

Igor A. Tikhonov,
leading engineer-designer;
PJSC «Omsk Scientific
Research Institute of Instrumentation»

Evolution of the Linear Lightning in the Course of the Electric Spark

Key words: lightning, spark, streamer, spiral.

Annotation: *The lightning structure in the course of the electric spark is considered. Nature of distribution of the charged particles in the channel of a lightning on the basis of the received experimental data is established.*

The mechanism of lightning in sufficient detail is presented in the literature (1,2). The model of the discharge is comprised of a series of emerging channels (streamers), within which consistently moves the flow of electrons. The channel is heated to several thousand degrees, so that the electrons in the form of a spark overcome enormous distances. Some papers lightning model is a dense plasma stream of charged particles that are compressed powerful magnetic field in a very narrow channel with a diameter of about an inch. It is assumed that the magnetic field is created by the very flow of charged particles and has a transverse coaxial converging to form the center of a circle. In this paper, the author proposes an inductive model.

An electron in a constant magnetic field spirals (3):

$$M = eB / w \quad (1)$$

where M - mass of the electron,

e - electron charge,

B - magnetic induction

w - angular frequency of the spiral.

Thus, the angular frequency is defined by the formula:

$$w = 2\pi f \quad (2)$$

where f - cyclotron frequency. For example, the earth's ionosphere electrons in a magnetic field of the earth, according to the formulas (1) and (2), the cyclotron frequency $f = 1.4 \times 10^6 \text{ Hz}$ (3). On the other hand, is defined as the cyclotron frequency of the electrons number of revolutions around the propagation axis in a second, ie:

$$f = v_s / \lambda \quad (3)$$

where v_s - linear velocity distribution of electrons, λ - the helical pitch.

From the numerous experimental data known to the parameters of a linear lightning and Earth's magnetic field (1,2):

The diameter of the bore of lightning - 10-45 cm,

The linear distribution of lightning - 150 km / s,

The current in the channel - 200 kA

Length zipper - up to 0.5 s,

The magnetic field of the Earth - $5 \times 10^{-5} \text{ T}$.

The proposed model is based on the results of the study of linear images of lightning, a small portion of which is to repeatedly enlarged shown in Figure 1. The photo was taken on SLR photographic film emulsion.

Three points are shown in the lightning spread a negative image. In the center of the image is fixed initial stage of the spread of lightning - a bright uniform cord. Due to the high density of charged particles to discern any details is almost impossible. At the bottom of the image shows the last stage of the spread of lightning - the remnants of the channel, dissolving in the atmosphere. Original technique of photographing enabled to detect an intermediate stage of development of a lightning. Thanks to a manifold increase in the photograph turned out blurry. However, in the upper portion of the image is clearly visible spiral some particles. Taking the diameter of the lightning channel ~ 0.2 m at pictures easily determine the helical pitch of $\lambda \sim 0.1$ m. Then, using the above parameters of a linear lightning and Earth's magnetic field, according to the formula (3) can determine the cyclotron frequency $f = 1.5 \times 10^6$ 1/sec, which is quite exactly the same as the result calculated by formulas (1) and (2) for electron-helix. The corresponding mass of the particle, calculated using the formula (1) is equal to 8.5×10^{31} kg, with great accuracy the mass of the electron (9.1×10^{31} kg). Consequently, according to the source (2), in this case, there was a spark of the electrons in the system of positively charged streamers.

Earth's magnetic field causes the electrons traveling at an angle α to the lines of the field, move inside the channel at a speed v spiral radius R :

$$R = \frac{v_{\perp}}{(e/m)B},$$

where $v_{\perp} = v \sin \alpha$ - the radial velocity of the electrons ,

$v_s = v \cos \alpha$ - linear velocity of the electrons (3).

Thus, electrons entering the earth's field angle α close to 90° , the spiral has a maximum radius and the minimum linear velocity along the streamer. Further spread of the spiral along the canals of consecutive streamers slightly depends on the magnetic field of the Earth, because due to the phenomenon of self-induction, the spread of the spiral continues automatically. Spiral of electrons similar to current I_L , propagating on coils of wire cylindrical coil of length l and the number of turns of wire N . In the vicinity of any cylindrical coil, due to the phenomenon of electromagnetism, there is always a magnetic field (4). In this case, the coil is virtually infinite, and the magnetic field is concentrated mainly in the inside and on the rule of thumb is directed towards a linear lightning propagation. Induction of the magnetic field inside the coil defined as:

$$B_L = \mu_0 H_L,$$

where $\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6}$ V•sec / (A•m) - magnetic constant , $H_L = I_L N / l$ - the magnetic field (4). Using a helical pitch $\lambda = l / N$ can be written $H_L = I_L / \lambda$. Thus, the current in the coil $I_L \sim 10^6$ A, $\lambda = 0.1$ m, find $H_L \sim 10^7$ A / m , $B_L \sim 12$ T , that hundreds of thousands of times more parameters of the magnetic field of the Earth. The phenomenon of self-inductance is expressed in an abrupt increase in the magnetic field inside the coil, which induces a voltage in the coil itself, it creates a magnetic field. The voltage is opposite in sign to the charge generating its current change. As a result, inductance prevents an abrupt change in current

causes a slow increase in the current circuit circuits [4], i.e., a spark discharge. The formation and distribution spirals thus stabilized.

As a result of the performed work proposed a model in which a lightning spark flowing in sequences of positively charged streamers, is an avalanche of electrons moving in a spiral formed in the Earth's magnetic field and propagates through the phenomena of electromagnetism and inductance.

Механизм развития разряда молнии достаточно детально представлен в литературе (1,2). Общепринятый механизм описан, например, в работе (2). Автор рассматривает развитие разряда в так называемой лидерной форме, представляющей собой последовательный ряд возникающих каналов-стримеров, сдвинутых один по отношению к другому в пространстве и во времени. Поток электронов, перемещающихся вдоль последовательно развивающихся стримеров, разогревает канал лидера до нескольких тысяч градусов, благодаря чему электроны в виде искрового разряда преодолевают гигантские расстояния. Далее указывается, что перемещение электронов вдоль стримеров приводит к образованию объёмного заряда вокруг разогретого искрового канала, полярность которого соответствует знаку заряда грозового облака.

Однако в этой общепринятой модели развития разряда молнии не совсем понятен характер распространения электронов внутри канала. В некоторых источниках искровой разряд молнии представляет собой плотный поток плазмы заряженных частиц, сжатых мощным магнитным полем в очень узком канале диаметром около сантиметра. Предполагается, что магнитное поле образуется благодаря самому потоку заряженных частиц и имеет поперечную коаксиальную форму сходящихся к центру канала окружностей. Непонятно, как заряженным частицам с низкой начальной скоростью удаётся в процессе разряда создавать магнитное поле, удерживающее достаточно плотную плазму в очень малом объёме пространства. В настоящей статье предпринята попытка осмысления этого процесса.

Как известно, электрон в постоянном магнитном поле движется по спирали (3):

$$M = eB / \omega, \quad (1)$$

где M – масса электрона,

e - заряд электрона,

B – индукция магнитного поля,

ω –угловая частота спирали.

При этом, угловая частота определяется по формуле:

$$\omega = 2\pi f, \quad (2)$$

где f –циклотронная частота. Например, для электронов земной ионосферы, находящихся в магнитном поле Земли, согласно формулам (1) и (2), циклотронная частота $f = 1,4 \times 10^6$ Гц (3). С другой стороны, циклотронная частота определяется как число оборотов электронов вокруг оси распространения за секунду, то есть:

$$f = v_s / \lambda, \quad (3)$$

где v_s – скорость линейного распространения электронов, λ – шаг спирали.

Кроме того, из литературы известны параметры линейной молнии и магнитного поля Земли:

Диаметр канала ствола молнии	- 10-45 см,
Скорость линейного распространения молнии	- 150 км/с,
Сила тока в канале	- 200 кА,
Длительность молнии	- до 0,5 с,
Индукция магнитного поля Земли	- 5×10^{-5} Тл.

Фотография линейной молнии, небольшой участок которой изображён на рисунке, была сделана в июле поздним вечером обычным зеркальным фотоаппаратом.

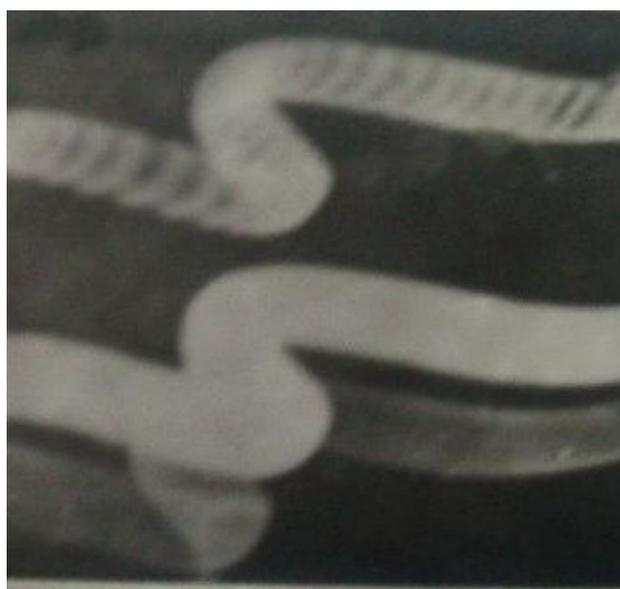


Рисунок. Эволюция линейной молнии.

Снимок представляет собой многократно увеличенный участок молнии, составляющий ~1-2% от общей длины молнии, попавшей в кадр фотоплёнки. Это, безусловно, отразилось на резкости и контрастности изображения, однако, позволило увидеть детали, недоступные при меньшем увеличении.

На негативе показаны три момента жизни молнии. В центре снимка зафиксирована начальная стадия жизни молнии – яркий однородный шнур. Плотность заряженных частиц настолько высока, что различить характер движения этих частиц практически невозможно. Внизу показана последняя стадия жизни молнии – остатки канала, растворяющиеся в атмосфере. В верхней части фотографии показана промежуточная стадия развития линейной молнии, на которой отчётливо видна спираль некоторых частиц. Принимая диаметр канала молнии ~0,2м, можно по фотографии определить шаг спирали $\lambda \sim 0,1$ м. Затем, используя вышеуказанные параметры линейной молнии и магнитного поля Земли, по формуле (3) можно определить циклотронную частоту $f = 1,5 \times 10^6$ об/сек, что достаточно точно совпадает с результатом, вычисленным по формулам (1) и (2) для электронной спирали. Соответствующая масса частицы, вычисленная по формуле (1), равна $8,5 \times 10^{-31}$ кг, что с большой точностью соответствует массе электрона ($9,1 \times 10^{-31}$ кг). Следовательно,

согласно теории (2), в данном случае наблюдался искровой разряд электронов в системе положительно заряженных стримеров.

Выражение силы Лоренца, действующей на движущуюся в электромагнитном поле заряженную частицу, в векторной форме имеет вид (3):

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}\vec{B}], \quad (4)$$

где \vec{E} – напряжённость электрического поля,
 \vec{B} – магнитная индукция,
 \vec{v} – скорость частицы,
 q – заряд частицы.

Если считать магнитное поле Земли постоянным и однородным для относительно компактной среды распространения молнии, то канал линейной молнии, вероятно, искривляется под действием электрического поля, непрерывно меняющегося в зависимости от заряда близлежащих облаков. Магнитное поле Земли заставляет электроны, летящие под углом α к силовым линиям поля, двигаться внутри канала по спирали радиуса R :

$$R = \frac{v_{\perp}}{(e/m)B},$$

и двигаться вдоль силовых линий магнитного поля Земли со скоростью v_s , где $v_{\perp} = v \sin \alpha$, $v_s = v \cos \alpha$, (3). Таким образом, при вхождении электронов в поле Земли под углом α близким к 90° , спираль имеет максимальный радиус и минимальную скорость линейного перемещения вдоль канала стримера. Дальнейшее распространение спирали вдоль каналов последовательно идущих стримеров незначительно зависит от магнитного поля Земли, ибо благодаря явлению самоиндукции, процесс распространения спирали продолжается автоматически. Спираль электронов аналогична цилиндрической катушке длиной l и с количеством витков N , по которым протекает ток I_L . В окрестностях любой цилиндрической катушки, благодаря явлению электромагнетизма, всегда существует магнитное поле (4). В данном случае, катушка практически бесконечна, и магнитное поле в основном сосредоточено внутри неё и по правилу буравчика направлено по направлению линейного распространения молнии. Индукция магнитного поля внутри спирали определяется как:

$$B_L = \mu_o H_L,$$

где $\mu_o = 1,257 \times 10^{-6} \text{ Вс}/(\text{Ам})$ – магнитная постоянная, $H_L = I_L N / l$ – напряжённость магнитного поля (4). Используя из фотографических данных величину шага спирали $\lambda = 0,1 \text{ м}$ можно записать $H_L = I_L / \lambda$. Таким образом, для тока в спирали $I_L \approx 10^6 \text{ А}$, находим $H_L \approx 10^7 \text{ А}/\text{м}$, $B_L \approx 12 \text{ Тл}$, что в двести тысяч раз больше параметров магнитного поля Земли. Явление самоиндукции выражается в скачкообразном увеличении магнитного поля внутри спирали, которое индуцирует напряжение в самой спирали, создающей это магнитное поле. Напряжение противоположно порождающему его изменению тока. В результате, самоиндукция препятствует скачкообразному изменению тока, обуславливает медленное нарастание

тока при замыкании цепи (4), то есть, при искровом разряде. Процесс формирования и распространения спирали, таким образом, стабилизируется.

В результате выполненной работы рассмотрена эволюция линейной молнии в процессе её распространения в атмосфере Земли. В виде гипотезы предложена модель распространения заряженных частиц внутри канала линейной молнии, согласно которой искровой разряд линейной молнии, протекающий в последовательном ряде положительно заряженных стримеров, представляет собой лавину электронов, движущихся по спирали, образованной в магнитном поле Земли и распространяющейся благодаря явлениям электромагнетизма и самоиндукции.

References:

1. *Vikiznanie: the free encyclopedia [Internet] Available from: <http://wikiznanie.ru> (date accessed : 22/10/2012).*
2. *Aleksandrov GN. Main stage lightning : the mechanism and the output characteristics: Journal of Theoretical Physics, 2006, Volume 76, №12; 101 -105.*
3. *Mozhaev B. The motion of charged particles in electric and magnetic fields: Journal "Quantum", 1979, Moscow, № 4; 40-43.*
4. *Kuhling H. Physics handbook. Moscow, 1983; 345.*