

Научная статья

УДК 537+519.6

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30107>



А.А. Сысоев¹, Д.И. Иудин¹, В.А. Раков²,
А.А. Емельянов¹, В.Ю. Климашов¹, Н.В. Коробкин³ ✉

¹ Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН),
г. Нижний Новгород, Россия;

² Флоридский университет, Гейнсвилл, США;

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ nikolay.korovkin@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ АТМОСФЕРНЫХ РАЗРЯДОВ С УЧЕТОМ ТЕРМОДИНАМИКИ ПЛАЗМЕННЫХ КАНАЛОВ. Ч. 2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. В статье представлена вторая часть исследования, посвященного моделированию сильноточных молниевых разрядов. В первой части [часть 1] был описан модельный подход, учитывающий термодинамику разрядных каналов, что позволяет связать проводимость и радиус токового канала лидерных сегментов с их температурой. Данная работа посвящена описанию и анализу результатов моделирования, охватывающих все стадии развития сильноточной молнии. Показано, что модель способна воспроизводить характерные для сильноточных молниевых разрядов токи с амплитудами до десятков тысяч ампер. Результаты моделирования позволяют сформулировать новый сценарий развития компактных внутриоблачных разрядов и начальных импульсов пробоя, основанный на коллективной динамике системы, состоящей из множества взаимосвязанных параллельно развивающихся разрядных каналов. В частности, продемонстрировано, что характерные для них импульсы тока могут формироваться в результате эволюции сети низкотемпературных (стримерных) плазменных каналов, внутри которой формируется горячий хорошо проводящий лидерный каркас, стягивающий на себя токи системы. При этом на всех этапах развития разряда относительная доля лидерных секций не превышает нескольких процентов от полного числа каналов токовой системы.

Ключевые слова: компактный внутриоблачный разряд, начальные импульсы пробоя, стримеры, лидеры, иерархические сети плазменных каналов, термодинамика разрядных каналов, инициация молнии, ступени отрицательного лидера, численное моделирование.

Благодарности: Вклад Сысоева А.А., Иудина Д.И., Емельянова А.А. и Климашова В.Ю. в работу над данной статьей поддержан грантом Российского научного фонда, проект № 23-21-00057.

Для цитирования:

Сысоев А.А., Иудин Д.И., Раков В.А. и др. Численное моделирование сильноточных атмосферных разрядов с учетом термодинамики плазменных каналов. Ч. 2. Анализ результатов моделирования // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 117–135. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30107>



A.A. Sysoev¹, D.I. Iudin¹, V.A. Rakov²,
A.A. Emelyanov¹, V.Yu. Klimashov¹, N.V. Korovkin³ ✉

¹ Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), Nizhny Novgorod, Russia;

² University of Florida, Gainesville, USA;

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ nikolay.korovkin@gmail.com

NUMERICAL SIMULATION OF HIGH-CURRENT ATMOSPHERIC DISCHARGES WITH CONSIDERATION OF PLASMA CHANNELS THERMODYNAMICS. PART 2. ANALYSIS OF SIMULATION RESULTS

Abstract. The article presents the second part of the study devoted to the modeling of high-current lightning discharges. The first part [part 1] describes a model approach taking into account discharge channels thermodynamics that allows us to relate conductivity and the current-carrying radius of leader segments to their temperature. The study presents and analyses simulation results covering all stages of the high-current lightning development. It is shown that the model is capable of reproducing currents characteristic of high-current lightning discharges with amplitudes up to tens of thousands of amperes. Simulation results let us formulate a new scenario of development of compact intracloud discharges and initial breakdown pulses based on collective dynamics of a system consisting of a large number of interconnected discharge channels developing in a parallel. In particular, it is demonstrated that current pulses characteristic of compact intracloud discharges and initial breakdown pulses can form as a result of evolution of a network of low-temperature (streamer) plasma channels. Inside this network, a hot well-conducting leader frame forms drawing the system currents onto itself. At the same time, at all the stages of discharge development the relative fraction of leader sections does not exceed a few percent of the total number of channels in the current system.

Keywords: compact intracloud discharge, initial breakdown pulses, streamers, leaders, hierarchical networks of plasma channels, discharge channels thermodynamics, lightning initiation, negative leader steps, numerical simulation.

Acknowledgements: Contribution of Sysoev A.A., Iudin D.I., Emelyanov A.A. and Klimashov V.Yu. to the work on this article was supported by a grant from the Russian Science Foundation, project No. 23-21-00057.

Citation:

A.A. Sysoev, D.I. Iudin, V.A. Rakov et al., Numerical simulation of high-current atmospheric discharges with consideration of plasma channels thermodynamics. Part 2. Analysis of simulation results, *Global Energy*, 30 (01) (2024) 117–135, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30107>

Результаты моделирования. Основные стадии развития сильноточного разряда показаны на рис. 1 и 2. На начальном этапе система представляет собой совокупность разрозненных положительных стримеров, которые, в силу асимметрии полярностей, всегда появляются раньше отрицательных. По мере развития системы положительных стримеров, растущих из общего «корня», в точке их старта накапливается достаточно большой отрицательный заряд, что создает условия для появления отрицательных стримеров. Отдельные стримерные системы, растущие преимущественно вдоль направления вектора напряженности внутриоблачного электрического поля E_a , срастаются в единую плазменную сеть. В рамках этой сети в местах наибольшей концентрации

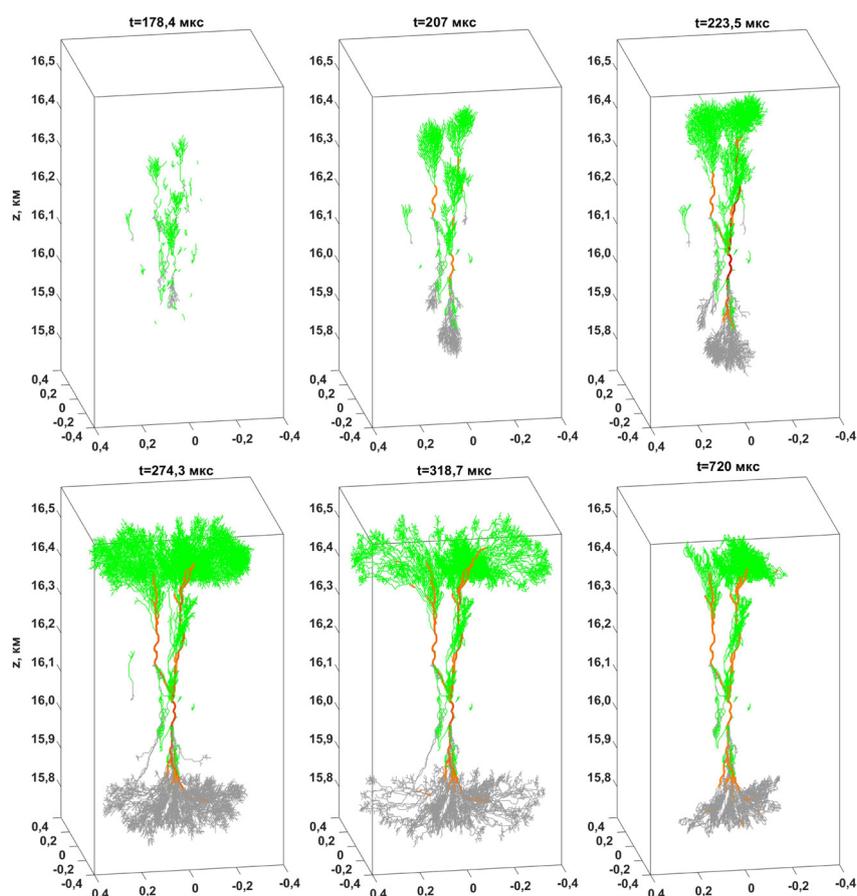


Рис. 1. Основные этапы эволюции сильноточного разряда. Положительные и отрицательные стримеры обозначены зеленым и серым цветами соответственно. Лидерные секции выделены красным. Над каждой панелью указано время, прошедшее от начала моделирования. Числа на всех трех осях обозначены в километрах

Fig. 1. Main stages of a high-current discharge evolution. Positive and negative streamers are shown in green and gray, respectively. Leader sections are denoted by red. The time from the start of the simulation is indicated above each panel. The numbers on all three axes are in kilometers

токов (как правило точки старта стримерных систем) формируются первые зачатки лидерных каналов. Разрозненные лидерные сегменты постепенно удлиняются и прогреваются, увеличивая напряженность электрического поля на своих головках. Запускается механизм электростатического притяжения между положительными головками одних лидеров и отрицательными головками других. Происходит агрегация множества коротких лидеров с образованием нескольких более крупных, которая пока еще не сопровождается заметными всплесками тока. Это, вероятно, объясняется относительно небольшой длиной и проводимостью «незрелых» лидерных сегментов. Кроме того, они вложены в стримерную сеть, состоящую из большого числа параллельных каналов. Несмотря на малую проводимость отдельных стримеров, их совокупный ток способствует релаксации напряженности электрического поля в занятом ими объеме, что позволяет эффективно «гасить» локальные всплески поля. Интенсивный импульс тока возникает несколько позднее, когда пара длинных хорошо поляризованных лидерных сегментов срастается в единый канал, пронизывающий плазменную сеть вдоль выделенного направления роста (см. панель рис. 2, соответствующую моменту времени 223,5 мкс). Данная стадия инициации молнии, которую на языке теории перколяции можно назвать этапом кластер-кластерной агрегации, обсуждается в [2] и численно исследована в работе [3].

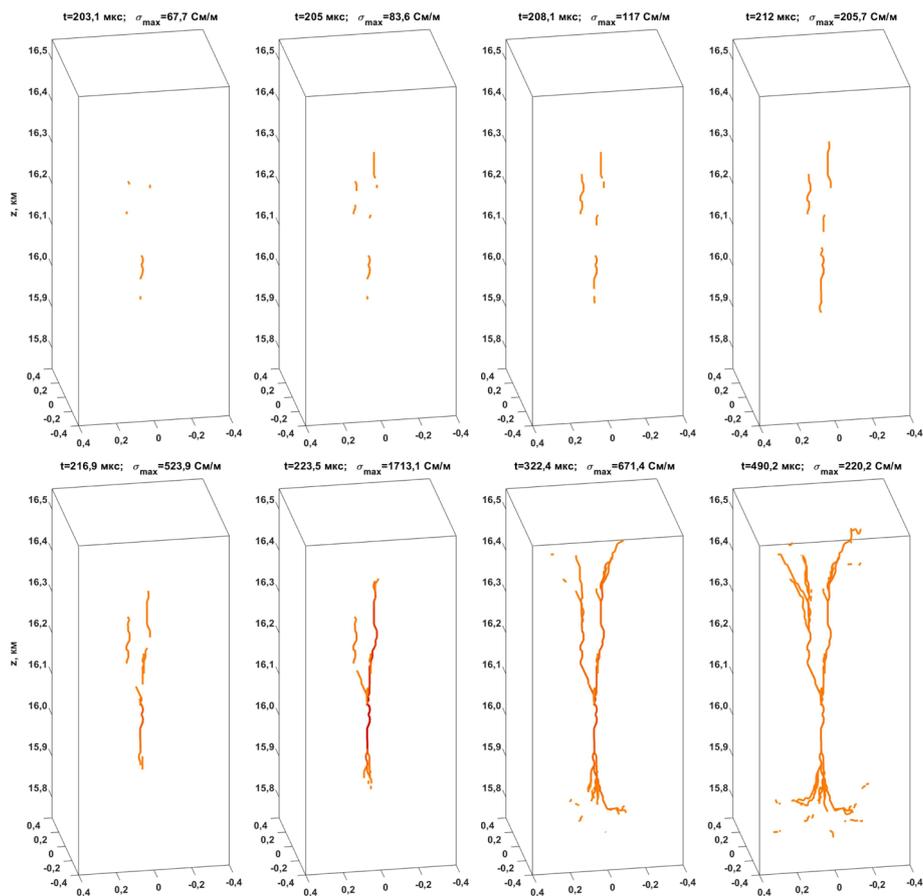


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но с учетом только горячих лидерных каналов, формирующих проводящий каркас системы. Более темные цвета соответствуют большим проводимостям. Кроме времени над каждой панелью указано текущее значение максимальной проводимости σ_{\max}

Fig. 2. Same as Fig. 1, but with only hot leader channels forming the well conducting frame of the system. Darker colors correspond to higher conductivities. In addition to time, the value of maximum conductivity σ_{\max} is shown above each panel

По новообразованному каналу протекает кратковременный мощный импульс тока выравнивания потенциалов (поляризации) с амплитудой порядка 40 кА (см. рис. 3). Быстрое разделение большого количества заряда приводит к резкому усилению напряженности электрического поля и, как следствие, к увеличению скорости роста стримеров на полюсах разряда. Возникают мощные стримерные короны, обладающие практически плоским фронтом и растущие со скоростями порядка $4 \cdot 10^6$ м/с (см. рис. 4). На этом этапе разряд принимает форму классического биполярного лидера. После выхода на границы зоны сильного поля рост разряда практически останавливается в вертикальном направлении, но какое-то время продолжается в латеральной плоскости. Такое поведение типично для каналов молнии, распространяющихся на высотах, соответствующих экстремумам внутриоблачного потенциала (центры зарядовых слоев) [4]. Температура (проводимость) лидерного каркаса начинает медленно спадать, как и суммарный ток разряда. На финальном этапе моделирования система состоит из постепенно остывающих практически обесточенных останков.

Некоторые динамические аспекты развития системы представлены на рис. 4–6.

Примеры эволюции параметров двух модельных каналов на различных этапах развития системы представлены на рис. 7.

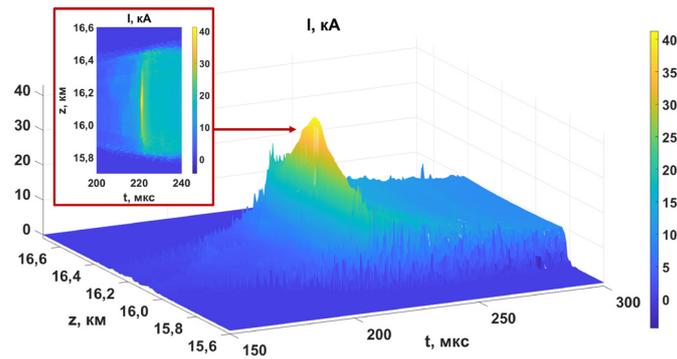


Рис. 3. Высотно-временной профиль тока сильноточного разряда.
 Вставка в левом верхнем углу рисунка акцентирует момент формирования импульса тока
 Fig. 3. Altitude-time profile of current of the high-current discharge.
 The inset in the upper left corner of the figure accentuates the moment of the current pulse formation

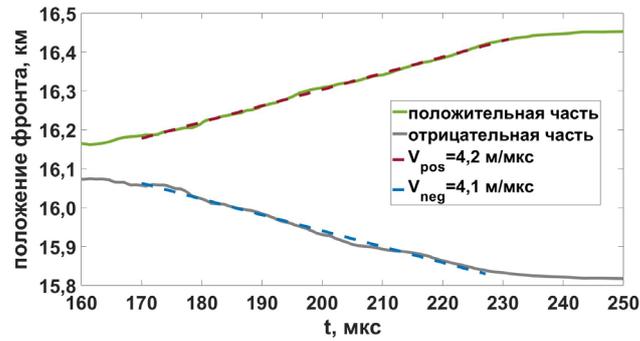


Рис. 4. Динамика распространения положительного и отрицательного фронтов разряда (усредненные положения) по вертикали. Аппроксимирующие пунктирные прямые используются для оценки соответствующих скоростей роста на «активном» этапе развития системы
 Fig. 4. Propagation dynamics of positive and negative discharge fronts (averaged positions) along the vertical direction. Approximating dotted lines are used to estimate the corresponding growth speeds at the “active” stage of the system development

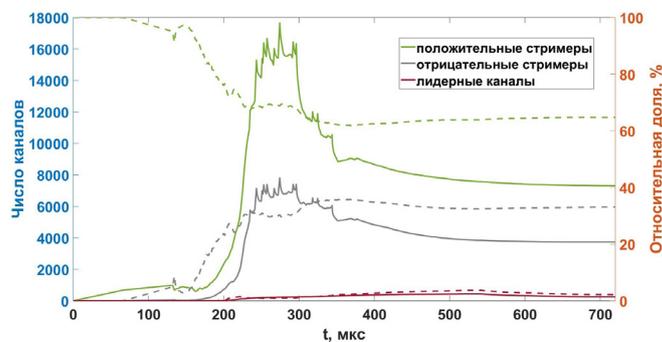


Рис. 5. Временная динамика изменения состава системы. Сплошными и пунктирными линиями обозначены количества каналов и их относительные доли соответственно
 Fig. 5. Temporal dynamics of changes in the system composition. Solid and dotted lines indicate numbers of channels and their relative shares, respectively

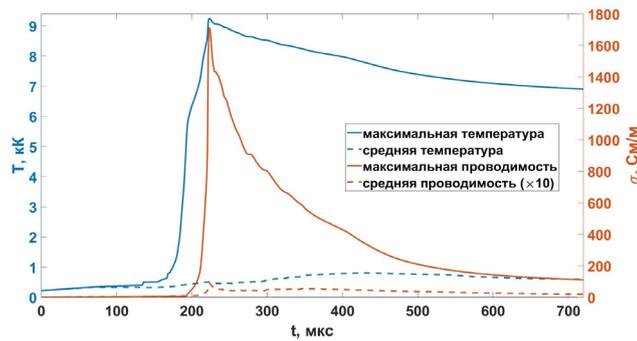


Рис. 6. Динамика изменения температуры и проводимости системы
 Fig. 6. Dynamics of changes in temperature and conductivity of the system

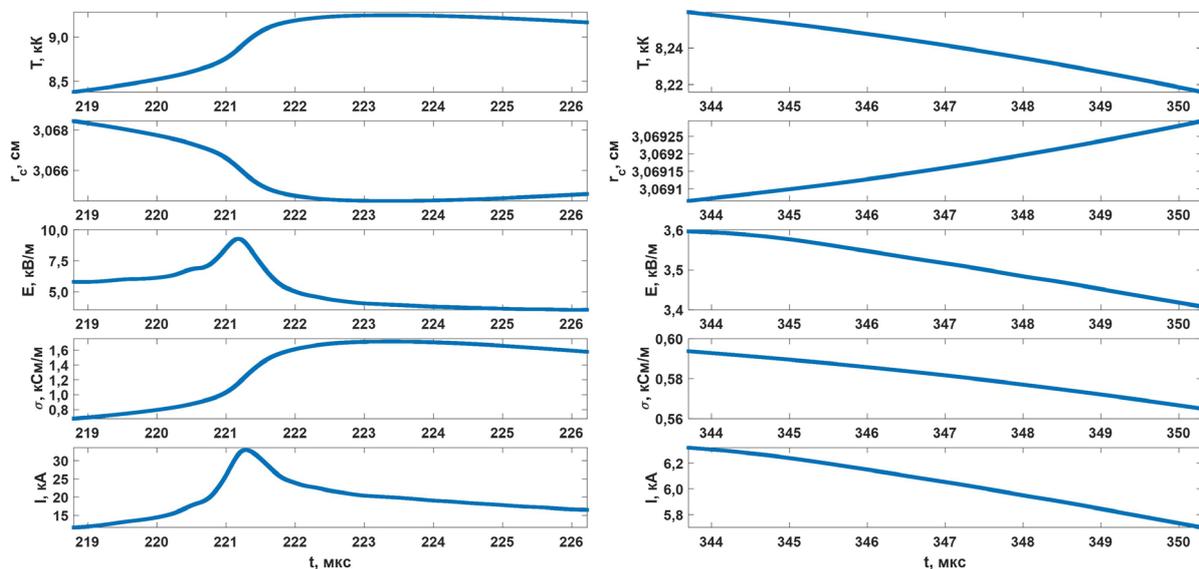


Рис. 7. Примеры эволюции температуры, радиуса токового канала, напряженности продольного электрического поля, проводимости и тока в двух отдельно взятых каналах. Левая и правая панели соответствуют этапам максимального тока и затухания системы соответственно
 Fig. 7. Examples of the evolution of temperature, current-carrying radius, longitudinal electric field strength, conductivity and current in two individual channels. The left and right panels correspond to the stages of maximum current and system decay, respectively

С точки зрения электрического поля излучения в дальней зоне наибольший интерес представляет радиационная компонента, пропорциональная производной тока по времени. Очевидно, что за биполярный импульс поля излучения отвечает мощный импульс тока выравнивания потенциалов, возникающий в момент слияния двух наиболее крупных лидерных фрагментов в единый канал. До момента его формирования система, состоящая из стримерных каналов и вложенных в плазменную сеть лидерных сегментов длиной от единиц до нескольких десятков метров, не способна породить внутри себя достаточно больших токов. После образования лидерного канала область относительно сильного внутриоблачного поля фактически исчерпывает свою ресурс поддержания дальнейшего роста разряда. Действительно, длина лидерного канала совпадает с протяженностью плазменной сети, которая, в свою очередь, заполняет собой зону

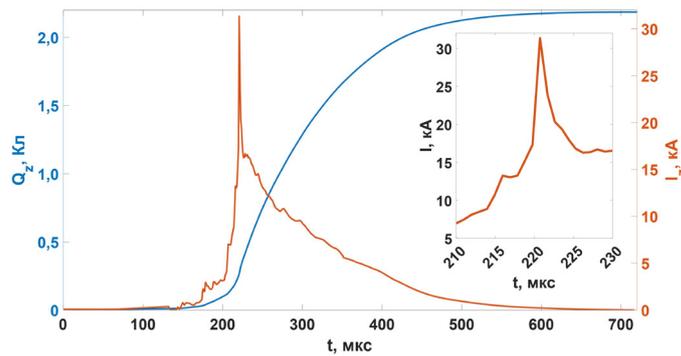


Рис. 8. Динамика изменения разделенного по вертикали заряда Q_z и его первой производной $I_z = dQ_z/dt$
 Fig. 8. Dynamics of vertically divided charge Q_z and its first derivative $I_z = dQ_z/dt$

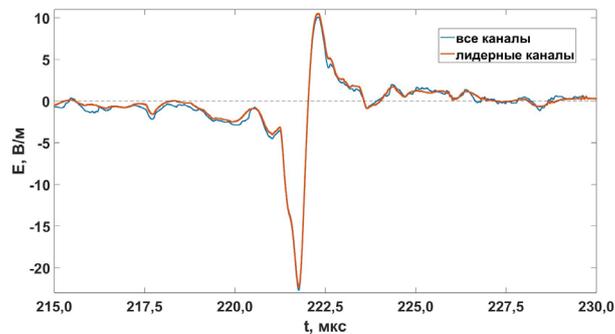


Рис. 9. Биполярный импульс электрического поля излучения моделируемой системы токов в дальней зоне (на расстоянии 100 км от источника)
 Fig. 9. Bipolar electric field radiation pulse produced by the simulated system of currents in the far zone (at a distance of 100 km from the source)

сильного поля. Поэтому на момент образования лидерный канал уже перекрывает данную зону по всей длине. Дальнейшее разрастание стримерных корон, способствующее растаскиванию заряда, разделенного импульсом тока поляризации, происходит как бы по инерции. Полный ток системы монотонно уменьшается, но модуль производной dI/dt слишком мал, чтобы обеспечить поле излучения, сопоставимое по амплитуде с предшествующим биполярным импульсом. Временная зависимость разделенного системой заряда Q_z и его первой производной $I_z = dQ_z/dt$ (полный вертикальный ток системы) представлена на рис. 8.

Биполярный импульс излучения, соответствующий всплеску тока системы, показан на рис. 9. Представленная осциллограмма соответствует стандартному расстоянию 100 км от источника, используемому для нормировки полей излучения КВР и НИП (см., например, [5–16]). Она рассчитана по описанному в [17] алгоритму, который принимает во внимание положение и пространственную ориентацию разрядных каналов и позволяет построить вертикальную компоненту напряженности электрического поля излучения в точке нахождения антенны как сумму полей излучения от каждой модельной связи. При этом высокое временное разрешение профилей тока каналов, получаемых с точностью до единиц наносекунд, гарантирует высокую детализацию результирующей осциллограммы $E(t)$. Сравнение вклада от горячих лидерных каналов с полным сигналом позволяет заключить, что именно лидерный каркас отвечает за характерное излучение системы.

Влияние высоты на особенности развития КВР и НИП

Описанный в данной работе сильноточный разряд характеризуется единственным всплеском тока и переносит положительный заряд вверх, что позволяет идентифицировать его как верхний КВР. Поскольку, как обосновано в [1], параметры импульсов излучения КВР и НИП во многом схожи, есть основания полагать, что они имеют близкие механизмы эволюции и что используемый в данной работе модельный подход может быть также применен к моделированию серии импульсов тока НИП.

Принципиальное отличие между двумя типами сильноточных разрядов заключается в том, что КВР является одиночным событием, а НИП подразумевает наличие серии (около 10) импульсов тока (поля излучения). Возможной причиной этого может быть разность высот формирования данных типов разрядов. Действительно, для нижних и верхних КВР типичны высоты 7–15 [18], 6–16 [19], 7–15 (медианное значение равно 13) [20] км и >14 [18], 16–19 [19], 15–20 (медианное значение равно 18) [20] км соответственно, в то время как НИП возникают на высотах порядка 4–8 км [8, 9, 21] (3–4 и 5,4–11,5 км согласно [22] и [23] соответственно). В работе [13], отдельно рассматривающей высоты формирования НИП, предшествующих разрядам типа облако-земля и внутриоблачным разрядам, были получены средние значения 6 и 9,1 км соответственно. Чтобы объяснить, как высота над землей (концентрация молекул воздуха) может влиять на механизм развития разряда, обратимся к высотным изменениям параметров ступеней отрицательного лидера.

На малых высотах (вблизи земли) основным инструментом изучения ступеней отрицательного лидера являются высокоскоростные оптические камеры (см., например, [24–26] и ссылки там). Типичные значения длин ступеней, межступенчатых интервалов и усредненных скоростей роста составляют 1–10 м, 10–20 мкс и 10^5 – 10^6 м/с соответственно. Например, авторы [26] оценили соответствующие значения как 1–13 м, 13,9–23,9 мкс и $4,1$ – $14,6 \cdot 10^5$ м/с соответственно (см. также их табл. 1, содержащую данные аналогичных измерений других работ). На больших высотах канал молнии скрыт внутри облака, и для наблюдения динамики его развития прибегают к радиоинтерферометрическим методам (обычно используются системы LMA, от англ. “Lightning Mapping Array”, см. [27] и ссылки там). При этом начиная с высот 5–7 км параметры ступеней оказываются существенно отличными от приземных. Так, измерения [28] свидетельствуют о длинах ступеней порядка нескольких сотен метров, межступенчатых интервалах длительностью несколько миллисекунд и средней скорости распространения, равной $5 \cdot 10^4$ м/с на высотах выше 7 км. Более того, авторы ассоциируют резкое изменение параметров ступеней на высоте 7 км над землей с фазовым переходом (см. также работу [29]). Результаты [30], основанные на данных оптической съемки, свидетельствуют о длинах ступеней от 200 м и более, межступенчатых интервалах длительностью 4,3 мс и скорости роста $4,7 \cdot 10^4$ м/с на высоте порядка 10 км. Сравнение параметров ступеней на различных высотах приводит к заключению о том, что условия формирования пространственных стемов, потенциальных зачатков пространственных лидеров, ухудшаются с ростом высоты. Действительно, авторы [30] отмечают, что “leader steps at high altitude are completed at a lower rate than at low altitude (ступени лидера на больших высотах формируются с меньшей частотой, чем на малых)”.

Большую роль в формировании ступеней может играть концентрация пространственных стемов (среднее расстояние между ними). Так, авторы исследования [31], в котором изучалось распространение отрицательного лидера в промежутке стержень-стержень длиной 16,7 м, отмечают “a space leader only starts to elongate from the space stem if a new space stem, connected to the old one, is created further in the gap (пространственный лидер начинает расти с пространственного стема только если новый пространственный стем, подсоединенный к исходному, формируется в промежутке)” и “a space stem requires another pilot, namely another space stem downstream in the gap, to generate a space leader (пространственный стем нуждается в дополнительном «пилоте»,

то есть другом пространственном стеме ниже в промежутке, чтобы создать пространственный лидер)».

В работе [32] была промоделирована трехмерная картина распределения напряженности электрического поля внутри и на периферии стримерных зон положительного и отрицательного лидеров молнии. Было показано, что с ростом высоты над землей падает не только отношение максимальной напряженности электрического поля перед головкой лидера к разрядной напряженности воздуха, но и число зон, в которых напряженность электрического поля превышает порог пробоя воздуха и которые потенциально могут быть местами появления пространственных стемов. Таким образом, результаты исследования [32] предсказывают уменьшение числа пространственных стемов, потенциальных зачатков пространственных лидеров, с падением плотности воздуха, что, в соответствии с результатами описанных выше экспериментальных наблюдений, должно препятствовать формированию ступеней лидера на больших высотах.

Вполне возможно, что сценарий инициации молнии [2, 33], подразумевающий «вызревание» лидерного канала внутри плазменной сети, может быть обобщен на случай КВР и НИП. Для НИП, формирующихся на меньших высотах, последовательное слияние большого числа пространственных стемов/лидеров обеспечивает несколько ступеней начального лидера, наблюдаемых в дальней зоне как серия всплесков электрического поля. В случае более высотных КВР образуется гораздо меньше пространственных стемов/лидеров, в результате чего формируется одна единственная «ступень», пронизывающая плазменную сеть по всей длине (см. рис. 1, 2). С другой стороны, большие высоты также означают больший объем плазменной сети, поскольку, согласно закону подобия $d \cdot N = \text{const}$, линейные размеры разряда d масштабируются с высотой как обратная концентрация молекул N^{-1} . Соответственно, при прочих равных условиях объем сети и количество вовлекаемого в пробой внутриоблачного заряда меняются как N^{-d_f} , где d_f – фрактальная размерность плазменной сети. Фактор N^{-d_f} должен увеличиваться с ростом высоты, даже несмотря на возможное падение фрактальной размерности d_f . Последнее обусловлено нелинейным увеличением среднего расстояния между точками ветвления стримеров с уменьшением давления воздуха [34]. Увеличение вовлекаемого в пробой заряда с ростом высоты может объяснить, почему, даже несмотря на падение напряженностей характерных электрических полей, отвечающих за эволюцию разряда (в соответствии с другим законом подобия $E/N = \text{const}$), пиковые токи импульсов КВР в среднем больше, чем в случае НИП (сравни $\sim 1\text{--}40$ кА для НИП [11, 12, 35] и $5\text{--}290$ кА для КВР [7, 10, 19, 36]). При этом статистически максимальные токи верхних КВР заметно больше, чем токи нижних. Согласно данным [19], соответствующие геометрические средние составляют 33 кА для нижних и 113 кА для верхних КВР.

Отметим, что предложенная в [1] модель способна отразить высотные изменения условий формирования плазменных каналов. Во-первых, все термодинамические параметры, входящие в уравнение теплопроводности, являются функциями давления воздуха. Во-вторых, что более важно, термический радиус r_T (расстояние от оси канала, на котором температура падает e раз по сравнению с максимальным осевым значением) и радиус токового канала r_c масштабируются с высотой как N^{-1} , а характерная напряженность продольного электрического поля в канале – как N . Согласно тестовым расчетам, уменьшение поперечного сечения проводящей части канала $Sc = \pi r_c^2 \sim N^{-2}$ на высотах развития НИП уменьшает его пропускную способность, что способствует поддержанию высокого уровня напряженности продольного электрического поля канала и быстрому росту его проводимости. Соответственно, относительная доля хорошо проводящих лидерных секций, как и частота их слияний, растет с падением высоты. Результаты дополнительных расчетов, полученных путем численного решения уравнения теплопроводности в r - t пространстве и подтверждающих ухудшение условий формирования и поддержания лидерного канала с ростом высоты, представлены на рис. 10. Дополнительные аргументы в пользу ухудшения условий формирования термализованного лидерного канала с уменьшением давления воздуха (ростом высоты) приведены в работе [37].

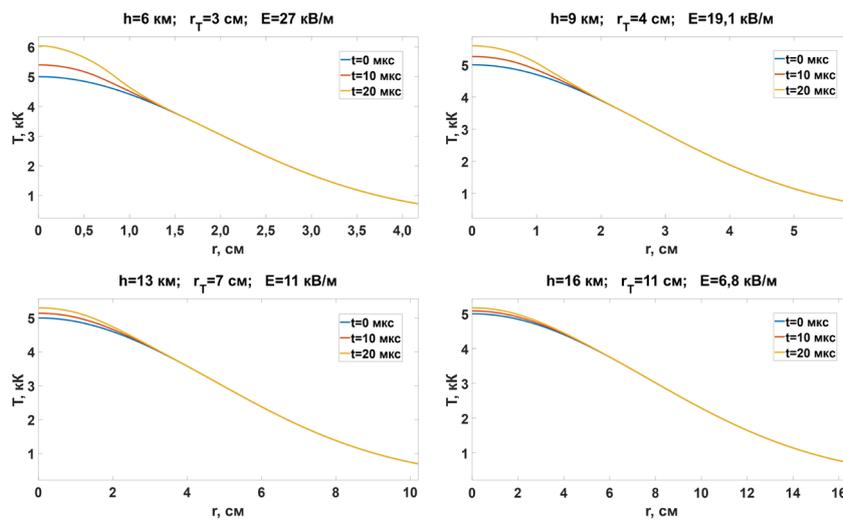


Рис. 10. Результаты численного решения уравнения теплопроводности на различных высотах, подтверждающие ухудшение условий формирования и поддержания горячего лидерного канала с ростом высоты над землей. На всех высотах напряженность электрического поля в канале составляет 10% от порога поддержания роста положительных стримеров, равного 500 кВ/(м·атм)

Fig. 10. Results of numerical solution of the heat conduction equation at different heights confirming deterioration of conditions for the formation and maintenance of a hot leader channel with increasing height above the ground. At all altitudes, electric field strength in the channel is 10% of the threshold for maintaining the growth of positive streamers equal to 500 kV/(m·atm)

Моделирование процесса формирования НИП, переходящего в ступенчатый отрицательный лидер молнии, является целью будущих исследований.

Обсуждение

Воспроизведенный в рамках моделирования процесс формирования сильноточного разряда соответствует сценарию [2, 33]. Все начинается с заполнения части грозового облака многочисленными одновременно развивающимися стримерными системами, которые затем сливаются в единую плазменную сеть. Внутри этой сети в местах наибольшей концентрации токов возникают каналы с повышенным уровнем энерговыделения, что приводит к росту их температуры (проводимости). Эти участки сети, выделяющиеся на общем стримерном фоне, можно назвать модельными аналогами необычных плазменных образований, недавно обнаруженных внутри искусственного облака заряженного водного аэрозоля [38, 39]. Постепенно они превращаются в поляризованные во внешнем поле лидерные сегменты. По мере удлинения лидерных каналов напряженность электрического поля на их концах усиливается, и их головки начинают ускоренно расти навстречу друг другу. В момент, когда в результате серии таких слияний образуется крупномасштабный канал, пронизывающий всю систему вдоль направления вектора напряженности внешнего электрического поля, по нему проходит мощный импульс тока поляризации. Близкий сценарий развития КВР описан в [40], где всплеск тока возникает в результате слияния двух изначально изолированных друг от друга стримерных конструкций, возникающих на вертикальном расстоянии 200 м друг от друга. При этом предполагалось, что исходное распределение внутриоблачного потенциала создается пучковой неустойчивостью, развивающейся в плазмopodobной облачной среде и приводящей к крупномасштабному разделению пространственного заряда [41–43]. В отличие от данной работы, модель [40] не воспроизводит процесс формирования объемной плазменной сети и не учитывает термодинамику разрядных каналов. Динамика развития модельной системы также напоминает процесс формирования ступени отрицательного лидера,

который включает в себя акт слияния пространственного лидера с основным отрицательным и сопровождается волной тока выравнивания потенциалов (см. [44] и ссылки там). Основная разница заключается в пространственных масштабах и, как следствие, амплитудах импульса тока поляризации.

Рассуждая о воспроизведенном в рамках модели сценарии формирования сильноточного разряда, нельзя не отметить фундаментального сходства между макромасштабным пробоем облачной среды и хрупким разрушением материала [45]. Подобно тому, как для инициации молнии не требуется наличие однородного поля, превышающего разрядную напряженность воздуха ($\approx 3 \text{ МВ}/(\text{м}\cdot\text{атм})$ [46]), прочность большинства материалов на несколько порядков меньше значения теоретической прочности на разрыв, полученного в предположении об одновременном разрыве межатомных связей по всей плоскости разрушения. По аналогии с разрушением материала, включающим в себя стадии зарождения микротрещин с размерами порядка 100 нм и их последующее распространение, формирование лидера молнии начинается с появления отдельных проводящих зародышей (пространственных стемов/лидеров), после чего происходит их удлинение вдоль направления вектора \mathbf{E}_a с последующим слиянием. По мере удлинения хрупкой трещины для ее развития требуется все меньшее и меньшее механическое напряжение, что делает процесс ее роста самоускоряющимся. Точно так же при удлинении лидерного канала (увеличении аспектного отношения проводника) растет напряженность электрического поля на его периферии, так что для поддержания его дальнейшего распространения требуется все меньшая и меньшая напряженность внешнего поля. При этом большая напряженность электрического поля на фронте роста разряда соответствует большей скорости роста стримеров и, как следствие, лидерного канала. В случае хрупкого разрушения скорость распространения трещины может достигать 40–50% от скорости звука в материале образца. Аналогично лидерный канал, пронизывающий плазменную сеть вдоль направления вектора \mathbf{E}_a , возникает практически мгновенно, со скоростью от нескольких до десятков процентов от скорости света.

Очень может быть, что чрезвычайно высокие скорости быстрого положительного/отрицательного пробоев, лежащие в диапазоне 10^7 – 10^8 м/с (3,3–33% от скорости света в воздухе) и отнесенные авторами [47, 48] к стримерам, на самом деле являются скоростью распространения волны ионизации вдоль новообразованного лидерного канала. В этом смысле воспроизведенный в рамках моделирования процесс формирования сильноточного разряда можно назвать фазовым переходом, поскольку он подразумевает практически мгновенную трансформацию плазменной сети от условно непроводящего состояния к проводящему. Параметром данного перехода является концентрация проводящих элементов сети. При этом не только до, но даже после фазового перехода относительная доля горячих хорошо проводящих лидерных каналов остается пренебрежимо малой. На это указывает относительная небольшая фрактальная размерность необычных плазменных образований, оцененная как 1,5–1,8 для двумерных изображений (см. рис. 1 работы [1]), вложенных в объемную сеть плазменных каналов, фрактальная размерность которой близка к тройке. Можно предположить, что и фрактальная размерность подмножества лидерных каналов, образующих проводящий каркас системы, принадлежит диапазону от 1 до 2. Соответствующие оценки для модельного лидерного каркаса дают максимальное значение его фрактальной размерности, равное 1,32.

Общее заключение

В первой части исследования [1] был представлен новый численный метод, позволяющий моделировать импульсные токи с амплитудами до десятков тысяч ампер, присущие таким сильноточным разрядам, как КВР и НИП. Основной особенностью модели [1], благодаря которой это стало возможным, является учёт термодинамики разрядных каналов, что позволяет корректно описать проводимость и радиус токового канала, а, следовательно, и ток лидерных элементов

системы. В данной работе представлены результаты применения модели [1] к описанию эволюции сильноточного разряда. Было установлено, что лидерный каркас системы может формироваться за счёт срастания наиболее горячих элементов изначально холодной стримерной сети, которые можно назвать естественными аналогами необычных плазменных образований. Практически мгновенное возникновение лидерного канала, пронизывающего систему вдоль направления вектора напряженности внутриоблачного поля, сопровождается кратковременным импульсом тока поляризации (выравнивания потенциалов) амплитудой в десятки тысяч ампер. В дальнейшем система развивается как типичный биполярный лидер молнии, головки которого оканчиваются мощными стримерными зонами. Резкое усиление напряженности электрического поля на концах проводящей структуры обеспечивает высокие скорости роста и интенсивное ветвление стримерных корон на периферии разряда. Эта особенность вкупе с относительно малой долей лидерных секций в общей структуре системы отчасти согласуется с концепцией быстрого стримерного пробоя. Однако не стримеры, а именно лидерный каркас обеспечивает характерный всплеск тока сильноточного разряда. Результаты данной работы ограничены моделированием верхнего КВР. В будущих исследованиях авторы планируют применить описанный подход к воспроизведению серии импульсов тока НИП.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Сысоев А.А., Иудин Д.И., Раков В.А., Емельянов А.А., Климашов В.Ю., Коровкин Н.В. Численное моделирование сильноточных атмосферных разрядов с учетом термодинамики плазменных каналов. Ч. 1. Описание модели // Глобальная энергия. 2023. Т. 29. № 4. С. xx, DOI: xx
- [2] Iudin D.I., Rakov V.A., Syssoev A.A., Bulatov A.A., Hayakawa M. From decimeter-scale elevated ionic conductivity regions in the cloud to lightning initiation, *Scientific Reports*, 11 (1) (2021) 18016, DOI: 10.1038/s41598-021-97321-4
- [3] Syssoev A.A., Iudin D.I., Iudin F.D., Klimashov V.Yu., Emelyanov A.A. Relay charge transport in thunderclouds and its role in lightning initiation, *Scientific Reports*, 12 (1) (2022) 7090, DOI: 10.1038/s41598-022-10722-x
- [4] Coleman L.M., Stolzenburg M., Marshall T.C., Stanley M. Horizontal lightning propagation, preliminary breakdown, and electric potential in New Mexico thunderstorms, *Journal of Geophysical Research*, 113 (2008) D09208, DOI: 10.1029/2007JD009459
- [5] Ahmad N.A., Fernando M., Baharudin Z.A., Cooray V., Ahmad H., Abdul Malek Z. Characteristics of narrow bipolar pulses observed in Malaysia, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72 (5–6) (2010) 534–540, DOI: 10.1016/j.jastp.2010.02.006
- [6] Nag A., Rakov V.A., Tsalikis D., Cramer J.A. On phenomenology of compact intracloud lightning discharges, *Journal of Geophysical Research*, 115 (2010) D14115, DOI: 10.1029/2009JD012957
- [7] Nag A., Rakov V.A., Cramer J.A. Remote measurements of currents in cloud lightning discharges, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 53 (2) (2011) 407–413, DOI: 10.1109/TEMC.2010.2073470
- [8] Stolzenburg M., Marshall T.C., Karunarathne S., Karunarathna N., Vickers L.E., Warner T.A., Orville R.E., Betz H.-D. Luminosity of initial breakdown in lightning, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118 (2013) 2918–2937, DOI: 10.1002/jgrd.50276
- [9] Stolzenburg M., Marshall T.C., Karunarathne S., Karunarathna N., Orville R.E. Leader observations during the initial breakdown stage of a lightning flash, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119 (2014) 12,198–12,221, DOI: 10.1002/2014JD021994
- [10] Karunarathne S., Marshall T.C., Stolzenburg M., Karunarathna N. Observations of positive narrow bipolar pulses, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120 (2015) 7128–7143, DOI: 10.1002/2015JD023150

- [11] **Karunarathne N., Marshall T.C., Karunarathne S., Stolzenburg M.** Studying sequences of initial breakdown pulses in cloud-to-ground lightning flashes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125 (2020) e2019JD032104, DOI: 10.1029/2019JD032104
- [12] **Kolmašová I., Santolík O., Farges T., Cummer S.A., Lán R., Uhlíř L.** Subionospheric propagation and peak currents of preliminary breakdown pulses before negative cloud-to-ground lightning discharges, *Geophysical Research Letters*, 43 (2016) 1382–1391, DOI: 10.1002/2015GL067364
- [13] **Smith E.M., Marshall T.C., Karunarathne S., Siedlecki R., Stolzenburg M.** Initial breakdown pulse parameters in intracloud and cloud-to-ground lightning flashes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123 (2018) 2129–2140, DOI: 10.1002/2017JD027729
- [14] **Bandara S., Marshall T., Karunarathne S., Stolzenburg M.** Electric field change and VHF waveforms of positive narrow bipolar events in Mississippi thunderstorms, *Atmospheric Research*, 243 (2020) 105000, DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105000
- [15] **Bandara S., Marshall T., Stolzenburg M.** Further studies of positive narrow bipolar events detected at close range, *Atmospheric Research*, 286 (2023) 106668, DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.106668
- [16] **Rakov V.A., Tran M.D., Zhu Y., Ding Z., Leal A.F.R., Kereszy I., Chen S.** New insights into the lightning discharge processes, *Plasma Sources Science and Technology*, 31 (2022) 104005, DOI: 10.1088/1361-6595/ac9330
- [17] **Sysoev A.A., Iudin D.I., Karashtin A.N., Shlyugaev Yu.V.** Radiation electric field produced by the lightning leader formation in a thundercloud: Observations and modeling, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 221 (2021) 105686, DOI: 10.1016/j.jastp.2021.105686
- [18] **Zhang H., Lu G., Qie X., Jiang R., Fan Y., Tian Y., Sun Z., Liu M., Wang Z., Liu D., Feng G.** Locating narrow bipolar events with single-station measurement of low-frequency magnetic fields, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 143–144 (2016) 88–101, DOI: 10.1016/j.jastp.2016.03.009
- [19] **Leal A.F.R., Rakov V.A.** A study of the context in which compact intracloud discharges occur, *Scientific Reports*, 9 (2019) 12218, DOI: 10.1038/s41598-019-48680-6
- [20] **Smith D.A., Heavner M.J., Jacobson A.R., Shao X.M., Massey R.S., Sheldon R.J., Wiens K.C.** A method for determining intracloud lightning and ionospheric heights from VLF/LF electric field records, *Radio Science*, 39 (2004) RS1010, DOI: 10.1029/2002RS002790
- [21] **Kolmasova I., Marshall T., Bandara S., Karunarathne S., Stolzenburg M., Karunarathne N., Siedlecki R.** Initial breakdown pulses accompanied by VHF pulses during negative cloud-to-ground lightning flashes, *Geophysical Research Letters*, 46 (2019) 5592–5600, DOI: 10.1029/2019GL082488
- [22] **Kolmašová I., Santolík O., Farges T., Rison W., Lán R., Uhlíř L.** Properties of the unusually short pulse sequences occurring prior to the first strokes of negative cloud-to-ground lightning flashes, *Geophysical Research Letters*, 41 (2014) 5316–5324, DOI: 10.1002/2014GL060913
- [23] **Lyu F., Cummer S.A., Lu G., Zhou X., Weinert J.** Imaging lightning intracloud initial stepped leaders by low-frequency interferometric lightning mapping array, *Geophysical Research Letters*, 43 (2016) 1–8, DOI: 10.1002/2016GL069267
- [24] **Hill J.D., Uman M.A., Jordan D.M.** High-speed video observations of a lightning stepped leader, *Journal of Geophysical Research*, 116 (2011) D16117, DOI: 10.1029/2011jd015818
- [25] **Petersen D.A., Beasley W.H.** High-speed video observations of a natural negative stepped leader and subsequent dart-stepped leader, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118 (2013) 12,110–12,119, DOI: 10.1002/2013jd019910
- [26] **Qi Q., Lu W., Ma Y., Chen L., Zhang Y., Rakov V.A.** High-speed video observations of the fine structure of a natural negative stepped leader at close distance, *Atmospheric Research*, 178–179 (2016) 260–267, DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.03.027
- [27] **Dwyer J.R., Uman M.A.** The physics of lightning, *Physics Reports*, 534(4) (2014) 147–241, DOI: 10.1016/j.physrep.2013.09.004

[28] **Scholten O., Hare B.M., Dwyer J., Liu N., Sterpka C., Buitink S., Corstanje A., Falcke H., Huege T., Hörandel J.R., Krampah G.K., Mitra P., Mulrey K., Nelles A., Pandya H., Rachen J.P., Trinh T.N.G., Veen S. ter, Thoudam S., Winchen T.** Distinguishing features of high altitude negative leaders as observed with LOFAR, *Atmospheric Research*, 260 (2021) 105688, DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105688

[29] **Scholten O., Hare B.M., Dwyer J., Liu N., Sterpka C., Buitink S., Huege T., Nelles A., Veen S. ter.** Time resolved 3D interferometric imaging of a section of a negative leader with LOFAR, *Physical Review D*, 104 (2021) 063022, DOI: 10.1103/PhysRevD.104.063022

[30] **Edens H.E., Eack K.B., Rison W., Hunyady S.J.** Photographic observations of streamers and steps in a cloud-to-air negative leader, *Geophysical Research Letters*, 41 (2014) 1336–1342, DOI: 10.1002/2013GL059180

[31] **Ortega P., Domens P., Gibert A., Hutzler B., Riquel G.** Performance of a 16.7 m air rod-plane gap under a negative switching impulse, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 27 (1994) 2379–2387, DOI: 10.1088/0022-3727/27/11/019

[32] **Syssoev A.A., Iudin D.I.** Numerical simulation of electric field distribution inside streamer zones of positive and negative lightning leaders, *Atmospheric Research*, 295 (2023) 107021, DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.107021

[33] **Iudin D.I., Rakov V.A., Syssoev A.A., Bulatov A.A., Hayakawa M.** Formation of decimeter-scale, long-lived elevated ionic conductivity regions in thunderclouds, *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2 (46) (2019) 1–10, DOI: 10.1038/s41612-019-0102-8

[34] **Nudnova M.M., Starikovskii A.Y.** Development of streamer flash initiated by HV pulse with nanosecond rise time, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 36 (2008) 896–897, DOI: 10.1109/TPS.2008.920289

[35] **Betz H.-D., Marshall T.C., Stolzenburg M., Schmidt K., Oettinger W.P., Defer E., Konarski J., Larroche P., Dombai F.** Detection of in-cloud lightning with VLF/LF and VHF networks for studies of the initial discharge phase, *Geophysical Research Letters*, 35 (2008) L23802, DOI: 10.1029/2008GL035820

[36] **Leal A.F.R., Rakov V.A., Rocha B.R.P.** Compact intracloud discharges: New classification of field waveforms and identification by lightning locating systems, *Electric Power Systems Research*, 173 (2019) 251–262, DOI: 10.1016/j.epsr.2019.04.016

[37] **Cooray V., Cooray G., Rubinstein M., Rachidi F.** Modeling compact intracloud discharge (CID) as a streamer burst, *Atmosphere*, 11 (5) (2020) 549, DOI: 10.3390/atmos11050549

[38] **Kostinskiy A.Yu., Syssoev V.S., Bogatov N.A., Mareev E.A., Andreev M.G., Makalsky L.M., Sukharevsky D.I., Rakov V.A.** Observation of a new class of electric discharges within artificial clouds of charged water droplets and its implication for lightning initiation within thunderclouds, *Geophysical Research Letters*, 42 (2015) 8165–8171, DOI: 10.1002/2015GL065620

[39] **Kostinskiy A.Yu., Bogatov N.A., Syssoev V.S., Mareev E.A., Andreev M.G., Bulatov M.U., Sukharevsky D.I., Rakov V.A.** Unusual plasma formations produced by positive streamers entering the cloud of negatively charged water droplets, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127 (2022) e2021JD035821, DOI: 10.1029/2021JD035821

[40] **Иудин Д.И., Давыденко С.С.** Фрактальная модель компактного внутриоблачного разряда. I. Особенности строения и эволюции // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. 2015. Т. 58. № 7. С. 530551.

[41] **Трахтенгерц В.Ю.** О природе электрических ячеек в грозовом облаке // *Доклады АН СССР*. 1989. Т. 308. № 3. С. 584–586.

[42] **Mareev E.A., Sorokin A.E., Trakhtengerts V.Yu.** Effects of collective charging in a multiflow aerosol plasma, *Plasma Physics Reports*, 25(3) (1999) 261–272.

[43] **Иудин Д.И., Трахтенгерц В.Ю.** Нелинейная динамика грозового облака // *Известия ВУЗов Радиофизика*. 2001. Т. 44. № 5-6. С. 419–438, DOI: 10.1023/A:1017945129828

[44] **Syssoev A.A., Iudin D.I., Bulatov A.A., Rakov V.A.** Numerical simulation of stepping and branching processes in negative lightning leaders, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125 (2020) e2019JD031360, DOI: 10.1029/2019JD031360

- [45] Григорьев Е.Г., Перлович Ю.А., Соловьев Г.И., Удовский А.Л., Якушин В.Л. Физическое материаловедение: Учебник для вузов. Под общей ред. Калина Б.А. Том 4. Физические основы прочности. Радиационная физика твердого тела. Компьютерное моделирование. М.: МИФИ, 2008. 696 с.
- [46] Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. М.: МФТИ, 1997. 320 с.
- [47] Rison W., Krehbiel P.R., Stock M.G., Edens H.E., Shao X.-M., Thomas R.J., Stanley M.A., Zhang Y. Observations of narrow bipolar events reveal how lightning is initiated in thunderstorms, *Nature Communications*, 7 (2016) 10721, DOI: 10.1038/ncomms10721
- [48] Tilles J.N., Liu N., Stanley M.A., Krehbiel P.R., Rison W., Stock M.G., Dwyer J.R., Brown R., Wilson J. Fast negative breakdown in thunderstorms, *Nature Communications*, 10 (1) (2019) 1648, DOI: 10.1038/s41467-019-09621-z

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СЫСОЕВ Артем Андреевич — доцент, *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), канд. физ.-мат. наук.*

E-mail: asysoev@ipfran.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8786-6744>

ИУДИН Дмитрий Игоревич — заведующий кафедрой, *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), д-р биол. наук.*

E-mail: iudin@ipfran.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8416-9377>

РАКОВ Владимир Александрович — директор международного центра исследования молнии, *Флоридский университет, канд. техн. наук.*

E-mail: rakov@ece.ufl.edu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4582-9483>

ЕМЕЛЬЯНОВ Алексей Александрович — младший научный сотрудник, *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), без степени.*

E-mail: alexey@sorta-nn.ru

КЛИМАШОВ Виталий Юрьевич — младший научный сотрудник, *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), без степени.*

E-mail: klim.nnov@gmail.com

КОРОВКИН Николай Владимирович — заведующий кафедрой, *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

REFERENCES

- [1] A.A. Sysoyev, D.I. Iudin, V.A. Rakov, A.A. Yemelyanov, V.Yu. Klimashov, N.V. Korovkin, Chislennoye modelirovaniye silnotochnykh atmosferynykh razryadov s uchetom termodinamiki plazmennyykh kanalov. Ch. 1. Opisanie modeli // *Globalnaya energiya*. 2023. T. 29. № 4. S. khkh, DOI: khkh

- [2] **D.I. Iudin, V.A. Rakov, A.A. Syssoev, A.A. Bulatov, M. Hayakawa**, From decimeter-scale elevated ionic conductivity regions in the cloud to lightning initiation, *Scientific Reports*, 11 (1) (2021) 18016, DOI: 10.1038/s41598-021-97321-4
- [3] **A.A. Syssoev, D.I. Iudin, F.D. Iudin, V.Yu. Klimashov, A.A. Emelyanov**, Relay charge transport in thunderclouds and its role in lightning initiation, *Scientific Reports*, 12 (1) (2022) 7090, DOI: 10.1038/s41598-022-10722-x
- [4] **L.M. Coleman, M. Stolzenburg, T.C. Marshall, M. Stanley**, Horizontal lightning propagation, preliminary breakdown, and electric potential in New Mexico thunderstorms, *Journal of Geophysical Research*, 113 (2008) D09208, DOI: 10.1029/2007JD009459
- [5] **N.A. Ahmad, M. Fernando, Z.A. Baharudin, V. Cooray, H. Ahmad, Z. Abdul Malek**, Characteristics of narrow bipolar pulses observed in Malaysia, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72 (5–6) (2010) 534–540, DOI: 10.1016/j.jastp.2010.02.006
- [6] **A. Nag, V.A. Rakov, D. Tsalikis, J.A. Cramer**, On phenomenology of compact intracloud lightning discharges, *Journal of Geophysical Research*, 115 (2010) D14115, DOI: 10.1029/2009JD012957
- [7] **A. Nag, V.A. Rakov, J.A. Cramer**, Remote measurements of currents in cloud lightning discharges, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 53 (2) (2011) 407–413, DOI: 10.1109/TEMC.2010.2073470
- [8] **M. Stolzenburg, T.C. Marshall, S. Karunarathne, N. Karunarathna, L.E. Vickers, T.A. Warner, R.E. Orville, H.-D. Betz**, Luminosity of initial breakdown in lightning, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118 (2013) 2918–2937, DOI: 10.1002/jgrd.50276
- [9] **M. Stolzenburg, T.C. Marshall, S. Karunarathne, N. Karunarathna, R.E. Orville**, Leader observations during the initial breakdown stage of a lightning flash, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119 (2014) 12,198–12,221, DOI: 10.1002/2014JD021994
- [10] **S. Karunarathne, T.C. Marshall, M. Stolzenburg, N. Karunarathna**, Observations of positive narrow bipolar pulses, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120 (2015) 7128–7143, DOI: 10.1002/2015JD023150
- [11] **N. Karunarathne, T.C. Marshall, S. Karunarathne, M. Stolzenburg**, Studying sequences of initial breakdown pulses in cloud-to-ground lightning flashes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125 (2020) e2019JD032104, DOI: 10.1029/2019JD032104
- [12] **I. Kolmašová, O. Santolík, T. Farges, S.A. Cummer, R. Lán, L. Uhlíř**, Subionospheric propagation and peak currents of preliminary breakdown pulses before negative cloud-to-ground lightning discharges, *Geophysical Research Letters*, 43 (2016) 1382–1391, DOI: 10.1002/2015GL067364
- [13] **E.M. Smith, T.C. Marshall, S. Karunarathne, R. Siedlecki, M. Stolzenburg**, Initial breakdown pulse parameters in intracloud and cloud-to-ground lightning flashes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123 (2018) 2129–2140, DOI: 10.1002/2017JD027729
- [14] **S. Bandara, T. Marshall, S. Karunarathne, M. Stolzenburg**, Electric field change and VHF waveforms of positive narrow bipolar events in Mississippi thunderstorms, *Atmospheric Research*, 243 (2020) 105000, DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105000
- [15] **S. Bandara, T. Marshall, M. Stolzenburg**, Further studies of positive narrow bipolar events detected at close range, *Atmospheric Research*, 286 (2023) 106668, DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.106668
- [16] **V.A. Rakov, M.D. Tran, Y. Zhu, Z. Ding, A.F.R. Leal, I. Kereszy, S. Chen**, New insights into the lightning discharge processes, *Plasma Sources Science and Technology*, 31 (2022) 104005, DOI: 10.1088/1361-6595/ac9330
- [17] **A.A. Syssoev, D.I. Iudin, A.N. Karashtin, Yu.V. Shlyugaev**, Radiation electric field produced by the lightning leader formation in a thundercloud: Observations and modeling, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 221 (2021) 105686, DOI: 10.1016/j.jastp.2021.105686
- [18] **H. Zhang, G. Lu, X. Qie, R. Jiang, Y. Fan, Y. Tian, Z. Sun, M. Liu, Z. Wang, D. Liu, G. Feng**, Locating narrow bipolar events with single-station measurement of low-frequency magnetic fields, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 143–144 (2016) 88–101, DOI: 10.1016/j.jastp.2016.03.009
- [19] **A.F.R. Leal, V.A. Rakov**, A study of the context in which compact intracloud discharges occur, *Scientific Reports*, 9 (2019) 12218, DOI: 10.1038/s41598-019-48680-6

- [20] **D.A. Smith, M.J. Heavner, A.R. Jacobson, X.M. Shao, R.S. Massey, R.J. Sheldon, K.C. Wiens**, A method for determining intracloud lightning and ionospheric heights from VLF/LF electric field records, *Radio Science*, 39 (2004) RS1010, DOI: 10.1029/2002RS002790
- [21] **I. Kolmasova, T. Marshall, S. Bandara, S. Karunaratne, M. Stolzenburg, N. Karunaratne, R. Siedlecki**, Initial breakdown pulses accompanied by VHF pulses during negative cloud-to-ground lightning flashes, *Geophysical Research Letters*, 46 (2019) 5592–5600, DOI: 10.1029/2019GL082488
- [22] **I. Kolmašová, O. Santolík, T. Farges, W. Rison, R. Lán, L. Uhlíř**, Properties of the unusually short pulse sequences occurring prior to the first strokes of negative cloud-to-ground lightning flashes, *Geophysical Research Letters*, 41 (2014) 5316–5324, DOI: 10.1002/2014GL060913
- [23] **F. Lyu, S.A. Cummer, G. Lu, X. Zhou, J. Weinert**, Imaging lightning intracloud initial stepped leaders by low-frequency interferometric lightning mapping array, *Geophysical Research Letters*, 43 (2016) 1–8, DOI: 10.1002/2016GL069267
- [24] **J.D. Hill, M.A. Uman, D.M. Jordan**, High-speed video observations of a lightning stepped leader, *Journal of Geophysical Research*, 116 (2011) D16117, DOI: 10.1029/2011jd015818
- [25] **D.A. Petersen, W.H. Beasley**, High-speed video observations of a natural negative stepped leader and subsequent dart-stepped leader, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118 (2013) 12,110–12,119, DOI: 10.1002/2013jd019910
- [26] **Q. Qi, W. Lu, Y. Ma, L. Chen, Y. Zhang, V.A. Rakov**, High-speed video observations of the fine structure of a natural negative stepped leader at close distance, *Atmospheric Research*, 178–179 (2016) 260–267, DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.03.027
- [27] **J.R. Dwyer, M.A. Uman**, The physics of lightning, *Physics Reports*, 534 (4) (2014) 147–241, DOI: 10.1016/j.physrep.2013.09.004
- [28] **O. Scholten, B.M. Hare, J. Dwyer, N. Liu, C. Sterpka, S. Buitink, A. Corstanje, H. Falcke, T. Huege, J.R. Hörandel, G.K. Krampah, P. Mitra, K. Mulrey, A. Nelles, H. Pandya, J.P. Rachen, T.N.G. Trinh, S. ter Veen, S. Thoudam, T. Winchen**, Distinguishing features of high altitude negative leaders as observed with LOFAR, *Atmospheric Research*, 260 (2021) 105688, DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105688
- [29] **O. Scholten, B.M. Hare, J. Dwyer, N. Liu, C. Sterpka, S. Buitink, T. Huege, A. Nelles, S. ter Veen**, Time resolved 3D interferometric imaging of a section of a negative leader with LOFAR, *Physical Review D*, 104 (2021) 063022, DOI: 10.1103/PhysRevD.104.063022
- [30] **H.E. Edens, K.B. Eack, W. Rison, S.J. Hunyady**, Photographic observations of streamers and steps in a cloud-to-air negative leader, *Geophysical Research Letters*, 41 (2014) 1336–1342, DOI: 10.1002/2013GL059180
- [31] **P. Ortega, P. Domens, A. Gibert, B. Hutzler, G. Riquel**, Performance of a 16.7 m air rod-plane gap under a negative switching impulse, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 27 (1994) 2379–2387, DOI: 10.1088/0022-3727/27/11/019
- [32] **A.A. Syssoev, D.I. Iudin**, Numerical simulation of electric field distribution inside streamer zones of positive and negative lightning leaders, *Atmospheric Research*, 295 (2023) 107021, DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.107021
- [33] **D.I. Iudin, V.A. Rakov, A.A. Syssoev, A.A. Bulatov, M. Hayakawa**, Formation of decimeter-scale, long-lived elevated ionic conductivity regions in thunderclouds, *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2 (46) (2019) 1–10, DOI: 10.1038/s41612-019-0102-8
- [34] **M.M. Nudnova, A.Y. Starikovskii**, Development of streamer flash initiated by HV pulse with nanosecond rise time, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 36 (2008) 896–897, DOI: 10.1109/TPS.2008.920289
- [35] **H.-D. Betz, T.C. Marshall, M. Stolzenburg, K. Schmidt, W.P. Oettinger, E. Defer, J. Konarski, P. Laroche, F. Dombai**, Detection of in-cloud lightning with VLF/LF and VHF networks for studies of the initial discharge phase, *Geophysical Research Letters*, 35 (2008) L23802, DOI: 10.1029/2008GL035820
- [36] **A.F.R. Leal, V.A. Rakov, B.R.P. Rocha**, Compact intracloud discharges: New classification of field waveforms and identification by lightning locating systems, *Electric Power Systems Research*, 173 (2019) 251–262, DOI: 10.1016/j.epsr.2019.04.016

- [37] V. Cooray, G. Cooray, M. Rubinstein, F. Rachidi, Modeling compact intracloud discharge (CID) as a streamer burst, *Atmosphere*, 11 (5) (2020) 549, DOI: 10.3390/atmos11050549
- [38] A.Yu. Kostinskiy, V.S. Syssoev, N.A. Bogatov, E.A. Mareev, M.G. Andreev, L.M. Makalsky, D.I. Sukharevsky, V.A. Rakov, Observation of a new class of electric discharges within artificial clouds of charged water droplets and its implication for lightning initiation within thunderclouds, *Geophysical Research Letters*, 42 (2015) 8165–8171, DOI: 10.1002/2015GL065620
- [39] A.Yu. Kostinskiy, N.A. Bogatov, V.S. Syssoev, E.A. Mareev, M.G. Andreev, M.U. Bulatov, D.I. Sukharevsky, V.A. Rakov, Unusual plasma formations produced by positive streamers entering the cloud of negatively charged water droplets, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127 (2022) e2021JD035821, DOI: 10.1029/2021JD035821
- [40] D.I. Iudin, S.S. Davydenko, Fraktalnaya model kompaktnogo vnutrioblachnogo razryada. I. Osobennosti stroeniya i evolyutsii // *Izvestiya VUZov. Radiofizika*. 2015. T. 58. № 7. С. 530551.
- [41] V.Yu. Trakhtengerts, O prirode elektricheskikh yacheyek v grozovom oblake // *Doklady AN SSSR*. 1989. T. 308. № 3. S. 584–586.
- [42] E.A. Mareev, A.E. Sorokin, V.Yu. Trakhtengerts, Effects of collective charging in a multiframe aerosol plasma, *Plasma Physics Reports*, 25(3) (1999) 261–272.
- [43] D.I. Iudin, V.Yu. Trakhtengerts, Nelineynaya dinamika grozovogo oblaka // *Izvestiya VUZov Radiofizika*. 2001. T. 44. № 5-6. S. 419–438, DOI: 10.1023/A:1017945129828
- [44] A.A. Syssoev, D.I. Iudin, A.A. Bulatov, V.A. Rakov, Numerical simulation of stepping and branching processes in negative lightning leaders, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125 (2020) e2019JD031360, DOI: 10.1029/2019JD031360
- [45] Ye.G. Grigoryev, Yu.A. Perlovich, G.I. Solovyev, A.L. Udovskiy, V.L. Yakushin, *Fizicheskoye materialovedeniye: Uchebnik dlya vuzov. Pod obshchey red. Kalina B.A. Tom 4. Fizicheskiye osnovy prochnosti. Radiatsionnaya fizika tverdogo tela. Kompyuternoye modelirovaniye*. M.: MIFI, 2008. 696 s.
- [46] E.M. Bazelyan, Yu.P. Rayzer, *Iskrovoy razryad*. M.: MFTI, 1997. 320 s.
- [47] W. Rison, P.R. Krehbiel, M.G. Stock, H.E. Edens, X.-M. Shao, R.J. Thomas, M.A. Stanley, Y. Zhang, Observations of narrow bipolar events reveal how lightning is initiated in thunderstorms, *Nature Communications*, 7 (2016) 10721, DOI: 10.1038/ncomms10721
- [48] J.N. Tilles, N. Liu, M.A. Stanley, P.R. Krehbiel, W. Rison, M.G. Stock, J.R. Dwyer, R. Brown, J. Wilson, Fast negative breakdown in thunderstorms, *Nature Communications*, 10 (1) (2019) 1648, DOI: 10.1038/s41467-019-09621-z

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Artem A. SYSOEV – *Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS)*.

E-mail: asysoev@ipfran.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8786-6744>

Dmitry I. IUDIN – *Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS)*.

E-mail: iudin@ipfran.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8416-9377>

Vladimir A. RAKOV – *University of Florida*.

E-mail: rakov@ece.ufl.edu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4582-9483>

Aleksey A. EMELYANOV – *Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS).*

E-mail: alexey@sorta-nn.ru

Vitaly Yu. KLIMASHOV – *Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS).*

E-mail: klim.nnov@gmail.com

Nikolay N. KOROVKIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

Поступила: 30.11.2023; Одобрена: 14.03.2024; Принята: 28.03.2024.

Submitted: 30.11.2023; Approved: 14.03.2024; Accepted: 28.03.2024.