

Инициация молнии как следствие естественной эволюции грозового облака. Ч. 3. Стимеры и стимерно-лидерный переход

ИУДИН Д.И.^{1,2}, СЫСОЕВ А.А.^{1,2}, РАКОВ В.А.³

¹ПИМУ, Нижний Новгород, Россия

²ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия

³Университет Флориды, Гейнсвилл, Флорида, США

Это – заключительная часть исследования, посвященного описанию авторского сценария инициации молнии в грозовом облаке, первые две части которого представлены в работах [1, 2]. В первой части показано, что учет процесса отлипания электронов от отрицательных ионов понижает разрядную напряженность воздуха на 15–30 %. Это частично упрощает, но не решает проблему инициации молнии в грозовом облаке, максимальные напряжённости электрического поля в котором примерно на порядок ниже электрической прочности воздуха. Во второй части описан переход от миллиметровых коронных разрядов к дециметровым областям повышенной ионной проводимости, который становится возможным, если пространственно-временная частота коронных разрядов, возникающих из-за столкновений (сближений) гидрометеоров, превышает вполне умеренное значение $0,1 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$. В свою очередь, области повышенной ионной проводимости являются источниками положительных стимеров. В статье представлен финальный этап процесса зарождения молнии, на котором ориентируемые крупномасштабным электрическим полем стимеры объединяются в единую плазменную сеть, внутри которой формируется горячий лидерный канал. Показано, что для осуществления перехода от стимеров к «зародышу» лидера молнии необходимо наличие разности потенциалов между границами зоны сильного внутриоблачного поля, превышающей 3 МВ. В конце работы приведено общее заключение, подводящее итоги трилогии.

Ключевые слова: инициация молнии, стимеры, лидеры, объёмные сети плазменных каналов, необычные плазменные образования, теория перколяции

Сети плазменных каналов в грозовом облаке.

В полном соответствии с народной мудростью «один в поле не воин» одиночные стимеры не способны трансформироваться в лидерный канал. В лабораторных условиях стимерная корона и лидер формируются благодаря наличию высоковольтных электродов. Начальный участок лабораторного лидера, называемый стемом (от англ. “stem”, в русскоязычной литературе можно также встретить прямой перевод – «стебель»), возникает благодаря огромному количеству стимеров (даже для лидера с током порядка 1 А частота появления стимеров из его головки оценивается как 10^9 с^{-1} [3]), которые проходят через небольшую область пространства и совокупно прогревают ее своими токами [3]. Процессы на головке растущего положительного лидера молнии, вероятно, принципиально не отличаются от лабораторных, но механизм его инициации должен быть совершенно иным, поскольку в диэлектрической среде грозового облака нет высоковольтных электродов. Многие исследователи согласны с тем, что процесс зарождения лидера молнии имеет принципиально коллективный характер в том смысле, что

он включает в себя многочисленные одновременно развивающиеся стимерные системы. Авторы обзора [4] формулируют эту мысль следующим образом: «*In order to create and maintain a hot channel, the energy from the electrostatic field must be concentrated into a much smaller volume, where the heating occurs. This may happen via the creation of an extended stremers network, with many streamers feeding their current into a narrow channel* (Чтобы создать и поддерживать горячий канал, энергия электростатического поля должна быть сконцентрирована в небольшом объёме облака, где и происходит нагрев. Это может достигаться за счёт создания обширной сети стимеров, собирающих заряды с большого объёма облака и питающих суммарным током тонкий канал)».

Гипотеза о существовании сетей плазменных каналов внутри грозового облака была косвенно подтверждена в эксперименте с искусственным аэрозольным облаком заряженных гидрометеоров [5], в котором были обнаружены так называемые необычные плазменные образования (от англ. “unusual plasma formations, UPFs”). В этом уникальном по близости к

условиям реальной грозовой тучи эксперименте с помощью скоростной инфракрасной камеры, работающей в связке со скоростной камерой видимого диапазона, были зафиксированы иерархические структуры сложной формы. Они «созревают» внутри стримерной сети, включающей в себя плазменные каналы на разных стадиях развития, и имеют высокие температуры, сравнимые с температурами лидера (несколько тысяч градусов Кельвина), и времена жизни порядка миллисекунд, что четко отличает их от холодных быстро затухающих стримеров. С другой стороны, поскольку геометрия этих структур (сложная организованная сеть каналов, занимающих относительно большой объём облака) сильно отличается от геометрии лидера (основного канала с ответвлениями, растущими в одном направлении и заканчивающимися стримерными зонами), их нельзя назвать лидерами. Кроме того, яркость каналов в занятом *UPF* пространстве изменяется более плавно, чем у лидеров. По этим причинам обнаруженная форма разряда была отнесена к новому, ранее неизвестному, типу. Вероятно, наиболее прогретые участки *UPFs*, расположенные в местах слияния токов многочисленных стримеров, могут эффективно поляризоваться и вытягиваться, образуя лидерный канал за счёт концентрации электростатической энергии, собираемой с достаточно большого объёма в малой области пространства, что полностью соответствует приведённому выше утверждению Двайера и Юмана. Авторы [5] заявляют, что *UPFs*, вероятно являясь переходным звеном от стримерной формы разряда к лидерной, «металлизируют» облачный объём, как описано в [6], тем самым создавая точки роста для лидера молнии. Согласно [7], время образования *UPFs* составляет порядка 1 мкс. Таким образом, есть серьезные основания полагать, что естественные аналоги *UPFs* могут существовать в реальном грозовом облаке и быть важной частью процесса инициации молний.

Для объяснения механизма формирования в облаке сетей плазменных каналов обратимся к приведённой во второй части исследования [2] схеме формирования областей повышенной ионной проводимости. Аналогично тому, как новые центры производства ионов возникают поверх останков старых при $\mathfrak{M} \geq \mathfrak{M}_c \approx 0,1 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ (данное критическое значение получено в работе [2]), можно показать, что пространственно-временное перекрывание отдельных стримерных разрядов начинается при выполнении того же условия. Действительно, области повышенной ионной проводимости с размерами 0,1–1 м создают флуктуации электрического поля такого же масштаба. Исходя из того, что стримеры продолжают расти до тех пор, пока не выходят из области, электрическое поле внутри которой превышает порог поддержания их роста [3], можно ожидать все тех же дециметровых–метровых масштабов самих стримеров. Так как в условиях изобилия электронов, отлипающих от отрицательных ионов в поле стримерных головок,

стримеры начинают активно ветвиться (начиная с масштабов, всего на порядок превышающих их диаметр [8]), занятый стримерным разрядом объём можно приблизительно оценить как $L_\perp^3 \approx 1 \text{ м}^3$. Поскольку плазма стримерного канала быстро теряет проводимость из-за прилипания и рекомбинации (в 10^2 раз за 0,3 мкс и в 10^6 раз за 1 мкс [9]), время жизни стримера крайне мало. Однако каждая стримерная головка оставляет после себя канал, температура которого на несколько градусов выше температуры окружающего воздуха [9]. Согласно уравнению теплопроводности, время жизни остаточного прогрева стримера можно оценить как отношение квадрата радиуса его канала ($\approx 10^{-5} \text{ м}^2$ при радиусе стримера порядка нескольких миллиметров [8]) к температурному коэффициенту диффузии ($\approx 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ [10]), которое составляет порядка секунды. Поскольку характерные масштабы и времена жизни стримерных останков оказываются приблизительно такими же, как у областей повышенной ионной проводимости [2], они имеют примерно такой же четырёхмерный гиперобъём $\mathfrak{S} \approx 1 \text{ м}^3\text{с}$. Следовательно, критическое значение пространственно-временной частоты появления стримеров тоже будет таким же, как в случае областей повышенной ионной проводимости, т.е. $0,1 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$.

Таким образом, если каждая область повышенной ионной проводимости (ОПИП) приводит к появлению хотя бы одного стримера, в грозовом облаке формируется объёмная плазменная сеть, состоящая из «живых» стримеров и останков ранее затухших стримерных каналов, преобладающих на начальном этапе. Если пространственно-временная частота появления стримеров будет не меньше критического порога $0,1 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ (выполняется автоматически, если каждая ОПИП обеспечивает появление хотя бы одного стримера), по крайней мере некоторые стримеры будут проходить по следам, оставшимся от своих предшественников. В такой ситуации температура стримерных останков будет постепенно расти за счёт кумулятивного эффекта джоулева энерговыделения. В конце концов в некоторых областях пространства температура повышается настолько, что вступает в действие процесс ионизационно-перегревной неустойчивости, приводящий к появлению зачатков лидерных каналов. Подобно пространственным стемам (стеблям), сопровождающим распространение лабораторных [11, 12] и молниевых [13–16] ступенчатых отрицательных лидеров, горячие сегменты поляризуются во внешнем поле и становятся «зонами роста» противоположно направленных положительных и отрицательных стримеров, ускоряя образование сети плазменных каналов. Эти горячие сегменты, естественные аналоги лабораторных *UPFs*, обладают более высокими по отношению к большинству окружающих их каналов температурами и проводимостями. Поэтому электрическое поле на их концах должно быть усилено за счет поляризации во внешнем поле тем больше, чем длиннее они становятся. В кон-

це концов горячие каналы различных *UPFs* сливаются друг с другом вследствие электростатического притяжения, формируя канал «молодого» лидера молнии.

Стоит отметить, что влияние активных частиц и нагрева в следе предыдущего стимерного разряда на развитие последующего, проходящего по той же траектории, является прочно установленным фактом [8, 17]. Очевидным фактором, способствующим «затягиванию» стимера в след ранее затухшего канала, является наличие в остаточной плазме отрицательных ионов, которые становятся поставщиками затравочных электронов за счет отлипания в сильном поле стимерной головки. Важным экспериментальным подтверждением обсуждаемого выше кумулятивного эффекта является эксперимент [18], посвященный исследованию эффективности механизмов диссипации квазиэлектростатической энергии в серии периодических разрядов импульсного напряжения в воздушном промежутке стержень–плоскость длиной 15 мм. Амплитуда пика, длительность импульса и скважность подаваемого на стержень напряжения составляли 30 кВ, 15 нс и 1 мс соответственно. Было установлено, что уже через несколько повторных прохождений стимерных каналов по одной и той же траектории происходит переход от стимерной формы разряда к искровой (*streamer-to-spark transition*), приводящий к перекрытию разрядного промежутка.

Ещё один пример качественного изменения свойств плазменного канала под действием последовательно проходящих по нему разрядов дает работа [19], в которой описан процесс инициации лидера молнии за счёт «реактивации» останков ранее затухшего канала. Авторы отмечают: «*Overall, the discharge activity at this stage appeared as brief sparks migrating throughout the cloud ... and keeping some segments of the previously created but largely decayed channel network alive. We speculate that when a “weak link” in the channel network is found, it can be converted (via the cumulative effect of multiple sparks following the same path) to a bidirectional leader seed*» (В целом, разрядная активность на этом этапе была представлена короткоживущими искровыми разрядами, мигрирующими по всему облаку ... и поддерживающими в активном состоянии некоторые сегменты ранее сформированной, но в значительной степени распавшейся сети каналов. Мы предполагаем, что при обнаружении «слабого звена» в сети каналов оно может быть преобразовано (благодаря кумулятивному эффекту множественных искровых разрядов, проходящих по одной и той же траектории) в двунаправленный зародыш лидера»).

Критерий формирования лидера молнии. Очевидным условием описанного выше сценария заполнения грозового облака сетью плазменных каналов является наличие в нём или, по крайней мере, в какой-то его области относительно высокой напряжённости крупномасштабного электрического поля E_a . Действительно, если величина внешнего поля будет значительно

меньше мезомасштабных всплесков, возникающих на полюсах областей повышенной ионной проводимости, направления роста стимерных разрядов будут практически случайными [20]. Теоретически образование сети каналов возможно и в этом случае, но при условии гораздо большей пространственно-временной частоты появления стимеров. Однако, даже если сеть всё-таки образуется, степень её поляризации во внешнем поле, скорее всего, будет недостаточной для зарождения лидера молнии. По мере увеличения амплитуды E_a растёт «организующая» роль крупномасштабного поля: появляется выделенное направление, вдоль которого объединяются стимерные каналы [20]. Кроме того, в более сильных полях ускоряются процессы, связанные с нагревом газа и поляризацией проводящих структур.

Даже если напряжённость крупномасштабного электрического поля E_a в некотором объёме грозового облака достаточно велика, этого может оказаться недостаточно. Необходимо также, чтобы измеренный вдоль направления вектора E_a размер занятой им области H был достаточно большим:

$$U_H = \int_0^H (\mathbf{E}_a \cdot \mathbf{z}_0) dz \geq 3 \text{ МВ}, \quad (1)$$

где \mathbf{z}_0 – вектор единичной длины, направленный вдоль поля E_a .

Критерий (1) имеет экспериментальное происхождение. В исследовании [21] посредством запуска ракет с заземленным проводом в поле грозового облака изучались условия, необходимые для возникновения и роста восходящего положительного лидера. Было установлено, что для инициации лидера с конца заземляющего провода длиной 400 м необходимо внешнее электрическое поле напряжённостью 13 кВ/м. В момент старта лидера молнии потенциал ракеты относительно окружающего воздуха составлял 3,6 МВ (отрицательный по отношению к земле). При этом первые импульсы тока (также называемые предшественниками), сигнализирующие о наличии стимеров на верхнем конце провода, были зарегистрированы у его основания при вдвое меньшей длине провода, когда разность потенциалов между ракетой и окружающим её воздухом была равна 1,3 МВ. Дополнительным аргументом в пользу правильности условия (1) являются результаты работы [22], посвященной исследованию условий зарождения восходящего лидера молнии с заземлённых объектов высотой h и незаземлённых прятёжнностью L во внешнем поле E_a . Было установлено, что для инициации разряда требуется «закороченная» разность потенциалов, вычисляемая как $E_a h$ и $E_a (L/2)$ для заземлённых и незаземлённых объектов соответственно, составляющая порядка 1 МВ. Показательным примером является инцидент с космическим кораблем «Апполон-12», спровоцировавшим разряд молнии во время запуска. На момент удара молнии эффективная длина корабля с учётом выхлопной струи горячих газов составляла примерно 400 м при внешнем поле E_a

≥ 10 кВ/м. Т.е. «закороченная» разность потенциалов должна была составлять не менее 2 МВ, что близко к критерию (1).

Если напряженность крупномасштабного электрического поля E_a достаточно велика для образования сетей плазменных каналов, но условие (1) не выполняется, возникают так называемые разряды-предвестники (от англ. “*precursors*”), которые дают экспериментально наблюдаемое электромагнитное излучение, но не оканчиваются инициацией молнии [23, 24]. Похожая ситуация наблюдалась во время извержений вулкана Сакурадзима в Японии с мая по июнь 2015 г. [25], когда было зарегистрировано относительно длительное ОВЧ-излучение разрядной активности, отличающееся от излучения молниевого разряда, но сходное с излучением предвестников.

В работе [26] «зародыш» молнии (*lightning seed*) определён как вытянутое плазменное образование, проводимость и длина которого составляют порядка 10^{-4} См/м и 10 м соответственно. В данной работе под «зародышем» молнии подразумевается горячий хорошо проводящий самоподдерживающийся канал, способный выжить после выхода из зоны сильного электрического поля за счёт высокой степени поляризации (усиления поля на своих концах). Вместо конкретизации параметров «молодого» лидерного канала, которые едва ли поддаются экспериментальной проверке, вводится эмпирический критерий (1). Два подхода не противоречат друг другу. Действительно, чтобы «закоротить» разность потенциалов 3 МВ, десятиметровый канал должен находиться во внешнем поле напряжённостью $3 \cdot 10^5$ В/м, что примерно на порядок ниже разрядной напряжённости воздуха на уровне моря ($E_b = 3$ МВ/(м·атм)) и находится на верхней границе максимальных измеренных в грозовом облаке напряжённостей электрических полей ($1\text{--}3 \cdot 10^5$ В/м [27]). Отметим, что требование на наличие разности потенциалов 3 МВ является вполне выполнимым, что выгодно отличает предлагаемый в данной работе сценарий инициации молнии от альтернативных подходов, для реализации многих из которых необходимы внутриоблачные разности потенциалов в сотни миллионов вольт [28, 29].

Моделирование процесса инициации молнии. Заключительная часть сценария инициации молнии ранее была промоделирована в работах [30–32]. Используемые в них модельные подходы основаны на результатах работы [33], в которой была представлена продвинутая стохастическая модель развития молнии, обладающая широким спектром преимуществ по отношению к альтернативным подходам [34–46]. Среди них можно выделить учёт эволюции параметров (напряженность продольного электрического поля, проводимость и ток) разрядных каналов и возможность одновременного роста и отмирания каналов в различных частях разрядного древа. Модель включает самосогласованную динамику изменения структуры разрядного

древа и пространственного распределения электрического поля, что делает развитие моделируемого разряда более реалистичным.

В [30] промоделирован процесс возникновения прогретого хорошо проводящего лидерного канала за счет объединения токов десятков тысяч стримеров, каждый из которых изначально обладает пренебрежимо малой проводимостью и температурой. К преимуществам модели относятся отсутствие привязки разрядных каналов к пространственной решетке и учет процесса стримерно-лидерного перехода, сформулированного в терминах температуры канала с опорой на хорошо известный универсальный механизм ионизационно-пирогревной неустойчивости. Было показано, что в основе процесса формирования двунаправленного лидера молнии лежит эффект самоорганизации разрядных структур. Его движущей силой является электростатическое взаимодействие, возникающее между близко расположенным поляризованными во внешнем поле каналами. Верификация результатов моделирования показала, что морфология, скорость распространения и электрические параметры (ток и погонный заряд чехла лидера канала) разрядного древа зарождающегося модельного лидера молнии хорошо согласуются с современными представлениями о физике молниевого разряда.

В [31] представлена численная модель, примененная к воспроизведению процессов возникновения, роста и последующего слияния биполярных стримерных/лидерных систем с образованием «зародыша» молнии. Предполагалось, что причиной появления затравочных положительных стримеров является описанный в [47] механизм усиления электрического поля на полюсах областей повышенной ионной проводимости. Основой динамики развития системы является ускоряющаяся во времени кластеризация поляризованных во внешнем поле разрядных структур. Акты слияния стримерных/лидерных систем происходят естественным образом в результате электростатического притяжения положительного конца одного поляризованного во внешнем поле разрядного древа к отрицательному концу другого. Результаты моделирования были использованы для расчета электромагнитного излучения моделируемой системы токов в дальней зоне. Было проведено сравнение полученной в рамках модели осциллограммы электрического поля излучения с собственными данными регистрации излучения грозы, происходившей 15 мая 2019 г. в Нижегородской области. Было показано, что предсказания модели хорошо согласуются с данными измерений, причем наиболее интенсивные биполярные импульсы электрического поля с амплитудой 0,1 В/м и длительностью 0,2 мкс генерируются кратковременными мощными импульсами тока выравнивания потенциалов с амплитудами в несколько сотен (до тысячи) ампер, возникающими при слиянии биполярных стримерных/лидерных систем. Результаты работы

позволяют интерпретировать наблюдаемое излучение грозового облака как результат естественной динамики развития внутриоблачных разрядов, что является косвенным аргументом в пользу правильности предложенного в [20] механизма формирования лидера молнии.

В [32] был проведен анализ развивающегося в грозовом облаке эстафетного переноса заряда (эстафетной проводимости) и его роли в процессе инициации молнии. Определение «эстафетный» связано с тем, что транспорт заряда происходит в отсутствие проводящего канала, перекрывающего область сильного электрического поля. Перенос заряда вдоль однородного внешнего поля происходит за счёт перманентно возникающих и распадающихся проводящих элементов, которые «подхватывают» имеющиеся в облаке пространственные заряды и перераспределяют их за счёт собственной поляризации. Рассматриваются две последовательно развивающиеся моды эстафетного переноса заряда. Первая (достримерная) обеспечивается наличием в грозовом облаке областей повышенной ионной проводимости, динамика которых усиливает локальные флуктуации электрического поля до уровня, достаточного для появления положительных стримеров [47, 48]. Вторая, более эффективная, мода связана с кластеризацией биполярных стримерных/лидерных систем. Каждый этап был исследован в рамках отдельной специально разработанной численной модели. На начальной (гораздо более долгой и более однородной) стадии эволюции грозового облака эстафетный перенос заряда обеспечивается перманентно возникающими и диссилирующими областями повышенной ионной проводимости, подготавливающими условия для появления положительных стримеров. На последующей стримерной/лидерной стадии самоорганизующаяся мода эстафетного переноса заряда воспроизводит себя на все больших пространственных масштабах и завершается формированием лидера молнии (рис. 1 и 2).

Заключение к трилогии. Процесс инициации молнии является одним из ключевых объектов изучения для специалистов в области атмосферного электричества и смежных дисциплин. В данной трилогии статей, включающих [1, 2], описан опирающийся на исследования [20, 47, 48] механизм зарождения молнии в грозовом облаке, последовательно разворачивающейся на нескольких пространственно-временных масштабах. Сначала происходит переход от мелкомасштабных (0,1–1 см) коронных разрядов к мезомасштабным (0,1–1 м) стримерным разрядам, а затем – от стримеров к самоподдерживающемуся «зародышу» молнии длиной в десятки метров.

Согласно [47], мелкомасштабные коронные разряды (центры ионизации или центры производства ионов), возникающие в моменты соударений/сближений гидрометеоров, приводят к засеву облака пятнами положительных и отрицательных ионов с размерами 0,1–1 м и остаточной проводимостью 10^{-13} – 10^{-12} См/м.

Если значение пространственно-временной частоты коронирования гидрометеоров становится больше $0,1 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ (для сравнения, частоты соударений (сближений) гидрометеоров в условиях грозового облака могут составлять десятки и даже сотни актов в кубометре за секунду), вступает в силу направленная переколяция в четырехмерном пространственно-временном континууме. Новые центры производства ионов начинают появляться не в «чистом» воздухе, а на фоне остаточной ионной концентрации предыдущих поколений центров ионизации. Запускается «эстафетный» механизм роста ионной концентрации, который приводит к появлению областей повышенной ионной проводимости с масштабами 0,1–1 м и проводимостью 10^{-10} – 10^{-9} См/м. Времена жизни данных областей $v_h^{-1} = 1$ –10 с определяются потерями ионов на гидрометеорах и превышают характерные времена их поляризации (максвелловской релаксации). Благодаря этому напряженность электрического поля на полюсах областей повышенной ионной проводимости увеличивается до уровня, достаточного для появления дециметровых–метровых положительных стримеров. Значительную роль на данной стадии развития грозового облака играет снижение разрядной напряженности воздуха за счет отлипания электронов от отрицательных ионов. Фактически получается, что для появления свободных электронов достаточно полей, которые на 15–30 % ниже электрической прочности воздуха. Их относительная доля в «сообществе» отрицательно заряженных частиц, которая может быть выражена через отношение эффективной частоты отлипания к частоте прилипания v_d/v_a , растет с ростом приведенной напряженности электрического поля. Таким образом, развитие разряда начинается при меньших полях и на меньших высотах по сравнению с традиционно принятой концепцией, опирающейся на равенство частот ионизации и прилипания.

Дальнейший переход от стримеров к самоподдерживающемуся лидеру молнии описан в [20], где показано, что если каждая область повышенной ионной проводимости за время своей жизни генерирует хотя бы один положительный стример, то внутри грозового облака возникает трехмерная сеть плазменных каналов. Те элементы плазменной сети, которые расположены в местах наибольшей концентрации токов, превращаются в горячие лидерные сегменты. Их прогрев происходит за счет кумулятивного эффекта джоулема нагрева и развития ионизационно-перегревной неустойчивости. Горячие сегменты поляризуются и удлиняются, слияясь в единый лидерный канал «зародыша» молнии. Образование стримерной сети требует выполнения ряда условий. Если напряженность крупномасштабного электрического поля будет относительно слабой, его направляющее действие может оказаться недостаточным и преимущественное направление развития стримерных разрядов будет отсутствовать. Данное обстоятельство снижает эффективность поляризации и

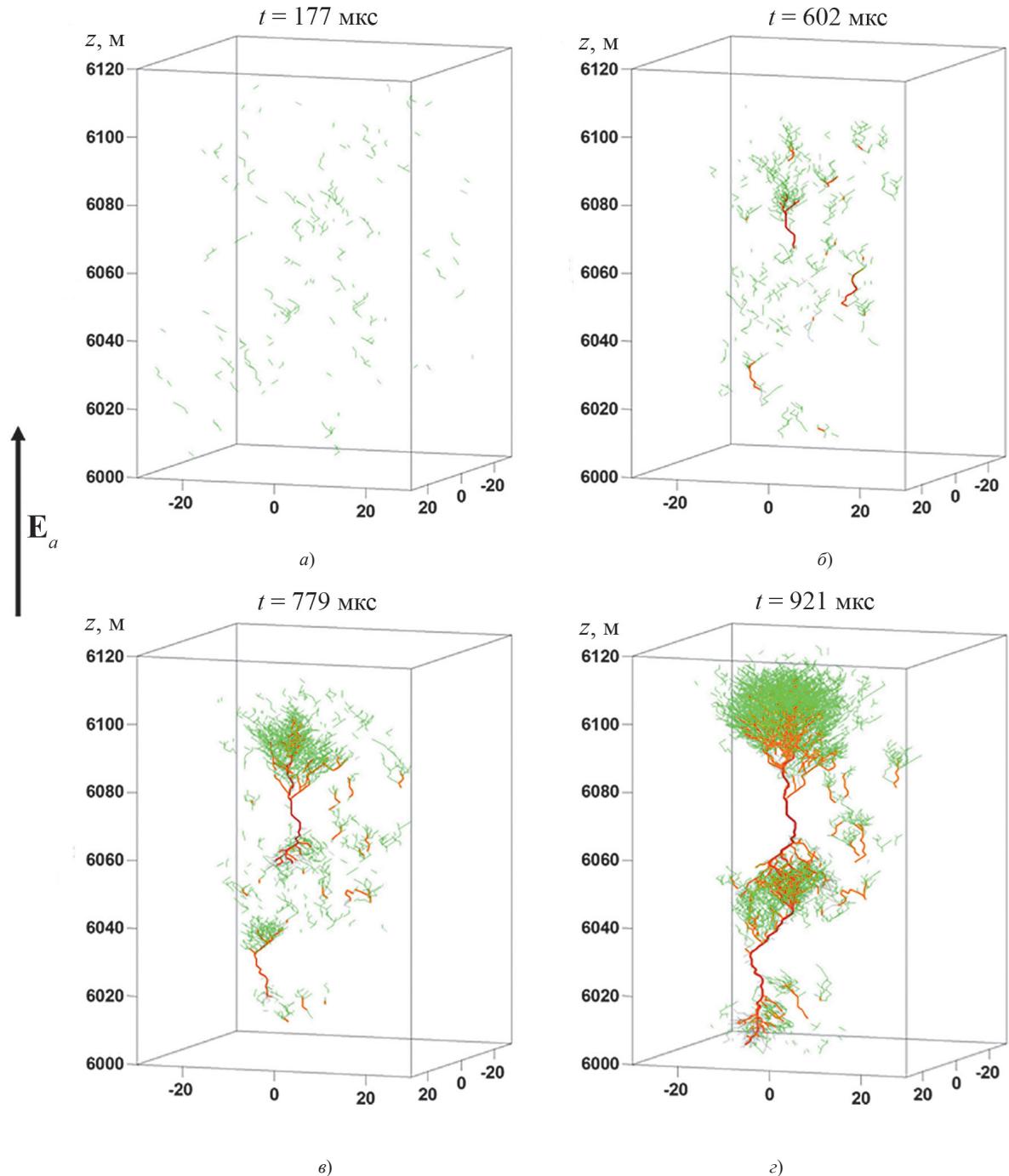


Рис. 1. Иллюстрация динамики эволюции одновременно развивающихся стримерных систем в случае наличия внешнего электрического поля с напряженностью $E_a = 6 \cdot 10^4$ В/м, достаточного для формирования лидера молнии. На стадии (a) модельный объем заполнен разделявшимися в пространстве положительными стримерами, стартующими из областей повышенной ионной проводимости. На стадиях (б) и (в) некоторые из них поляризуются до уровня, достаточного для того, чтобы трансформироваться в двунаправленные лидерные каналы, которые срастаются друг с другом на стадии (г), формируя полноценный лидер молнии. Каналы положительных стримеров, отрицательных стримеров и лидерные секции, проводимость которых выше 1 См/м, обозначены зеленым, серым и красным цветами соответственно. Сверху над каждой панелью показаны моменты времени от начала моделирования. На финальной стадии (г) «закорачиваемая» лидером разность потенциалов составляет около 7 МВ (адаптированный рис. 10 из [32])

Fig. 1. Illustration of the dynamics of evolution of simultaneously developing streamer systems in the presence of an external electric field $E_a = 6 \cdot 10^4$ V/m which is sufficient for lightning leader formation. At the stage (a), the model volume is filled with spatially separated positive streamers starting from elevated ionic conductivity regions. At stages (б) and (в), some of them polarize enough to transform into bidirectional leader channels which merge with each other at stage (г) forming a full-fledged lightning leader. Channels of positive streamers, negative streamers, and leader sections, the conductivity of which is higher than 1 S/m, are marked in green, gray and red, respectively. At the top of each panel, the times elapsed since the beginning of the simulation are shown. At stage (г) the potential difference “bridged” by the leader is about 7 MV (adapted Fig. 10 from the [32])

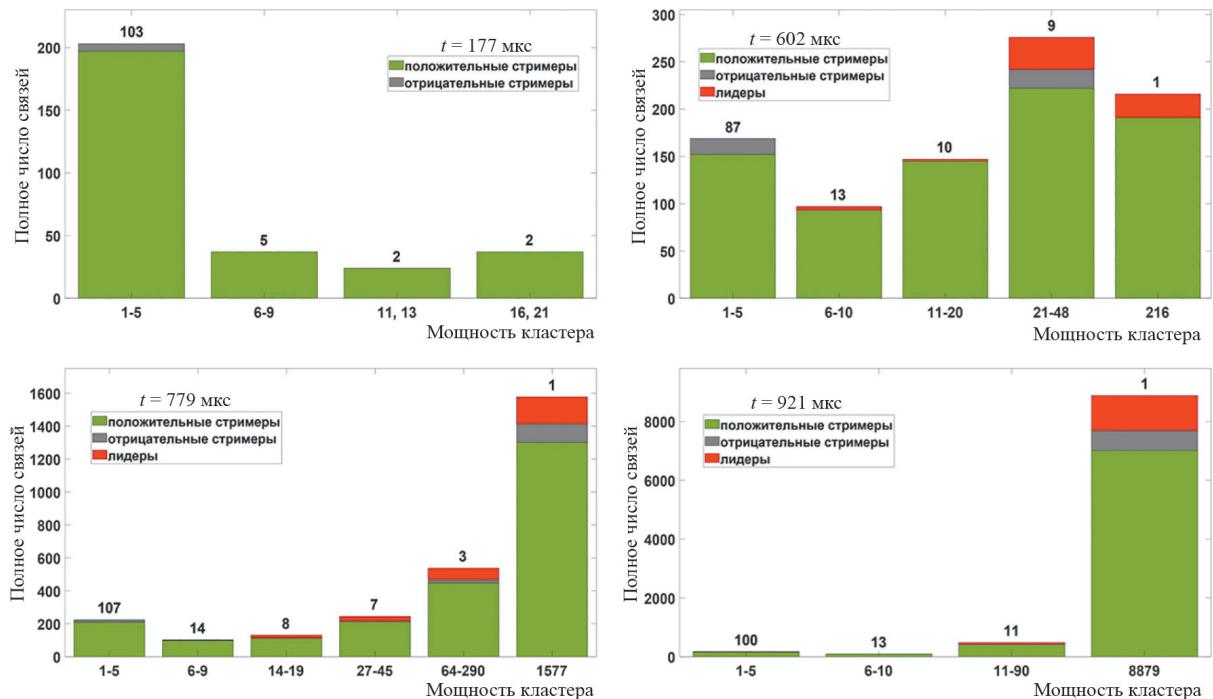


Рис. 2. Распределения модельных связей по кластерам различных мощностей (под мощностью кластера понимается число входящих в него каналов) в моменты времени, соответствующие панелям (а)–(е) рис. 1. Помимо наиболее распространенных положительных стимеров каждый столбец распределения может включать в себя меньшее число отрицательных стимеров и лидерных секций. Числа над каждым столбцом показывают число кластеров с количеством связей, указанным на горизонтальной оси. На каждой панели наибольший кластер показан справа (адаптированный рис. 14 из [32])

Fig. 2. Distributions of model links over clusters of different intensity (intensity of a cluster means the number of channels included in it) at the moments of time corresponding to panels (a) – (e) in Fig. 1. In addition to the most common positive streamers, each bar may include smaller amount of negative streamers and leader sections. The numbers above each bar show the amounts of clusters with the quantities of channels shown on the horizontal axis. In each panel the largest cluster is shown on the right. (adapted Fig. 14 from the [32])

взаимодействия стимерных систем и, как следствие, не позволяет им объединиться в единую структуру. Если напряженность внешнего электрического поля, напротив, оказывается достаточно большой, индивидуальные очаги стимерной активности эффективно поляризуются, электростатически притягиваются друг к другу и, в конце концов, кластеризуются, формируя вытянутые вдоль направления вектора напряженности внешнего поля хорошо проводящие структуры. Кроме величины напряженности электрического поля важен также пространственный масштаб его существования, т.е. решающую роль в формировании лидера молнии играет разность потенциалов между границами активной зоны грозового облака. Необходимым условием формирования самоподдерживающегося «зародыша» молнии, способного выжить после выхода из области сильного электрического поля, является наличие в активной зоне грозового облака разности потенциалов, превышающей 3 МВ. В ином случае, если сеть плазменных каналов все-таки формируется, возникают разряды-предвестники (“precursors”), не выходящие за границы породивших их плазменных сетей.

Важнейшими элементами предложенной схемы являются стохастическая составляющая напряженности электростатического поля грозового облака на микро-

и мезомасштабах и кумулятивные эффекты, приводящие сначала к «засеванию» облака долгоживущими зонами повышенной ионной проводимости, затем к формированию обширных стимерных сетей, а впоследствии и к появлению «зародыша» лидера внутри сети плазменных каналов. При этом основные события описанного сценария разворачиваются в рамках фрактальных пространственно-временных кластеров и не затрагивают большую часть пространственно-временного объема облака. Усредненная по пространству и времени картина выглядит так, как будто никаких внутриоблачных разрядов быть не может. Действительно, на каждом этапе представленной схемы, будь то электронные лавины, стимеры или протяженные сети плазменных каналов, в среднем процессы диссипации преобладают над кратковременными сильно локализованными процессами генерации. Возможно, именно поэтому проблема инициации молниевого разряда все еще возглавляет список десяти наиболее важных проблем физики молний.

Важно отметить, что необходимые для реализации описанного механизма условия, накладываемые на пространственно-временную частоту коронирования гидрометеоров и внутриоблачную разность потенциалов, которые должны превышать $0,1 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ и 3 МВ

соответственно, вполне реализуемы в условиях типичного грозового облака, что подтверждается результатами экспериментальных оценок частоты столкновений (сближений) гидрометеоров [49–52] и измерений напряженностей внутриоблачных электрических полей [53, 54]. Следует отметить, что, как и во всех альтернативных сценариях инициации молний [28, 29, 55–70], некоторые положения предложенного механизма являются в значительной степени умозрительными и нуждаются в дальнейшей экспериментальной проверке. С другой стороны, представленный в данной трилогии работ сценарий не нуждается в привлечении каких-либо внешних вспомогательных факторов, будь то высокоэнергичные частицы космических лучей [28, 29, 58–60, 63, 70], нереалистично большие внутриоблачные разности потенциалов [28, 29] или экстремально крупные вытянутые гидрометеоры [63], что выгодно отличает его от альтернативных гипотез.

Эпилог к трилогии. Подобно искусному фокуснику, Природа ловко прячет механизм инициации молний за облачной дымкой. В качестве пустого цилиндра она предъявляет нам данные *in situ* измерений внутриоблачных полей, максимальные значения напряженностей которых на порядок ниже пробойного уровня, а в качестве вынутого из цилиндра кролика – многокилометровый молниевый разряд. Для разгадки величайшей тайны атмосферного электричества потребовался синтез теории переколяции и физики газового разряда. Было обнаружено, что в одном рукаве Природа прячет области повышенной ионной проводимости, незаметно возникающие в грозовом облаке за счет «жизнедеятельности» многих поколений коронных разрядов, а в другом – объемные сети плазменных каналов, внутри которых в конце концов и формируется лидер молнии. Фактически один и тот же трюк повторяется дважды. На первом этапе в четырехмерном пространстве-времени происходит взаимное перекрытие пятен остаточной ионной концентрации, в результате которого появляются области повышенной ионной проводимости, источники положительных стимеров. На второй стадии в пространственно-временном континууме перекрываются уже стимерные разряды, в результате чего формируются сети плазменных каналов, поляризационные токи которых генерируют «зародыш» молнии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иудин Д.И., Сысоев А.А., Раков В.А. Инициация молний как следствие естественной эволюции грозового облака. Ч. 1. Роль отлипания в снижении критической разрядной напряженности воздуха. – Электричество, 2022, № 11, с. 13–28.
2. Иудин Д.И., Сысоев А.А., Раков В.А. Инициация молний как следствие естественной эволюции грозового облака. Ч. 2. Достимерный этап. – Электричество, 2022, № 12, с. 13–22.
3. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. М.: МФТИ, 1997, 320 с.
4. Dwyer J.R., Uman M.A. The Physics of Lightning. – Physics Reports, 2014, vol. 534(4), pp. 147–241, DOI:10.1016/j.physrep.2013.09.004.
5. Kostinskiy A.Yu. et al. 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, 2015, vol. 42, pp. 8165–8171, DOI:10.1002/2015GL065620.
6. Iudin D.I., Trakhtengerts V.Yu., Hayakawa M. Fractal Dynamics of Electric Discharges in a Thundercloud. – Physical Review E, 2003, vol. 68, p. 016601, DOI:10.1103/PhysRevE.68.016601.
7. Kostinskiy A.Yu. et al. Unusual plasma formations produced by positive streamers entering the cloud of negatively charged water droplets. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2022, vol. 127(21), p. e2021JD035821, DOI:10.1029/2021JD035821.
8. Nijdam S., Teunissen J., Ebert U. The Physics of Streamer Discharge Phenomena. – Plasma Sources Science and Technology, 2020, vol. 29(10), p. 103001, DOI:10.1088/1361-6595/abaa05.
9. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молний и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001, 320 с.
10. Варгатник Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972, 720 с.
11. Горин Б.Н., Шкилев А.В. Развитие электрического разряда в длинных промежутках стержень-плоскость при отрицательном импульсном напряжении. – Электричество, 1976, № 6, с. 31–39.
12. Reess T. et al. An Experimental Study of Negative Discharge in a 1.3 m Point-Plane Air Gap: the Function of the Space Stem in the Propagation Mechanism. – Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, vol. 28(11), pp. 2306–2313.
13. Hill J.D., Uman M.A., Jordan D.M. High-Speed Video Observations of a Lightning Stepped Leader. – Journal of Geophysical Research, 2011, vol. 116, p. D16117, DOI:10.1029/2011jd015818.
14. 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, 2013, vol. 118(21), pp. 12110–12119, DOI:10.1002/2013jd019910.
15. Edens H.E. et al. Photographic Observations of Streamers and Steps in a Cloud-to-Air Negative Leader. – Geophysical Research Letters, 2014, vol. 41(4), pp. 1336–1342, DOI:10.1002/2013GL059180.
16. Jiang R. et al. Channel Branching and Zigzagging in Negative Cloud-to-Ground Lightning. – Scientific Reports, 2017, vol. 7, p. 3457, DOI:10.1038/s41598-017-03686-w.
17. Nijdam S. et al. Probing Background Ionization: Positive Streamers with Varying Pulse Repetition Rate and with a Radioactive Admixture. – Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, vol. 44(45), p. 455201, DOI:10.1088/0022-3727/44/45/455201.
18. Starikovskiy A.Yu., Pancheshnyi S.V., Rakitin A.E. Periodic Pulse Discharge Self-Focusing and Streamer-to-Spark Transition in Under-Critical Electric Field. – In 49-th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, 2011, AIAA 2011-1271.
19. Tran M., Rakov V. Initiation and Propagation of Cloud-to-Ground Lightning Observed with a High-Speed Video Camera. – Scientific Reports, 2016, vol. 6, DOI:10.1038/srep39521.
20. Iudin D.I. et al. From Decimeter-Scale Elevated Ionic Conductivity Regions in the Cloud to Lightning Initiation. – Scientific Reports, 2021, vol. 11(1), DOI:10.1038/s41598-021-97321-4.
21. Willett J.C., Davis D.A., Laroche P. An Experimental Study of Positive Leaders Initiating Rocket-Triggered Lightning. – Atmospheric Research, 1999, vol. 51(3), pp. 189–219, DOI:10.1016/S0169-8095(99)00008-3.
22. Pierce E.T. Triggered Lightning and Some Unsuspected Lightning Hazards. – Naval Research Reviews, 1972, pp. 14–28.
23. Zonge K.L., Evans W.H. Prestroke Radiation from Thunderclouds. – Journal of Geophysical Research, 1966, vol. 71(6), pp. 1519–1523.
24. Harvey R.B., Lewis E.A. Radio Mapping of 250- and 925-Megahertz Noise Sources in Clouds. – Journal of Geophysical Research, 1973, vol. 78(12), pp. 1944–1947, DOI:10.1029/JC078i012p01944.
25. Behnke S.A. et al. Investigating the Origin of Continual Radio Frequency Impulses During Explosive Volcanic Eruptions. – Journal of

- Geophysical Research: Atmospheres, 2018, vol. 123(8), pp. 4157–4174, DOI:10.1002/2017JD027990.
26. **Solomon R., Schroeder V., Baker M.B.** Lightning Initiation – Conventional and Runaway-Breakdown Hypotheses. – Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2001, vol. 127(578), pp. 2683–2704, DOI:10.1002/qj.49712757809.
27. **Rakov V.A., Uman M.A.** Lightning: Physics and Effects. New York: Cambridge University Press, 2003, 687 p.
28. **Гуревич А.В., Зыбин К.П.** Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы. – Успехи физических наук, 2001, т. 171, № 11, с. 1177–1199.
29. **Dwyer J.R.** The Initiation of Lightning By Runaway Air Breakdown. – Geophysical Research Letters, 2005, vol. 32(20), DOI:10.1029/2005GL023975.
30. **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.
31. **Sysoev A.A. et al.** Radiation Electric Field Produced by the Lightning Leader Formation in a Thundercloud: Observations and Modeling. – Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2021, vol. 221, DOI:10.1016/j.jastp.2021.105686.
32. **Sysoev A.A. et al.** Relay Charge Transport in Thunderclouds and Its Role in Lightning Initiation. – Scientific Reports, 2022, vol. 12(1), DOI:10.1038/s41598-022-10722-x.
33. **Iudin D.I. et al.** Advanced Numerical Model of Lightning Development: Application to Studying the Role of LPCR in Determining Lightning Type. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, vol. 122(12), pp. 6416–6430, DOI:10.1002/2016jd026261.
34. **Niemeyer L., Pietronero L., Wiesmann H.J.** Fractal Dimension of Dielectric Breakdown. – Physical Review Letters, 1984, vol. 52(12), pp. 1033–1036, DOI:10.1103/PhysRevLett.52.1033.
35. **Wiesmann H.J., Zeller H.R.** A Fractal Model of Dielectric Breakdown and Prebreakdown in Solid Dielectrics. – Journal of Applied Physics, 1986, vol. 60(5), pp. 1770–1773, DOI:10.1063/1.337219.
36. **Femia N., Niemeyer L., Tucci V.** Fractal Characteristics of Electrical Discharges: Experiments and Simulation. – Journal of Physics D: Applied Physics, 1993, vol. 26(4), DOI:10.1088/0022-3727/26/4/014.
37. **Dissado L.A., Sweeney P.J.J.** Physical Model for Breakdown Structures in Solid Dielectrics. – Physical Review B, 1993, vol. 48(22), pp. 16261–16268, DOI:10.1103/PhysRevB.48.16261.
38. **Петров Н.И., Петрова Г.Н.** Физические механизмы формирования внутриоблачных разрядов молний. – Журнал технической физики, 1993, т. 63, № 4, с. 41–49.
39. **Петров Н.И., Петрова Г.Н.** Математическое моделирование траектории лидерного разряда и молниепоражаемости изолированных и заземленных объектов. – Журнал технической физики, 1995, т. 65, № 5, с. 41–58.
40. **Дульзон А.А. и др.** Моделирование развития ступенчатого лидера молний. – Журнал технической физики, 1999, т. 69, № 4, с. 48–53.
41. **Mansell E.R. et al.** Simulated Three-Dimensional Branched Lightning in a Numerical Thunderstorm Model. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2002, vol. 107(D9), DOI:10.1029/2000jd000244.
42. **Agoris D.P. et al.** A Computational Approach on the Study of Franklin Rod Height Impact on Striking Distance Using a Stochastic Model. – Journal of Electrostatics, 2004, vol. 60(2–4), pp. 175–181, DOI:10.1016/j.elstat.2004.01020.
43. **Tan Y., Tao S., Zhu B.** Fine-Resolution Simulation of the Channel Structures and Propagation Features of Intracloud Lightning. – Geophysical Research Letters, 2006, vol. 33(9), DOI:10.1029/2005gl025523.
44. **Riousset J.A. et al.** Three-Dimensional Fractal Modeling of Intracloud Lightning Discharge in a New Mexico Thunderstorm and Comparison with Lightning Mapping Observations. – Journal of Geophysical Research, 2007, vol. 112(D15), DOI:10.1029/2006JD007621.
45. **Mansell E.R., Ziegler C.L., Bruning E.C.** Simulated Electrification of a Small Thunderstorm with Two-Moment Bulk Microphysics. – Journal of the Atmospheric Sciences, 2010, vol. 67(1), pp. 171–194, DOI:10.1175/2009jas2965.1.
46. **Wang H. et al.** A Numerical Study of the Positive Cloud-to-Ground Flash from the Forward Flank of Normal Polarity Thunderstorm. – Atmospheric Research, 2016, vol. 169, pp. 183–190, DOI:10.1016/j.atmosres.2015.10.011.
47. **Iudin D.I. et al.** Formation of Decimeter-Scale, Long-Lived Elevated Ionic Conductivity Regions in Thunderclouds. – NPJ Climate and Atmospheric Science, 2019, vol. 2(46), pp. 1–10, DOI:10.1038/s41612-019-0102-8.
48. **Иудин Д.И.** Зарождение молниевого разряда как индуцированный шумом кинетический переход. – Известия вузов. Радиофизика, 2017, т. 60, № 5, с. 418–441.
49. **Gardiner B. et al.** Measurements of Initial Potential Gradient and Particle Charges in a Montana Summer Thunderstorm. – Journal of Geophysical Research, 1985, vol. 90(D4), pp. 6079–6086, DOI:10.1029/JD090iD04p06079.
50. **Dye J.E. et al.** Observations within Two Regions of Charge during Initial Thunderstorm Electrification. – Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1988, vol. 114(483), pp. 1271–1290, DOI:10.1002/qj.49711448306.
51. **Ziegler C.L. et al.** A Model Evaluation of Noninductive Graupel-Ice Charging in the Early Electrification of Mountain Thunderstorm. – Journal of Geophysical Research, 1991, vol. 96(D7), pp. 12833–12855.
52. **Ziegler C.L., MacGorman D.R.** Observed Lightning Morphology Relative to Modeled Space Charge and Electric Field Distributions in a Tornadic Storm. – Journal of Atmosphere Science, 1994, vol. 51, pp. 833–851, DOI:10.1175/1520-0469(1994)051<0833:OLMRTM>2.0.CO;2.
53. **Winn W.P., Schwede G.W., Moore C.B.** Measurements of Electric Fields in Thunderclouds. – Journal of Geophysical Research, 1974, vol. 79, pp. 1761–1767, DOI:10.1029/JC079i012P01761.
54. **Marshall T.C., McCarthy M.P., Rust W.D.** Electric Field Magnitudes and Lightning Initiation in Thunderstorms. – Journal of Geophysical Research, 1995, vol. 100(D4), pp. 7097–7103, DOI:10.1029/95JD00020.
55. **Loeb L.B.** The Mechanisms of Stepped and Dart Leaders in Cloud-to-Ground Lightning Strokes. – Journal of Geophysical Research, 1966, vol. 71(20), pp. 4711–4721.
56. **Phelps C.T.** Positive Streamer System Intensification and Its Possible Role in Lightning Initiation. – Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 1974, vol. 36(1), pp. 103–111.
57. **Griffiths R.F., Phelps C.T.** A Model for Lightning Initiation Arising from Positive Corona Streamer Development. – Journal of Geophysical Research, 1976, vol. 81(21), pp. 3671–3676, DOI:10.1029/JC081i021P03671.
58. **Gurevich A.V., Milikh G.M., Roussel-Dupre R.** Runaway Electron Mechanism of Air Breakdown and Preconditioning during a Thunderstorm. – Physics Letters A, 1992, vol. 165(5–6), pp. 463–468, DOI:10.1016/0375-9601(92)90348-P.
59. **Gurevich A.V., Zybin K.P., Roussel-Dupre R.A.** Lightning Initiation by Simultaneous Effect of Runaway Breakdown and Cosmic Ray Showers. – Physics Letters A, 1999, vol. 254(1–2), pp. 79–87, DOI:10.1016/S0375-9601(99)00091-2.
60. **Petersen D. et al.** A Brief Review of the Problem of Lightning Initiation and a Hypothesis of Initial Lightning Leader Formation. – Journal of Geophysical Research, 2008, vol. 113(D17), p. D17205, DOI:10.1029/2007JD009036.
61. **Liu N. et al.** Formation of Streamer Discharges from an Isolated Ionization Column at Subbreakdown Conditions. – Physical Review Letters, 2012, vol. 109(2), p. 025002, DOI:10.1103/PhysRevLett.109.025002.
62. **Sadighi S. et al.** Streamer Formation and Branching from Model Hydrometeors in Subbreakdown Conditions Inside Thunderclouds. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, vol. 120(9), pp. 3660–3678, DOI:10.1002/2014JD022724.

63. **Dubinova A. et al.** Prediction of Lightning Inception by Large Ice Particles and Extensive Air Showers. – *Physical Review Letters*, 2015, vol. 115(1), DOI:10.1103/PhysRevLett.115.015002.

64. **Shi F., Liu N., Rassoul H.K.** Properties of Relatively Long Streamers Initiated from an Isolated Hydrometeor. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, vol. 121(12), pp. 7284–7295, DOI:10.1002/2015JD024580.

65. **Rison W. et al.** Observations of Narrow Bipolar Events Reveal How Lightning is Initiated in Thunderstorms. – *Nature Communications*, 2016, vol. 7, DOI:10.1038/ncomms10721.

66. **Babich L.P. et al.** Positive Streamer Initiation from Raindrops in Thundercloud Fields. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, vol. 121(11), pp. 6393–6403, DOI:10.1002/2016JD024901.

67. **Cai Q., Jansky J., Pasko V.P.** Initiation of Positive Streamer Corona in Low Thundercloud Fields. – *Geophysical Research Letters*, 2017, vol. 44(11), pp. 5758–5765, DOI:10.1002/2017GL073107.

68. **Cai Q., Jansky J., Pasko V.P.** Initiation of Streamers Due to Hydrometeor Collisions in Thunderclouds. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, vol. 123(14), pp. 7050–7064, DOI:10.1029/2018JD028407.

69. **Babich L.P., Bochkov E.I.** Initiation of Positive Streamers near Uncharged Ice Hydrometeors in the Thundercloud Field. – *Plasma Physics Reports*, 2018, vol. 44(5), pp. 533–538, DOI:10.1134/S1063780X18050033.

70. **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*, 2020, vol. 125(22), p. e2020JD033191, DOI:10.1029/2020JD033191.

Поступила в редакцию [12.09.2022]
Принята к публикации [17.11.2022]

Авторы:



Иудин Дмитрий Игоревич – доктор физ.-мат. наук, доктор биолог. наук, заведующий кафедрой медицинской биофизики, Приволжский исследовательский медицинский университет; ведущий научный сотрудник Института прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия.



Сысоев Артем Андреевич – кандидат физ.-мат. наук, старший преподаватель кафедры медицинской биофизики, Приволжский исследовательский медицинский университет; младший научный сотрудник Института прикладной физики РАН «ИПФ РАН», Нижний Новгород, Россия.



Раков Владимир Александрович – кандидат техн. наук, почётный доктор физико-математических наук, директор международного центра исследования молний, заслуженный профессор университета Флориды, Гейнсвилл, США.

Elektrичество, 2023, No. 1, pp. 16–27

DOI:10.24160/0013-5380-2023-1-16-27

Lightning Initiation as a Consequence of Natural Thundercloud Evolution. Part 3. Streamers and Transition from Streamers to a Leader Channel

IUDIN Dmitry I. (*Privolzhsky Research Medical University; the Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod, Russia*) – Head of the Medical Biophysics dept.; Leading Researcher, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Dr. Sci. (Biol.).

SYSSOEV Artem A. (*Privolzhsky Research Medical University; the Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod, Russia*) – Senior Teacher of the Medical Biophysics dept.; Junior Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.).

RAKOV Vladimir A. (*University of Florida, Gainesville, USA*) – Distinguished Professor and Director of the International Center for Lightning Research and Testing, Cand. Sci. (Eng.).

This article presents the final part of the study devoted to description of the authors' scenario of lightning initiation in a thundercloud, the first two parts of which are presented in [1, 2]. The first part shows that consideration of the electron detachment from negative ions results in that the air breakdown field reduces by 15–30 %. This partially simplifies but does not solve the problem of lightning initiation in a thundercloud, the maximum electric fields in which are approximately an order of magnitude lower than the dielectric strength of air. The second part describes the transition from millimeter corona discharges to decimeter-scale regions of elevated ionic conductivity, which becomes possible if the spatiotemporal frequency of corona discharges arising due to collisions (nearly collisions) of hydrometeors exceeds a quite moderate value of $0,1 \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$. In turn, the regions of elevated ionic conductivity give rise to positive streamers. The article presents the lightning initiation process final stage, at which streamers oriented by the large-scale electric field are combined into

a single plasma network, inside which a hot leader channel is generated. It is shown that, for the transition from streamers to a lightning leader seed to occur, a potential difference between the boundaries of the zone of a strong intracloud field is to exceed 3 MV. The article ends with a general conclusion summarizing the trilogy results.

Ключевые слова: *lightning initiation, streamers, leaders, volumetric plasma channel networks, unusual plasma formations, percolation theory*

REFERENCES

1. Iudin D.I., Syssoev A.A., Rakov V.A. *Elektrичество – in Russ. (Electricity)*, 2022, No. 11, pp. 13–28.
2. Iudin D.I., Syssoev A.A., Rakov V.A. *Elektrичество – in Russ. (Electricity)*, 2022, No. 12, pp. 13–22.
3. Bazelyan E.M., Raizer Yu.P. *Iskrovoy razryad* (Spark Discharge). M.: MFTI, 1997, 320 p.
4. Dwyer J.R., Uman M.A. The Physics of Lightning. – *Physics Reports*, 2014, vol. 534(4), pp. 147–241, DOI:10.1016/j.physrep.2013.09.004.
5. Kostinskiy A.Yu. et al. 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*, 2015, vol. 42, pp. 8165–8171, DOI:10.1002/2015GL065620.
6. Iudin D.I., Trakhtengerts V.Yu., Hayakawa M. Fractal Dynamics of Electric Discharges in a Thundercloud. – *Physical Review E*, 2003, vol. 68, p. 016601, DOI:10.1103/PhysRevE.68.016601.
7. Kostinskiy A.Yu. et al. Unusual plasma formations produced by positive streamers entering the cloud of negatively charged water droplets. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, vol. 127(21), p. e2021JD035821, DOI:10.1029/2021JD035821.
8. Nijdam S., Teunissen J., Ebert U. The Physics of Streamer Discharge Phenomena. – *Plasma Sources Science and Technology*, 2020, vol. 29(10), p. 103001, DOI:10.1088/1361-6595/abaa05.
9. Bazelyan E.M., Rayzer Yu.P. *Fizika molnii i molniezashchity* (Lightning Physics and Lightning Protection). M.: Fizmatlit, 2001, 320 p.
10. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* (Thermophysical Properties of Gases and Liquids, a Reference Book). M.: Nauka, 1972, 720 p.
11. Gorin B.N., Shkilev A.V. *Elektrичество – in Russ. (Electricity)*, 1976, No. 6, pp. 31–39.
12. Reess T. et al. An Experimental Study of Negative Discharge in a 1.3 m Point-Plane Air Gap: the Function of the Space Stem in the Propagation Mechanism. – *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1995, vol. 28(11), pp. 2306–2313.
13. Hill J.D., Uman M.A., Jordan D.M. High-Speed Video Observations of a Lightning Stepped Leader. – *Journal of Geophysical Research*, 2011, vol. 116, p. D16117, DOI:10.1029/2011jd015818.
14. 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*, 2013, vol. 118(21), pp. 12110–12119, DOI:10.1002/2013jd019910.
15. Edens H.E. et al. Photographic Observations of Streamers and Steps in a Cloud-to-Air Negative Leader. – *Geophysical Research Letters*, 2014, vol. 41(4), pp. 1336–1342, DOI:10.1002/2013GL059180.
16. Jiang R. et al. Channel Branching and Zigzagging in Negative Cloud-to-Ground Lightning. – *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, p. 3457, DOI:10.1038/s41598-017-03686-w.
17. Nijdam S. et al. Probing Background Ionization: Positive Streamers with Varying Pulse Repetition Rate and with a Radioactive Admixture. – *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, vol. 44(45), p. 455201, DOI:10.1088/0022-3727/44/45/455201.
18. Starikovskiy A.Yu., Pancheshnyi S.V., Rakitin A.E. Periodic Pulse Discharge Self-Focusing and Streamer-to-Spark Transition in Under-Critical Electric Field. – In 49-th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, 2011, AIAA 2011-1271.
19. Tran M., Rakov V. Initiation and Propagation of Cloud-to-Ground Lightning Observed with a High-Speed Video Camera. – *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, DOI:10.1038/srep39521.
20. Iudin D.I. et al. From Decimeter-Scale Elevated Ionic Conductivity Regions in the Cloud to Lightning Initiation. – *Scientific Reports*, 2021, vol. 11(1), DOI:10.1038/s41598-021-97321-4.
21. Willett J.C., Davis D.A., Laroche P. An Experimental Study of Positive Leaders Initiating Rocket-Triggered Lightning. – *Atmospheric Research*, 1999, vol. 51(3), pp. 189–219, DOI:10.1016/S0169-8095(99)00008-3.
22. Pierce E.T. Triggered Lightning and Some Unsuspected Lightning Hazards. – *Naval Research Reviews*, 1972, pp. 14–28.
23. Zonge K.L., Evans W.H. Prestroke Radiation from Thunderclouds. – *Journal of Geophysical Research*, 1966, vol. 71(6), pp. 1519–1523.
24. Harvey R.B., Lewis E.A. Radio Mapping of 250- and 925-Megahertz Noise Sources in Clouds. – *Journal of Geophysical Research*, 1973, vol. 78(12), pp. 1944–1947, DOI:10.1029/JC078i012p01944.
25. Behnke S.A. et al. Investigating the Origin of Continual Radio Frequency Impulses During Explosive Volcanic Eruptions. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, vol. 123(8), pp. 4157–4174, DOI:10.1002/2017JD027990.
26. Solomon R., Schroeder V., Baker M.B. Lightning Initiation – Conventional and Runaway-Breakdown Hypotheses. – *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2001, vol. 127(578), pp. 2683–2704, DOI:10.1002/qj.49712757809.
27. Rakov V.A., Uman M.A. *Lightning: Physics and Effects*. New York: Cambridge University Press, 2003, 687 p.
28. Gurevich A.V., Zybin K.P. *Uspekh fizicheskikh nauk – in Russ. (Successes of Physical Sciences)*, 2001, vol. 171, No. 11, pp. 1177–1199.
29. Dwyer J.R. The Initiation of Lightning By Runaway Air Breakdown. – *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32(20), DOI:10.1029/2005GL023975.
30. Bulatov A.A., Iudin D.I., Syssoev A.A. *Izvestiya vuzov. Radiofizika – in Russ. (News of Universities. Radiophysics)*, 2020, vol. 63, No. 2, pp. 125–154.
31. Syssoev A.A. et al. Radiation Electric Field Produced by the Lightning Leader Formation in a Thundercloud: Observations and Modeling. – *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2021, vol. 221, DOI:10.1016/j.jastp.2021.105686.
32. Syssoev A.A. et al. Relay Charge Transport in Thunderclouds and Its Role in Lightning Initiation. – *Scientific Reports*, 2022, vol. 12(1), DOI:10.1038/s41598-022-10722-x.
33. Iudin D.I. et al. Advanced Numerical Model of Lightning Development: Application to Studying the Role of LPCR in Determining Lightning Type. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, vol. 122(12), pp. 6416–6430, DOI:10.1002/2016jd026261.
34. Niemeyer L., Pietronero L., Wiesmann H.J. Fractal Dimension of Dielectric Breakdown. – *Physical Review Letters*, 1984, vol. 52(12), pp. 1033–1036, DOI:10.1103/PhysRevLett.52.1033.
35. Wiesmann H.J., Zeller H.R. A Fractal Model of Dielectric Breakdown and Prebreakdown in Solid Dielectrics. – *Journal of Applied Physics*, 1986, vol. 60(5), pp. 1770–1773, DOI:10.1063/1.337219.
36. Femia N., Niemeyer L., Tucci V. Fractal Characteristics of Electrical Discharges: Experiments and Simulation. – *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1993, vol. 26(4), DOI:10.1088/0022-3727/26/4/014.

37. **Dissado L.A., Sweeney P.J.J.** Physical Model for Breakdown Structures in Solid Dielectrics. – *Physical Review B*, 1993, vol. 48(22), pp. 16261–16268, DOI:10.1103/PhysRevB.48.16261.
38. **Petrov N.I., Petrova G.N.** *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki – in Russ. (Technical Physics)*, 1993, vol. 63(4), pp. 41–49.
39. **Petrov N.I., Petrova G.N.** *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki – in Russ. (Technical Physics)*, 1995, vol. 65(5), pp. 41–58.
40. **Dulzon A.A. et al.** *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki – in Russ. (Technical Physics)*, 1999, vol. 69(4), pp. 48–53.
41. **Mansell E.R. et al.** Simulated Three-Dimensional Branched Lightning in a Numerical Thunderstorm Model. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, vol. 107(D9), DOI:10.1029/2000jd000244.
42. **Agoris D.P. et al.** A Computational Approach on the Study of Franklin Rod Height Impact on Striking Distance Using a Stochastic Model. – *Journal of Electrostatics*, 2004, vol. 60(2–4), pp. 175–181, DOI:10.1016/j.elstat.2004.01020.
43. **Tan Y., Tao S., Zhu B.** Fine-Resolution Simulation of the Channel Structures and Propagation Features of Intracloud Lightning. – *Geophysical Research Letters*, 2006, vol. 33(9), DOI:10.1029/2005gl025523.
44. **Riousset J.A. et al.** Three-Dimensional Fractal Modeling of Intracloud Lightning Discharge in a New Mexico Thunderstorm and Comparison with Lightning Mapping Observations. – *Journal of Geophysical Research*, 2007, vol. 112(D15), DOI:10.1029/2006JD007621.
45. **Mansell E.R., Ziegler C.L., Bruning E.C.** Simulated Electrification of a Small Thunderstorm with Two-Moment Bulk Microphysics. – *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2010, vol. 67(1), pp. 171–194, DOI:10.1175/2009jas2965.1.
46. **Wang H. et al.** A Numerical Study of the Positive Cloud-to-Ground Flash from the Forward Flank of Normal Polarity Thunderstorm. – *Atmospheric Research*, 2016, vol. 169, pp. 183–190, DOI:10.1016/j.atmosres.2015.10.011.
47. **Iudin D.I. et al.** Formation of Decimeter-Scale, Long-Lived Elevated Ionic Conductivity Regions in Thunderclouds. – *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2019, vol. 2(46), pp. 1–10, DOI:10.1038/s41612-019-0102-8.
48. **Iudin D.I.** *Izvestiya vuzov. Radiofizika – in Russ. (News of Universities. Radiophysics)*, 2017, vol. 60, No. 5, pp. 418–441.
49. **Gardiner B. et al.** Measurements of Initial Potential Gradient and Particle Charges in a Montana Summer Thunderstorm. – *Journal of Geophysical Research*, 1985, vol. 90(D4), pp. 6079–6086, DOI:10.1029/JD090iD04p06079.
50. **Dye J.E. et al.** Observations within Two Regions of Charge during Initial Thunderstorm Electrification. – *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1988, vol. 114(483), pp. 1271–1290, DOI:10.1002/qj.49711448306.
51. **Ziegler C.L. et al.** A Model Evaluation of Noninductive Graupel-Ice Charging in the Early Electrification of Mountain Thunderstorm. – *Journal of Geophysical Research*, 1991, vol. 96(D7), pp. 12833–12855.
52. **Ziegler C.L., MacGorman D.R.** Observed Lightning Morphology Relative to Modeled Space Charge and Electric Field Distributions in a Tornadic Storm. – *Journal of Atmosphere Science*, 1994, vol. 51, pp. 833–851, DOI:10.1175/1520-0469(1994)051<0833:OLMRTM>2.0.CO;2.
53. **Winn W.P., Schwede G.W., Moore C.B.** Measurements of Electric Fields in Thunderclouds. – *Journal of Geophysical Research*, 1974, vol. 79, pp. 1761–1767, DOI:10.1029/JC079I012P01761.
54. **Marshall T.C., McCarthy M.P., Rust W.D.** Electric Field Magnitudes and Lightning Initiation in Thunderstorms. – *Journal of Geophysical Research*, 1995, vol. 100(D4), pp. 7097–7103, DOI:10.1029/95JD00020.
55. **Loeb L.B.** The Mechanisms of Stepped and Dart Leaders in Cloud-to-Ground Lightning Strokes. – *Journal of Geophysical Research*, 1966, vol. 71(20), pp. 4711–4721.
56. **Phelps C.T.** Positive Streamer System Intensification and Its Possible Role in Lightning Initiation. – *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1974, vol. 36(1), pp. 103–111.
57. **Griffiths R.F., Phelps C.T.** A Model for Lightning Initiation Arising from Positive Corona Streamer Development. – *Journal of Geophysical Research*, 1976, vol. 81(21), pp. 3671–3676, DOI:10.1029/JC081I021P03671.
58. **Gurevich A.V., Milikh G.M., Roussel-Dupre R.** Runaway Electron Mechanism of Air Breakdown and Preconditioning during a Thunderstorm. – *Physics Letters A*, 1992, vol. 165(5–6), pp. 463–468, DOI:10.1016/0375-9601(92)90348-P.
59. **Gurevich A.V., Zybin K.P., Roussel-Dupre R.A.** Lightning Initiation by Simultaneous Effect of Runaway Breakdown and Cosmic Ray Showers. – *Physics Letters A*, 1999, vol. 254(1–2), pp. 79–87, DOI:10.1016/S0375-9601(99)00091-2.
60. **Petersen D. et al.** A Brief Review of the Problem of Lightning Initiation and a Hypothesis of Initial Lightning Leader Formation. – *Journal of Geophysical Research*, 2008, vol. 113(D17), p. D17205, DOI:10.1029/2007JD009036.
61. **Liu N. et al.** Formation of Streamer Discharges from an Isolated Ionization Column at Subbreakdown Conditions. – *Physical Review Letters*, 2012, vol. 109(2), p. 025002, DOI:10.1103/PhysRevLett.109.025002.
62. **Sadighi S. et al.** Streamer Formation and Branching from Model Hydrometeors in Subbreakdown Conditions Inside Thunderclouds. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, vol. 120(9), pp. 3660–3678, DOI:10.1002/2014JD022724.
63. **Dubinova A. et al.** Prediction of Lightning Inception by Large Ice Particles and Extensive Air Showers. – *Physical Review Letters*, 2015, vol. 115(1), DOI:10.1103/PhysRevLett.115.015002.
64. **Shi F., Liu N., Rassoul H.K.** Properties of Relatively Long Streamers Initiated from an Isolated Hydrometeor. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, vol. 121(12), pp. 7284–7295, DOI:10.1002/2015JD024580.
65. **Rison W. et al.** Observations of Narrow Bipolar Events Reveal How Lightning is Initiated in Thunderstorms. – *Nature Communications*, 2016, vol. 7, DOI:10.1038/ncomms10721.
66. **Babich L.P. et al.** Positive Streamer Initiation from Raindrops in Thundercloud Fields. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, vol. 121(11), pp. 6393–6403, DOI:10.1002/2016JD024901.
67. **Cai Q., Jansky J., Pasko V.P.** Initiation of Positive Streamer Corona in Low Thundercloud Fields. – *Geophysical Research Letters*, 2017, vol. 44(11), pp. 5758–5765, DOI:10.1002/2017GL073107.
68. **Cai Q., Jansky J., Pasko V.P.** Initiation of Streamers Due to Hydrometeor Collisions in Thunderclouds. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, vol. 123(14), pp. 7050–7064, DOI:10.1029/2018JD028407.
69. **Babich L.P., Bochkov E.I.** Initiation of Positive Streamers near Uncharged Ice Hydrometeors in the Thundercloud Field. – *Plasma Physics Reports*, 2018, vol. 44(5), pp. 533–538, DOI:10.1134/S1063780X18050033.
70. **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*, 2020, vol. 125(22), p. e2020JD033191, DOI:10.1029/2020JD033191.

Received [12.09.2022]
Accepted [17.11.2022]