

# Численное моделирование излучения грозового облака на стадии инициации молнии

Сысоев А.А.<sup>1,2</sup>, Иудин Д.И.<sup>1,2</sup>, Караштин А.Н.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup>Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижний Новгород, Россия

## Абстракт

Недавно для целого ряда грозových систем в различных регионах планеты появились сообщения о наблюдении непрерывной последовательности кратковременных разрядов, случайным образом заполняющих зону сильного внутриоблачного поля. Отдельные разряды в последовательности имеют длительность намного меньше миллисекунды и пространственную протяженность, не превышающую нескольких сотен метров. В течение периода активности грозовой системы эти разряды происходят каждые несколько миллисекунд. После внутриоблачного разряда скорость появления импульсов резко снижается до нескольких в секунду, а затем вновь возрастает до нескольких сотен в секунду вплоть до следующего внутриоблачного разряда. Разряды-предвестники дискретны как во времени, так и в пространстве, отделены друг от друга интервалами от сотен миллисекунд до нескольких секунд и локализованы в пространстве, как правило, очень близко к месту зарождения последующего внутриоблачного разряда. Конкретный физический механизм возникновения разрядной активности, порождающей наблюдаемое излучение, до сих пор не до конца понятен. В качестве возможных вариантов было предложено несколько гипотез, среди которых можно выделить пробой на убегающих электронах и быстрый положительный пробой. В данном исследовании предлагается альтернативное объяснение, которое основано на сравнении экспериментальных данных радиоактивности грозových облаков, полученных в Нижегородской области 15 мая 2019 года с помощью широкополосного радиоинтерферометра с результатами численного моделирования процесса формирования лидера молнии в грозovém облаке. Показано, что наблюдаемые интенсивные всплески электрического поля могут возникать в результате слияния двух или более биполярных стримерных/лидерных систем длиной от нескольких до нескольких десятков метров. Последовательность таких слияний при определенных условиях может привести к формированию самоподдерживающегося лидерного канала, которым завершается процесс инициации молнии. Результаты исследования опубликованы в работе [1] и кратко описаны ниже.

## Введение

На данный момент проблема инициации молнии в грозовом облаке возглавляет список десяти наиболее важных вопросов физики молнии [2]. Для объяснения процесса инициации молнии было предложено несколько механизмов, среди которых широкую известность приобрели два подхода. Первый проистекает из работ [3-5] и сводится к инициации стримерного разряда с поверхности гидрометеора, а второй предполагает, что инициация молнии является следствием развития пробоя на убегающих электронах [6-8].

В недавних работах [9, 10] был предложен фундаментально новый сценарий инициации молнии, последовательно разворачивающийся на нескольких пространственно-временных масштабах. На начальной стадии коронные разряды, возникающие в моменты соударений/сближений гидрометеоров, приводят к заполнению облака пятнами положительных и отрицательных ионов. В результате описанного в исследовании [9] эстафетного механизма, который начинает работать при относительно малой пространственно-временной частоте коронирования гидрометеоров (ее пороговое значение составляет  $0.1 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ ), происходит постепенный рост концентрации ионов вплоть до возникновения областей повышенной ионной проводимости. Поскольку проводимость ионных пятен может достигать значений  $10^{-10}$ - $10^{-9} \text{ См/м}$ , они способны эффективно поляризоваться, увеличивая электрическое поле на своих полюсах до уровня, достаточного для появления положительных стримеров. В работе [10] показано, что если каждая область повышенной ионной проводимости за время своей жизни генерирует хотя бы один положительный стример, то внутри грозового облака возникает трехмерная плазменная сеть. Те элементы сети, которые расположены в местах наибольшей концентрации токов, превращаются в горячие лидерные сегменты. Их прогрев происходит за счет кумулятивного эффекта джоулева нагрева и развития ионизационно-перегревной неустойчивости. Лидерные сегменты поляризуются и удлиняются, сливаясь в единый хорошо проводящий канал. При этом потенциальный «зародыш» молнии будет жизнеспособным после выхода из зоны сильного поля, если перекрываемая им разность потенциалов превышает 3 МВ.

Одной из возможностей верификации того или иного сценария инициации молнии является сравнение предсказанного им излучения формирующихся токовых систем с экспериментально зарегистрированной электромагнитной активностью грозового облака на стадии инициации молнии. В данной работе показано, что наблюдаемые кратковременные импульсы электрического поля могут быть объяснены слиянием биполярных стримерных/лидерных систем, объединяющихся в единый канал «зародыша»

молнии. Данный вывод подкреплен сравнением результатов численного моделирования с осциллограммой радиоизлучения грозового облака, полученной в Нижегородской области 15 мая 2019 года с помощью широкополосного радиointерферометра.

### **Данные наблюдений**

Используемые в работе экспериментальные данные были получены с помощью специально разработанной установки, предназначенной для записи коротких электромагнитных импульсов. Оборудование расположено в Нижегородской области (координаты точки приема – 56.15N, 44.32E). Установка состоит из четырех широкополосных антенных ансамблей, аналогичных описанным в [11, 12] и подключенных к записывающим устройствам. Она позволяет регистрировать сигналы электромагнитного излучения с частотой дискретизации до 60 МГц, а также определять направление прихода сигнала. Каждый антенный ансамбль состоит из трех отдельных антенн: двух взаимно перпендикулярных рамочных антенн для измерения горизонтального магнитного поля и End-Fed антенны для измерения вертикального электрического поля. Все три антенны активны и включают в себя транзисторные усилители. Это позволяет существенно уменьшить размер установки и добиться одинаковой амплитудно-частотной характеристики для всех антенн в диапазоне частот 0,1–30 МГц. Из-за достаточно сильных электромагнитных помех в точке приема для измерения сигнала излучения использовалось только магнитное поле.

Осциллограмма записанного с помощью экспериментальной установки излучения показана на Рис. 1. Сигнал можно поделить на два участка, о чем явно свидетельствуют графики среднеквадратичной амплитуды поля и куртозиса. Первые 65 мс можно условно назвать долидерной стадией, остальные 35 мс – лидерной. Приблизительно такой промежуток времени требуется отрицательному ступенчатому лидеру, распространяющемуся с типичной скоростью порядка 220 км/с, чтобы преодолеть расстояние от границы между основным отрицательным и нижним положительным слоями заряда до земли (4.5-7.5 км). Долидерная стадия характеризуется импульсами относительно большой амплитуды, умеренным значением среднеквадратичного поля и относительно большим куртозисом. На лидерной стадии интенсивность излучения немного возрастает, а куртозис падает более, чем на порядок, что говорит о появлении в излучении квазинепрерывной (шумовой) составляющей и об уменьшении амплитуд импульсов и интервалов времени между ними.

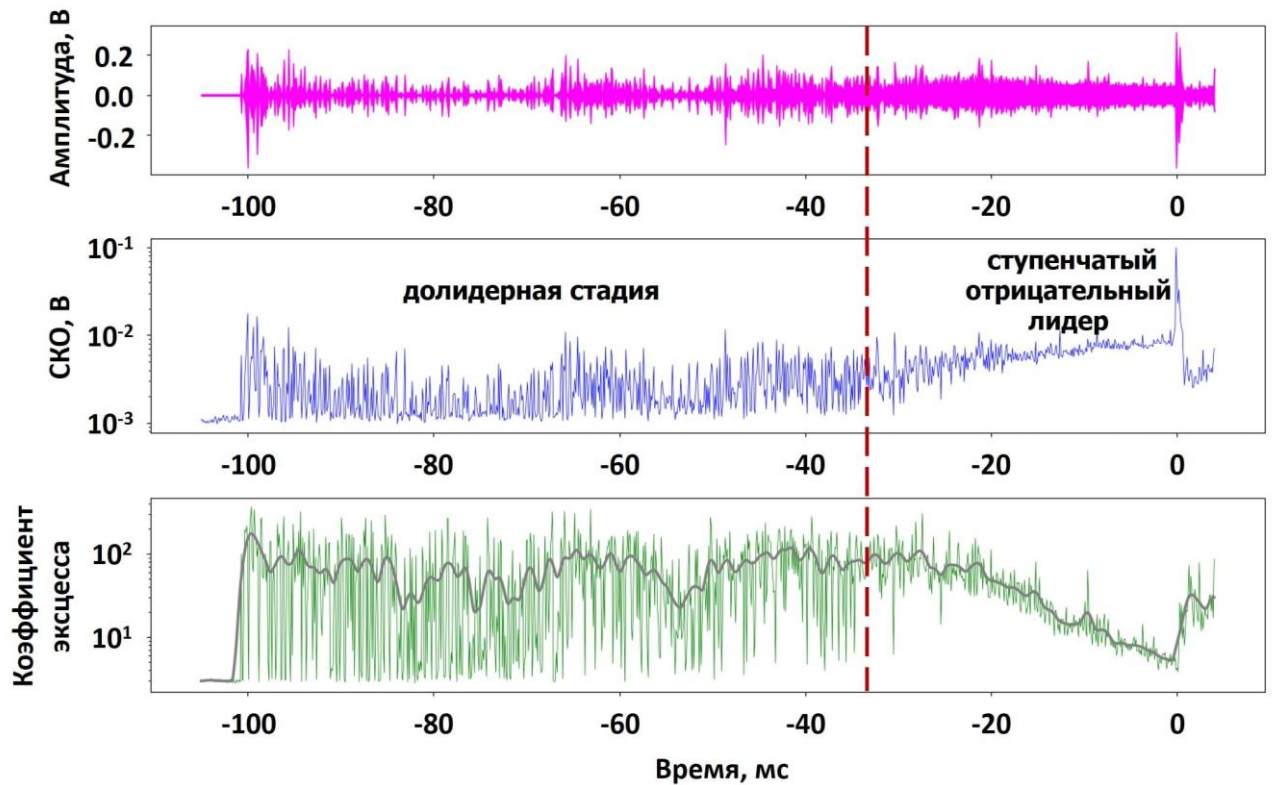


Рис. 1. Осциллограмма радиоизлучения грозового облака, полученная 15 мая 2019 г. в Нижегородской области. На верхней панели показан записанный с антенны сигнал, на средней и нижней панелях – его среднеквадратичное отклонение и куртозис соответственно, усредненные по 100-микросекундным временным интервалам (на нижней панели жирная линия усреднена по 2-миллисекундным интервалам). Время отсчитывается от момента возвратного удара. Коэффициент перевода амплитуды сигнала, полученного с выхода приемного устройства в вольтах, в напряженность  $E_z$ -компоненты электрического поля в вольтах на метр составляет порядка единицы.

Для сравнения с результатами численного моделирования была выбрана долидерная часть осциллограммы, начальный участок и некоторые отдельные импульсы которой представлены на Рис. 2.

### Описание численной модели

Область моделирования представляет собой прямоугольный параллелепипед с длинами ребер  $60 \times 60 \times 120 \text{ м}^3$ , разбитый на кубические ячейки с длиной ребра  $a = 1 \text{ м}$ . Вершины данных ячеек образуют простую кубическую решетку, на узлах которой развиваются модельные разряды. Центр модельного объема расположен на высоте 6.5 км над уровнем моря, которая типична для инициации разряда типа облако-земля отрицательной полярности [13]. Разряд развивается в однородном вертикально направленном электрическом поле  $E_0$  с напряженностью 160 кВ/м, величина которой попадает в диапазон экспериментально измеряемых в облаке значений [14, табл. 3.2].

Электрический потенциал  $\varphi$ , создаваемый постоянным электрическим полем  $E_0$  и зарядами, расположенными в узлах пространственной решетки, вычисляется как решение уравнения Пуассона. Потенциал в узле решетки с радиус-вектором  $r'$  может быть вычислен как

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \sum_{\mathbf{r}' \neq \mathbf{r}} \frac{q_{r'}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} + \frac{q_r}{a/2} \right) - (\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{r}), \quad (1)$$

где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума. Проекция электрического поля на вектор  $\mathbf{r} - \mathbf{r}'$ , соединяющий пару узлов пространственной решетки с радиус-векторами  $\mathbf{r}$  и  $\mathbf{r}'$  может быть найдена как

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

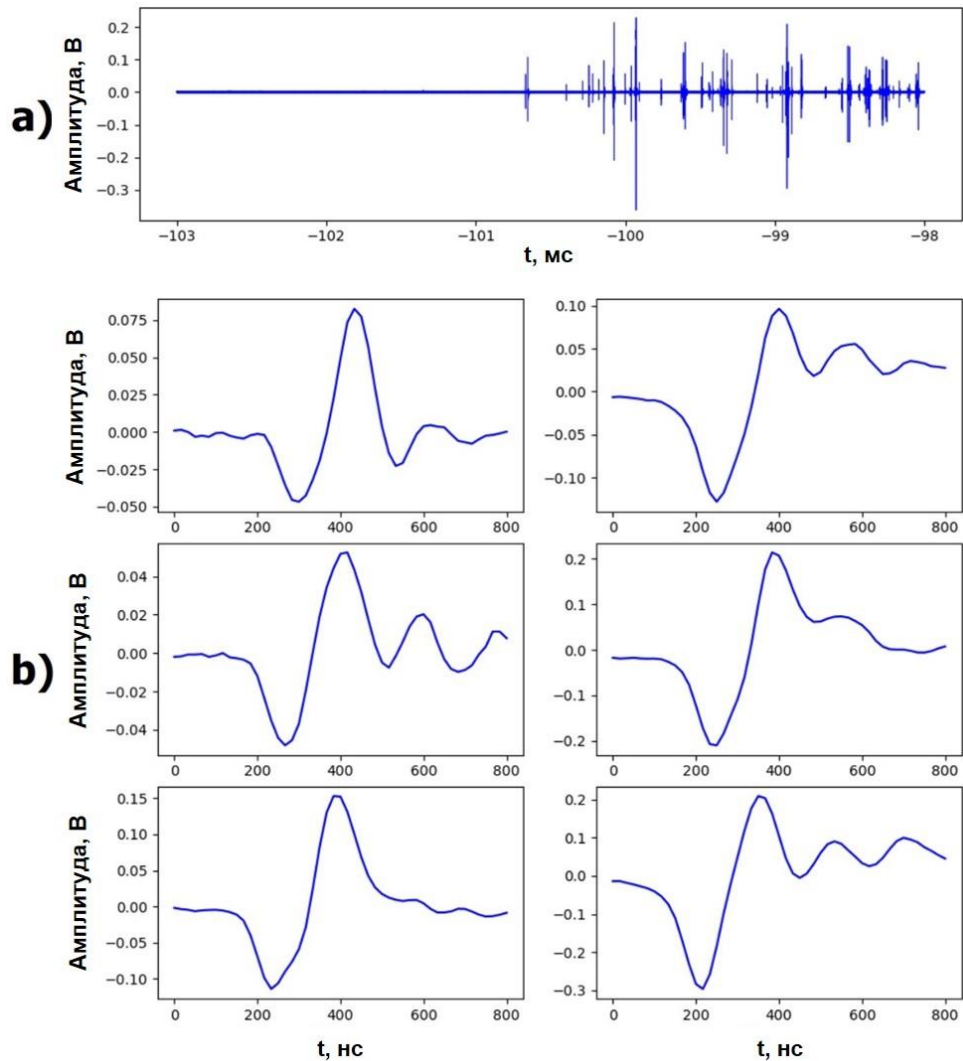


Рис. 2. Начальная стадия осциллограммы, показанной на Рис. 1 (а) и несколько примеров биполярных импульсов излучения, взятых из первой миллисекунды после начала записи осциллограммы (б).

Разрядные каналы могут расти за счет испускания новых проводящих связей. Приращение канала, то есть появление нового проводящего отрезка между парой соседних узлов пространственной решетки с радиус-векторами  $\mathbf{r}$  и  $\mathbf{r}'$ , является вероятностным процессом. Соответствующая функция распределения вероятностей имеет вид

$$P^{\pm}(E_{r,r'}) = \begin{cases} 1 - \exp\left\{-\frac{|E_{r,r'}| - E_{pth}^{\pm}}{E_{pth}^{\pm}}\right\}, & |E_{r,r'}| \geq E_{pth}^{\pm} \\ 0, & |E_{r,r'}| < E_{pth}^{\pm}. \end{cases} \quad (3)$$

В формуле (3) пороговые поля  $E_{pth}^{\pm}$  поддержания роста различны для положительных и отрицательных стримеров и, в соответствии с хорошо известной асимметрией [15],  $E_{pth}^{-} = 2E_{pth}^{+}$ . В работе используются величины  $E_{pth}^{+} = 1.5 \times 10^5$  В/м и  $E_{pth}^{-} = 3 \times 10^5$  В/м. Значение  $E_{pth}^{+}$  было получено в работах [4, 5] на базе лабораторных экспериментов и моделирования для давления на высоте 6.5 км над уровнем моря.

Модельная проводимость канала  $\sigma$  меняется во времени и определяется балансом между выделением и диссипацией джоулевой энергии (см., например, [16]). В первом приближении эволюция проводимости канала может быть описана следующим уравнением [16-18]:

$$\frac{\partial \sigma_{r,r'}}{\partial t} = (\eta E_{r,r'}^2 - \beta) \sigma_{r,r'}, \quad (4)$$

где  $\eta = 5.5 \times 10^{-5}$  м<sup>2</sup>В<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> и  $\beta = 5.5 \times 10^3$  с<sup>-1</sup> – параметры, отвечающие за скорость роста и диссипации проводимости канала соответственно. Начальная проводимость модельной связи составляет  $10^{-9}$  См/м. Условный порог, отделяющий холодные стримерные каналы от горячих лидерных, принят равным 10 См/м.

Продольное электрическое поле канала постепенно релаксирует от допробойного значения к значению поля хорошо прогретого лидерного канала. Данный переход осуществляется под действием токов выравнивания потенциалов, постоянно протекающих по всему объему разрядной структуры [1, 16, 19]. Для каждой связи, соединяющей узлы пространственной решетки с радиус-векторами  $r$  и  $r'$ , данный ток может быть найден из закона Ома как

$$I_{r,r'} = \sigma_{r,r'} \pi r_c^2 E_{r,r'}, \quad (5)$$

причем радиусы  $r_c$  всех разрядных каналов принимаются равными 5 мм. Токи выравнивания потенциала (5) приводят к поляризации разрядного древа и накоплению заряда на его концах, что приводит к вытеснению электрического поля из объема разрядной структуры на ее периферию [1, 16, 19].

Более подробное описание используемой модели и алгоритм расчета производимого моделируемой системой токов поля излучения приведены в работе [1].

## Результаты моделирования

Описанная модель была применена к воспроизведению процесса формирования лидера молнии в облаке в результате возникновения, роста и последующего слияния биполярных стримерных/лидерных систем (см. Рис. 3). При этом развитие разряда начинается во внешнем электрическом поле, равном 160 кВ/м, что лишь слегка превышает порог роста положительных стримеров. Подразумевается, что затравочные положительные стримеры возникают в результате мелкомасштабной динамики облачных ионов, описанной в работе [9]. Эволюция системы разрядных каналов происходит следующим образом. Небольшая доля выживающих в относительно слабом внешнем поле затравочных стримеров постепенно поляризуется и прогревается токами выравнивания потенциалов, что приводит к их трансформации в хорошо проводящие лидерные каналы (см. Рис. 3(b,c)). По мере роста близко расположенные биполярные лидеры увеличивают степень своей поляризации и начинают сливаться между собой за счет электростатического притяжения, существующего между их положительными и отрицательными частями. В конце концов их слияние приводит к формированию длинного, хорошо поляризованного и способного к самостоятельному распространению лидера молнии (см. Рис. 3(d)). При этом в результате постоянного увеличения локальной интенсивности электрического поля каждая последующая стадия эволюции системы развивается быстрее предыдущей.

Результаты моделирования были использованы для расчета производимого моделируемой системой токов электромагнитного излучения в дальней зоне (на расстоянии 15-и км от источника, что соответствует исходным наблюдениям). При этом были учтены не только все три компонента электрического поля, но и положения и пространственные ориентации каждого разрядного канала относительно приемной антенны. Полная осциллограмма излучения моделируемой системы токов представлена на Рис. 4. Отдельные биполярные импульсы, представляющие собой увеличенные участки общей осциллограммы, показаны на Рис. 5. Сравнение Рис. 5 и 2(b) позволяет говорить о хорошем согласии между предсказаниями модели и данными экспериментальных наблюдений. При этом наиболее интенсивные биполярные импульсы электрического поля с амплитудой порядка 0.1 В/м и длительностью порядка 0.2 мкс генерируются кратковременными мощными импульсами тока выравнивания потенциалов с амплитудой порядка нескольких сотен (до тысячи) ампер, возникающих при слиянии биполярных стримерных/лидерных систем, что показано на Рис. 6. Акты слияния происходят естественным образом в результате электростатического притяжения положительного конца одного поляризованного во внешнем поле разрядного древа к отрицательному концу другого.

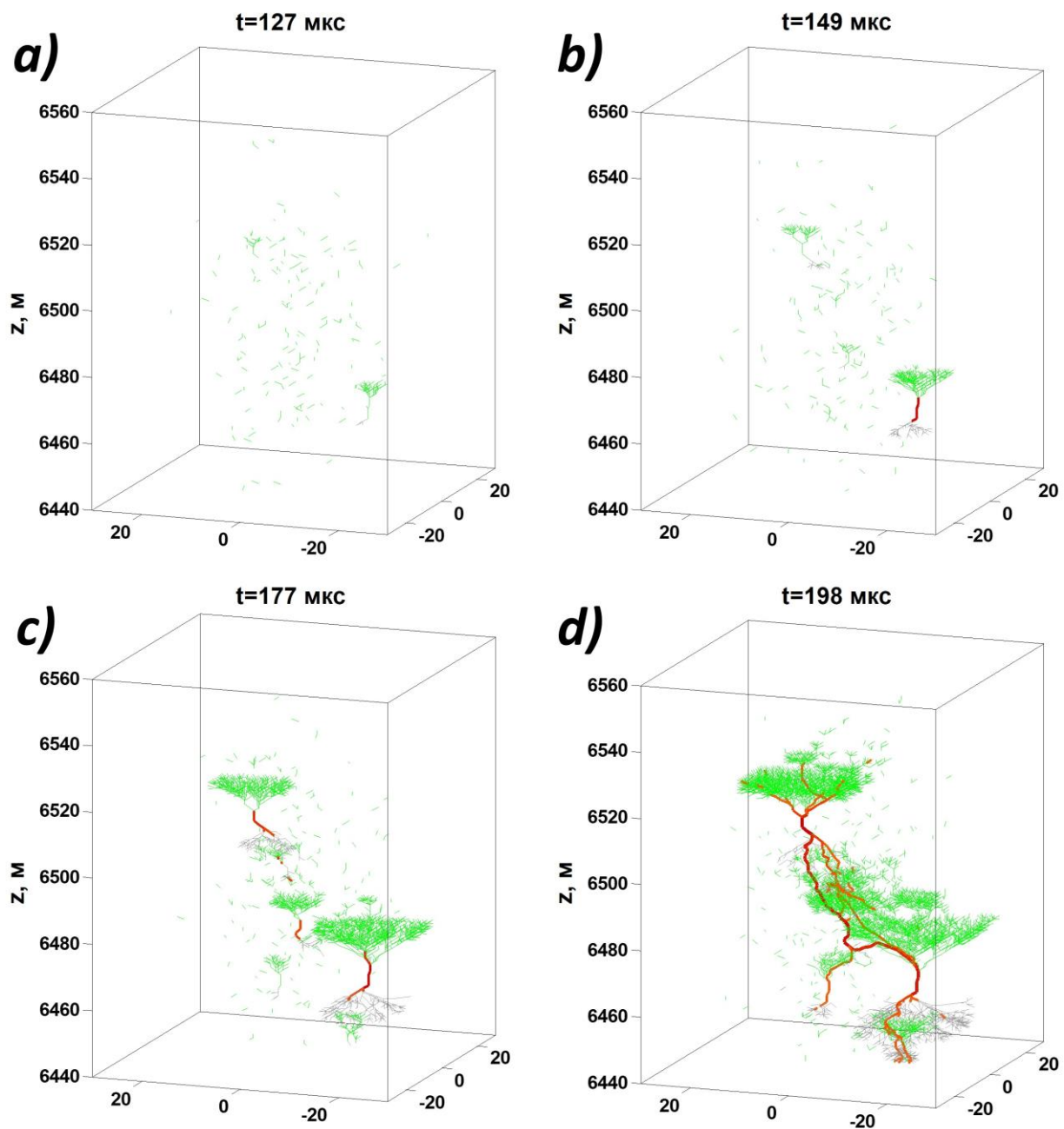


Рис. 3. Визуализация различных этапов процесса формирования лидера молнии в результате слияния одновременно развивающихся стримерных/лидерных систем. Каналы положительных и отрицательных стримеров показаны зелеными и серыми линиями соответственно. Красным обозначены каналы с проводимостью, превышающей 10 См/м, которые можно условно считать лидерными.

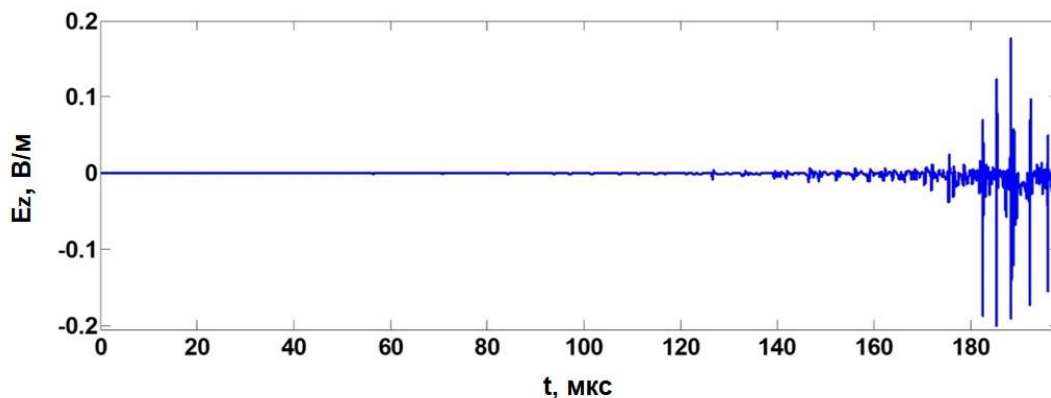
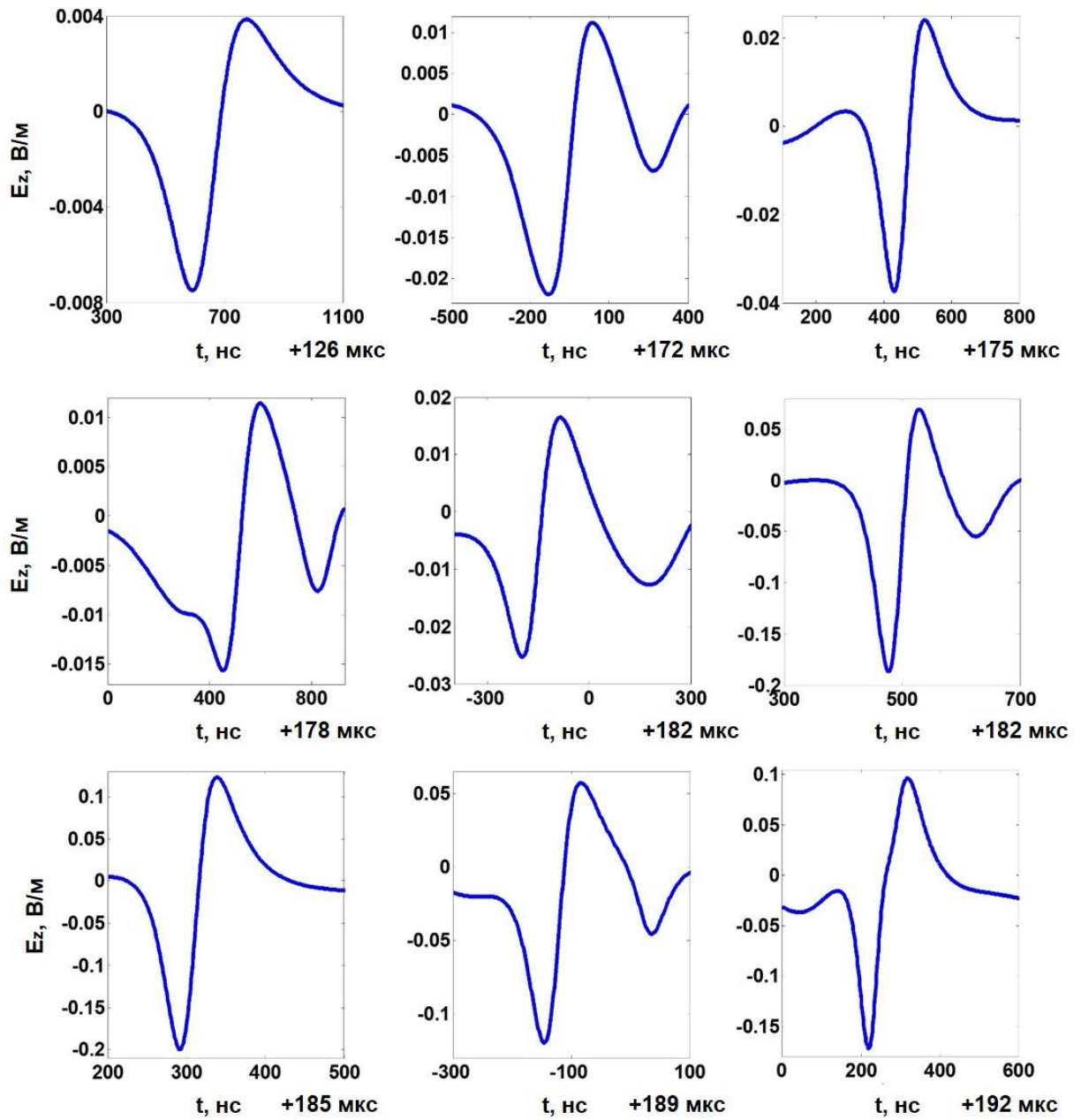
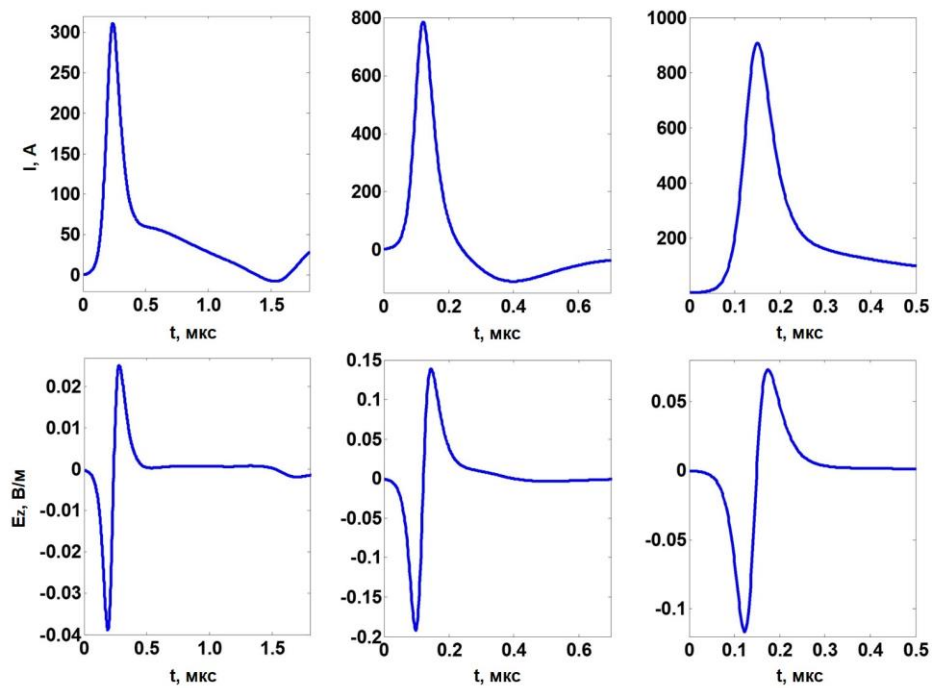


Рис. 4. Полная осциллограмма излучения моделируемой системы токов.





**Рис. 5.** Некоторые типичные примеры импульсов электрического поля, генерируемых токовой системой, несколько мгновенных снимков которой показаны на Рис. 3. Для каждого из представленных импульсов время отсчитывается от значения, обозначенного в правом нижнем углу панели.



**Рис. 6.** Примеры биполярных всплесков электрического поля излучения (нижняя панель) и соответствующих им импульсов тока, являющихся источниками данных всплесков (верхняя панель). Представленные на рисунке токи выравнивания потенциалов возникают в точке встречи двух биполярных лидеров и являются частью процесса их слияния. Знак тока считается положительным, если он переносит положительный заряд вверх и отрицательным в ином случае.

### Обсуждение и заключение

В работе представлена численная модель, в рамках которой было воспроизведено развитие объемной сети стримерных/лидерных каналов в зоне сильного внутриоблачного поля. Модель учитывает асимметрию характерных полей развития положительных и отрицательных стримеров и временную эволюцию параметров (продольное электрическое поле и проводимость) разрядных каналов, что позволило успешно воспроизвести двунаправленный рост, поляризацию и слияние биполярных стримерных/лидерных систем. В рамках моделирования процесс формирования самоподдерживающегося канала лидера молнии происходит за счет объединения токов более мелких многочисленных одновременно развивающихся стримерных/лидерных разрядов. Высокая степень сходства между предсказанными моделью и зарегистрированными с помощью широкополосного радиоинтерферометра импульсами электромагнитного излучения грозового облака позволяет интерпретировать наблюдаемое излучение как результат естественной динамики развития внутриоблачных разрядов, то есть без привлечения высокоэнергичных частиц космических лучей [6, 8, 20, 21], нереалистично большой внутриоблачной разности потенциалов [6, 8, 21] или экстремально длинных гидрометеоров [22]. Поскольку модель фактически воспроизводит описанную в работе [10] финальную стадию сценария инициации молнии, факт хорошего согласия модельных расчетов с реальными данными является аргументом в пользу правильности предложенного в работах [9, 10] подхода.

Работа поддержана грантом РФФИ 19-17-00183 «Исследование процессов инициации и развития молниевых разрядов в атмосфере Земли». Авторы выражают благодарность В.А. Ракову за плодотворные дискуссии по предмету данного исследования.

### Литература

1. Syssoev, A.A., Iudin, D.I., Karashtin, A.N., Shlyugaev, Yu.V. Radiation electric field produced by the lightning leader formation in a thundercloud: Observations and modeling // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2021. Vol. 221, P. 105686, doi:10.1016/j.jastp.2021.105686.
2. Dwyer, J.R., Uman, M.A. The physics of lightning // *Phys. Rep.* 2014. Vol. 534 (4), P. 147–241, doi:10.1016/j.physrep.2013.09.004.
3. Loeb, L.B. The mechanisms of stepped and dart leaders in cloud-to-ground lightning strokes // *J. Geophys. Res.* 1966. Vol. 71 (20), P. 4711–4721, doi:10.1029/JZ071i020p04711.
4. Griffiths, R.F., Phelps, C.T. A model for lightning initiation arising from positive corona streamer development // *J. Geophys. Res.* 1976. Vol. 81 (21), P. 3671–3676, doi:10.1029/JC081i021p03671.
5. Phelps, C.T., Griffiths, R.F. Dependence of positive corona streamer propagation on air pressure and water vapor content // *J. Appl. Phys.* 1976. Vol. 47 (7), P. 2929–2934, doi:10.1063/1.323084.
6. Gurevich, A.V., Milikh, G.M., Roussel-Dupre, R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // *Phys. Lett. A.* 1992. Vol. 165 (5–6), P. 463–468, doi:10.1016/0375-9601(92)90348-P.
7. Marshall, T.C., McCarthy, M.P., Rust, W.D. Electric field magnitudes and lightning initiation in thunderstorms // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100 (D4), P. 7097–7103, doi:10.1029/95JD00020.
8. Gurevich, A.V., Zybin, K.P., Roussel-Dupre, R.A. Lightning initiation by simultaneous effect of runaway breakdown and cosmic ray showers // *Phys. Lett. A.* 1999. Vol. 254 (1–2), P. 79–87, doi:10.1016/S0375-9601(99)00091-2.
9. Iudin, D.I., Rakov, V.A., Syssoev, A.A., Bulatov, A.A., Hayakawa, M. Formation of decimeter-scale, long-lived elevated ionic conductivity regions in thunderclouds // *NPJ Clim. Atmos. Sci.* 2019. Vol. 2, No. 46, doi:10.1038/s41612-019-0102-8.
10. Iudin, D.I., Rakov, V.A., Syssoev, A.A., Bulatov, A.A., Hayakawa, M. From decimeter-scale elevated ionic conductivity regions in the cloud to lightning initiation // *Sci. Rep.* 2021. Vol. 11, Art. no. 18016, doi:10.1038/s41598-021-97321-4.
11. Gurevich, A.V., Duncan, L.M., Karashtin, A.N., Zybin, K.P. Radio emission of lightning initiation // *Phys. Lett. A.* 2003. Vol. 312 (3), P. 228–237, doi:10.1016/S0375-9601(03)00511-5.

12. Karashtin, A.N., Shlyugaev, Y.V., Gurevich, A.V. High-frequency radio emission of the lightning discharge // Radiophys. Quantum Electron. 2005. Vol. 48 (9), P. 711–719, doi:10.1007/s11141-005-0115-5.
13. Karunarathna, N., Marshall, T.C., Karunarathne, S., Stolzenburg, M. Initiation locations of lightning flashes relative to radar reflectivity in four small Florida thunderstorms // J. Geophys. Res. Atmos. 2017. Vol. 122 (12), P. 6565–6591, doi:10.1002/2017JD026566.
14. Rakov, V.A., Uman, M.A. (2003), Lightning: Physics and Effects. Cambridge University Press, New York, 687 p.
15. Базелян, Э.М. Райзер, Ю.П. (2001), Физика молнии и молниезащиты, М.: Физматлит, 320 с.
16. Iudin, D.I., Rakov, V.A., Mareev, E.A., Iudin, F.D., Syssoev, A.A., Davydenko, S.S. Advanced numerical model of lightning development: Application to studying the role of LPCR in determining lightning type // J. Geophys. Res. Atmos. 2017. Vol. 122, No. 12. P. 6416–6430, doi:10.1002/2016JD026261.
17. Rompe, R., Weizel, W. Uber des Toeplersche Funkengesetz (on the Toepler spark theory) // Zt. Phys. 1944. Vol. 122, P. 636–639, doi:10.1007/BF01330625.
18. Dulzon, A.A., Lopatin, V.V., Noskov, M.D., Pleshkov, O.L. Modelling the development of the stepped leader of a lightning discharge // Tech. Phys. 1999. Vol. 44 (4), P. 394–398, doi:10.1134/1.1259308.
19. Syssoev, A.A., Iudin, D.I., Bulatov, A.A., Rakov, V.A. Numerical simulation of stepping and branching processes in negative lightning leaders // J. Geophys. Res. Atmos. 2020. V. 125, No. 7. P. e2019JD031360, doi:10.1029/2019JD031360.
20. Kostinskiy, A.Y., Marshall, T.C., Stolzenburg, M. The mechanism of the origin and development of lightning from initiating event to initial breakdown pulses (v.2) // J. Geophys. Res. Atmos. 2020. Vol. 125, P. e2020JD033191, doi:10.1029/2020JD033191.
21. Dwyer, J.R. The initiation of lightning by runaway air breakdown // Geophys. Res. Lett. 2005. Vol. 32, P. L20808, doi:10.1029/2005GL023975.
22. Dubinova, A., Rutjes, C., Ebert, U., Buitink, S., Scholten, O., Trinh, G.T.N. Prediction of Lightning Inception by Large Ice Particles and Extensive Air Showers // Phys. Rev. Lett. 2015. Vol. 115, P. 015002, doi:10.1103/PhysRevLett.115.015002.

## Сведения об авторах

1. Сысоев Артем Андреевич, кандидат физ.-мат. наук, младший научный сотрудник; Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), Нижний Новгород, Россия;

603950, г. Нижний Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, 46;

тел.: +7 9601939524;

факс: 7(831) 416-06-16;

e-mail: [zaratustrann@yandex.ru](mailto:zaratustrann@yandex.ru)

2. Иудин Дмитрий Игоревич, доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник; Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), Нижний Новгород, Россия;

603950, г. Нижний Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, 46;

тел.: +7 9023043709;

факс: 7(831) 416-06-16;

e-mail: [iudin@ipfran.ru](mailto:iudin@ipfran.ru)

3. Караштин Анатолий Николаевич, доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник;

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), Нижний Новгород, Россия;

603950, г. Нижний Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, 46;

тел.: +7 9159534188;

факс: 7(831) 416-06-16;

e-mail: [tolk@nirfi.unn.ru](mailto:tolk@nirfi.unn.ru)