

## МОЛНИЯ КАК ЕСТЕСТВЕННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ИСТОЧНИК ЦИКЛОТРОННОГО И СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Н.И. Петров

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 117342, Москва,  
ул. Бутлерова, 15

E-mail: petrovni@mail.ru

**Аннотация.** Показано существование быстрых электромагнитных поверхностных плазмонных волн (ППВ), распространяющихся вдоль канала молниевого разряда со скоростью, близкой к скорости света в вакууме. Предложена физическая модель формирования вихревого тока в плазменном канале молниевых разрядов вследствие аномального эффекта Холла, вызванного явлением релятивистского спин-орбитального взаимодействия. Это позволяет рассматривать канал молниевого разряда как ускоритель заряженных частиц, генерирующий микроволновое, рентгеновское, гамма- и радиочастотное излучение импульсом тока, движущимся по спиральной траектории, с помощью механизмов синхротронного и циклотронного излучения.

**Ключевые слова:** молния; синхротронное излучение; излучение гигагерцового и терагерцового диапазонов; микроволновое и радиочастотное излучение; рентгеновское и гамма-излучение; поверхностные плазмонные волны

## LIGHTNING AS A NATURAL ACCELERATOR OF CHARGED PARTICLES AND A SOURCE OF CYCLOTRON AND SYNCHROTRON RADIATION

N.I. Petrov

**Abstract.** The existence of fast electromagnetic surface plasmon waves propagating along the lightning discharge channel at a speed close to the speed of light in a vacuum is shown. A physical model of the formation of an eddy current in a plasma channel of lightning discharges due to the anomalous Hall effect caused by the phenomenon of relativistic spin-orbit interaction is proposed. This allows us to consider the lightning discharge channel as a charged particle accelerator that generates microwave, X-ray, gamma, and radio frequency radiation with a current pulse moving along a spiral trajectory via synchrotron and cyclotron radiation mechanisms.

**Keywords:** lightning; synchrotron radiation; gigahertz and terahertz radiation; microwave and radio frequency radiation; X-ray and gamma radiation; surface plasmon waves

### Введение

Молния - одно из самых энергетически мощных физических явлений в атмосфере. Недавно было обнаружено, что молния является источником земных гамма-вспышек - одного из самых мощных природных фотонных излучений на Земле [1]. Механизм возникновения высокоэнергетического излучения молнией до сих пор неясен. Рентгеновское и  $\gamma$ -излучение, наблюдаемое при вспышках молний и длинных разрядах в атмосфере, обычно связывают с тормозным излучением убегающих электронов высокой энергии [2]. Однако точный механизм, ответственный за образование электронов с высокой энергией, до конца не изучен.

В настоящей работе предложен альтернативный физический механизм формирования рентгеновского и гамма-излучения, вызванного поляризационным током и связанным с ним электромагнитным полем, движущимся с релятивистской скоростью вдоль изогнутого канала молниевого разряда. Современные теоретические модели высокоэнергетического излучения молний, основанные на релятивистских расчетах лавинного убегания, не могут объяснить обнаруженное излучение в диапазоне от 10 до 100 МэВ [3, 4]. Некоторые основные свойства, такие как спектр излучения, энергия отсечки, поляризация и диаграмма направленности излучения, все еще нуждаются в объяснении. Отметим, что предлагаемый нами механизм синхротронного излучения [5], в отличие от существующих моделей, не требует наличия крупномасштабной области электрического поля высокой интенсивности для ускорения электронов и затравочных частиц, необходимых для релятивистских процессов лавинообразного распространения убегающих электронов.

### Поверхностные плазмонные волны, распространяющиеся вдоль канала молнии

На рис. 1 представлены зависимости скорости и длины распространения ППВ от частоты и проводимости канала. Расчеты показывают существование быстрых электромагнитных поверхностных волн, распространяющихся вдоль канала молниевого разряда со скоростью, близкой к скорости света в вакууме. Установлено, что для высокочастотных поверхностных плазмонных волн ультрарелятивистские скорости достигаются при проводимостях и радиусах разрядного канала, характерных для молний.

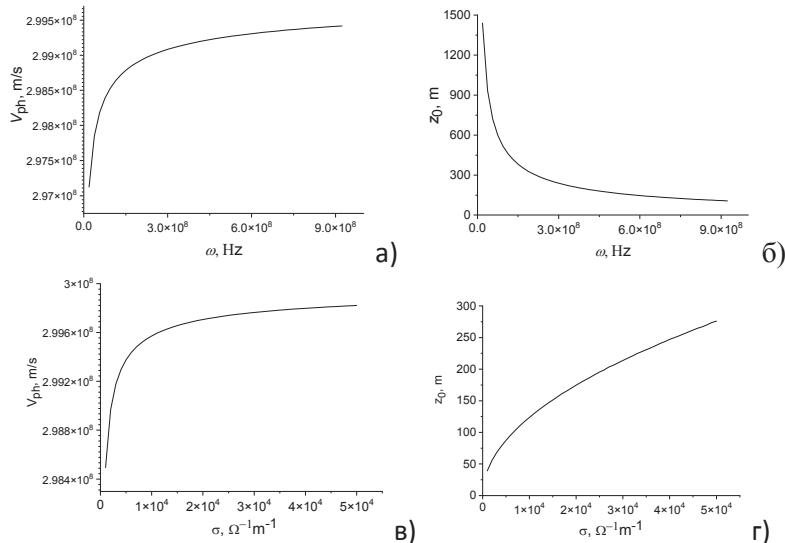


Рис. 1. Зависимости скорости (а, в) и длины распространения (б, г) от частоты (а, б), и проводимости канала (в, г). (а, б) -  $\sigma = 10^4 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ ; (в, г) –  $\omega = 10^9 \text{ Гц}$

### Формирование спиральной структуры канала пробоя молнии

Как было показано выше, импульсы тока обратного удара в молнии распространяются с релятивистскими скоростями, близкими к скорости света в вакууме. Поэтому для описания поведения частиц в канале грозового разряда целесообразно использовать уравнение Дирака. В этом случае гамильтониан, описывающий электрон во внешнем электрическом поле, имеет вид [6]:

$$\hat{H} = \frac{\vec{p}^2}{2m} + e\Phi - \frac{\vec{p}^4}{8m^2 c^2} - \frac{e\hbar}{2m^2 c^2} \mathcal{S}(\vec{E} \times \vec{p}) - \frac{e^2 \hbar^2}{8m^2 c^2} \operatorname{div} \vec{E}, \quad (1)$$

где  $\vec{E} = -\nabla\Phi$  – электрическое поле,  $e$  – заряд электрона,  $m$  – масса электрона,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света,  $\mathcal{S}$  – оператор спина электрона, и  $\vec{p} = -i\hbar\nabla$  – оператор импульса.

Последние три члена уравнения (1) описывают релятивистские поправки порядка  $(v/c)^2$  к  $p^2/2m + e\Phi$ . На рис. 2 приведены фотографии каналов пробоя лабораторной искры в атмосфере [7].

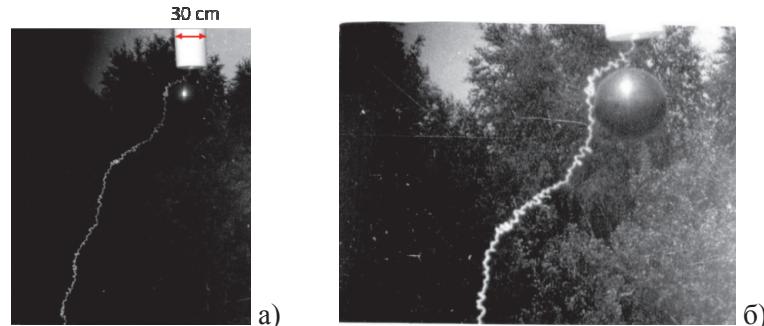


Рис. 2. Траектория вихревого тока в лабораторном положительном искровом разряде в воздушном промежутке длиной 6 м [7]. Шаг спирали равен  $1.5 \div 2.5 \text{ см}$ , диаметр спирали  $\approx 3 \text{ см}$ , диаметр металлической сферы = 30 см. (б) Увеличенное изображение верхней части (а)

На рис. 3 показана фотография небольшого участка канала молнии (1-2% от общей длины), сделанная обычной камерой поздно вечером [8].

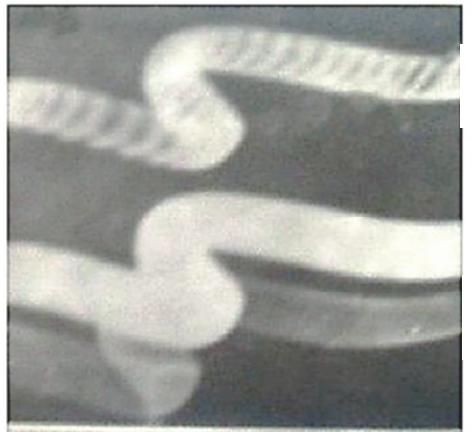


Рис. 3. Фотография, полученная путем увеличения части изображения канала молнии:  $\phi = 20$  см;  $h = 10$  см ([8]). 1 – начальная стадия, 2 – промежуточная стадия, 3 – последняя стадия

### Синхротронное излучение молнии

Кривизна канала молнии приводит к ускорению движущейся плотности заряда, что приводит к электромагнитному излучению. Ускорение и излучение также возникают, когда электроны движутся по спиральной траектории (рис. 4).

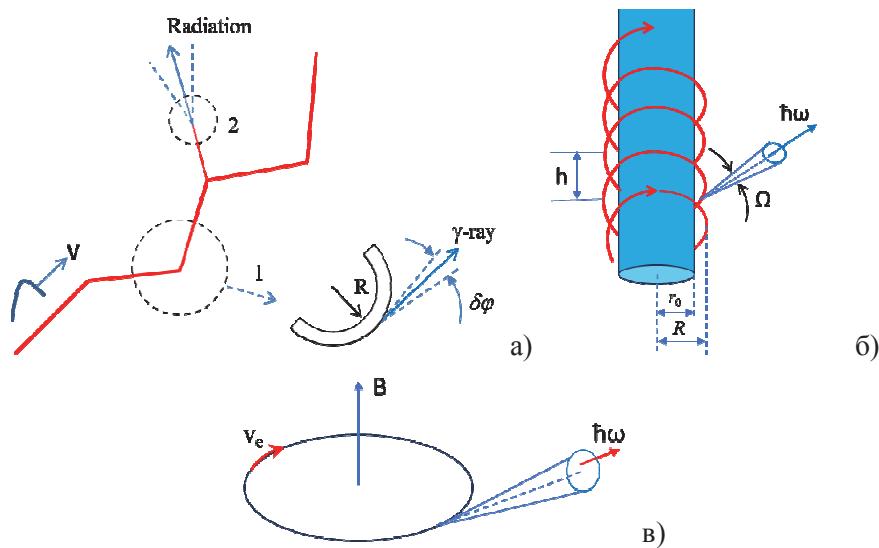


Рис. 4. Схематический вид извилистости канала молнии. (а) источники (места) излучения: 1 – синхротронное излучение, 2 – переходное излучение; (б) канал молнии (синий цвет) и вихревой ток (красный цвет); (в)  $\mathbf{B}$  – магнитное поле,  $\mathbf{V}_e$  – направление скорости электрона

В ультраквазирелятивистском случае полная мощность излучения определяется как [9]:

$$W = \frac{2}{3} \frac{e^2 c}{4\pi\epsilon_0} \frac{\alpha^4 \gamma^4}{R^2}, \quad (2)$$

где  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$  – релятивистский фактор Лоренца,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная вакуума,  $\alpha = e/c$ ,  $v$  – скорость ППВ, и  $R$  – радиус кривизны изгиба траектории.

На рис. 5 представлены зависимости частоты и энергии фотонов от проводимости канала молнии, а также нормированный спектр излученных фотонов.

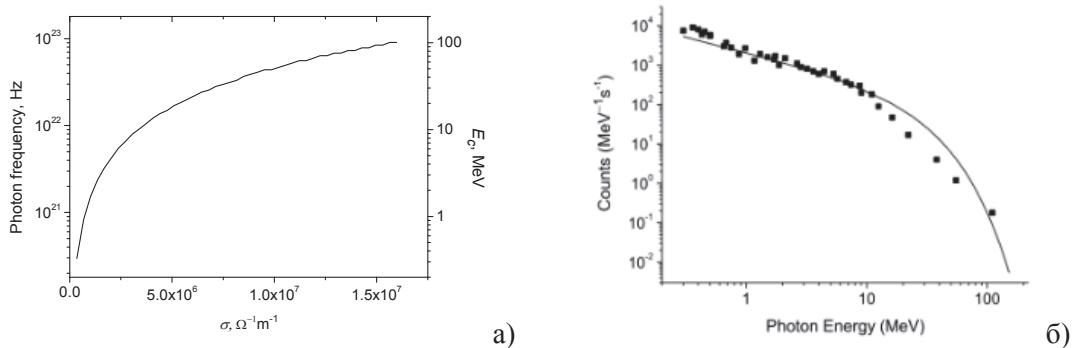


Рис. 5. (а) Частота и энергия фотонов как функция от проводимости канала.  $\omega = 3.1 \cdot 10^9$  Гц.  
 (б) Нормированный спектр фотонов (сплошная кривая) и измеренный спектр [4]

### Заключение

В работе показано, что теоретические модели формирования вихревого тока в плазменном канале молнии и генерации микроволнового, рентгеновского, гамма- и радиочастотного излучения по механизму синхротронного излучения, согласуются с данными наблюдений [4, 10, 11].

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания FFNS-2025-0007.

### Список литературы

1. Fishman G. J., et al. Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin. *Science*. – 1994. – V. 264. – P. 1313–1316.
2. Gurevich A.V., Milikh G.M., and Roussel-Dupre R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // *Phys. Lett. A*. – 1992. – V. 165. – P. 463–468.
3. Dwyer J.R. and Smith D.M. A comparison between Monte Carlo simulations of runaway breakdown and terrestrial gamma-ray flash observations // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – V. 32. – L22804.
4. Tavani M., Marisaldi M., Labanti C., et al. Terrestrial Gamma-Ray Flashes as Powerful Particle Accelerators // *Phys. Rev. Lett.* – 2011. – V. 106. – P. 018501.
5. Petrov N.I. Synchrotron mechanism of X-ray and gamma-ray emissions in lightning and spark discharges // *Sci. Rep.* – 2021. – V. 11. – P. 19824.
6. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Квантовая электродинамика. – 4-е изд., ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 720 с.
7. Petrov N.I., Petrova G.N. Physical mechanisms of high-frequency electromagnetic field generation by a Lightning discharge // Proceedings EMC'99, Zurich, Switzerland – 1999. – P. 581–586.
8. Tikhonov I.A. Evolution of the linear lightning in the course of the electric spark // Eastern European Scientific Journal. – 2015, – V. 2. – P. 22–27.
9. Тернов И.М. Синхротронное излучение // УФН. – 1995. – Т. 165. – С. 429–456.
10. Parkevich E.V., Shpakov K.V., Baidin I.S., Rodionov A.A., Khirianova A.I., Bolotov Ya.K., and Ryabov V.A. Angular anisotropy of hard x rays produced by laboratory atmospheric discharges // *J. Appl. Phys.* – 2024. – V. 136. – P. 163302.
11. Petrov N.I. Lightning as a natural source of synchrotron radiation of X-ray and gamma-ray photons // *Phys. Rev. E*. – 2025. – V. 111. – 035205.