

# EARTH SCIENCES

## FEATURES OF DEVELOPMENT OF THUNDER LIGHTNING

Ryazanov N.

*Electrical Engineer, Director of Imkomtech LLC in Tomsk, Russia*

## ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ГРОЗОВОЙ МОЛНИИ

Рязанов Н.Д.

*Инженер-электрофизик, директор ООО «Имкомтех» г. Томск, Россия.*

<https://doi.org/10.5281/zenodo.10246353>

### Abstract

This article discusses the existing theories of lightning development and proposes a practically grounded hypothesis for the formation of thunderstorm lightning. Inside the cloud, there comes a moment when the intensity between the differently charged regions reaches a critical one, then a primary electric discharge occurs, and the rate of change in the intensity of the electric field in the formed "black lightning" reaches  $10^{12} - 10^{17}$  and more. Under the influence of such electric field strengths, primary channels of electrical breakdown appear, which form a tree-like structure of the discharge. This leads to the formation of more powerful electrical discharges, which in turn form "ignition" discharges for the development of even more powerful stages of the leader phase of the discharges. Each resulting discharge is accompanied by "black lightning", a pulse of radio emission and gamma radiation.

### Аннотация

В данной статье рассмотрены существующие теории развития молний и предложена практически обоснованная гипотеза образования грозовой молнии. Внутри облака, наступает момент, когда напряженность между разноименно заряженными областями достигает критической, то происходит первичный электрический разряд, а скорость изменения напряженности электрического поля в образующихся «черных молниях» достигает  $10^{12} - 10^{17}$  и более. Под действием таких напряженностей электрического поля возникают первичные каналы электрического пробоя, которые образуют древовидную структуру разряда. Это приводит к образованию более мощных электрических разрядов, которые в свою очередь образуют «поджигающие» разряды для развития ещё более мощных ступеней лидерной фазы разрядов. Каждый возникающий разряд сопровождается «черной молнией», импульсом радиоизлучения и гамма-излучением.

**Keywords:** electric spark discharge, igniting pulse, electric field strength, gamma radiation, black lightning.

**Ключевые слова:** электрический искровой разряд, поджигающий импульс, напряженность электрического поля, гамма-излучение, черная молния.

Процессам образования и развития грозовых молний посвящено большое количество научных работ. Однако достоверного механизма образования молний на данный момент не существует. Общий процесс развития наземной молнии состоит из нескольких стадий. На первой стадии в зоне, где электрическое поле достигает критического значения, начинается ударная ионизация, создаваемая вначале свободными зарядами, всегда имеющимися в небольшом количестве в воздухе, которые под действием электрического поля приобретают значительные скорости по направлению к земле и, сталкиваясь с молекулами, составляющими воздух, ионизируют их.

На данный момент существует несколько теорий развития грозовых молний. Одна из наиболее достоверных теорий развития молнии разработана группой ученых под руководством Александра Викторовича Гуревича. По мнению ученых из группы академика А.В. Гуревича, молнии рождаются под влиянием космического излучения [1]. Решение основано на открытом Гуревичем эффекте пробоя на убегающих электронах. «Суть теории

убегающих электронов заключается в том, что электроны с энергией от 1 кэВ, под действием электрического поля могут ускоряться в газе (ускорение происходит от КэВ до МэВ). То есть быстрые электроны движутся не как обычные, а особым образом ускоряются, но именно при наличии газа. В 1992 году, когда появились первые работы о наблюдении гамма-излучения в атмосфере, была разработана теория лавинообразования убегающих электронов, которую называли пробоем на убегающих электронах». Во время грозы в облаке, заряженном отрицательными ионами, образуется электрический заряд примерно 10 Кулон на км<sup>2</sup> ( $10^{19}$  отрицательных ионов дает 1 Кл). Такое электрическое поле в определенных условиях должно индуцировать достаточную проводимость в этом облаке, иначе просто невозможно этот заряд передать. По теории Гуревича возникает «тоненький шнур» диаметром всего несколько миллиметров, прогретый до температуры 3500°C, достаточной для проводимости. Однако электрический заряд настолько велик, что он не может поместиться в столь тонком шнуре, и разряд, возникающий «по следу» этого

шнура, происходит в канале диаметром примерно 5 м. Движение этого заряда от облака к облаку или от облака к земле происходит в несколько стадий, как бы ступенчато: тот заряд, который сидел в облаке на каплях, переносится на ионы воздуха, а впереди движется тонкий шнур-лидер. И когда он дойдет до другого облака или до Земли, выходит встречный лидер, они встречаются, и происходит вспышка. Вся накопленная энергия примерно за 50 микросекунд переходит в излучение. Мы видим вспышку молнии, температура в таком канале достигает примерно 20 тыс. градусов. Процесс продвижения лидера длится, условно, минута – километр, с такой скоростью он ползет примерно 10 секунд от облака до Земли. Сам же разряд происходит за 50 мкс, а скорость молнии составляет  $10^8$  м/с. «В процессе движения лидера, как считает Гуревич, и возникает сильное электрическое поле, в котором могут ускоряться и размножаться электроны, необходимые для продолжения движения лидера. Это ускорение электронов сопровождается излучением в самых разных спектральных диапазонах, от радиоизлучения и до гамма-излучения. Согласно теории, каждому удару молнии предшествует особый электромагнитный импульс в радиодиапазоне. Именно эти импульсы ученым и удалось обнаружить в нескольких сотнях случаев. По их мнению, это служит доказательством того, что теория Гуревича верна. Примечательно, что теория Гуревича позволяет объяснить так называемые темные молнии — гамма-всплески, которые сопровождают каждый удар молнии». Совсем недавно норвежским исследователям удалось доказать, что такого рода темные молнии являются неотъемлемыми спутниками именно грозовых разрядов.

Атмосферные выбросы гамма-лучей во время грозы, называют еще «темными молниями». Они, как выяснили ученые, являются одной из стадий процесса формирования электрических разрядов-молний, который происходит в грозовых облаках. Авторы работы [1] утверждают, что гамма-лучи возникают в результате взаимодействия молекул воздуха с электронами, которые двигаются со скоростью, близкую к скорости света. Темная молния – это поток электронов, двигающихся практически со скоростью света. При взаимодействии с молекулами кислорода, возникают гамма-лучи. Они порождают электроны и позитроны, которые, смешиваясь с воздухом, образуют еще большее количество гамма-лучей. Слабым местом теории Гуревича является то, что в первоначальных расчетах фигурировали космические лучи достаточно высокой энергии. Такие частицы встречаются намного реже, чем случаются грозы. В последующих работах Александру Гуревичу и Анатолию Караштину удалось разрешить эту проблему. Они считают, что дополнительную энергию процессу сообщают свободные электроны, пролетающие рядом с каплями или градинами.

В работе [2], авторы считают, что для появления внутриоблачного разряда необходимо наличие сильно разветвленного «проводящего дерева», по ветвям которого из одной части облака в другую

может быть сброшен значительный объемный заряд. Появление такого «дерева» в облаке инициирует космическая частица сверхвысокой энергии  $\epsilon > 10^{14}$  эВ. Она образует в атмосфере так называемый широкий атмосферный ливень (ШАЛ) [2 с.10].

В 1991 году Норвежские ученые открыли «темную молнию» [3]. Норвежские ученые, проводившие исследования процесса формирования молний, пришли к выводу, что выбросы гамма-лучей являются его составной частью. Атмосферные выбросы гамма-лучей во время грозы, называют еще «темными молниями». Они, как выяснили ученые, являются одной из стадий процесса формирования электрических разрядов-молний, который происходит в грозовых облаках. Норвежские ученые пришли к мнению, что темные молнии напрямую связаны с обычными молниями. Исследователи рассматривают такое явление как промежуточную стадию образования грозовых электрических разрядов. Выброс в атмосферу гамма-лучей темных молний приводит к сильнейшему радиоимпульсу, образующему светлую молнию, которую можно наблюдать во время грозы. Все эти выводы были сделаны норвежцами, в результате наблюдения за одним из участков атмосферы. Авторы исследования обнаружили взаимосвязь между темной молнией и радиоимпульсом, зафиксированным в один и тот же момент на довольно удаленном расстоянии от эпицентра грозы. Новая концепция предполагает, что электрический разряд сначала приводит к гамма-вспышке, затем электроны, притянутые таким разрядом, провоцируют радиоимпульс, а это, в свою очередь, вызывает классический электрический разряд [3]. Благодаря этому открытию, норвежцы выдвинули свою гипотезу о том, что процесс образования темных молний происходит гораздо чаще, чем предполагалось ранее. Недостатком данной теории является отсутствие процесса образования «темной молнии».

Интересна не только сама молния, но и физические явления, которые она порождает. В 1989 году Джоном Уинклером было установлено, что на высотах 50 – 70 км над поверхностью земли во время разряда молнии проявляются гигантские объемные разряды. Исследователи назвали их спрайтами, джетами и эльфами.

В 1994 году на американском спутнике были зафиксированы мощные вспышки гамма-излучения, идущие от Земли, причем фотоны имели энергию, характерную для ядерных взрывов. Позже было выяснено, что происходит это и во время грозы.

Существует теория [4], в которой предложен механизм возникновения цепи водных квантово-сцепленных кластеров, в которых одномоментно возникает перестройка водородных связей (структурный фазовый переход), приводящая к увеличению суммарного напряжения на кластерах цепи. Когерентное напряжение вызывает ускорение электронов, достигающих Мэвских энергий. Это и есть модель темной молнии, а сам механизм ускорения достаточно обоснован. Вполне возможно, что ана-

логичные структуры возникают в атмосфере в моменты предшествующие землетрясению, когда в квантовой сцепленности находится как литосфера, так и водонасыщенная атмосфера. Аналогичные механизмы, возможно, участвуют в функционировании шаровой молнии и других самосветящихся образований, таких как спрайты, джеты, струи и даже огни Святого Эльма и огни Хессдалена, часто называемые как неопознанные летающие объекты (НЛО) [4].

Авторы работы [5], в результате многолетних исследований, впервые предложили теоретическую

схему, поэтапно объясняющую процесс зарождения молний. Согласно ей, мелкие кристаллы льда и капли воды в грозовых облаках — так называемые гидрометеоры — сталкиваясь, создают «всплески» электрического поля, которые генерируют большое количество разноименно заряженных частиц — ионов. Если таких центров образования ионов в облаке много, и они возникают близко друг к другу, их общий электрический заряд постепенно накапливается и создает сильное электрическое поле, превышающее порог пробоя воздуха. Локальное усиление поля на дециметровых масштабах без каких-либо

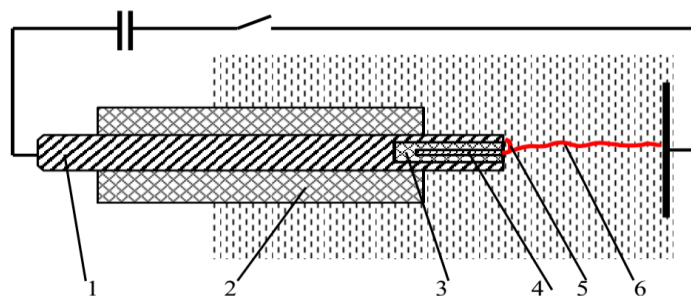


Рис. 1 Конструкция потенциального электрода с синхронным поджигом.

1 – стержневой потенциальный электрод ( $\varnothing$  12мм, длина оголенной части=15мм);

2 – наружная изоляция потенциального электрода (вакуумная резина  $\varnothing$  нар=22мм);

3 – диэлектрическая втулка ( $\varnothing$  нар=9мм, длина=25мм);

4 – металлический стержень ( $\varnothing$ =3мм, длина=15мм).

5 – поджигающий разряд.

6 – основной канал разряда.

других внешних воздействий приводит к формированию стримеров — холодных слабо проводящих плазменных каналов. В дальнейшем разрозненные стримеры сливаются в более жизнеспособную трехмерную сеть, внутри которой в местах сосредоточения наибольших токов формируется «зародыш» молнии. Удлиняясь вдоль направления электрического поля, он превращается в полноценный молниевый канал. Характерный масштаб процесса на каждом этапе увеличивается: всплески электрического поля возникают на миллиметровых и сантиметровых масштабах, стримеры имеют длину порядка метра, а «зародыш» молнии — от десяти до ста метров.

Открытие явления снижения пробивного напряжения диэлектриков [6], в котором

обнаружен механизм образования «темных молний», позволяет по-новому рассмотреть процесс развития и образования молний. Это явление

было обнаружено при пробое воды на конструкции электрода приведенного на Рис. 1. При детальном изучении развития данного явления можно увидеть, что резкое снижение напряжения пробоя происходит при достижении определенных параметров инициирующего разряда — критического напряжения приложенного к межэлектродному промежутку, что видно из графиков зависимости длины пробиваемого водного промежутка от величины приложенного напряжения [7]. Если сравнить энергию поджигающего импульса для различных материалов, которые были использованы в экспериментах (Рис. 2 и Рис. 3), то оказывается, что энергия поджигающего

импульса, в точке перелома кривой на графиках зависимости длины пробоя от приложенного напряжения, окажется примерно одинаковой для всех материалов исходя из формулы энергии емкости поджигающего электрода.

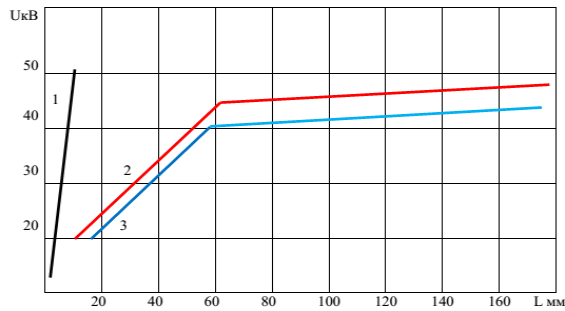


Рис. 2

1 – пробой воды без поджигающего разряда;  
2 – диэлектрическая втулка из форстеритовой керамики; 3 – диэлектрическая втулка из стеатитовой керамики.

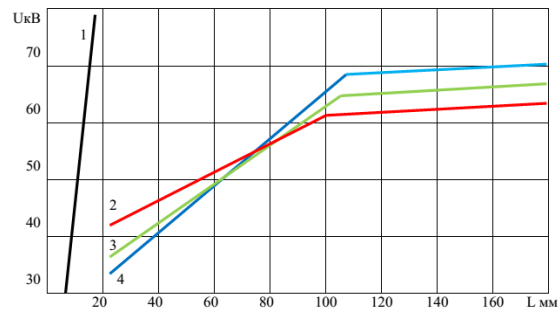


Рис. 3

1 – пробой воды без поджигающего разряда;  
2 – диэлектрическая втулка из фторопласта;  
3 – диэлектрическая втулка из оргстекла;  
4 – диэлектрическая втулка из полиэтилена.

$$E = \frac{CU^2}{2} = \frac{\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln R_2/R_1} \frac{U^2}{2}$$



Рис. 4

Зависимость напряженности электрического поля при пробое парогазовой полости в зависимости от концентрации NaCl в воде.

При проведении экспериментов по пробое газовой полости, образующейся в гидроциклоне [9], от мощности поджигающего синхронного разряда, был обнаружен эффект снижения напряжения пробоя при увеличении мощности поджигающего разряда. Мощность синхронного поджигающего разряда изменялась при помощи изменения проводимости воды за счет изменения концентрации соли NaCl в водном растворе. Как видно из зависимости приведенной на Рис. 4 с увеличением мощности поджигающего разряда снижается напряжение пробоя парогазовой полости. Эффект изменений очень высоких напряженностей электрического

поля  $\frac{dE}{dR} > 10^{16}$  хорошо вписывается для объяснения образования грозовой молнии: образования темной молнии (когда электроны движутся со скоростью близкую к скорости света), образование рентгеновского излучения, образования спрайтов, джетов и эльфов.

Образование высоких напряженностей электрического поля наблюдались на осциллограммах напряжения при исследовании высоковольтного импульсного пробоя диэлектриков, где коммутация высоковольтного источника энергии к исследуемому объекту осуществлялась тригatronным разрядником [8].



*Puc. 5*



*Puc. 6*





Рис. 7

Таким образом, развитие длинных молний происходит следующим образом. Так как структура грозового облака состоит из множества разномышенно заряженных областей, которые постоянно активно перемещаются внутри облака, наступает момент, когда напряженность между разноименно заряженными областями достигает критической, то происходит первичный электрический разряд [9]. При его возникновении, электрическое поле части облака, где возникают первичные разряды, концентрируется с площади нескольких квадратных метров до нескольких квадратных миллиметров, а скорость изменения напряженности электрического поля в точках разряда достигает  $10^{12} \div 10^{17}$  и более. Под действием таких напряженностей электрического поля возникают первичные каналы электрического пробоя, вокруг которых под воздействием высокой напряженности электрического поля образуются древовидные структуры разряда, грозовое облако засеивается областями повышенной проводимости. Это приводит к образованию более мощных электрических разрядов, которые в свою очередь образуют «поджигающие» разряды для развития ещё более мощных и более протяженных «черных молний», по которым развиваются ступени лидерной фазы разрядов. Каждый возникающий разряд сопровождается «черной молнией», импульсом радиоизлучения и гамма-излучением направленными в сторону облака с максимальной концентрацией объемного заряда. По сформированной «черной молнии» развивается лидерная стадия электрического разряда и видимая фаза молнии, что полностью объясняет возникновение тонкого шнура и его ступенчатое движение, как в

теории Гуревича, так и в концепции авторов научной работы [5]. Каждая часть молнии является поджигающим разрядом для формирования следующей «черной молнии» при чем, чем мощнее поджигающий разряд, тем мощнее «темная молния», тем ниже пробивные градиенты для развития длинной молнии. В образовавшийся основной канал молнии происходит вливание боковых каналов молнии, которые и образуют видимую древовидную структуру образовавшейся молнии. Наиболее мощные «темные молнии» создают более мощные гамма и рентгеновское излучения, основная мощность которых направлена вдоль молнии. В 1990 году французскими учеными [10] был установлен факт развития молний от облаков в сторону ионосферы, в результате которых возникают спрайты и эльфы. В работе [11] автор утверждает, что «гамма-вспышки возникают над грозовыми облаками обычно после мощного разряда положительной молнии. Предполагается, что гамма-кванты излучаются быстрыми электронами (на скоростях очень близких к скорости света), которые, сталкиваясь с ядрами атомов в молекулах воздуха, высвобождают энергию в виде гамма-лучей». Известно, что с понижением давления в атмосфере уменьшается пробивное напряжение. Ниже, приведены величины пробивного порога напряженностей электрического поля для некоторых высот в атмосфере [11]:

- Для приземного слоя воздуха  $E_{кр} > E$  при 30 000 В/см;
- На высоте 16 км  $E_{кр} > E$  составляет уже 4000 В/см;
- Для высоты 32 км пробойный порог падает до 550 В/см;

- Для высоты 72 км (место появления спрайтов) порог составляет всего 3,7 В/см;
- На уровне 96 км (где возникают Эльфы) всего 0,18 В/см.

Все эти данные хорошо согласуются с высокими напряженностями электрических полей, возникающих в «черных» молниях, которые распространяются вверх, за счет образования мощных разрядов молний от облака к земле или от земли к облаку.

Моменты образования новых ступеней можно рассмотреть на приведенных фотографиях молний (Рис. 5, 6 и 7), где каждому очередному поджигу развития молнии соответствует узловая точка разряда.

Предложенная теория возникновения и развития молний полностью объясняет за счет чего образуются электроны, движущиеся со скоростью близкую к скорости света, образование гамма-излучения и мощного радиоизлучения.

#### Список литературы:

1. Гуревич А. В., Зыбин К. П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // УФН, 171, 1177–1199 (2001).
2. В.И. Ермаков, Ю.И. Стожков. ФИЗИКА ГРОЗОВЫХ ОБЛАКОВ, Москва, 2004. С. 10.
3. Журнал Discovery № 6 (54) июнь 2013 стр.8
4. В. В. Кузнецов Образование потоков частиц высокой энергии в облаке, темные молнии. Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2016. № 4(15). С. 63-73.
5. D. I. Iudin, V.A. Rakov, A.A. Syssoev, A.A. Bulatov, M. Hayakawa. From decimeter-scale elevated ionic conductivity regions in the cloud to lightning initiation. Scientific Reports | (2021) 11:18016 | <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97321-4>
6. Рязанов Н.Д. Явление снижения электрической прочности диэлектриков// Электронный научный журнал "Исследования технических наук". - 2014. - Выпуск 3(13) Июль-Сентябрь. С. 46-51.
7. Рязанов Н.Д. История создания электроимпульсного озонирования воды высоковольтными импульсами наносекундной длительности. Водочистка, водоподготовка, водоснабжение. № 4 (148), 2020 г. С. 30-35.
8. Рязанов Н.Д. Научное подтверждение существования «темных молний». Austria journal № 20, 2018, p. 47-49.
9. Рязанов Н.Д. Решена загадка развития грозовой молнии. Norwegian Journal of development of the International Science. № 49, part 2, 2020, p. 6-9.
10. Dennis J. Boccippio, et al. "Sprites, ELF Transients, and Positive Ground Strokes." Science, vol. 269, no. 5227, 1995, pp. 1088–91.
11. Кибальчич И.А. Загадки грозowego электричества. Харьков 2020. С.33