

Научная статья

УДК 537+519.6

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29403>



А.А. Сысоев^{1,2}, Д.И. Иудин^{1,2}, В.А. Раков³,
А.А. Емельянов¹, В.Ю. Климашов¹, Н.В. Коробкин^{1,4} ✉

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

² Приволжский исследовательский медицинский университет (ПИМУ),
г. Нижний Новгород, Россия;

³ Флоридский университет, Гейнсвилл, Соединенные Штаты;

⁴ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбГУ),
Санкт-Петербург, Россия

✉ nikolay.korovkin@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ АТМОСФЕРНЫХ РАЗРЯДОВ С УЧЕТОМ ТЕРМОДИНАМИКИ ПЛАЗМЕННЫХ КАНАЛОВ. Ч. 1. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Аннотация. В работе представлен новый подход к моделированию сильноточных молниевых разрядов в атмосфере Земли, к которым можно отнести компактные внутриоблачные разряды и начальные импульсы пробоя. Модель обладает высоким пространственно-временным разрешением и учитывает асимметрию пороговых полей распространения положительных и отрицательных стримеров, эволюцию параметров разрядных каналов и возможность их одновременного роста и отмирания в различных частях разрядного древа. Ключевой особенностью модели является учет термодинамики разрядных каналов. Это позволяет связать проводимость и радиус токонесящей части горячего лидерного канала с его температурой, что необходимо для воспроизведения характерных для сильноточных молниевых разрядов токов с амплитудами в десятки тысяч ампер. Работа представлена в двух частях. В данной статье описаны современные представления о сильноточных молниевых разрядах и приведено описание численной модели, позволяющей воспроизвести их эволюцию. Результаты моделирования и их подробный анализ, позволяющий сформулировать новый сценарий развития компактных внутриоблачных разрядов и начальных импульсов пробоя, будут представлены в следующей части исследования.

Ключевые слова: компактный внутриоблачный разряд, начальные импульсы пробоя, стримеры, лидеры, иерархические сети плазменных каналов, термодинамика разрядных каналов, 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. 1. Описание модели // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 4. С. 50–71. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29403>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29403>

A.A. Sysoev^{1,2}, D.I. Iudin^{1,2}, V.A. Rakov³,
A.A. Emelyanov¹, V.Yu. Klimashov¹, N.V. Korovkin^{1,4} ✉

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

² Privolzhsky Research Medical University (PRMU),
Nizhny Novgorod, Russia;

³ University of Florida, Gainesville, United States;

⁴ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU),
St. Petersburg, Russia

✉ nikolay.korovkin@gmail.com

NUMERICAL SIMULATION OF HIGH-CURRENT ATMOSPHERIC DISCHARGES WITH CONSIDERATION OF PLASMA CHANNEL THERMODYNAMICS. PART 1. MODEL DESCRIPTION

Abstract. The paper presents a new approach to modeling high-current lightning discharges in the Earth's atmosphere, which include compact intracloud discharges and initial breakdown pulses. The model has high spatiotemporal resolution and takes into account the asymmetry between threshold propagation fields of positive and negative streamers, evolution of discharge channels parameters, and the possibility of their simultaneous growth and decay in different parts of discharge tree. The key feature of the model is consideration of discharge channel thermodynamics. This makes it possible to relate the conductivity and radius of the current-carrying part of a hot leader channel to its temperature, which is necessary for reproduction of the currents characteristic of high-current lightning discharges with amplitudes of tens of thousands of amperes. The work is presented in two parts. This article is the first part, which describes modern ideas about high-current lightning discharges and presents a numerical model that is able to reproduce their evolution. Simulation results and their detailed analysis, which allows us to formulate a new development scenario for compact intracloud discharges and initial breakdown pulses, will be presented in the second part of the study.

Keywords: compact intracloud discharge, initial breakdown pulses, streamers, leaders, hierarchical networks of plasma channels, discharge channel thermodynamics, 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 channel thermodynamics. Part 1. Model description, *Global Energy*, 29 (04) (2023) 50–71, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29403>

Введение. Объектами исследования данной работы являются компактные внутриоблачные разряды (КВР, в англоязычной литературе встречаются термины “compact intracloud discharge (CID)”, “narrow bipolar event (NBE)” и “narrow bipolar pulse (NBP)”) и начальные импульсы пробоя (НИП, в англоязычной литературе “initial breakdown pulses (IBPs)” или “preliminary breakdown pulses”), привлекающие повышенное внимание благодаря своим импульсным токам с амплитудами в десятки тысяч ампер.

КВР был открыт Дэвидом Ле Вайном в 1980 году [1], где он описан как изолированный во времени и пространстве разряд с протяжённостью от 100 м до 1 км. КВР является самым мощным (на порядок большим, чем у «обычной» молнии) в природе источником ВЧ-ОВЧ излучения (3–300 МГц). КВР обычно возникают на высотах более 10 км [2–7]. Те из них, что образуются между основным положительным и основным отрицательным слоями заряда и переносят вверх отрицательный заряд, называются нижними в отличие от верхних, перекрывающих промежутки между основным положительным и верхним (экранирующим) отрицательным слоями заряда и переносящих вверх положительный заряд. КВР характеризуется биполярным импульсом электрического поля излучения с длительностью 10–30 мкс и амплитудой $\sim 10\text{--}20$ В/м на расстоянии 100 км от источника [3, 8, 9], сравнимой или даже большей, чем у импульса излучения, порождаемого током возвратного удара. Несмотря на преобладание гладкой биполярной формы, осциллограммы электрического поля КВР могут иметь более сложный вид (авторы работ [10] и [3, 11] выделяют 11 и 4 типов осциллограмм соответственно). Отличительной особенностью КВР является то, что всплеск его тока с длительностью микросекундного масштаба и амплитудой в нескольких десятках тысяч ампер (в редких случаях до 150–200 кА) возникает внезапно, без каких-либо инструментально измеряемых предшествующих ему сигналов. Кроме того, совершенно не понятно, каким образом внутри грозового облака за очень малое время развития КВР происходит разделение порядка 0,5–1 Кл электрического заряда. Поэтому неудивительно, что вопрос о механизме развития КВР занимает четвёртое место в приведённом в [12] списке десяти наиболее актуальных вопросов физики молнии. Параметры КВР многократно измерялись и могут быть найдены, например, в работах [3, 5, 7–11, 13]. КВР были промоделированы в [14–21].

Существует два основных сценария формирования КВР. В первом он рассматривается как чисто стримерный пробой (гигантская лавина стримеров), развивающийся без формирования лидерного канала. Данная идея возникла благодаря радиоинтерферометрическим наблюдениям [22, 23]. В них было зарегистрировано распространение в облаке источников излучения, происходящее со скоростями $10^7\text{--}10^8$ м/с, которые были приписаны стримерным разрядам. Для обозначения этих событий были введены понятия быстрого положительного и быстрого отрицательного пробоев (от англ. «fast positive/negative breakdown»). Позднее появилось несколько работ, посвященных численному моделированию быстрого стримерного пробоя [19–21]. В данных моделях высокая скорость стримеров поддерживалась благодаря большим значениям напряженности электрического поля на плоском фронте лавины. Действительно, модель [24] предсказывает, что скорости положительных и отрицательных стримеров могут достигать значений порядка 10^7 м/с при напряженности электрического поля на уровне 1,5–2 МВ/м. Еще одним аргументом в пользу чисто стримерной природы КВР является анализ спектра его излучения [25], который показал присутствие «стримерных» линий на длине волны 337 нм при практически полном отсутствии «лидерных» линий на длине волны 777,4 нм. Однако остается непонятным, за счет чего плоский фронт стримерной лавины может сохранять устойчивость и почему при столь больших локальных напряженностях электрического поля не происходит формирование горячего лидерного канала. Так, авторы [6] со ссылкой на эксперименты [26, 27] отмечают: “However, it is difficult to imagine that a large streamer formation can remain essentially homogeneous during its lifetime of the order of 10 μ s or so. Indeed, hot channel segments are likely to be created inside the streamer formation via the thermal ionizational instability ... and redistribution of current within the overall streamer structure due to interaction of streamer branches with each other (Однако сложно представить, что большое стримерное образование может сохранять однородность на временах жизни порядка 10 мкс. Действительно, горячие лидерные сегменты скорее всего будут возникать внутри стримерного образования в результате развития ионизационно-перегревной неустойчивости ... и перераспределения токов внутри стримерной структуры вследствие взаимодействия стримерных ветвей)”. К тому же, в исследовании [28] было показано, что аномально большие скорости быстрого стри-

мерного пробоя могут быть не реальной скоростью движения фронта разряда, а артефактом применяемой методики обработки радиоинтерферометрических данных.

Альтернативная гипотеза состоит в том, что импульс тока КВР, отвечающий за характерное низкочастотное излучение, протекает по хорошо проводящему лидерному каналу [14, 15, 29]. При этом многократные отражения волны тока от границ канала приводят к формированию мощных стримерных вспышек, которые являются источником наблюдаемого ОВЧ излучения. Одним из преимуществ данного подхода является то, что отражение волны тока от концов проводящего канала естественным образом объясняет наблюдаемые в большинстве случаев осцилляции в хвосте импульса излучения КВР (см. [7] и ссылки там).

Другим мало изученным примером сильноточного молниевоего разряда являются начальные импульсы пробоя, как правило предшествующие инициации ступенчатого отрицательного лидера «классической» молнии [30]. Для НИП, предшествующих разрядам типа облако-земля и внутриоблачным молниям, характерны высоты порядка 5–7 и 8–10 км соответственно [31]. Нижний и верхний диапазоны соответствуют границам между основным отрицательным и нижним положительным (зона формирования отрицательных разрядов типа облако-земля) и между основными отрицательным и положительным (зона формирования внутриоблачных разрядов) слоями заряда [32]. НИП являются сериями биполярных импульсов электрического поля длительностью 20–40 мкс. Полная серия, содержащая около 10 импульсов, разделенных интервалами в десятки – сотни микросекунд, длится в среднем 1–3 мс. Спустя порядка 30 мс от первого импульса НИП, переходящего в нисходящий отрицательный лидер, происходит возвратный удар. Наиболее интересной особенностью НИП является необычайно большие амплитуды всплесков производимого ими излучения (около 1 В/м на расстоянии 100 км от источника [31, 33]), для генерации которых необходимы импульсные токи сопоставимые по величине или даже большие, чем токи молнии типа облако-земля на стадии возвратного удара. Токи НИП и переносимый в каждом импульсе заряд по порядку величины близки к таковым у КВР. Однако для НИП форма импульсов электрического поля обычно осложняется дополнительными микросекундными всплесками, как бы наложенными поверх основного сигнала, и поэтому оказывается более изрезанной [34]. Среди недавних работ, посвященных наблюдению НИП, можно выделить [31, 33, 35–41]. НИП были промоделированы в [16, 34, 42].

Начальные импульсы пробоя принято ассоциировать с гипертрофированными ступенями так называемого начального отрицательного лидера (от англ. «initial negative leader») [38–41]. Используется прямая аналогия с механизмом распространения отрицательного лидера с той лишь разницей, что для объяснения наблюдаемых амплитуд тока НИП требуются ступени длиной в несколько сотен метров [16, 40, 41]. Данная точка зрения подкрепляется тем, что каждый импульс серии сопровождается оптически видимой вспышкой света [43–45] (как и в случае образования ступени отрицательного лидера [46, 47]), а сама серия начальных импульсов обычно завершается формированием нисходящего отрицательного ступенчатого лидера. Стоит, однако, иметь в виду, что «обычные» ступени отрицательного лидера, оптически наблюдаемые вблизи земли, характеризуются длиной порядка 10 м, межступенчатыми интервалами порядка 10 мкс (см. [48] и ссылки там) и пиковыми токами в районе нескольких тысяч ампер [49]. Поэтому любой адекватный механизм формирования НИП должен объяснять столь радикальные отличия.

Происхождение токов КВР и НИП, пиковые значения которых достигают десятков и даже сотен тысяч ампер, на настоящий момент является предметом исследований. Для сравнения, ток в канале нисходящего лидера молнии составляет порядка 100–200 А [30, таблица 1.1]. После контакта лидера молнии с землей формируется импульс тока возвратного удара с типичной амплитудой порядка 30 кА и длительностью в районе 70–80 мкс [30, таблица 1.1]. Он обеспечивает разрядку чехла заряда, окружающего многокилометровый лидерный канал, который формируется в течение единиц – десятков миллисекунд. В случае КВР и НИП ничего подобного быть не может.

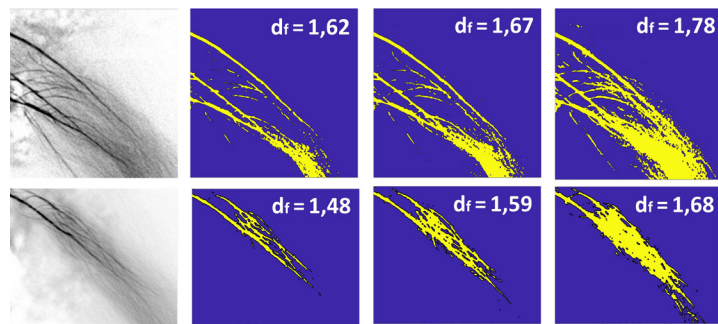


Рис. 1. Оценка фрактальной размерности необычных плазменных образований по данным рис. 2(а) и 5(с) из эксперимента [26]. Двухцветные панели получены при различных пороговых яркостях пикселей. Подписанные на них фрактальные размерности рассчитаны box-counting методом. Реальная (трехмерная) фрактальная размерность может превышать двумерную не более, чем на единицу

Fig. 1. Estimation of the fractal dimension of unusual plasma formations according to the data in Figs. 2(a) and 5(c) from the experiment [26]. Bicolor panels were obtained at different threshold brightness of pixels. Specified fractal dimensions are calculated via the box-counting method. Real (three-dimensional) fractal dimension can exceed the two-dimensional one by no more than unity

КВР является изолированным событием с наблюдаемой длительностью не более 30 мкс, появлению которого не предшествует сколь-нибудь заметная разрядная активность, а НИП образуются в ограниченном объеме облака (оцененном в [41] как 100^3 м^3) ещё до появления ступенчатого отрицательного лидера. Данные обстоятельства указывают на наличие какого-то альтернативного механизма, который способен обеспечить эффективный сбор внутриоблачного заряда за очень малый промежуток времени.

Дополнительный интерес к КВР и НИП обусловлен тем, что их эволюция тесно связана с процессом инициации молнии, который считается самой интригующей из нерешенных проблем атмосферного электричества [12]. Хотя КВР является изолированным разрядом, не исключено, что в редких случаях он может предшествовать появлению «классической» молнии (см. [5] и ссылки там). Серия НИП обычно предшествует появлению молниевых разряда [30]. Кроме того, формирование токовых систем КВР и НИП, которое, как принято считать, не является следствием предшествующей разрядной активности, само по себе относится к процессу инициации молнии.

Концептуальная основа предлагаемой модели

Недавно появились новые сценарии формирования молниевых разрядов [50–52]. В них активно обсуждается эксперимент с искусственным облаком заряженного водного аэрозоля [26], в котором были обнаружены так называемые необычные плазменные образования (от англ. «unusual plasma formations»). Они представляют собой ранее неизвестную форму атмосферного разряда, «вызревающую» в рамках объемной стримерной сети в виде проводящих кластеров сложной формы, включающих в себя каналы с различными температурами (проводимостями). Наиболее горячие фрагменты необычных плазменных образований, формирующиеся в местах слияния токов множества стримеров, способны эффективно поляризоваться и удлиняться во внешнем электрическом поле, формируя лидерный канал за счет концентрации собранной с достаточно большого объема электростатической энергии в малой области пространства. Широкий разброс параметров необычных плазменных образований, варьирующихся от стримерных до лидерных, позволяет классифицировать их как переходное звено в цепи процессов инициации молнии. Важно отметить, что доля горячих хорошо проводящих каналов необычных плазменных образований относительно мала. На это указывает небольшая фрактальная размерность их структуры, вложенной в объемную стримерную сеть, фрактальная размерность которой близка к тройке (см. рис. 1).

Концепция объемной иерархической сети плазменных каналов, развивающейся внутри грозового облака, оказалась чрезвычайно удобной с точки зрения возможности сбора большого количества внутриоблачного заряда за короткий промежуток времени. Действительно, такая сеть, занимающая относительно большой объем (порядка 1 км^3 по оценкам [52]) внутри грозового облака, обладает большой электрической емкостью [17]. А наличие многочисленных параллельно развивающихся проводящих каналов способно обеспечить большой совокупный ток. Если на стадии возвратного удара молнии происходит разрядка чехла заряда радиусом в единицы – десятки метров, охватывающего многокилометровый лидерный канал, то в случае внутриоблачной сети заряд переносится на меньшую высоту, но через гораздо большую площадь. В сценарии [52] принципиально важным фактором, запускающим формирование плазменной сети каналов, являются высокоэнергичные космические частицы (широкие атмосферные ливни). В работе [50] фундаментом инициации молнии является коллективная динамика заряженных гидрометеоров, участвующих в турбулентном движении и создающих сильно неоднородное распределение напряженности электрического поля, что также является необходимым элементом сценария [52]. Это приводит к возникновению в грозовом облаке сначала областей повышенной ионной проводимости, а затем и стримерных разрядов [50, 51, 53].

Предлагаемая в данной работе модель развивает сценарий инициации молнии [50, 51] для случая КВР и НИП. Она воспроизводит эволюцию объёмной сети параллельно развивающихся низкотемпературных плазменных каналов, в рамках которой формируется хорошо проводящий лидерный каркас, стягивающий на себя токи системы. При этом воспроизведение токов КВР и НИП становится возможным благодаря учету термодинамики разрядных каналов, которая определяет транспортные свойства лидерных фрагментов сети. Результаты моделирования позволяют сформулировать новый механизм эволюции сильноточных молниевых разрядов, что важно как для лучшего понимания проблемы инициации молнии, так и для совершенствования методов молниезащиты.

Описание модели

Область моделирования представляет собой прямоугольный параллелепипед, центр которого расположен на высоте 16,15 км над землей. В него вложена простая кубическая решетка с длиной ребра a , равной 8 м, узлы которой служат опорными точками роста разрядных каналов. Вертикальный профиль внутриоблачного электрического поля представляет собой электростатический аналог потенциальной ямы «глубиной» 146 кВ/м и «шириной» около 600 м. Подобное распределение внутриоблачного потенциала может существовать между двумя слоями заряда с хорошо очерченными границами, которые можно сравнить с пластинами огромного облачного конденсатора. Для рассматриваемой высоты это могут быть основной положительный слой заряда снизу и экранирующий отрицательный сверху. Смена направления вектора напряжённости фонового электрического поля на краях данной области ограничивает зону существования разряда, определяя его компактность. Предполагается, что затравочные положительные стримеры возникают внутри области моделирования в результате локальных флуктуаций электрического поля, происхождение которых обосновано в исследованиях [50, 51, 53].

Алгоритм предлагаемой модели основан на принципах работы [54], в которой была представлена продвинутая стохастическая модель молнии. Среди её прогрессивных особенностей можно отметить учёт эволюции параметров (продольное электрическое поле, проводимость, ток) разрядных каналов и возможность их одновременного роста и отмирания в различных частях разрядного древа, а также самосогласованную динамику изменения структуры разряда и пространственного распределения электрического поля. В дополнение к [54], настоящая модель обладает высоким пространственно-временным разрешением и учитывает асимметрию пороговых полей распространения положительных и отрицательных стримеров. Она также включает в себя блок,

отвечающий за эволюцию температуры разрядных каналов и зависящих от неё параметров, что позволяет воспроизвести текущие по разрядным каналам токи амплитудой до десятков тысяч ампер. Основные положения модели описаны ниже.

Электрический потенциал φ , создаваемый внутриоблачным электрическим полем \mathbf{E}_a и зарядами, расположенными в узлах пространственной решетки, вычисляется как решение уравнения Пуассона. Потенциал в узле решетки с радиус-вектором \mathbf{r} может быть найден как

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\sum_{\mathbf{r}' \neq \mathbf{r}} \frac{q_{r'}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} + \frac{q_r}{a/2} \right) + \varphi_a, \quad (1)$$

где q_r и $q_{r'}$ – заряды, расположенные в узлах решетки с радиус-векторами \mathbf{r}' (рассматриваемая точка) и \mathbf{r} (точка-источник) соответственно, φ_a – потенциал, создаваемый вертикально направленным внутриоблачным полем \mathbf{E}_a , $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума, a – шаг пространственной решетки. В формуле (1) суммирование проводится по всем узлам решетки, кроме того, в котором вычисляется потенциал. Собственный потенциал узла оценивается как отношение расположенного в нем заряда к половине шага пространственной решетки $a/2 = 4$ м, который ассоциируется с характерным масштабом распределения заряда вокруг соответствующего узла. Подобный способ решения проблемы сингулярности широко используется в численных методах [55]. В силу удаленности от поверхности земли, в расчетах не учитывается вклад отраженных в ней зарядов.

Напряженность электрического поля $E_{r,r'}$, между парой узлов пространственной решетки с радиус-векторами \mathbf{r} и \mathbf{r}' вычисляется как

$$E_{r,r'} = \frac{(\varphi(\mathbf{r}) - \varphi(\mathbf{r}'))}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}. \quad (2)$$

Знак поля в формуле (2) отвечает за направление переноса заряда и соответствует знаку проекции вектора $E_{r,r'}$ на направление разности $\mathbf{r}' - \mathbf{r}$.

Базовым элементом модели является разрядный канал, который в зависимости от текущей температуры может быть стримерным или лидерным. Каждый канал соединяет пару соседних узлов простой кубической решётки. Приращение канала с образованием новой связи является вероятностным процессом. Соответствующая вероятность зависит от локального значения напряженности электрического поля $E_{r,r'}$ между парой соседних узлов пространственной решётки с радиус-векторами \mathbf{r} и \mathbf{r}' и может быть найдена по формуле Вейбулла (см. рис. 2):

$$P(E_{r,r'}) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{|E_{r,r'}| - E_{pth}^\pm}{E_{ith}} \right)^2 \right\}, \quad \text{если } |E_{r,r'}| \geq E_{pth}^\pm; \quad (3)$$

$$0, \quad \text{если } |E_{r,r'}| < E_{pth}^\pm,$$

где E_{pth}^\pm – пороговое поле поддержания роста положительных и отрицательных стримеров, E_{ith} – нормировочное поле, которое можно ассоциировать с порогом инициации стримеров. В соответствии с хорошо известной асимметрией полярностей [56], $E_{pth}^- \approx 2E_{pth}^+$, поэтому положительные стримеры всегда появляются до отрицательных и растут более интенсивно, по крайней мере на начальном этапе развития разряда. Принято считать, что пороги E_{pth}^+ и E_{pth}^- составляют 5 и 10 кВ/(см·атм) соответственно [56]. Однако известно, что они растут с увеличением абсолютной влажности воздуха (см. [57, 58] и ссылки там), сложным образом зависят от давления (см.,

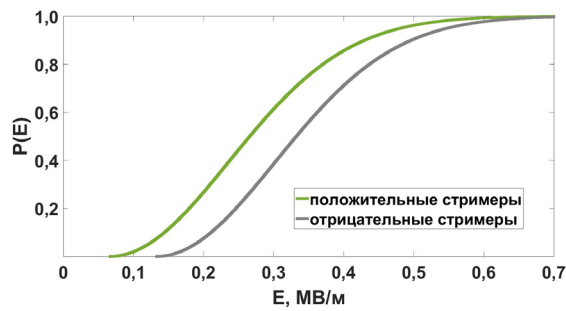


Рис. 2. Зависимость вероятности роста (3) положительных и отрицательных стримеров от напряженности электрического поля (2) между парой соседних узлов пространственной решетки

Fig. 2. Dependence (3) of the probability of positive and negative streamers growth on electric field strength (2) between a pair of adjacent spatial grid nodes

например, [59, 60]) и существенно снижаются при наличии в воздухе переохлажденных водяных паров [61] и гидрометеоров [62].

Модель также учитывает возможность отмирания каналов. Если периферийная связь по истечении одного временного шага модели не испускает из своей вершины новых связей, она удаляется. При этом перенесенный по ней заряд остается «вмороженным» в узел пространственной решетки, внося вклад в заряд чехла лидера.

Одной из важных особенностей модели является учет возможности образования петель внутри разрядной структуры. Это важно для корректного моделирования трехмерной плазменной сети, в рамках которой токи одновременно текут по множеству параллельных каналов. В некоторых ситуациях такой подход может обеспечить большой суммарный ток, протекающий по пучку каналов с относительно малой проводимостью.

Основной новизной данной модели является учет термодинамики разрядных каналов. Для каждой связи, начиная с момента ее появления, решается уравнение теплопроводности

$$-\operatorname{div}(k_T \nabla T) + \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \sigma E^2 - \epsilon_{\text{rad}}, \quad (4)$$

правая часть которого включает источник в виде джоулева нагрева σE^2 и сток в виде потерь на излучение ϵ_{rad} . Уравнение (4) решается в приближении постоянного давления:

$$p = \frac{\rho R T Z}{M_0} = \text{const}, \quad (5)$$

где $R = 8.31 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$ – универсальная газовая постоянная, $M_0 = 29 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ – молярная масса воздуха, $Z = M_0/M$ – сжимаемость газа, отражающая уменьшение его молярной массы M с ростом температуры. Все входящие в (4) и (5) термодинамические величины являются функциями давления и температуры воздуха. Соответствующие зависимости для коэффициента теплопроводности k_T , молярной теплоемкости при постоянном давлении c_p и сжимаемости Z были взяты из источников [63, 64], [64, 65] и [63, 64] соответственно. Зависящая от температуры плотность воздуха ρ вычислялась из формулы (5). Радиационные потери температуры канала ϵ_{rad} соответствуют случаю оптически тонкой плазмы в работе [66]. Поскольку исходные данные для радиационных потерь соответствуют энергии, излучаемой единичным объемом в единицу телесного угла, при подстановке в выражение (4) их необходимо умножить на 4π стерадиан. В рамках радиально-симметричного приближения структуры канала уравнение (4) можно переписать в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho c_p} \left(k_T \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial k_T}{\partial T} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + k_T \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \sigma E^2 - \varepsilon_{\text{rad}} \right). \quad (6)$$

Поскольку в рамках модели одновременно может присутствовать несколько десятков тысяч разрядных каналов, строгое решение уравнения теплопроводности для каждого из них в r - t пространстве не представляется возможным. Вместо этого используется упрощение, предполагающее постоянство функционального профиля радиального распределения температуры канала:

$$T(r) = T_a + (T_m - T_a) e^{-(r/r_T)^2}, \quad (7)$$

где T_m – максимальное значение температуры на оси канала, T_a – температура окружающего воздуха, r_T – термический радиус канала. При таком предположении достаточно решать уравнение (6) в одной единственной точке (r_{eff} , T_{eff}), усредняя его по радиусу от нуля до некоего радиуса отсечки r_{cutoff} . В данной работе в качестве r_{cutoff} используется расстояние от оси, на котором температура канала падает вдвое по сравнению с максимальным значением T_m . Эффективная температура T_{eff} , отвечающая радиусу r_{eff} , находится интегрированием:

$$T_{\text{eff}} = T_a + (T_m - T_a) \frac{\int_0^{r_{\text{cutoff}}} e^{-(r/r_T)^2} dr}{r_{\text{cutoff}}} = T_a + (T_m - T_a) \frac{\sqrt{\pi} \cdot \text{erf}(r_{\text{cutoff}}/r_T) r_T}{2r_{\text{cutoff}}}, \quad (8)$$

где $\text{erf}(x)$ – функция ошибок.

На момент возникновения стримерного канала, который в данной работе ассоциируется с пучком однонаправленных стримеров, ему присваивается начальное значение осевой температуры T_m , которое на 100 К превышает температуру окружающего воздуха $T_a = 217$ К. Если температура на оси канала превышает условный порог $T_c = 5000$ К, соответствующий диапазону температур стримерно-лидерного перехода [67], он становится лидерным.

По каждому разрядному каналу протекают токи выравнивания потенциалов, которые описываются законом Ома (здесь и далее индексы, относящиеся к соединяемым связью узлам, опущены):

$$I = \sigma r_c^2 E, \quad (9)$$

где σ и r_c – проводимость и радиус токового канала, E – напряжённость продольного электрического поля в канале. Для холодных стримерных каналов радиус r_c полагается постоянным, а динамика проводимости описывается полуэмпирическим соотношением

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = (\eta E^2 - \beta) \sigma, \quad (10)$$

которое отражает борьбу джоулева энерговыделения (параметр η) с диссипацией (параметр β), причём изначально стримерный канал обладает пренебрежимо малой проводимостью σ_0 .

Для горячих лидерных каналов, плазму которых можно считать равновесной, параметры σ и r_c полагаются функциями температуры T (см. рис. 3). В данной работе используется приближение, сформулированное в пункте 2.5.2 монографии [67], опирающееся на резкую зависимость равновесной проводимости от температуры плазмы (в данной работе использованы формулы из источника [68]). Оно заключается в замене реального радиального профиля проводимости «ступенькой», описывающей резкий переход от максимального (осевого) значения к нулю. Шири-

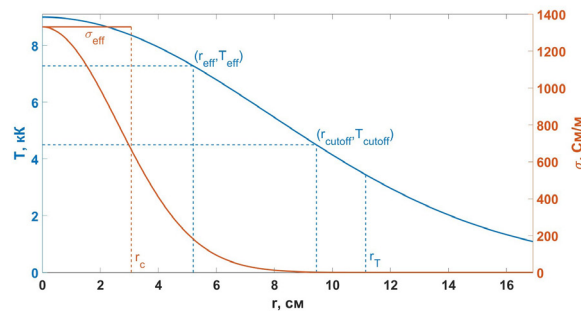


Рис. 3. Иллюстрация связи между температурой, проводимостью и токовым радиусом лидерного канала
 Fig. 3. Illustration of the relationship between temperature, conductivity, and current-carrying radius of the leader channel

ну данной «ступеньки», соответствующую расстоянию от оси канала, на котором проводимость падает вдвое, можно рассматривать как эффективный радиус токового канала. Таким образом, ток лидерного канала полностью определяется текущими значениями его температуры и напряженности продольного электрического поля. В целях соблюдения условия непрерывности радиус токового канала стримеров, независимо от их температуры, считается равным минимальному (начальному) радиусу лидера, который соответствует граничной температуре T_c . При этом проводимость стримерного канала ограничена сверху значением минимальной (стартовой) проводимости лидера, соответствующей той же температуре T_c и равной 5,3 См/м.

В модели присутствует два различных шага по времени. Первый (большой) относится к изменениям структуры разряда, которые включают появление новых каналов и отмирание уже существующих. Он вычисляется как

$$\tau = \frac{L}{\max(V_{\text{str}}^+, V_{\text{str}}^-)}, \quad (11)$$

где $L = (8 + 12\sqrt{2} + 8\sqrt{3})a/26 \approx 12$ м – средневзвешенная по всем возможным направлениям роста длина связи, V_{str}^+ и V_{str}^- – скорости роста положительных и отрицательных стримеров, усредненные по всем каналам, появившимся за время итерации модели τ . Скорости роста положительных и отрицательных стримеров являются функциями напряженности электрического поля (2) между узлами пространственной решетки, которые соединяются новообразованным каналом. Связь между скоростью роста стримеров и электрическим полем соответствует данным рис. 4(b) работы [24]. Такой подход обеспечивает согласование скорости изменения структуры разряда с текущим значением напряженности электрического поля на его фронте. Второй (малый) временной шаг используется для расчета переноса заряда между узлами разрядной структуры и пересчета динамических параметров каналов. В целях обеспечения устойчивости счета он подстраивается под текущее значение максимальной проводимости каналов, уменьшаясь с ростом последней.

Основные параметры модели собраны в табл. 1. Заметим, что на рассматриваемой высоте давление воздуха равно 0,1 атм, а концентрация молекул составляет 13,3% от приземного значения. Поэтому, в соответствии с законами подобия, все характерные размеры должны быть примерно на порядок больше, а все характерные поля – примерно на порядок меньше, чем эквивалентные значения на уровне земли.

Обсуждение

В настоящее время в области физики молнии накопилось огромное количество экспериментальных данных, которые нуждаются в теоретическом осмыслении. Одним из наиболее удобных

Таблица 1

Основные параметры модели

Table 1

Main parameters of the model

Название	Символьное обозначение	Единица измерения	Значение (эквивалент на уровне земли)
Шаг пространственной решетки	a	м	8 (1,06)
Высота центра области моделирования над уровнем моря	h	км	16,15 (0)
^a Давление воздуха	p	атм	0,1 (1,0)
^a Температура окружающего воздуха	T_a	К	217 (288)
Коэффициент падения концентрации молекул воздуха	$N(h)/N(h = 0)$	–	0,133 (1,0)
Напряженность внутриоблачного электрического поля (уровень плато)	E_a	кВ/м	146,3 (1100)
Порог роста положительных стримеров	E_{pth}^+	кВ/м	66,5 (500)
Порог роста отрицательных стримеров	E_{pth}^-	кВ/м	133 (1000)
Нормировочное поле в формуле (3)	E_{ith}	кВ/м	239,4 (1800)
Термический радиус канала в формуле (7)	r_T	см	11,15 (1,48)
Параметр роста проводимости в формуле (10)	η	$m^2B^{-2}c^{-1}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$ (–)
Параметр спада проводимости в формуле (10)	β	c^{-1}	$3,5 \cdot 10^3$ (–)
Начальная проводимость канала	σ_0	См/м	$1,3 \cdot 10^{-7}$ (–)
^b Пороговая температура стримерно-лидерного перехода	T_c	К	5000 (–)
^b Проводимость стримерно-лидерного перехода	σ_c	См/м	5,3 (–)
^b Токовый радиус стримерного канала	r_c	см	2,51 (0,33)

^aЗначения взяты из онлайн базы данных [69].

^bСоответствует максимальному значению для стримера и минимальному (начальному) для лидера.

^bНачальный (минимальный) токовый радиус лидерного канала.

инструментов их анализа является численное моделирование. Благодаря бурному развитию вычислительной техники данный метод становится способным описывать все более и более тонкие процессы, составляющие внутреннюю динамику сложных физических систем, анализ которых выходит за рамки простых численных оценок. Вместе с тем возможности существующих моделей молниевых разрядов по-прежнему недостаточны для решения ряда актуальных задач. До недавнего времени большинство моделей молнии рассматривали древо разряда как средство релаксации внутриоблачной разности потенциалов. При этом пространственное разрешение таких моделей составляло сотни метров, а параметры каналов считались неизменными (обзор предшествующих моделей молнии представлен в [54]). Впервые временная эволюция напряженности продольного

электрического поля и проводимости каналов, а также возможность их одновременного роста и отмирания в различных частях разрядного древа была представлена в работе [54]. Позднее данный подход был применен к моделированию распространения ступенчатого отрицательного лидера [70] и начальной стадии развития молнии [71, 72].

Первая попытка включить в моделирование температуру канала была предпринята в работе [71]. Ее эволюция подчинялась упрощенному уравнению

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{I \Delta \varphi}{V}, \quad (12)$$

в котором произведение тока канала I на разность потенциалов на его концах $\Delta \varphi$, деленное на объем канала V , соответствовало джоулеву нагреву. Был введен диапазон температур от 2950 К до 3050 К, в котором развивается ионизационно-перегревная неустойчивость и происходит стримерно-лидерный переход. Это было необходимо для ограничения проводимости холодных ($T < 2950$ К) стримерных каналов, которая не могла превышать 0,1 См/м. При этом проводимость горячих ($T > 3050$ К) лидерных каналов была зафиксирована на уровне 10 См/м. На дальнейшее развитие лидерного канала его температура никак не влияла. Такая методика, хотя и позволяет отделить стримерные каналы от лидерных, не описывает связь между температурой и током лидерного канала, что крайне важно для моделирования сильноточных атмосферных разрядов и главной стадии молнии.

Основной прогрессивной чертой данной работы является привязка проводимости и радиуса токового канала лидера к его температуре, что потребовало учета описания термодинамики разрядных каналов. При доступных на данный момент возможностях вычислительной техники и вследствие большого числа одновременно существующих элементов разрядной системы (до 25697 в представленном в следующей части работы расчете) решение эволюционного уравнения в пространстве радиус-время для каждого канала представляется невозможным. В качестве доступной альтернативы было использовано упрощающее предположение о неизменности функции (7), описывающей радиальный профиль температуры канала, что позволило осуществить моделирование полного цикла развития разряда за разумное время. Отметим, что даже в моделях, рассматривающих эволюцию параметров одного единственного канала, зачастую используются упрощающие предположения о радиальной зависимости температуры (см., например, работы [73, 74], где используется прямоугольный профиль $T(r)$).

Еще одним существенным упрощением является использование полуэмпирической формулы (10), отвечающей за эволюцию проводимости стримерных каналов. Более корректное описание свойств неравновесной стримерной плазмы с неизбежностью требует рассмотрения ряда плазмохимических реакций, что выходит за рамки данной работы. Во-первых, включение в модель плазмохимических уравнений неприемлемо увеличивает время счета (подавляющее большинство каналов находится на стримерной стадии). Во-вторых, частоты большинства плазмохимических процессов являются резкими функциями локального значения приведенного электрического поля. Последнее невозможно корректно вычислить в рамках численной модели с пространственным разрешением порядка 10 м. Хотя подобный подход вполне реализуем в рамках нульмерных математических моделей (см., например, [73]), его распространение на трехмерные динамические модели разрядов, одновременно включающих десятки тысяч элементов, является предметом будущих исследований. Первый шаг на этом пути был сделан в работе [75], где проводимость стримерного канала вычислялась с учетом подвижностей и концентраций электронов и ионов. Однако авторы не рассматривали плазмохимическую сторону эволюции каналов, пренебрегая вкладом ионов и считая подвижность и пространственное распределение концентрации электронов в канале заданными и не зависящими от времени. Авторы подчеркивают: “In the current

paper, we will make a number of assumptions to make the model as simple as possible. This will allow us to identify the key new features induced by consistent charge transport, without having to wonder whether properties are due to certain other model features (В данной работе мы делаем ряд предположений, упрощающих модель настолько, насколько это возможно. Это позволит нам выделить новые ключевые особенности, обусловленные самосогласованным транспортом заряда, не заботясь о том, вызваны ли они какими-либо специфическими модельными приближениями.)”. Данный подход характерен для всех моделей разряда, оперирующих достаточно большим числом элементов (разрядных каналов), и должен быть преодолен для получения качественно новых результатов.

Заключение

В работе представлен модельный подход, позволяющий воспроизводить импульсные токи с амплитудами в десятки тысяч ампер, присущие таким сильноточным разрядам, как КВР и НИП. В отличие от большинства аналогичных подходов к численному расчету эволюции молнии, представленная модель обладает высоким пространственно-временным разрешением и учитывает асимметрию пороговых полей распространения положительных и отрицательных стримеров, эволюцию параметров разрядных каналов и возможность их одновременного роста и отмирания в различных частях разрядного древа. Главная новизна модели заключается в учёте термодинамики разрядных каналов. Знание температуры лидера позволяет корректно описать его проводимость и радиус токового канала, а, следовательно, и ток. Во второй части работы будут представлены и проанализированы результаты моделирования сильноточного разряда, позволяющие сформулировать новый сценарий развития КВР и НИП.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Le Vine D.M.** Sources of the strongest RF radiation from lightning, *Journal of Geophysical Research*, 85 (1980) 4091–4095, DOI: 10.1029/JC085iC07p04091s
- [2] **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
- [3] **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
- [4] **Zhang H., Lu G., Qie X., Jiang R., Fan Y., Tian Y., Sun Y., Liu M., Wang Z., Liu D., Feng D.** 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
- [5] **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
- [6] **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
- [7] **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
- [8] **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
- [9] **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

- [10] **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
- [11] **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.
- [12] **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
- [13] **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
- [14] **Nag A., Rakov V.A.** Electromagnetic pulses produced by bouncing-wave-type lightning discharges, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 51 (3) (2009), 466–470, DOI: 10.1029/2010JD014235
- [15] **Nag A., Rakov V.A.** Compact intracloud lightning discharges: 1. Mechanism of electromagnetic radiation and modeling, *Journal of Geophysical Research*, 115 (2010) D20102, DOI: 10.1029/2010JD014235
- [16] **C.L. Da Silva, Pasko V.P.** Physical mechanism of initial breakdown pulses and narrow bipolar events in lightning discharges, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120 (2015) 4989–5009, DOI: 10.1002/2015JD023209
- [17] **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.
- [18] **Давыденко С.С., Иудин Д.И.** Фрактальная модель компактного внутриоблачного разряда. II. Особенности электромагнитного излучения // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. 2016. Т. 59. № 7. С. 620637.
- [19] **Attanasio A., Krehbiel P.R., C.L. da Silva.** Griffiths and Phelps lightning initiation model, revisited, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124 (14) (2019) 8076–8094, DOI: 10.1029/2019JD030399
- [20] **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
- [21] **Attanasio A., C.L. da Silva, Krehbiel P.** Electrostatic conditions that produce fast breakdown in thunderstorms, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126 (2021) e2021JD034829, DOI: 10.1029/2021JD034829
- [22] **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
- [23] **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
- [24] **Starikovskiy A.Yu., Aleksandrov N.L.** How pulse polarity and photoionization control streamer discharge development in long air gaps, *Plasma Sources Science and Technology*, 29 (2020) 075004, DOI: 10.1088/1361-6595/ab9484
- [25] **Liu F., Lu G., Neubert T., Lei J., Chanrion O., Østgaard N., Li D., Luque A., Gordillo-Vázquez F.J., Reglero V., Lyu W., Zhu B.** Optical emissions associated with narrow bipolar events from thunderstorm clouds penetrating into the stratosphere, *Nature Communications*, 12 (2021) 6631, DOI: 10.1038/s41467-021-26914-4
- [26] **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
- [27] **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

- [28] **Liu N., Scholten O., Dwyer J.R., Hare B.M., Sterpka C.F., Tilles J.N., Lind F.D.** Implications of multiple corona bursts in lightning processes for radio frequency interferometer observations, *Geophysical Research Letters*, 49 (7) (2022) e2021GL097367, DOI: 10.1029/2021GL097367
- [29] **Hamlin T., Light T.E., Shao X.M., Eack K.B., Harlin J.D.** Estimating lightning channel characteristics of positive narrow bipolar events using intrachannel current reflection signatures, *Journal of Geophysical Research*, 112 (2007) D14108, DOI: 10.1029/2007JD008471
- [30] **Rakov V.A., Uman M.A.** *Lightning: Physics and effects*, Cambridge University Press, New York, 2003, 687 p.
- [31] **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
- [32] **Karunarathna N., Marshall T.C., Karunarathne S., Stolzenburg M.** Initiation locations of lightning flashes relative to radar reflectivity in four small Florida thunderstorms, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122 (12) (2017) 6565–6591, DOI: 10.1002/2017JD026566
- [33] **Karunarathna 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
- [34] **Karunarathna N., Marshall T.C., Stolzenburg M., Karunarathne S.** Modeling initial breakdown pulses of CG lightning flashes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119 (2014) 9003–9019, DOI: 10.1002/2014JD021553
- [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] **Nag A., Rakov V.A.** Some inferences on the role of lower positive charge region in facilitating different types of lightning, *Geophysical Research Letters*, 36 (2009) L05815, DOI: 10.1029/2008GL036783
- [37] **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
- [38] **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
- [39] **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
- [40] **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
- [41] **Liu N.Y., Scholten O., Hare B.M., Dwyer J.R., Sterpka C.F., Kolmašová I., Santolík O.** LOFAR observations of lightning initial breakdown pulses, *Geophysical Research Letters*, 49 (2022) e2022GL098073, DOI: 10.1029/2022GL098073
- [42] **Nag A., Rakov V.A.** A unified engineering model of the first stroke in downward negative lightning, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121 (2016) 2188–2204, DOI: 10.1002/2015JD023777
- [43] **Campos L.Z.S., Saba M.M.F.** Visible channel development during the initial breakdown of a natural negative cloud-to-ground flash, *Geophysical Research Letters*, 40 (2013) 4756–4761, DOI: 10.1002/grl.50904
- [44] **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

- [45] **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
- [46] **Wang D., Takagi N., Watanabe T., Rakov V.A., Uman M.A.** Observed leader and return-stroke propagation characteristics in the bottom 400 m of a rocket-triggered lightning channel, *Journal of Geophysical Research*, 104(D12) (1999) 14,369–14,376, DOI: 10.1029/1999JD900201
- [47] **Chen M., Takagi N., Watanabe T., Wang D., Kawasaki Z.-I., Liu X.** Spatial and temporal properties of optical radiation produced by stepped leaders, *Journal of Geophysical Research*, 104(D22) (1999) 27,573–27,584, DOI: 10.1029/1999JD900846
- [48] **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
- [49] **Krider E., Weidman C., Noggle R.C.** The electric field produced by lightning leader steps, *Journal of Geophysical Research*, 82 (6) (1977) 951–960.
- [50] **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
- [51] **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
- [52] **Kostinskiy A.Yu., Marshall T.C., Stolzenburg M.** The mechanism of the origin and development of lightning from initiating event to initial breakdown pulses (v.2), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125 (22) (2020) e2020JD033191, DOI: 10.1029/2020JD033191
- [53] **Иудин Д.И.** Зарождение молниевых разрядов как индуцированный шумом кинетический переход // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. 2017. Т. 60. № 5. С. 418–441.
- [54] **Iudin D.I., Rakov V.A., Mareev E.A., Iudin F.D., Syssoev A.A., Davydenko S.S.** Advanced numerical model of lightning development: Application to studying the role of LPCR in determining lightning type, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122 (12) (2017) 6416–6430, DOI: 10.1002/2016jd026261
- [55] **Sadiku M.N.O.** *Elements of electromagnetics*, Oxford University Press, Oxford, 2018, 920 p.
- [56] **Базелян Э.М., Райзер Ю.П.** *Искровой разряд*. М.: МФТИ, 1997. 320 с.
- [57] **Mikropoulos P.N., Stassinopoulos C.A., Sarigiannidou B.C.** Positive streamer propagation and breakdown in air: the influence of humidity, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15 (2008) 416–425, DOI: 10.1109/TDEI.2008.4483460
- [58] **Starikovskiy A.Y., Bazelyan E.M., Aleksandrov N.L.** The influence of humidity on positive streamer propagation in long air gap, *Plasma Sources Science and Technology*, 31 (2022) 114009, DOI: 10.1088/1361-6595/aca04c
- [59] **Phelps C.T., Griffiths R.F.** Dependence of positive corona streamer propagation on air pressure and water vapor content, *Journal of Physics*, 47 (1976) 2929–2934, DOI: 10.1063/1.323084
- [60] **Aleksandrov N.L., Bazelyan E.M.** Temperature and density effects on the properties of a long positive streamer in air, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 29 (1996) 2873, DOI: 10.1088/0022-3727/29/11/021
- [61] **Войцеховский М.Б.** Аномальный стримерный разряд в воздухе с переохлажденными водяными парами и его свечение // *Доклады АН СССР*. 1986. Т. 288. № 2. С. 351–354.
- [62] **Mackay W.A.** Some investigations on the deformation and breaking of water drops in strong electric fields, *Proceedings of the Royal Society A*, 133 (1931) 565–587.
- [63] **Hansen C.F.** Approximations for the thermodynamic and transport properties of high-temperature air, *NASA Technical Report*, R-50 (1959) 1–35.
- [64] **Варгафтик Н.Б.** *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*. М.: Наука, 1972. 720 с.

- [65] Stupochenko E.V., Samuilov E.V., Pleshanov A.S., Rozhdestvensky I.B., Stakhanov I.P. Thermodynamic properties of air at high temperatures, Symposium (International) on Combustion, 8 (1) (1961) 388–397, DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80527-8
- [66] Naghizadeh-Kashani Y., Cressault Y., Gleizes A. Net emission coefficient of air thermal plasmas, Journal of Physics D: Applied Physics, 35 (22) (2002) 2925–2934, DOI: 10.1088/0022-3727/35/22/306
- [67] Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
- [68] Borovsky J.E. An electrodynamic description of lightning return strokes and dart leaders: Guided wave propagation along conducting cylindrical channels, Journal of Geophysical Research, 100 (D2) (1995) 2697–2726, DOI: 10.1029/94JD00407
- [69] Thermopedia. Atmosphere (physical properties of), <https://www.thermopedia.com/content/570/>, DOI: 10.1615/AtoZ.a.atmosphere_physical_properties_of. (дата обращения: 06.09.2023).
- [70] 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
- [71] Булатов А.А., Иудин Д.И., Сысоев А.А. Самоорганизующаяся транспортная модель искрового разряда в грозовом облаке // Известия ВУЗов Радиофизика. 2020. Т. 63. № 2. С. 125–154.
- [72] 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
- [73] C.L. da Silva, Sonnenfeld R.G., Edens H.E., Krehbiel P.R., Quick M.G., Koshak W.J. The plasma nature of lightning channels and the resulting nonlinear resistance, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124 (2019) 9442–9463, DOI: 10.1029/2019JD030693
- [74] Taylor M.C., C.L. da Silva, Walker T.D., Christian H.J. Data-driven simulations of the lightning return stroke channel properties, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 64 (5) (2022) 1461–1469, DOI: 10.1109/TEMC.2022.3189590
- [75] Luque A., Ebert U. Growing discharge trees with self-consistent charge transport: The collective dynamics of streamers, New Journal of Physics, 16 (2014) 013039, DOI: 10.1088/1367-2630/16/1/013039

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СЫСОЕВ Артем Андреевич — научный сотрудник, *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 — ведущий научный сотрудник, *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН)*, д-р физ.-мат. 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
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>

REFERENCES

- [1] **D.M. Le Vine**, Sources of the strongest RF radiation from lightning, *Journal of Geophysical Research*, 85 (1980) 4091–4095, DOI: 10.1029/JC085iC07p04091
- [2] **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
- [3] **S. Karunaratne, T.C. Marshall, M. Stolzenburg, N. Karunaratna**, Observations of positive narrow bipolar pulses, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120 (2015) 7128–7143, DOI: 10.1002/2015JD023150
- [4] **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
- [5] **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
- [6] **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
- [7] **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
- [8] **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
- [9] **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
- [10] **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
- [11] **S. Bandara, T. Marshall, S. Karunaratne, 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
- [12] **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
- [13] **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

- [14] **A. Nag, V.A. Rakov**, Electromagnetic pulses produced by bouncing-wave-type lightning discharges, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 51 (3) (2009), 466–470, DOI: 10.1029/2010JD014235
- [15] **A. Nag, V.A. Rakov**, Compact intracloud lightning discharges: 1. Mechanism of electromagnetic radiation and modeling, *Journal of Geophysical Research*, 115 (2010) D20102, DOI: 10.1029/2010JD014235
- [16] **C.L. Da Silva, V.P. Pasko**, Physical mechanism of initial breakdown pulses and narrow bipolar events in lightning discharges, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120 (2015) 4989–5009, DOI: 10.1002/2015JD023209
- [17] **D.I. Iudin, S.S. Davydenko**, Fraktalnaya model kompaktnogo vnutrioblachnogo razryada. I. Osobennosti stroyeniya i evolyutsii // *Izvestiya VUZov. Radiofizika*. 2015. T. 58. № 7. С. 530551.
- [18] **S.S. Davydenko, D.I. Iudin**, Fraktalnaya model kompaktnogo vnutrioblachnogo razryada. II. Osobennosti elektromagnitnogo izlucheniya // *Izvestiya VUZov. Radiofizika*. 2016. T. 59. № 7. S. 620637.
- [19] **A. Attanasio, P.R. Krehbiel, C.L. da Silva**, Griffiths and Phelps lightning initiation model, revisited, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124 (14) (2019) 8076–8094, DOI: 10.1029/2019JD030399
- [20] **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
- [21] **A. Attanasio, C.L. da Silva, P. Krehbiel**, Electrostatic conditions that produce fast breakdown in thunderstorms, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126 (2021) e2021JD034829, DOI: 10.1029/2021JD034829
- [22] **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
- [23] **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
- [24] **A.Yu. Starikovskiy, N.L. Aleksandrov**, How pulse polarity and photoionization control streamer discharge development in long air gaps, *Plasma Sources Science and Technology*, 29 (2020) 075004, DOI: 10.1088/1361-6595/ab9484
- [25] **F. Liu, G. Lu, T. Neubert, J. Lei, O. Chanrion, N. Østgaard, D. Li, A. Luque, F.J. Gordillo-Vázquez, V. Reglero, W. Lyu, B. Zhu**, Optical emissions associated with narrow bipolar events from thunderstorm clouds penetrating into the stratosphere, *Nature Communications*, 12 (2021) 6631, DOI: 10.1038/s41467-021-26914-4
- [26] **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
- [27] **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
- [28] **N. Liu, O. Scholten, J.R. Dwyer, B.M. Hare, C.F. Sterpka, J.N. Tilles, F.D. Lind**, Implications of multiple corona bursts in lightning processes for radio frequency interferometer observations, *Geophysical Research Letters*, 49 (7) (2022) e2021GL097367, DOI: 10.1029/2021GL097367
- [29] **T. Hamlin, T.E. Light, X.M. Shao, K.B. Eack, J.D. Harlin**, Estimating lightning channel characteristics of positive narrow bipolar events using intrachannel current reflection signatures, *Journal of Geophysical Research*, 112 (2007) D14108, DOI: 10.1029/2007JD008471
- [30] **V.A. Rakov, M.A. Uman**, *Lightning: Physics and effects*, Cambridge University Press, New York, 2003, 687 p.
- [31] **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

- [32] **N. Karunarathna, T.C. Marshall, S. Karunarathne, M. Stolzenburg**, Initiation locations of lightning flashes relative to radar reflectivity in four small Florida thunderstorms, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122 (12) (2017) 6565–6591, DOI: 10.1002/2017JD026566
- [33] **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
- [34] **S. Karunarathne, T.C. Marshall, M. Stolzenburg, N. Karunarathna**, Modeling initial breakdown pulses of CG lightning flashes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119 (2014) 9003–9019, DOI: 10.1002/2014JD021553
- [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. Nag, V.A. Rakov**, Some inferences on the role of lower positive charge region in facilitating different types of lightning, *Geophysical Research Letters*, 36 (2009) L05815, DOI: 10.1029/2008GL036783
- [37] **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
- [38] **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
- [39] **I. Kolmasova, T. Marshall, S. Bandara, S. Karunarathne, M. Stolzenburg, N. Karunarathne, 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
- [40] **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
- [41] **N.Y. Liu, O. Scholten, B.M. Hare, J.R. Dwyer, C.F. Sterpka, I. Kolmašová, O. Santolík**, LOFAR observations of lightning initial breakdown pulses, *Geophysical Research Letters*, 49 (2022) e2022GL098073, DOI: 10.1029/2022GL098073
- [42] **A. Nag, V.A. Rakov**, A unified engineering model of the first stroke in downward negative lightning, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121 (2016) 2188–2204, DOI: 10.1002/2015JD023777
- [43] **L.Z.S. Campos, M.M.F. Saba**, Visible channel development during the initial breakdown of a natural negative cloud-to-ground flash, *Geophysical Research Letters*, 40 (2013) 4756–4761, DOI: 10.1002/grl.50904
- [44] **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
- [45] **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
- [46] **D. Wang, N. Takagi, T. Watanabe, V.A. Rakov, M.A. Uman**, Observed leader and return-stroke propagation characteristics in the bottom 400 m of a rocket-triggered lightning channel, *Journal of Geophysical Research*, 104(D12) (1999) 14,369–14,376, DOI: 10.1029/1999JD900201
- [47] **M. Chen, N. Takagi, T. Watanabe, D. Wang, Z.-I. Kawasaki, X. Liu**, Spatial and temporal properties of optical radiation produced by stepped leaders, *Journal of Geophysical Research*, 104 (D22) (1999) 27,573–27,584, DOI: 10.1029/1999JD900846
- [48] **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

- [49] **E. Krider, C. Weidman, R.C. Noggle**, The electric field produced by lightning leader steps, *Journal of Geophysical Research*, 82 (6) (1977) 951–960.
- [50] **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
- [51] **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
- [52] **A.Yu. Kostinskiy, T.C. Marshall, M. Stolzenburg**, The mechanism of the origin and development of lightning from initiating event to initial breakdown pulses (v.2), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125 (22) (2020) e2020JD033191, DOI: 10.1029/2020JD033191
- [53] **D.I. Iudin**, Zarozhdeniye molniyevogo razryada kak indutsirovannyi shumom kineticheskiy perekhod // *Izvestiya VUZov. Radiofizika*. 2017. T. 60. № 5. S. 418–441.
- [54] **D.I. Iudin, V.A. Rakov, E.A. Mareev, F.D. Iudin, A.A. Syssoev, S.S. Davydenko**, Advanced numerical model of lightning development: Application to studying the role of LPCR in determining lightning type, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122 (12) (2017) 6416–6430, DOI: 10.1002/2016jd026261
- [55] **M.N.O. Sadiku**, *Elements of electromagnetics*, Oxford University Press, Oxford, 2018, 920 p.
- [56] **E.M. Bazelyan, Yu.P. Rayzer**, *Iskrovoy razryad*. M.: MFTI, 1997. 320 s.
- [57] **P.N. Mikropoulos, C.A. Stassinopoulos, B.C. Sarigiannidou**, Positive streamer propagation and breakdown in air: the influence of humidity, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15 (2008) 416–425, DOI: 10.1109/TDEI.2008.4483460
- [58] **A.Y. Starikovskiy, E.M. Bazelyan, N.L. Aleksandrov**, The influence of humidity on positive streamer propagation in long air gap, *Plasma Sources Science and Technology*, 31 (2022) 114009, DOI: 10.1088/1361-6595/aca04c
- [59] **C.T. Phelps, R.F. Griffiths**, Dependence of positive corona streamer propagation on air pressure and water vapor content, *Journal of Physics*, 47 (1976) 2929–2934, DOI: 10.1063/1.323084
- [60] **N.L. Aleksandrov, E.M. Bazelyan**, Temperature and density effects on the properties of a long positive streamer in air, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 29 (1996) 2873, DOI: 10.1088/0022-3727/29/11/021
- [61] **M.B. Voytsekhovskiy**, Anomalnyy strimernyy razryad v vozdukh s pereokhlazhdennymi vodyanymi parami i yego svecheniye // *Doklady AN SSSR*. 1986. T. 288. № 2. S. 351–354.
- [62] **W.A. Macky**, Some investigations on the deformation and breaking of water drops in strong electric fields, *Proceedings of the Royal Society A*, 133 (1931) 565–587.
- [63] **C.F. Hansen**, Approximations for the thermodynamic and transport properties of high-temperature air, *NASA Technical Report*, R-50 (1959) 1–35.
- [64] **N.B. Vargaftik**, *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey*. M.: Nauka, 1972. 720 s.
- [65] **E.V. Stupochenko, E.V. Samuilov, A.S. Pleshanov, I.B. Rozhdestvensky, I.P. Stakhanov**, Thermodynamic properties of air at high temperatures, *Symposium (International) on Combustion*, 8 (1) (1961) 388–397, DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80527-8
- [66] **Y. Naghizadeh-Kashani, Y. Cressault, A. Gleizes**, Net emission coefficient of air thermal plasmas, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 35 (22) (2002) 2925–2934, DOI: 10.1088/0022-3727/35/22/306
- [67] **E.M. Bazelyan, Yu.P. Rayzer**, *Fizika molnii i molniyeshchity*. M.: Fizmatlit, 2001. 320 s.
- [68] **J.E. Borovsky**, An electrodynamic description of lightning return strokes and dart leaders: Guided wave propagation along conducting cylindrical channels, *Journal of Geophysical Research*, 100 (D2) (1995) 2697–2726, DOI: 10.1029/94JD00407
- [69] Thermopedia. Atmosphere (physical properties of), <https://www.thermopedia.com/content/570/>, DOI: 10.1615/AtoZ.a.atmosphere_physical_properties_of. (data obrashcheniya: 06.09.2023).
- [70] **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

[71] **A.A. Bulatov, D.I. Iudin, A.A. Sysoyev**, Samoorganizuyushchayasya transportnaya model iskrovogo razryada v grozovom oblake // Izvestiya VUZov Radiofizika. 2020. T. 63. № 2. S. 125–154.

[72] **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

[73] **C.L. da Silva, R.G. Sonnenfeld, H.E. Edens, P.R. Krehbiel, M.G. Quick, W.J. Koshak**, The plasma nature of lightning channels and the resulting nonlinear resistance, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124 (2019) 9442–9463, DOI: 10.1029/2019JD030693

[74] **M.C. Taylor, C.L. da Silva, T.D. Walker, H.J. Christian**, Data-driven simulations of the lightning return stroke channel properties, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 64 (5) (2022) 1461–1469, DOI: 10.1109/TEMC.2022.3189590

[75] **A. Luque, U. Ebert**, Growing discharge trees with self-consistent charge transport: The collective dynamics of streamers, *New Journal of Physics*, 16 (2014) 013039, DOI: 10.1088/1367-2630/16/1/013039

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 V. KOROVKIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>

Поступила: 20.09.2023; Одобрена: 20.10.2023; Принята: 28.11.2023.

Submitted: 20.09.2023; Approved: 20.10.2023; Accepted: 28.11.2023.