

Разряд молнии как самоорганизующаяся транспортная сеть.

Ч. 2. Точка реверса и транзиенты молнии*

ИУДИН Д.И.^{1,2}, КОРОВКИН Н.В.^{2,3}, СЫСОЕВ А.А.^{1,2}, ХАЯКАВА М.⁴

¹ПИМУ, Нижний Новгород, Россия

²ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия

³СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

⁴Университет электрокоммуникаций, Тёфу, Токио, Япония

Вторая часть исследования посвящена проблеме макромасштабной асимметрии разряда молнии. Показано, что скорость смещения точки реверса, а вместе с ней и средневзвешенного потенциала молнии, определяется разностью периферийных токов разряда. Движение точки реверса в направлении доминирующего лидера приводит к изменению средневзвешенного потенциала молнии и служит ключом к объяснению макромасштабных проявлений асимметрии разряда молнии. Исследовано, при каких условиях уже на поздней стадии развития молнии отрицательный лидер становится доминирующим вместо положительного, сохраняющего свое первенство в подавляющем большинстве ситуаций. На основе парадигмы движущейся точки реверса предложена классификация основных типов переходных процессов, связанных с реактивацией распавшихся ветвей доминирующего лидера, т.е. лидера с превалирующим периферийным током. Показано, что транзиенты, вызванные реактивацией распавшихся ветвей доминирующего отрицательного лидера, являются полярными антиподами транзиентов, связанных с доминированием положительного лидера. Установлено, что переходные процессы сопровождаются перезарядкой чехла лидера. При этом погонный заряд высокопроводящей сердцевины лидерного канала оказывается управляющим параметром процесса перезарядки чехла. Описан возможный сценарий развития компактных внутриоблачных разрядов, согласующийся с концепцией движения точки реверса, сформулированной в работе.

К л ю ч е в ы е с л о в а: асимметрия полярностей, лидер молнии, чехол заряда лидерного канала, точка реверса, транзиенты молнии, компактный внутриоблачный разряд

Вторая часть исследования является продолжением работы [1]. В первой части было показано, что транспортная сеть молнии обладает структурной асимметрией, обусловленной двукратным различием напряженностей электрических полей поддержания роста положительных и отрицательных стримеров. Подробно обсуждалось понятие точки нулевого индуцированного заряда или точки реверса.

Движение точки реверса молнии. В силу интегральной электронейтральности древа разряда полные ёмкости и заряды его положительной и отрицательной частей равны друг другу как в симметричной, так и в асимметричной моделях. Однако в последнем случае плотность плазменных каналов (дренажная плотность) положительной части древа разряда превалирует над объёмной плотностью проводящих элементов отрицательной части. Вследствие этого периферийная ёмкость на положительном конце превышает периферийную ёмкость отрицательного полюса [1]. Ёмкостный баланс достигается за счёт большей протяжённости

ветвей отрицательного лидера по сравнению с длиной ветвей положительного. Как следствие, точка реверса электрической транспортной системы, которая определяется как точка нулевого индуцированного заряда, расположена ближе к положительному концу разрядного древа (рис. 1,б из [1]):

$$L_{s_{\max}^+} < L_{s_{\max}^-}. \quad (1)$$

Более того, при сохранении электронейтральности древа разряда точка реверса движется от точки инициации к положительному концу молнии.

Точка реверса – это точка, где заряд чехла равен нулю. По определению, потенциал молнии в этой точке есть её средневзвешенный потенциал, который совпадает с внутриоблачным. Перемещение точки реверса сопровождается перезарядкой чехла и изменением средневзвешенного потенциала, которое для симметричной модели может происходить только из-за неоднородности внешнего поля. В однородном элек-

*Статья публикуется в порядке обсуждения.

трическом поле точка реверса симметричной системы находится в покое. Для асимметричного древа разряда точка реверса смещается от точки инициации даже в однородном поле. При доминировании положительно-го лидера происходит понижение среднего потенциала древа разряда. В ряде случаев это может привести к преодолению отрицательным лидером потенциальной ямы, препятствующей его распространению по направлению к земле.

Характерную скорость V_r перемещения точки реверса вдоль главного русла можно оценить, сравнивая значения электрического тока I^+ и I^- на противоположных концах системы, используя следующие феноменологические соотношения [2]:

$$I_L^+ = \lambda^+ V^+; \quad I_L^- = \lambda^- V^-, \quad (2)$$

где λ^\pm – погонные плотности заряда в стримерной зоне положительных и отрицательных лидерных каналов; V^\pm – скорости лидеров.

В простейшем случае однородного внешнего поля переход в систему координат, движущуюся со скоростью $V_r \ll c$, где c – скорость света, обеспечивает выравнивание токов на полюсах:

$$(V_r + V^-)\lambda^- = (V_r - V^+)\lambda^+. \quad (3)$$

Окончательно для скорости точки реверса получаем

$$V_r = \frac{\lambda^+ V^+ - \lambda^- V^-}{\lambda^+ + \lambda^-} = \frac{I_L^+ - I_L^-}{\lambda^+ + \lambda^-}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что скорость точки реверса определяется именно разностью токов на полюсах, а не разностью скоростей противоположно направленных лидеров. Даже при меньшей скорости положительно-го лидера его ток может доминировать из-за высокой локальной разветвленности. Интегральные положительные и отрицательные токи электрической транспортной системы с учётом разветвленности полярных лидерных систем переписуются в следующем виде:

$$I_L^+ = \sum_{i=1}^{N^+} \lambda_i^+ V_i^+; \quad I_L^- = \sum_{j=1}^{N^-} \lambda_j^- V_j^-, \quad (5)$$

где $i = 1, \dots, N^+$ и $j = 1, \dots, N^-$ – индексы всей совокупности N^+ положительных и N^- отрицательных лидерных каналов системы; λ_i^+ и λ_j^- – погонные плотности заряда каналов вблизи головок положительных и отрицательных лидеров соответственно; V_i^+ и V_j^- – их скорости.

Тогда выражение для скорости точки реверса приобретает форму:

$$V_r = \frac{\sum_{i=1}^{N^+} \lambda_i^+ V_i^+ - \sum_{j=1}^{N^-} \lambda_j^- V_j^-}{\sum_{i=1}^{N^+} \lambda_i^+ + \sum_{j=1}^{N^-} \lambda_j^-} = \frac{I_L^+ - I_L^-}{\sum_{i=1}^{N^+} \lambda_i^+ + \sum_{j=1}^{N^-} \lambda_j^-}. \quad (6)$$

В (6) положительный знак скорости дрейфа точки реверса соответствует ее движению в сторону роста положительной части молнии. Асимметрия электрической транспортной системы не сводится к различию скоростей лидеров противоположной полярности, а определяется разностью интегральных периферийных токов электрической транспортной системы. Мгновенное положение точки реверса определяется соотношением дренажных плотностей разноименно заряженных частей проводящей конструкции, а её скорость может служить мерой асимметрии системы. С развитием древа разряда его размеры достигают масштабов неоднородности внутриоблачного поля. В этом более общем случае положение и скорость точки реверса системы находятся в отношениях взаимной обусловленности с морфологическими особенностями лидерных каналов различной полярности и могут значительно варьироваться при изменении величины и направления внешнего поля. Можно считать, что (6) описывает мгновенную скорость точки реверса, которая может значительно флуктуировать и даже менять знак в процессе эволюции молнии.

Движение точки реверса сопровождается изменением средневзвешенного потенциала разрядного древа, который в каждый момент времени практически совпадает со значением внутриоблачного потенциала в области текущего положения самой точки реверса. Изменение потенциала точки реверса в асимметричной модели обуславливает альтернативный механизм конкурентного подавления боковых ветвей доминирующего лидера. Действительно, доминирующий положительный лидер движется в сторону понижения внутриоблачного потенциала, при этом головка прева-лизирующей по току ветви положительного лидера находится в зоне наименьшего потенциала по сравнению с боковыми ветвями. Точка реверса движется в сторону развития доминирующего лидера, и её потенциал тоже снижается. В результате происходит падение потенциала и старых точек ветвления доминирующего лидера, а соответствующая разность потенциалов, питающая боковые ветви, постепенно снижается и может достигнуть критического уровня, ниже которого плазменный канал переходит в режим слабого тока и затухает [3].

Как было отмечено выше, чаще всего доминирует положительный лидер, поскольку в атмосферных условиях критическое поле роста проводящей структуры на ее положительном полюсе E_s^+ вдвое меньше критического поля на противоположном отрицательном конце E_s^- . В общем случае положительная и отрицательная вершины двунаправленного лидера молнии развиваются на разных высотах. Поэтому двукратное отличие между E_s^+ и E_s^- следует переписать с учетом экспоненциального падения критического поля с высотой:

$$E_s^+(z^+) \approx 0,5 E_s^-(z^-) \exp\left(-\frac{z^+ - z^-}{H}\right). \quad (7)$$

где z^+ и z^- – характерные высоты развития положительных и отрицательных лидеров молнии соответственно, а $H \approx 8400$ м.

Из (7) следует, что в однородном крупномасштабном электрическом поле выравнивание критических полей E_s^+ и E_s^- происходит, когда высота распространения вершины отрицательного лидера превышает высоту распространения вершины положительного примерно на 5 км. Таким образом, на начальном этапе развития молнии, когда электрическое поле грозового облака можно считать однородным, а вертикальная протяженность разряда не превышает нескольких километров, всегда доминирует положительный лидер. Однако на стадии зрелости молнии, когда вертикальная протяженность разрядного дерева становится значительной, а окружающее электрическое поле сильно неоднородным, положительный лидер может утратить первенство и точка реверса начинает двигаться к концу отрицательного лидера.

Далее будет показано, что смена знака доминирующего лидера может произойти, например, когда нисходящий отрицательный лидер подходит близко к земле и его электростатическое отражение значительно усиливает электрическое поле на отрицательной периферии разряда. Другая возможность потери доминирования положительным лидером может быть реализована в случае, когда положительный разряд на землю, создаваемый мощной конвективной ячейкой, несет положительный заряд с большой высоты, а высота распространения головки отрицательного лидера заведомо превышает высоту распространения вершины положительного более чем на 5 км. Доминирование отрицательного лидера в положительных разрядах типа облако-земля может привести к тому, что повторные удары проходят к земле по одному и тому же каналу, по аналогии с ударами в отрицательных разрядах на землю, как это было недавно обнаружено в Аргентине [4]. Согласно рис. 2 в [4] при стремлении положительного лидера к земле характерная высота распространения отрицательного лидера составляла 7,5 км.

Структурные флуктуации и переходные процессы в молнии. Представленная в [1] классификация Хортон для плазменных каналов дает уникальную возможность проследить за динамикой развития разрядов молнии. Действительно, рост лидерного дерева сопровождается разветвлением инициирующего родительского потока с $s = 1$ на два дочерних. При этом число Хортон–Штролера родительского потока увеличивается на единицу, а единичный порядок передается дочерним веткам по наследству. Очевидно, что последующее ветвление только одной из дочерних веток не меняет порядка инициирующего родительского потока. Аналогичная ситуация складывается и на более высоких этажах иерархии. Таким образом, в случае активного ветвления лидера «волна» роста порядка потоков распространяется вверх по иерархии и может

добраться даже до ствола дерева молнии и увеличить его порядок s_{\max}^{\pm} на единицу.

Самосогласованная система порядков потоков дренажной сети позволяет совершенно естественно взглянуть и на проблему отмирания ветвей в процессе эволюции разряда. В [5] было отмечено, что «отключение» или волна переключения плазменных каналов в низко проводящее состояние всегда распространяется вниз по течению к основному стволу (подобно сезонному пересыханию русла рек) [3]. Если при этом пересохшее русло встречается в точке ветвления с потоком более высокого порядка, порядок последнего не меняется. В противном случае порядок канала ниже точки ветвления с пересохшим руслом падает на единицу. Волна «отключения» тоже может добраться до ствола дерева молнии и уменьшить на единицу его порядок s_{\max}^{\pm} . С учетом формул (6) и (7) отмирание ветвей лидера может рассматриваться как движение лидерной головки с отрицательной скоростью. При этом скорость смещения точки реверса в сторону доминирующего лидера может достигать значения порядка скорости самого лидера. Последовательный переход от конфигурации потоков на рис. 2,а к конфигурациям на рис. 2,б и в работы [1] иллюстрирует распространение волны пересыхания – «отключения», двигающейся вниз по течению и оставляющей за собой серые пересохшие каналы. Описанные правила роста и отмирания ветвей дерева разряда были впервые сформулированы для усовершенствованной модели молнии [6] и затем обсуждались в [5].

Важно подчеркнуть, что изменение (увеличение или уменьшение) порядка плазменного канала на единицу или, другими словами, переход канала на соседний (следующий или предыдущий) уровень иерархии сопровождается изменением заряда на входе в этот канал в соответствующей точке ветвления. Изменения заряда, вызванные структурными вариациями молнии, пропорциональны изменениям потенциала соответствующих фрагментов дерева разряда относительно внутриоблачного потенциала. Изменения заряда на стыках каналов, до которых «докатилась» структурная волна роста или падения порядка потоков, сопровождается локальной подзарядкой или перезарядкой чехла лидера и не может происходить мгновенно. Последнее связано с тем, что энергия, запасенная в конденсаторе, не может меняться скачком. Резко меняется только ток канала, что и приводит к экспериментально наблюдаемым транзисторам светимости [7, 8], связанным со структурными изменениями сети молнии.

Действительно, с волнами нарастания/отключения тока лидера тесно связано ещё одно важное проявление асимметрии молнии – реактивация затухших ветвей дерева разряда. Ведущую роль здесь играет феномен возвратного лидера (от англ. “recoil leader”), который возникает при внутриоблачных вспышках и в период внутриоблачного развития вспышек облако-земля.

Предпосылкой возникновения возвратного лидера является затухание тока в тех каналах, в которых впоследствии инициируются возвратные лидеры, т.е. их генерация обычно следует за волной падения тока в канале. Общепринятая интерпретация возвратных лидеров состоит в том, что они являются отрицательными лидерами, которые движутся по следам обесточенных ветвей положительного. Видеозаписи [9] показывают, что возвратные процессы с течением времени, как правило, увеличиваются по длине от самых маленьких до больших и главных ветвей. Возвратный лидер, который при развитии отрицательных вспышек на землю достигает земли, называют стреловидным лидером. Его развитие предшествует каждому новому событию в серии ударов отрицательной вспышки на землю. До анализа, проведенного в [5], оставалось непонятным, почему рост положительных лидеров сопровождается развитием отрицательных возвратных лидеров, а положительных возвратных лидеров, если они и существуют, никто не наблюдал. Так, по мнению авторов линейной модели [10], объяснить развитие возвратных

лидеров могло бы то, что более слаботочный положительный конец оказывается и более склонным к охлаждению и отсечке. В [5] генерация возвратных лидеров была связана с реактивацией недавно затухших ветвей положительного лидера, когда обратное движение точки реверса в сторону развития отрицательного лидера приводит к повышению средневзвешенного потенциала молнии. При этом происходит изменение характера взаимодействия ветвей положительного лидера: конкурентное подавление партнёров уступает место их симбиозу. Генерация возвратного лидера схематично показана на рис. 1, а синей пунктирной линией под номером 3 в ситуации, когда точка реверса, совершая обратное движение в сторону отрицательного лидера (синяя стрелка на рис. 1, а), уже успела опуститься ниже затухшего канала 3. Обратное движение точки реверса может наблюдаться при развитии внутриоблачных разрядов и принципиально присуще фазе обратного удара отрицательных вспышек облако-земля. Для положительных ударов, где точка реверса движется к земле (исключением являются редкие «долго-

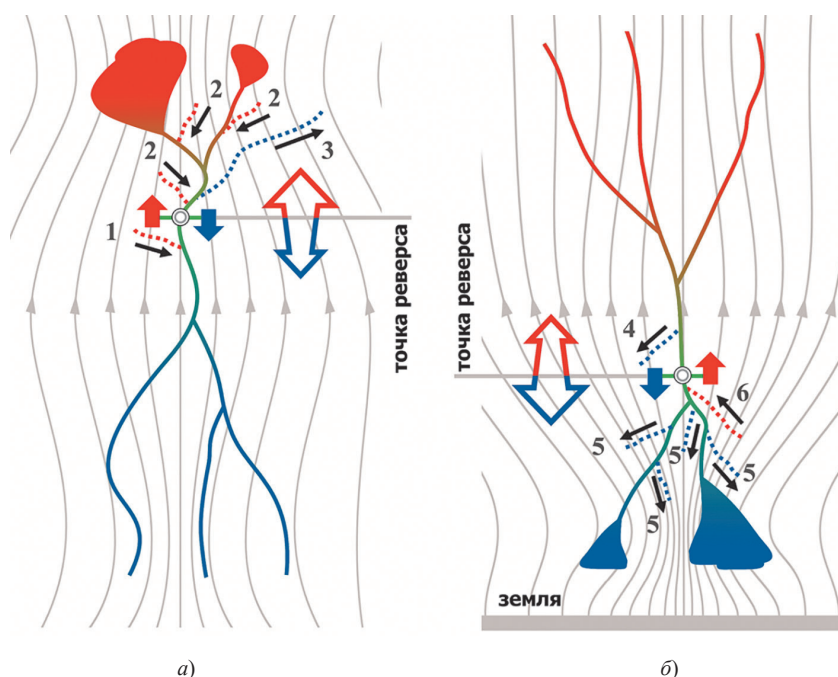


Рис. 1. Схема движения точки реверса и соответствующая классификация переходных процессов: *а* – доминирует положительный лидер; *б* – доминирует нисходящий отрицательный лидер. Проводящие каналы окрашены в соответствии со знаком заряда чехла. Круглые метки указывают точки реверса (нулевые уровни заряда чехла, окружающего тонкую сердцевину канала молнии). Красные стрелки, направленные вверх, и синие стрелки, направленные вниз, указывают возможные направления движения точки реверса. Реактивированные ветви схематично показаны пунктирными линиями и пронумерованы от 1 до 6. События, представленные красными пунктирными линиями, соответствуют движению точки реверса к вершине положительного лидера, а события, представленные синими пунктирными линиями, соответствуют движению точки реверса в сторону развития отрицательного лидера. Черные стрелки показывают направление тока в реактивированных каналах

Fig. 1. The scheme of reversing point movement and the corresponding classification of transient processes: *a* – dominating role belongs to positive leader; *b* – dominating role belongs to negative leader. Conductive channels are colored in accordance with the sign of charge of the lightning channel sheath. Round markers indicate reversing points (zero levels of charge of corona shell of the lightning channel surrounding thin channel core). Red arrows pointing up and blue arrows pointing down indicate possible directions of reversing point movement. Reactivated branches are schematically shown with dotted lines and numbered from 1 to 6. Events represented by red dotted lines correspond to the movement of reversing point towards the positive leader tip, while events represented by blue dotted lines correspond to the movement of reversing point towards the negative leader growth direction. Black arrows show the direction of current in reactivated channels

вязые» положительные вспышки облако-земля), ветви отрицательного лидера всегда находятся в симбиозе и соответствующие аналоги возвратных положительных лидеров формироваться не могут.

Другим важным примером реактивации затухших ветвей древа разряда являются так называемые иглоподобные структуры (от англ. *“needle-like structures”*) [11–13]. Экспериментальные исследования, недавно проведенные в [11] с помощью картографирования молний в диапазоне частот 30–80 МГц и астрономического радиотелескопа *LOFAR (LOw Frequency ARray)*, способного разрешать события с шагом 1 мкс по времени и 2 м в пространстве, обнаружили, что положительный лидер выявляет со временем свои контуры источниками, «мерцающими» вдоль всей его длины. Мерцания подобно иголкам распространяются радиально от горячего канала положительного лидера на расстояние 30–100 м со средней скоростью $3 \cdot 10^5$ м/с и имеют отрицательную полярность. Появление этих «иголок» вдоль канала положительного лидера регистрируется каждые 3–7 мс. Об этих мерцающих источниках сообщалось и ранее, но предыдущие исследования не смогли определить, является ли радиоизлучение положительных лидеров следствием распространения головки положительного лидера или импульсов тока, которые распространяются по плазменному каналу.

Авторы [11] рассматривают несколько вариантов формирования иглоподобных разрядов, основным из которых является снятие избыточного отрицательного заряда, накопившегося на поверхности горячего канала положительного лидера из-за его недостаточной пропускной способности. В [5] было указано, что иглоподобные образования обеспечиваются движением точки реверса молнии в сторону развития положительного лидера. На рис. 1,а иглоподобные структуры показаны схематично красными пунктирными линиями под цифрами 1 и 2, соответствующее направление движения точки реверса обозначено красной стрелкой. Поскольку молния представляет собой иерархическую систему плазменных каналов, максвелловское время релаксации ее проводящих фрагментов увеличивается по мере увеличения их пространственного размера от периферии к стволу молнии. В результате структурные волны и соответствующие волны заряда, вызванные развитием доминирующего лидера, быстро поглощаются на периферии, но относительно медленно достигают точки реверса. При значительной скорости роста периферии доминирующего лидера иглоподобные транзиенты начинают развиваться не только вблизи ствола (цифра 1 на рис. 1,а), но и на ветвях доминирующего лидера (отмечены на рис. 1,а цифрами 2). Подробные характеристики «игл» представлены в [14]. «Иглы» также наблюдались радиоинтерферометром (100–200 МГц) [15] и высокоскоростными камерами [12, 13].

Возвратные лидеры и иглоподобные разряды являются переходными явлениями, связанными с дина-

микой положительного лидера. Недавно экспериментально были обнаружены транзиенты, связанные с реактивацией ветвей нисходящих отрицательных ступенчатых лидеров [7, 8]. Используя высокоскоростные видеокамеры (с межкадровым интервалом длительностью 20 мкс) и соответствующие записи электрического поля, авторы [7] впервые зафиксировали яркие кратковременные вспышки светимости при повторном соединении обесточенных лидерных веток с основной лидерной системой и назвали их «искрами» (от англ. *“sparks”*). Авторы [7] пришли к выводу, что «искры» являются обычным явлением для нисходящих ступенчатых отрицательных лидеров. Недавно с помощью высокоскоростных видеокамер видимого и инфракрасного диапазонов авторы [8] наблюдали аналогичные транзиенты светимости, которые повторно освещали затухшие ветви двух отрицательных ступенчатых лидеров во Флориде.

Для объяснения транзиентов светимости в нисходящем отрицательном лидере в [7, 8] были предложены два механизма, в некотором смысле дополняющие друг друга. Авторы [7] выдвинули следующую гипотезу их развития. Пока плазменная ветвь подключена к системе нисходящего лидера, ее потенциал определяется потенциалом лидерной системы. Однако после того, как ветвь обесточена, она сохраняет потенциал, который был у нее во время отключения. По мере того, как лидер продолжает опускаться, его потенциал увеличивается, в то время как потенциал затухающей ветви остается постоянным. «Искровой» переходный процесс возникает, когда разность потенциалов между лидером и его обесточенной ветвью становится достаточной для реактивации. Второй механизм реактивации затухших лидерных ветвей, связанный с формированием порций положительного заряда при формировании ступеней отрицательного лидера, впервые был предложен в [8]. Процесс образования ступеней на движущейся вниз вершине лидера обязательно порождает распространяющуюся вверх волну тока, которая несет положительный заряд вверх, к точке реверса молнии. Авторы [8] утверждают, что *“step-related positive charge waves (moving up along the channel) may cause transients in the remnants of decayed branches at higher altitudes* (ступенчатые волны положительного заряда (движущиеся вверх по каналу) могут вызывать переходные процессы в останках затухших ветвей на больших высотах)».

С точки зрения развиваемого в данной работе подхода механизмы реактивации, предложенные в [7, 8], не только дополняют друг друга, но и являются «двумя сторонами одной медали». Действительно, приближение отрицательного лидера к земле усиливает электрическое поле на его периферии, что может привести к переходу доминирующей роли к нисходящему отрицательному лидеру в последние миллисекунды его жизни. Доминирование отрицательного лидера представляется редким событием и схематично показано на рис. 1,б.

В самом начале нисходящего движения точки реверса может наблюдаться генерация возвратных лидеров по уже рассмотренному выше сценарию (см. переходный процесс, схематично изображенный на рис. 1,а синим пунктиром и обозначенный номером 3). Затем продолжение движения точки реверса к земле (синяя стрелка на рис. 1,б) активирует конкурентное подавление боковых ветвей доминирующего отрицательного лидера и одновременно способствует реактивации затухших отрицательных ветвей, ток которых противоположен исходному направлению. Соответствующие переходные процессы схематично показаны на рис. 1,б синими пунктирными линиями и обозначены цифрами 4 и 5. Структурная волна положительного заряда не успевает полностью распространиться по отрицательной части разрядного древа, поэтому транзиенты возникают не только вблизи ствола молнии (событие 4), но и на боковых ветвях отрицательного лидера (события 5). Черные стрелки на рис. 1,б показывают направление тока в реактивированных каналах доминирующего нисходящего лидера. Стоит заметить, что всплески тока положительного лидера, вызванные резкими скачками в развитии положительной периферии, могут заставить точку реверса доминирующего отрицательного лидера остановиться и даже начать движение в противоположном направлении, т.е. к положительному концу (красная стрелка на рис. 1,б). Это ретроградное движение точки реверса приводит к реактивации недавно затухших ветвей отрицательного лидера в виде транзиентов, подобных тому, что схематично изображен на рис. 1,б красной пунктирной линией и обозначен цифрой 6. Так, авторы [8] сообщили, что в одном случае усиление яркости основного канала наблюдалось ими выше точки ветвления в кадре, следующем сразу за переходным процессом. Эта транзиентная вспышка могла бы служить примером положительного возвратного лидера. Однако вероятность ретроградного движения точки реверса при развитии доминирующего отрицательного лидера крайне мала, поскольку доминирование отрицательного лидера скорее всего является необратимым процессом.

В результате движения точки реверса доминирующего нисходящего отрицательного лидера к земле его боковые ветви исчезают, а их затухшие каналы провоцируют транзиентные события, одни из которых примыкают непосредственно к стволу молнии (см. [7]), а другие реализуются ближе к отрицательной периферии. В [7] подсчет всех видимых транзиентов и их синхронизация был выполнен для 15 лидеров, находящихся в пределах 8 км от камеры. Переходные процессы в их исследовании происходят на высоте около 3 км, ограниченной видимой вершиной ступенчатого лидера. Авторы [8] наблюдали транзиенты светимости, которые реактивировали затухшие ветви двух более близких отрицательных ступенчатых лидеров (от 2 до 4 км), и верхняя граница вертикального поля зрения в их наборе данных была заметно ниже, чем в [7] (около

1.25 км). По этой причине данные, представленные в [7], описывают больше событий типа, отмеченного на диаграмме на рис. 1,б цифрой 4, чем данные, представленные в [8], где преобладают переходные процессы типа, отмеченного на рис. 1,б номером 5.

Флуктуации электрического поля, связанные с диссипацией электростатической энергии при развитии грозовой системы, обеспечивают движение точки реверса как прерывистый стохастический процесс. Это движение должно сопровождаться зарядкой/перезарядкой чехла лидера молнии [5]. Управляющим параметром этого процесса является плотность погонного заряда центральной высокопроводящей жилы лидерного канала. Так, резкие изменения структуры молнии неизбежно сопровождаются переходными процессами, относящимися к основным лидерным ветвям. Процессы регуляции молнии, вероятно, связаны как с транзиентами, которые пересекают горячий лидер или канал постоянного тока, так и с переходными процессами, которые воспроизводят останки распавшихся каналов и могут рассматриваться как акты реактивации ветвей [8].

Концепция движения точки реверса в приложении к компактным внутриоблачным разрядам. Компактные внутриоблачные разряды (КВР) представляют собой изолированные во времени (длительностью около 30 мкс) и пространстве (не более 1 км) одиночные разряды и являются самыми мощными (на порядок более интенсивными по сравнению с «обычной» молнией) в природе источниками ВЧ–ОВЧ излучения (3–300 МГц) (см. [16] и ссылки там). Форма осциллограммы излучения КВР (см., например, [17, 18]) свидетельствует о наличии кратковременного импульса тока с амплитудами в десятки – сотни тысяч ампер, что сравнимо или даже превосходит амплитуду тока молнии на стадии возвратного удара. На настоящий момент не существует единой точки зрения на механизм формирования КВР, позволяющий собирать и разделять заряд порядка 0,1–1 Кл за очень малое время существования разряда. Одна группа исследователей, опираясь на эксперименты [19–21], считает, что КВР имеют чисто стримерную природу. При этом разряд рассматривается как мощная конусообразная лавина положительных [19] или отрицательных [20] стримеров длиной порядка 0,1–1 км с практически плоским фронтом, черпающая энергию из внутриоблачного поля (см. также модели [22–24]). Поскольку было обнаружено, что источники излучения распространяются с чрезвычайно высокими скоростями в районе 10^7 – 10^8 м/с, в зависимости от полярности стримеров они были названы быстрым положительным и быстрым отрицательным пробоями (от англ. “fast positive/negative breakdown”). В пользу данной точки зрения также говорит тот факт, что в спектре КВР были обнаружены «стримерные» линии на длине волны 337 нм, в то время как «лидерные» линии на длине волны 777,4 нм были выражены гораздо слабее или отсутствовали [21].

Альтернативная точка зрения заключается в том, что мощный импульс тока КВР протекает по хорошо проводящему лидерному каналу, стримерные вспышки на концах которого дают обильное ОВЧ излучение [25, 26]. Несмотря на наличие экспериментальных данных, косвенно подтверждающих стримерную природу КВР, гипотеза о существовании его лидерной части также имеет основания. Действительно, сложно предположить, что при столь больших токах отвечающая за формирование лидерного канала ионизационно-перегревная неустойчивость не развивается хотя бы в некоторых областях с локально повышенной плотностью тока. Для сравнения, типичный лабораторный лидер имеет ток порядка 1 А [27], что в 10^4 – 10^5 раз меньше, чем пиковый ток КВР.

Концепция макромасштабной асимметрии развития положительного и отрицательного полюсов молнии позволяет «примерить» две, казалось бы, противоречащие друг другу гипотезы развития КВР (рис. 2).

Предположим, что его формирование происходит по сценарию инициации молнии [28–30], в рамках которого лидерный канал возникает за счет слияния лидерных «зародышей», формирующихся в рамках объемной стримерной сети. Существенным отличием в случае формирования КВР является большая, чем для «классической» молнии, протяженность плазменной сети, которая за счет большей электрической емкости позволяет быстро собрать разделяемый токами КВР облачный заряд. Поскольку на начальном этапе развития разряда основную роль играют положительные стримеры, формирующиеся внутри плазменной сети «молодые» лидеры длиной от нескольких до нескольких десятков метров должны иметь слабо выраженную отрицательную часть и большое число конкурирующих ветвей положительной полярности. В

результате ряда последовательных слияний отдельных лидерных сегментов образуется единый лидерный канал, пронизывающий стримерную сеть вдоль направления внешнего электрического поля. После слияния по данному каналу протекает ток выравнивания потенциалов, в результате которого происходит перезарядка чехла лидера и смещение точки реверса в сторону роста доминирующего положительного полюса разряда. Сдвиг точки реверса меняет потенциал лидера, отсекая боковые ветви положительной полярности: формируется «оголенный» лидерный канал, ограниченный стримерными коронами. Количество и скорость роста стримеров в стримерных зонах КВР будут особенно велики вследствие колоссальных токов поляризации, приводящих к быстрому накоплению заряда порядка 0,1–1 Кл на положительном и отрицательном полюсах разряда. В пользу данного предположения говорит тот факт, что характерные для КВР скорости роста стримеров могут наблюдаться только при напряженностях электрического поля, превышающих 1,5–2 МВ/(м·атм) [31]. Проверка описанной выше гипотетической схемы развития КВР в рамках численного моделирования является предметом будущих исследований.

В рамках данной концепции обширная стримерная корона на положительном полюсе КВР может быть принята за быстрый положительный пробой. Несмотря на безальтернативное доминирование положительного лидера, обусловленное относительно малой вертикальной протяженностью разряда и удаленностью от поверхности земли, при столь больших токах отрицательная стримерная корона также будет сильно развитой. Она может быть настолько выраженной, что при наблюдении с земли ее можно принять за быстрый отрицательный пробой. При этом лидерный канал, «замаскированный» мощными стримерными вспышками

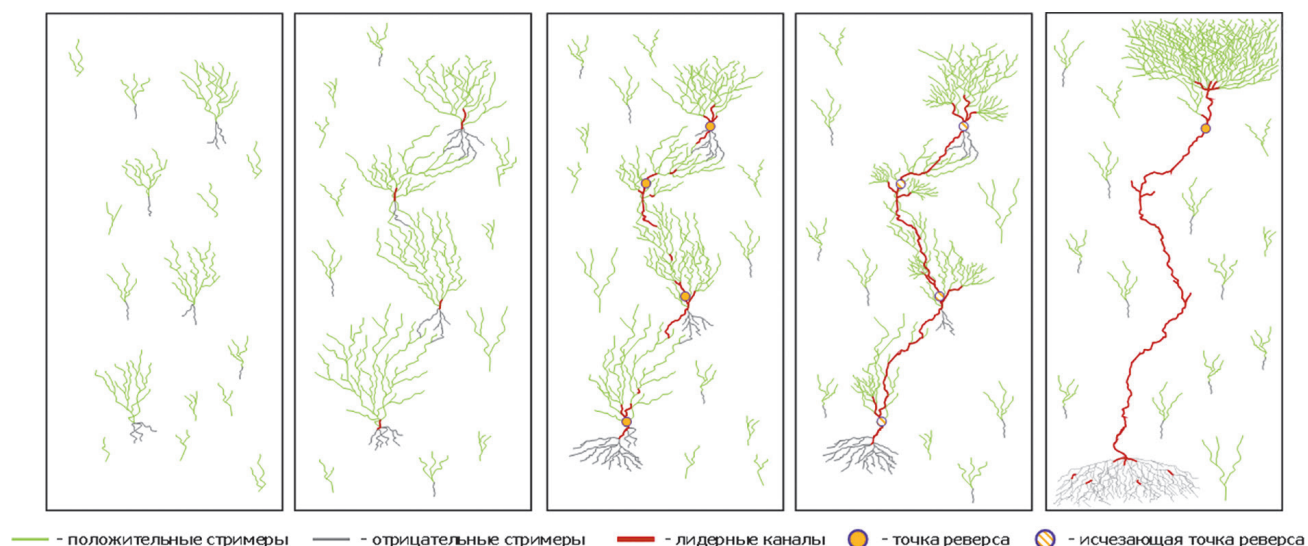


Рис. 2. Схема развития компактного внутриоблачного разряда, согласующаяся с концепцией движения точки реверса

Fig. 2. The scheme of compact intracloud discharge development consistent with the concept of reversing point movement

с торцов и останками породившей его стримерной сети по всей длине, может быть практически недоступен для наблюдения.

Выводы. В рамках проведенного исследования показано, что способность молнии как открытой системы сохранять постоянство своего внутреннего состояния тесно связана с асимметрией полярностей: морфологические и транспортные свойства молнии обусловлены нарушением структурной симметрии древа электрического разряда при смене направления тока на противоположное. Положительная и отрицательная части грозового разряда имеют существенные морфологические различия, обеспечивающие заметную разницу в значениях периферийных токов. Движение точки реверса молнии (точки нулевого заряда чехла двунаправленного лидера) от места зарождения в направлении развития доминирующего лидера является принципиальным проявлением асимметрии полярности молнии [5]. Установлено, при каких условиях отрицательный лидер становится доминирующим вместо положительного, сохраняющего свое первенство в подавляющем большинстве ситуаций.

Особый интерес представляет класс транзиентов светимости, связанных с реактивацией распавшихся каналов. Для реактивации лидерная ветвь должна сначала затухнуть. Вслед за [5, 32] было установлено, что действительно существует два типа затухания лидеров. Если первый вариант отключения плазменных каналов получил название «смерть лидера» [32] и характерен как для симметричных, так и асимметричных транспортных систем, то второй является привилегией только асимметричного случая и вызван конкурентным подавлением боковых ветвей доминирующего лидера из-за движения точки реверса и соответствующего изменения средневзвешенного потенциала древа молнии. Такая трактовка второго механизма отключения плазменных каналов принципиально отличается от указанной авторами [32] и основанной на эффекте «удушения поля», когда многократное ветвление развивающегося лидера, по мнению авторов [32], экранирует (подобно зонтику) электрическое поле облака от нижних ветвей.

На основе парадигмы движущейся точки реверса была проведена классификация основных типов транзиентов, связанных с реактивацией затухших ветвей доминирующего лидера. Положительный лидер доминирует в подавляющем большинстве ситуаций. Основные транзиенты, связанные с развитием доминирующего положительного лидера, помимо отмирания его боковых ветвей, представлены известными возвратными лидерами и недавно обнаруженными иглоподобными событиями. Иголоподобный тип реактивации доминирующих положительных лидерных ветвей схематично представлен на рис. 1,а.

Иглоподобные события возникают из-за уменьшения потенциала ствола молнии при движении точки реверса к вершине положительного лидера. И наоборот,

возвратные лидеры возникают при ретроградном движении точки реверса. Возвратные лидеры вызываются быстрым перераспределением потенциала разрядного древа молнии за счет движения точки реверса, а не быстрой перестройкой конфигурации облачных зарядов. Быстрая перестройка конфигурации облачного заряда, вероятно, является следствием, а не причиной появления возвратных лидеров [8].

Возникновение переходных процессов связано с тем, что система должна успеть «переварить» структурные изменения на собственной периферии. Физической причиной возникновения переходных процессов в сети плазменных каналов молнии является наличие емкостных элементов, периодически меняющих свои размеры и конфигурацию. Это объясняется тем, что энергия электрического поля, запасенная в этих элементах, не может резко меняться при «переключениях» (процессах морфологических изменений структуры древа молнии) в цепи. Другими словами, новый емкостный элемент не может накапливать или расходовать энергию мгновенно. Для этого требуется конечное время порядка времени релаксации сети (постоянная времени цепи резистор–конденсатор молнии). При этом ток в ветвях электрической цепи молнии резко меняется, вызывая усиление свечения каналов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-21-00057).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иудин Д.И. и др. Разряд молнии как самоорганизующаяся транспортная сеть. Ч. 1. Концепция асимметричного разрядного древа. – *Электричество*, 2023, № 6, с. 77–88.
2. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001, 320 с.
3. Ngin T. et al. Does the Lightning Current Go to Zero between Ground Strokes? Is There a Current “Cutoff”? – *Geophysical Research Letters*, 2014, vol. 41, pp. 3266–3273, DOI:10.1002/2014GL059601.
4. Zhu Y. et al. Multiple Strokes Along the Same Channel to Ground in Positive Lightning Produced by a Supercell. – *Geophysical Research Letters*, 2021, vol. 48, DOI:10.1029/2021GL096714.
5. Iudin D. I. Lightning as an Asymmetric Branching Network. – *Atmospheric Research*, 2021, vol. 256, pp. 1–12, DOI:10.1016/j.atmosres.2021.105560.
6. 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.
7. Stolzenburg M. et al. Transient Luminosity Along Negative Stepped Leaders in Lightning. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, vol. 120, pp. 3408–3435, DOI:10.1002/2014JD022933.
8. Ding Z. et al. On a Possible Mechanism of Reactivation of Decayed Branches of Negative Stepped Leaders. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, vol. 125 (23), DOI:10.1029/2020JD033305.
9. Van der Velde O.A., Montanya J. Asymmetries in Bidirectional Leader Development of Lightning Flashes. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, vol. 118(24), pp. 13504–13519, DOI: 10.1002/2013JD020257.
10. Williams E.R., Heckman S. Polarity Asymmetry in Lightning Leaders: The Evolution of Ideas on Lightning Behavior from Strikes to Aircraft. – *Journal AerospaceLab*, 2012, vol. 5, pp. 1–8.

11. Hare B.M. et al. Needle-Like Structures Discovered on Positively Charged Lightning Branches. – Nature, 2019, vol. 568, pp. 360–363, DOI:10.1038/s41586-019-1086-6.

12. Saba M.M.F. et al. Optical Observation of Needles in Upward Lightning Flashes. – Scientific Reports, 2020, vol. 10, DOI:10.1038/s41598-020-74597-6.

13. Wu B. et al. A +CG Flash Caused by a Sequence of Bidirectional Leaders that Served to Form a Ground-Reaching Branch of a Pre-Existing Horizontal Channel. – Earth and Space Science Open Archive, 2021, DOI:10.1002/essoar.10503918.2.

14. Hare B.M. et al. Needle Propagation and Twinkling Characteristics. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, vol. 126(6), DOI:10.1029/2020JD034252.

15. Pu Y., Cummer S.A. Needles and Lightning Leader Dynamics Imaged with 100–200 MHz Broadband VHF Interferometry. – Geophysical Research Letters, 2019, vol. 46(22), pp. 13556–13563, DOI:10.1029/2019GL085635.

16. 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.

17. 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, 2019, vol. 173, pp. 251–262, DOI:10.1016/j.epsr.2019.04.016.

18. Nag A. Characterization and Modeling of Lightning Processes with Emphasis on Compact Intracloud Discharges, PhD Dissertation, Univ. of Fla., Gainesville, 2010, 508 p.

19. 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.

20. Tilles J.N. et al. Fast Negative Breakdown in Thunderstorms. – Nature Communications, 2019, vol. 10 (1), DOI:10.1038/s41467-019-09621-z.

21. Liu F. et al. Optical Emissions Associated with Narrow Bipolar Events from Thunderstorm Clouds Penetrating into the Stratosphere. – Nature Communications, 2021, vol. 12, DOI: 10.1038/s41467-021-26914-4.

22. Attanasio A., Krehbiel P.R., da Silva C.L. Griffiths and Phelps Lightning Initiation Model, Revisited. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, vol. 124, pp. 8076–8094, DOI: 10.1029/2019JD030399.

23. Cooray V. et al. Modeling Compact Intracloud Discharge (CID) as a Streamer Burst. – Atmosphere, 2020, vol. 11, DOI: 10.3390/atmos11060549.

24. Attanasio A., da Silva C., Krehbiel P. Electrostatic Conditions That Produce Fast Breakdown in Thunderstorms. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, vol. 126, DOI:10.1029/2021JD034829.

25. Hamlin T. et al. Estimating Lightning Channel Characteristics of Positive Narrow Bipolar Events Using Intrachannel Current Reflection Signatures. – Journal of Geophysical Research, 2007, vol. 112, DOI:10.1029/2007JD008471.

26. Nag A., Rakov V.A. Compact Intracloud Lightning Discharges: 1. Mechanism of Electromagnetic Radiation and Modeling. – Journal of Geophysical Research, 2010, vol. 115, DOI:10.1029/2010JD014235.

27. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. М.: МФТИ, 1997, 320 с.

28. Иудин Д.И., Сысоев А.А., Раков В.А. Инициация молнии как следствие естественной эволюции грозового облака. Ч. 1. Роль

отлипания в снижении критической разрядной напряжённости воздуха. – Электричество, 2022, № 11, с. 13–28.

29. Иудин Д.И., Сысоев А.А., Раков В.А. Инициация молнии как следствие естественной эволюции грозового облака. Ч. 2. До-стримерный этап. – Электричество, 2022, № 12, с. 13–22.

30. Иудин Д.И., Сысоев А.А., Раков В.А. Инициация молнии как следствие естественной эволюции грозового облака. Ч. 3. Стримеры и стримерно-лидерный переход – Электричество, 2023, № 1, с. 16–27.

31. Starikovskiy A.Yu., Aleksandrov N.L. How Pulse Polarity and Photoionization Control Streamer Discharge Development in Long Air Gaps. – Plasma Sources Science and Technology, 2020, vol. 29, DOI:10.1088/1361-6595/ab9484.

32. Mazur V., Ruhnke L.H. The Physical Processes of Current Cutoff in Lightning Leaders. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, vol. 119, pp. 2796–2810, DOI: 10.1002/2013JD020494.

Поступила в редакцию [17.05.2023]
Принята к публикации [25.05.2023]

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.



Коровкин Николай Владимирович – доктор техн. наук, профессор, профессор высшей школы высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург; 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; научный сотрудник Института прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия.



Хаякава М. – доктор техн. наук, почетный профессор университета электрокоммуникаций, Тёфу, Токио, Япония.

Lightning Discharge as a Self-Organizing Transport Network.

Part 2. Reversing Point and Lightning Transients

IUDIN Dmitriy 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.).

KOROVKIN Nikolay V. (*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg; the Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod, Russia*) – Professor of the Higher School of High-Voltage Energy; Leading Researcher, Dr. Sci. (Eng.), Professor.

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.).

HAYAKAWA M. (*The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo, Japan*) – Emeritus Professor Emeritus of the University of Electro-Communications, Dr. Sci. (Eng.).

The second part of the study addresses the problem of a lightning discharge macroscale asymmetry. It is shown that the displacement rates of both the reversing point and weighted averaged lightning potential are governed by the difference of peripheral discharge currents. The reversing point movement in the direction of the dominant leader leads to a change in the weighted average lightning potential and serves as a key to explaining the macroscale manifestations of lightning discharge asymmetry. The conditions under which the negative leader becomes -- already at the lightning discharge late development stage -- the dominant one instead of the positive one, which retains its dominance in the overwhelming majority of situations, are studied. Based on the moving reversing point paradigm, the article proposes classification of the main types of transients associated with reactivation of the dominant leader's decayed branches, i.e., a leader with the prevailing peripheral current. It is shown that the transients caused by reactivation of the dominant negative leader's decayed branches are polar opposites of the transients associated with the dominance of the positive leader. It has been found that the transients are accompanied by recharging of the leader channel sheath. Under these conditions, the charge per unit length of the highly conductive leader channel core is the recharging process governing parameter. A possible development scenario of compact intracloud discharges is described, which is consistent with the reversing point movement concept formulated in the work.

Key words: polarity asymmetry, lightning leader, leader channel charge sheath, reversing point, lightning transients, compact intracloud discharge.

The work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 23-21-00057).

REFERENCES

1. Iudin D.I., Korovkin N.V., Syssoev A.A., Hayakawa M. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2023, No. 6, pp. 77–88, DOI:10.24160/0013-5380-2023-6-77-88.
2. Bazelyan E.M., Rayzer Yu.P. *Fizika molnii i molniezashchity* (Lightning Physics and Lightning Protection). M.: Fizmatlit, 2001, 320 p.
3. Ngin T. et al. Does the Lightning Current Go to Zero between Ground Strokes? Is There a Current “Cutoff”? – *Geophysical Research Letters*, 2014, vol. 41, pp. 3266–3273, DOI:10.1002/2014GL059601.
4. Zhu Y. et al. Multiple Strokes Along the Same Channel to Ground in Positive Lightning Produced by a Supercell. – *Geophysical Research Letters*, 2021, vol. 48, p. e2021GL096714, DOI: 10.1029/2021GL096714.
5. Iudin D.I. Lightning as an Asymmetric Branching Network. – *Atmospheric Research*, 2021, vol. 256, pp. 1–12, DOI:10.1016/j.atmosres.2021.105560.
6. 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.
7. Stolzenburg M. et al. Transient Luminosity Along Negative Stepped Leaders in Lightning. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, vol. 120, pp. 3408–3435, DOI:10.1002/2014JD022933.
8. Ding Z., Rakov V.A., Zhu Y., Tran M.D. On a Possible Mechanism of Reactivation of Decayed Branches of Negative Stepped Leaders. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, vol. 125 (23), p. e2020JD033305, DOI:10.1029/2020JD033305.
9. Van der Velde O.A., Montanya J. Asymmetries in Bidirectional Leader Development of Lightning Flashes. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, vol. 118(24), pp. 13504–13519, DOI: 10.1002/2013JD020257.
10. Williams E.R., Heckman S. Polarity Asymmetry in Lightning Leaders: The Evolution of Ideas on Lightning Behavior from Strikes to Aircraft. – *Journal AerospaceLab*, 2012, vol. 5, pp. 1–8.
11. Hare B.M. et al. Needle-Like Structures Discovered on Positively Charged Lightning Branches. – *Nature*, 2019, vol. 568, pp. 360–363, DOI:10.1038/s41586-019-1086-6.

12. **Saba M.M.F. et al.** Optical Observation of Needles in Upward Lightning Flashes. – Scientific Reports, 2020, vol. 10, p. 17460, DOI:10.1038/s41598-020-74597-6.
13. **Wu B. et al.** A +CG Flash Caused by a Sequence of Bidirectional Leaders that Served to Form a Ground-Reaching Branch of a Pre-Existing Horizontal Channel. – Earth and Space Science Open Archive, 2021, DOI:10.1002/essoar.10503918.2.
14. **Hare B. M. et al.** Needle Propagation and Twinkling Characteristics. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, vol. 126(6), p. e2020JD034252, DOI:10.1029/2020JD034252.
15. **Pu Y., Cummer S.A.** Needles and Lightning Leader Dynamics Imaged with 100–200 MHz Broadband VHF Interferometry. – Geophysical Research Letters, 2019, vol. 46(22), pp. 13556–13563, DOI:10.1029/2019GL085635.
16. **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.
17. **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, 2019, vol. 173, pp. 251–262, DOI:10.1016/j.epsr.2019.04.016.
18. **Nag A.** Characterization and Modeling of Lightning Processes With Emphasis on Compact Intracloud Discharges, PhD dissertation, Univ. of Fla., Gainesville, 2010, 508 p.
19. **Rison W. et al.** Observations of Narrow Bipolar Events Reveal How Lightning is Initiated in Thunderstorms. – Nature Communications, 2016, vol. 7, p. 10721, DOI:10.1038/ncomms10721.
20. **Tilles J.N. et al.** Fast Negative Breakdown in Thunderstorms. – Nature Communications, 2019, vol. 10 (1), p. 1648, DOI:10.1038/s41467-019-09621-z.
21. **Liu F. et al.** Optical Emissions Associated with Narrow Bipolar Events from Thunderstorm Clouds Penetrating into the Stratosphere. – Nature Communications, 2021, vol. 12, p. 6631, DOI: 10.1038/s41467-021-26914-4.
22. **Attanasio A., Krehbiel P.R., da Silva C.L.** Griffiths and Phelps Lightning Initiation Model, Revisited. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, vol. 124, pp. 8076–8094, DOI: 10.1029/2019JD030399.
23. **Cooray V., Cooray G., Rubinstein M., Rachidi F.** Modeling Compact Intracloud Discharge (CID) as a Streamer Burst. – Atmosphere, 2020, vol. 11, p. 549, DOI: 10.3390/atmos11060549.
24. **Attanasio A., da Silva C., Krehbiel P.** Electrostatic Conditions That Produce Fast Breakdown in Thunderstorms. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, vol. 126, p. e2021JD034829, DOI:10.1029/2021JD034829.
25. **Hamlin T. et al.** Estimating Lightning Channel Characteristics of Positive Narrow Bipolar Events Using Intrachannel Current Reflection Signatures. – Journal of Geophysical Research, 2007, vol. 112, p. D14108, DOI:10.1029/2007JD008471.
26. **Nag A., Rakov V.A.** Compact Intracloud Lightning Discharges: 1. Mechanism of Electromagnetic Radiation and Modeling. – Journal of Geophysical Research, 2010, vol. 115, p. D20102, DOI:10.1029/2010JD014235.
27. **Bazelyan E.M., Rayzer Yu.P.** *Iskrovoy razryad* (Spark Discharge). M.: MFTI, 1997, 320 p.
28. **Iudin D.I., Syssoev A.A., Rakov V.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2022, No. 11, pp. 13–28.
29. **Iudin D.I., Syssoev A.A., Rakov V.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2022, No. 12, pp. 13–22.
30. **Iudin D.I., Syssoev A.A., Rakov V.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2023, No. 1, pp. 16–27.
31. **Starikovskiy A.Yu., Aleksandrov N.L.** How Pulse Polarity and Photoionization Control Streamer Discharge Development in Long Air Gaps. – Plasma Sources Science and Technology, 2020, vol. 29, p. 075004, DOI:10.1088/1361-6595/ab9484.
32. **Mazur V., Ruhnke L.H.** The Physical Processes of Current Cutoff in Lightning Leaders. – Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, vol. 119, pp. 2796–2810, DOI: 10.1002/2013JD020494.

Received [17.05.2023]

Accepted [25.05.2023]