, напряженности электрического поля и электромагнитного излучения во время грозовых разрядов [78]. Интенсивность потока нейтронов во время ближних молний в окрестности г. Якутска измеряется с помощью счетчиков СНМ-15 (в свинцовой оболочке и без нее) с разрешением в 10 мкс. Проанализированы вариации напряженности электрического поля и нейтронов во время метелей в заполярном Тикси, в которых наблюдались мощные снеговые заряды с сильными ветрами со скоростями до 60 м с⁻¹.

Показано, что при рассматриваемых событиях напряженность электрического поля может менять направление на противоположное, достигая величин 90 кВ м⁻¹, что не сопровождается электрическими разрядами и всплесками нейтронов.

Данные об усилениях потока нейтронов во время грозы также с успехом применены для исследования грозовых ядерных реакций [79]. Проведена проверка предположения о том, что усиление потока нейтронов обусловлено фотоядерными реакциями за счет гамма-квантов тормозного излучения лавин убегающих электронов высоких энергий, способных развиваться в грозовом электрическом поле. Обсуждена важность различения отклика детекторов на нейтроны, электроны и гамма-кванты. Выполнены оценки вклада гроз в вариации содержания атмосферного радиоуглерода ¹⁴C, широко используемого для датировки археологических артефактов и художественных произведений [80]. Показано, что измеренные значения потока грозовых нейтронов на один разряд молнии в областях с сильной грозовой активностью обеспечивают локальную скорость наработки радиоуглерода, сопоставимую с наработкой космическим излучением. Обнаружен ранее неизвестный естественный источник не только радиоуглерода ¹⁴C, но и других изотопов в атмосфере, таких как ¹³N, ¹⁵N, ¹⁵O, ¹⁷O, ¹³C.

7. ИНТЕГРИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРОЗ

Исследование региональных особенностей электрического поля атмосферы в условиях формирования мощных конвективных (грозовых) облаков имеет существенное значение, поскольку вариации его напряженности характеризуют процессы электризации развивающихся в регионе погодных явлений и дают информацию о региональных параметрах глобальной электрической цепи. Фактических данных о влиянии опасных погодных явлений (ливни, грозы и др.), крупномасштабных атмосферных циркуляций, эффектов солнечно-земной взаимосвязи на дневные и сезонные вариации атмосферного электрического поля в регионах сегодня еще не достаточно для организации надежного штормового предупреждения.

Важной задачей является проведение совместных исследований формирования и электризации грозовых облаков путем натурных наблюдений и численного моделирования. Работы [81, 82]

посвящены совместному анализу данных инструментальных наблюдений грозорегистратора LS8000, метеорологических радиолокаторов, датчиков напряженности электрического поля и результатов численного моделирования электрических параметров мощных конвективных облаков по трехмерной модели, разработанной в Высогогорном геофизическом институте, который позволил выявить особенности влияния электрических процессов на формирование микроструктурных характеристик конвективных облаков и осадков. Использовалась 3-мерная нестационарная численная модель развития мощного конвективного облака с детализированным описанием гидротермодинамических, микрофизических и электрических процессов в неустойчивой атмосфере с учетом вертикального профиля скорости и направления ветра. Данная модель определяла величину объемных зарядов облаков, электростатический потенциал облака, создаваемого этими зарядами, а также горизонтальные и вертикальные составляющие электрического поля облака в целом. Параллельно с этим, моделью рассчитывалась величина радиолокационной отражаемости облаков на длинах волн 3.2 и 10 см для сопоставления с фактическими радарными данными. Результаты расчетов на данной модели показали, что взаимодействие процессов в мощных конвективных облаках носит нелинейный характер и играет важную роль в формировании микроструктуры облака.

Для выявления взаимосвязей характеристик электрических разрядов с параметрами кучево-дождевого облака в процессе его развития на Северном Кавказе проведен анализ одновременных радиолокационных, радиометрических (с помощью радиометра SEVIRI, установленного на спутнике «Meteosat») и радиопеленгационных измерений [83]. Установлены корреляция между масштабом неоднородности поля радиационной температуры облака и частотой электрических разрядов, а также увеличение частоты электрических разрядов при увеличении интенсивности осадков; при этом максимум частоты электрических разрядов достигался при интенсивности осадков около 70 мм/ч.

Проведенный в работе [84] анализ данных наблюдений радиолокатора МРЛ-5 и грозопеленгационной системы LS8000 за развитием мощного грозо-градового облака показал наличие связи суммарного тока молний в НЧ-диапазоне с частотой молний в НЧ- и ОНЧ-диапазонах. По данным измерений общий заряд, перенесен-

ный отрицательными молниевыми разрядами из облака на землю, составил 387 Кл, среднее значение заряда на 1 молнию — 0.44 Кл. Для исследования мощного грозо-градового облака над Пятигорском 29 мая 2012 г., сопровождавшегося сильным градом, использована трехмерная нестационарная модель конвективного облака [85]. Полученные значения характеристик облака позволили проанализировать эволюцию поля осадков и зарядовой структуры при развитии облака.

Исследования радиоизлучения близких гроз, проводимые в Нижегородском регионе, показали, что радиоизлучение сосредоточено во временных интервалах порядка долей микросекунды с промежутком в несколько микросекунд между импульсами, и не обнаруживает плавного нарастания [86]. Радиоизлучение регистрируется не только во время молниевых разрядов, но также и в промежутках между ними. В работах [87, 88] продемонстрирована и подтверждена существенная зависимость грозовой активности от типа подстилающей поверхности. Так, интенсивность гроз над мегаполисом в среднем на 46% больше, чем над слабо населенной территорией. В то же время интенсивность гроз над районами густого леса примерно в 2.4 раза больше, чем над сельхозугодьями.

В работе [89] представлены результаты 5-летнего исследования грозовой активности в различных регионах Северной Азии. Сведения об этих параметрах — плотности наземных разрядов и соответствующих токах — необходимы для более эффективной молниезащиты. Отсутствие регулярных спутниковых и наземных наблюдений в этом регионе обусловило необходимость применения данных глобальной сети WWLLN. Эффективность обнаружения этой системой молний в 2012 г. в среднем составила около 15% для разрядов «облако—земля» и более 30% для молний с пиковым значением тока свыше 100 кА. По данным авторов, средняя плотность разрядов молний выявила постепенное увеличение за этот период, а количество внутриоблачных разрядов преобладало над разрядами «облако—земля». Здесь следует отметить, что вероятность обнаружения внутриоблачных разрядов сетью WWLLN достаточно мала. В Центральной Якутии доля молний «облако—земля» составляла в летний период 40–60%. При осреднении местоположения гроз на сетке $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ были обнаружены локальные максимумы повторяемости гроз, обусловленные влиянием рельефа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2015–2018 гг. исследования атмосферного электричества в Российской Федерации получили новый толчок к развитию. 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 том числе с использованием уникальных лабораторных стендов и натурного стенда ВЭИ в Истре. В ряде регионов России успешно продолжают исследования климатологии атмосферных электрических явлений, региональных метеорологических особенностей гроз, совершенствуются методы моделирования и прогноза грозных явлений. Проведены многочисленные лабораторные эксперименты по исследованию особенностей развития молниевых разрядов: как облако–земля, так и земля–ионосфера. Выведен на орбиту микроспутник «Чибис-М», главной задачей которого является исследование разрядных явлений в верхней атмосфере. Проанализированы результаты наблюдений, полученные со спутника «Вернов». Измерения приземных потоков энергичных частиц, производимые на станции Тянь-Шань, привели к получению новых сведений о широких атмосферных ливнях и энергичном излучении молниевых разрядов.

За последние 3 года были успешно проведены конференции, посвященные проблемам атмосферного электричества: V и VI Международные конференции по молниезащите (Санкт-Петербург, 2016 и 2018), Вторая и Третья Всероссийские конференции «Глобальная электрическая цепь» (Борок, Ярославская обл., 2015 и 2017). Российские ученые (12 человек, из них 11 представителей учреждений РАН) приняли активное участие в XVI Международной конференции по атмосферному электричеству (ICAE 2018, Нара, Япония, июнь 2018 г.), которая проводится раз в 4 года и является основным международным форумом по атмосферному электричеству.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект № 0035-2019-0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Торопов А.А., Козлов В.И., Каримов Р.Р.* Вариации атмосферного электрического поля по наблюдениям в Якутске // Наука и образование. 2016. № 2. С. 58–65.
2. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Mareev E.A.* Electrodynamic properties and height of atmospheric convective boundary layer // Atmos. Res. 2017. V. 194. P. 119–129.
3. *Редин А.А., Куповых Г.В., Кудринская Т.В. и др.* Атмосферно-электрические наблюдения как метод контроля техногенного воздействия на атмосферу // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 1. С. 271–277.
4. *Панчишкина И.Н., Петрова Г.Г., Петров А.И.* Экспериментальные исследования процессов вертикального переноса заряда в приземной атмосфере // Геомагнетизм и аэрномия. 2017. Т. 57. № 3. С. 376–381.
5. *Пустовалов К.Н., Нагорский П.М.* Сравнительный анализ электрического состояния приземного слоя атмосферы при прохождении кучево-дождевых облаков в теплый и холодный периоды года // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 6. С. 451–455.
6. *Анисимов С.В., Шихова Н.М.* Фрактальные свойства аэроэлектрических пульсаций // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 4. С. 41–58.
7. *Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Редин А.А.* Влияние солнечной активности на вариации электрического поля в приземном слое атмосферы // Изв. ВУЗов. Физика. 2016. Т. 59. № 12–3. С. 217–221.
8. *Анисимов С.В., Галиченко С.В.* Транспорт радона и формирование электрического состояния атмосферного пограничного слоя // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9. № 4. С. 7–14.
9. *Клово А.Г., Куповых Г.В., Свидельский С.С. и др.* Исследования структуры электродного слоя в приземной атмосфере // Изв. ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2018. № 1. С. 88–95.
10. *Куповых Г.В., Клово А.Г., Тимошенко Д.В. и др.* Приближенное аналитическое решение задачи об электродинамическом состоянии приземной атмосферы в условиях аэрозольного загрязнения // Изв. ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2018. № 2. С. 84–89.
11. *Морозов В.Н., Куповых Г.В., Редин А.А. и др.* Нестационарное физико-математическое моделирование электрических процессов в приземном слое атмосферы с учетом субмикронных аэрозольных частиц // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2017. № 584. С. 36–56.
12. *Slyunyaev N.N., Mareev E.A., Zhidkov A.A.* On the variation of the ionospheric potential due to large-scale radioactivity enhancement and solar activity // J. Geophys. Res. Sp. Phys. 2015. V. 120. № 8. P. 7060–7082.

13. Слюняев Н.Н., Жидков А.А. О параметризации источников глобальной электрической цепи // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2016. Т. 59. № 3. С. 223–242.
14. Намгаладзе А.А., Карнов М.И. Ток проводимости и сторонний электрический ток в глобальной электрической цепи // Химическая физика. 2015. Т. 34. № 10. С. 8–11.
15. Морозов В.Н., Соколенко Л.Г., Зайнетдинов Б.Г. Глобальная электрическая цепь в атмосфере: теоретические модели и экспериментальные данные // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2018. № 589. С. 98–113.
16. Kalinin A.V., Slynunayev N.N. Initial-boundary value problems for the equations of the global atmospheric electric circuit // J. Math. Anal. Appl. 2017. V. 450. № 1. P. 112–136.
17. Денисова Н.А., Калинин А.В. Влияние выбора граничных условий на распределение электрического поля в моделях глобальной электрической цепи // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2018. Т. 61. № 10. С. 831–842.
18. Slynunayev N.N., Kalinin A.V., Mareev E.A. Thunderstorm generators operating as voltage sources in global electric circuit models // J. Atmos. Solar-Terrestrial-Phys. 2019. V. 183. P. 99–109.
19. Денисенко В.В., Якубайлик О.Э. Учет рельефа при вычислении сопротивления глобального атмосферного проводника // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1. № 1. С. 104–108.
20. Морозов В.Н. Проникновение нестационарных ионосферных электрических полей в нижние слои атмосферы в модели глобальной электрической цепи // Геомагнетизм и аэронавигация. 2018. Т. 58. № 1. С. 119–124.
21. Denisenko V.V., Nesterov S.A., Boudjada M.Y. et al. A mathematical model of quasistationary electric field penetration from ground to the ionosphere with inclined magnetic field // J. Atmos. Solar-Terrestrial-Phys. 2018. V. 179. P. 527–537.
22. Денисенко В.В. Оценка напряженности электрического поля, проникающего от поверхности земли в ионосферу // Химическая физика. 2015. Т. 34. № 10. С. 44–50.
23. Denisenko V.V., Rycroft M.J., Harrison R.G. Mathematical Simulation of the Ionospheric Electric Field as a Part of the Global Electric Circuit // Surv. Geophys. 2019. V. 40. № 1. P. 1–35.
24. Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В. и др. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера–атмосфера–ионосфера–магнитосфера, инициируемых ионизацией // Геомагнетизм и аэронавигация. 2015. Т. 55. № 4. С. 540–558.
25. Denisenko V.V., Boudjada M.Y., Lammer H. Propagation of Seismogenic Electric Currents Through the Earth's Atmosphere // J. Geophys. Res. Sp. Phys. 2018. V. 123. № 5. P. 4290–4297.
26. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 27–37.
27. Дементьева С.О., Ильин Н.В., Мареев Е.А. Расчет электрического поля и индекса молниевой активности в моделях прогноза погоды // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 210–217.
28. Шаталина М.В., Дементьева С.О., Мареев Е.А. Мониторинг и моделирование грозовых событий в Нижегородском регионе: интенсивная гроза 1–2 июня 2015 г. // Метеорология и гидрология. 2016. № 11. С. 81–87.
29. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Прогноз грозовой активности с помощью модели электризации кучево-дождевых облаков // Метеорология и гидрология. 2017. № 2. С. 5–19.
30. Коломеец Л.И., Смышляев С.П. Прямые и обратные эффекты между грозовой активностью, температурой и составом атмосферы в региональном масштабе: чувствительные тесты с WRF-CHEM // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2017. № 585. С. 187–211.
31. Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Гонпалакришнан В. и др. Численное моделирование влияния сильного аэрозольного загрязнения атмосферы на динамику электрической структуры кучево-дождевого облака // Метеорология и гидрология. 2015. № 12. С. 5–18.
32. Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Карнов А.В. и др. Вариации удельного заряда сальтирующих песчинок в ветропесчаном потоке на опустыненной территории // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 1. С. 31–39.
33. Горчаков Г.И., Карнов А.В., Копейкин В.М. и др. Влияние силы Сэфмана, подъемной силы и электрической силы на перенос частиц в ветропесчаном потоке // Доклады Академии наук. 2016. Т. 467. № 3. С. 336.
34. Mareev E.A., Demytyeva S.O. The role of turbulence in thunderstorm, snowstorm, and dust storm electrification // J. Geophys. Res. Atmos. 2017. V. 122. № 13. P. 6976–6988.
35. Дементьева С.О., Мареев Е.А. Моделирование электрических параметров гроз с учетом турбулентных эффектов // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2018. Т. 61. № 8–9. С. 633–644.
36. Дементьева С.О., Мареев Е.А. О вкладе турбулентности в электризацию грозовых облаков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 1. С. 28–35.
37. Kostinskiy A.Yu., Syssoev V.S., Bogatov N.A. et al. Observation of a new class of electric discharges within artificial clouds of charged water droplets and its implication for lightning initiation within thun-

- derclouds // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. № 19. P. 8165–8171.
38. *Rakov V.A., Mareev E.A., Tran M.D. et al.* High-Speed Optical Imaging of Lightning and Sparks: Some Recent Results // *IEEE Trans. Power Energy.* 2018. V. 138. № 5. P. 321–326.
 39. *Kostinskiy A.Yu., Syssoev V.S., Bogatov N.A. et al.* Abrupt Elongation (Stepping) of Negative and Positive Leaders Culminating in an Intense Corona Streamer Burst: Observations in Long Sparks and Implications for Lightning // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2018. V. 123. № 10. P. 5360–5375.
 40. *Kostinskiy A.Yu., Syssoev V.S., Bogatov N.A. et al.* Observations of the connection of positive and negative leaders in meter-scale electric discharges generated by clouds of negatively charged water droplets // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2016. V. 121. № 16. P. 9756–9766.
 41. *Kostinskiy A.Y., Syssoev V.S., Mareev E.A. et al.* Electric discharges produced by clouds of charged water droplets in the presence of moving conducting object // *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* 2015. V. 135. P. 36–41.
 42. *Темников А.Г., Орлов А.В., Черненский Л.Л. и др.* Исследование механизмов формирования совместно развивающихся восходящих лидеров как стадии поражения молнией наземных объектов // *Вестник Московского энергетического института.* 2015. № 5. С. 58–64.
 43. *Темников А.Г., Орлов А.В., Черненский Л.Л. и др.* Исследование систем определения места удара и параметров разряда молнии с использованием искусственного грозового облака // *Вестник Московского энергетического института.* 2015. № 6. С. 80–86.
 44. *Темников А.Г., Черненский Л.Л., Орлов А.В. и др.* Применение искусственных грозовых ячеек для исследования проблем инициирования молнии между грозовым облаком и землей // *Изв. РАН. Энергетика.* 2017. № 2. С. 48–61.
 45. *Темников А.Г., Черненский Л.Л., Орлов А.В. и др.* Физическое моделирование процессов формирования повторных ударов отрицательной молнии с использованием искусственных грозовых ячеек // *Письма в Журнал технической физики.* 2018. Т. 44. № 17. С. 57–64.
 46. *Иудин Д.И., Давыденко С.С., Готлиб В.М. и др.* Физика молнии: новые подходы к моделированию и перспективы спутниковых наблюдений // *Успехи физических наук.* 2018. Т. 188. № 8. С. 850–864.
 47. *Иудин Д.И., Иудин Ф.Д., Хаякава М.* Моделирование радиоизлучения внутриоблачного молниевых разряда // *Изв. ВУЗов. Радиофизика* // *Изв. ВУЗов — Радиофизика.* 2015. Т. 58. № 3. С. 187–199.
 48. *Iudin D.I., Rakov V.A., Mareev E.A. et al.* Advanced numerical model of lightning development: Application to studying the role of LPCR in determining lightning type // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2017. V. 122. № 12. P. 6416–6430.
 49. *Slyunyaev N.N., Mareev E.A., Rakov V.A. et al.* Statistical Distributions of Lightning Peak Currents: Why Do They Appear to Be Lognormal? // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2018. V. 123. № 10. P. 5070–5089.
 50. *Бабич Л.П., Бочков Е.И., Куцык И.М.* Численное моделирование компактного внутриоблачного разряда и генерируемого им электромагнитного импульса // *Доклады Академии наук.* 2015. Т. 462. № 4. С. 471–474.
 51. *Babich L.P., Bochkov E.I., Kutsyk I.M. et al.* Numerical simulation of positive streamer development in thundercloud field enhanced near raindrops // *Письма в ЖЭТФ.* 2016. Т. 103. № 7–8. С. 510–515.
 52. *Иудин Д.И., Давыденко С.С.* Фрактальная модель компактного внутриоблачного разряда. I. Особенности строения и эволюции // *Изв. ВУЗов. Радиофизика.* 2015. Т. 58. № 7. С. 530–551.
 53. *Давыденко С.С., Иудин Д.И.* Фрактальная модель компактного внутриоблачного разряда. II. Особенности электромагнитного излучения // *Изв. ВУЗов. Радиофизика.* 2016. Т. 59. № 7. С. 620–637.
 54. *Елисеев А.В., Мохов И.И., Чернокульский А.В.* Влияние молниевой активности и антропогенных факторов на крупномасштабные характеристики природных пожаров // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2017. Т. 53. № 1. С. 3–14.
 55. *Сурков В.В., Хаякава М.* Полуаналитические модели образования спрайтов из плазменных неоднородностей // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2016. Т. 56. № 6. С. 763–771.
 56. *Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А.* Самосогласованная модель ночного спрайта // *Изв. ВУЗов. Радиофизика.* 2016. Т. 59. № 12. С. 1076–1086.
 57. *Арделян Н.В., Бычков В.Л., Голубков Г.В. и др.* Влияние грозовой активности на параметры плазмы воздуха в ионосфере // *Химическая физика.* 2018. Т. 37. № 7. С. 59–64.
 58. *Зеленый Л.М., Климов С.И., Ангаров В.Н. и др.* Проект микроспутник «Чиби́с-М». Опыт создания и реализации // *Механика, управление и информатика.* 2015. Т. 7. № 4. С. 91–118.
 59. *Зеленый Л.М., Климов С.И., Ангаров В.Н. и др.* Космический эксперимент «Микроспутник» на российском сегменте международной космической станции // *Космическая техника и технологии.* 2015. № 3. С. 26–37.
 60. *Климов С.И., Ангаров В.Н., Готлиб В.М. и др.* Специфика космических исследований на микроспутниковых платформах, интегрированных в инфраструктуру российского сегмента МКС // *Изв. ВУЗов. Приборостроение.* 2016. Т. 59. № 6. С. 435–442.
 61. *Мозгов К.С., Носикова Н.С., Ренский С.И. и др.* Исследование влияния грозовой активности на околоземное космическое пространство // *Космонавтика и ракетостроение.* 2018. № 5. С. 148–161.

62. Климов П.А., Гарипов Г.К., Хренов Б.А. и др. Транзиентные атмосферные явления по результатам измерений на спутнике «Вернов» // Исследование Земли из космоса. 2017. № 3. С. 65–75.
63. Стриковский А.В., Евтушенко А.А., Гуцин М.Е. и др. Импульсный высоковольтный разряд в воздухе с градиентом давления // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 10. С. 866–873.
64. Тарасенко В.Ф., Соснин Э.А., Скакун В.С. и др. Демонстрация в лабораторных условиях аналогов красных спрайтов и голубых струй, наблюдаемых в атмосферных разрядах // Изв. ВУЗов. Физика. 2017. Т. 60. № 10–2. С. 95–98.
65. Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С. и др. Моделирование голубых струй и стартеров с помощью апокампа, формируемого при пониженных давлениях воздуха // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 10. С. 855–858.
66. Богомолов В.В., Панасюк М.И., Свертилов С.И. и др. Наблюдение гамма-всплесков земного происхождения в космическом эксперименте РЭЛЕК на спутнике «Вернов» // Космические исследования. 2017. Т. 55. № 3. С. 169–178.
67. Минаев П.Ю., Позаненко А.С. Короткие транзиентные гамма-события в эксперименте SPI/INTEGRAL: поиск, классификация и интерпретация // Труды XIX Международной конференции «Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных» (DAMDID/RCDL'2017), 10–13 октября 2017.
68. Черненко А.М. О связи гамма-вспышек земного происхождения (TGF) с распределением примесей в тропосфере // Сборник тезисов докладов пятнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 2017 г.
69. Chilingarian A., Chilingaryan S., Reymers A. Atmospheric discharges and particle fluxes // J. Geophys. Res. Sp. Phys. 2015. V. 120. № 7. P. 5845–5853.
70. Chilingarian A., Hovsepyan G., Kozliner L. Extensive air showers, lightning, and thunderstorm ground enhancements // Astropart. Phys. 2016. V. 82. P. 21–35.
71. Chilingarian A., Khanikyants Y., Mareev E.A. et al. Types of lightning discharges that abruptly terminate enhanced fluxes of energetic radiation and particles observed at ground level // J. Geophys. Res. Atmos. 2017. V. 122. № 14. P. 7582–7599.
72. Чилингарян А. О моделях, основанных на концепции «убегающих» электронов, используемых для объяснения высоко-энергичных явлений в атмосфере // Изв. РАН, Серия Физическая. 2017. Т. 81. № 2. С. 254–257.
73. Канониди К.Х., Лидванский А.С., Хаердинов М.Н. и др. Вариации космических лучей во время гроз и новые геофизические эффекты // Изв. РАН. Серия Физическая. 2015. Т. 79. № 5. С. 733–735.
74. Канониди К.Х., Куреня А.Н., Лидванский А.С. и др. Грозовые эффекты по данным комплексного исследования вариаций вторичных частиц космических лучей // Изв. РАН, Серия Физическая. 2017. Т. 81. № 2. С. 242–245.
75. Ryabov V.A., Almenova A.M., Antonova V.P. et al. Modern status of the Tien-Shan cosmic ray station // EPJ Web Conf. / ed. Pattison B. 2017. V. 145. P. 12001.
76. Gurevich A.V., Almenova A.M., Antonova V.P. et al. Observations of high-energy radiation during thunderstorms at Tien-Shan // Phys. Rev. D. 2016. V. 94. № 2. P. 023003.
77. Gurevich A.V., Garipov G.K., Almenova A.M. Simultaneous observation of lightning emission in different wave ranges of electromagnetic spectrum in Tien Shan mountains // Atmos. Res. 2018. V. 211. P. 73–84.
78. Козлов В.И., Муллаяров В.А., Стародубцев А.А. и др. Регистрация нейтронов во время грозы с разрешением 10 мкс в Якутске // Изв. РАН. Серия Физическая. 2015. Т. 79. № 5. С. 751–753.
79. Babich L.P. Radiocarbon Production by Thunderstorms // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44. № 21. P. 11,191–11,200.
80. Babich L.P. Thunderous nuclear reactions // Nature. 2017. V. 551. № 7681. P. 443–444.
81. Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Шаповалов А.В. и др. Напряженность электрического поля атмосферы и грозовые явления на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 46–54.
82. Аджиев А.Х., Аджиева А.А., Князева З.М. и др. Территориальные особенности грозовой активности на Северном Кавказе по метеорологическим и инструментальным данным // Метеорология и гидрология. 2015. № 4. С. 46–52.
83. Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Довгалюк Ю.А. и др. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 1. Развитие облака и формирование электрических разрядов, Метеорология и гидрология // 2016. № 9. С. 27–40.
84. Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Павар С.Д. и др. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 2. Анализ методов прогноза и диагноза электрического состояния облаков // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 31–45.
85. Синькевич А.А., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е. и др. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 3. Численное моделирование эволюции облака // Метеорология и гидрология. 2017. № 8. С. 18–28.
86. Karashtin A.N., Shlyugaev Yu.V., Bulatov A.A. et al. Sub-Microsecond Radio Emission from Thunderclouds // Proceedings of VI International Conference on Atmospheric Electricity, 17–22 June 2018, Nara city, Nara, Japan. P. P-06–22.
87. Булатов А.А., Кутерин Ф.А., Шлюгаев Ю.В. Особенности распределения молниевой активности на территории Нижегородской области по данным региональной грозопеленгационной системы за 2014–2016 гг. // Энергетик. 2017. № 10. С. 26–29.

88. Булатов А.А., Кутерин Ф.А., Шлюгаев Ю.В. Региональная сеть пассивной грозопеленгации в Нижегородской области // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 113–121.
89. Тарабукина Л.Д., Козлов В.И., Каримов Р.Р. и др. Пространственное распределение разрядов в Северной Азии // Метеорология и гидрология. 2017. № 2. С. 20–29.

Russian Studies of Atmospheric Electricity in 2015–2018

E. A. Mareev^{1*}, V. N. Stasenko², M. V. Shatalina¹,
S. O. Dementyeva¹, A. A. Evtushenko¹, E. K. Svechnikova¹, N.N. Slyunyaev¹

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

²*Planeta Research Center for Space Hydrometeorology
Bol'shoi Predtechenskii per., 7, Moscow, 123242, Russia*

*E-mail: mareev@appl.sci.nnov.ru

Received: 12.07.2019

Accepted: 07.08.2019

This review contains the most significant results of Russian studies in the field of atmospheric electricity in 2015–2018. 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 XXVII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)¹. The review is followed by a list of the main published works on the studies of atmospheric electricity of Russian scientists in 2015–2018.

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

¹ Russian National Report/ Meteorology and Atmospheric Sciences. 2015–2018 / Eds: I.I. Mokhov, A.A. Krivolytsky. National Geophysical Committee RAS. Moscow: MAX Press, 2019 – 332 p.