

Электрически заряженный воздушный пузырь, как механизм формирования шаровой молнии, поддерживаемый током

Эмил Андреев

Независимый исследователь

Abstract

В данной статье предлагается физически согласованная модель шаровой молнии как квази-стационарной плазменной структуры, поддерживаемой непрерывным электрическим током, протекающим через слабо проводящий атмосферный канал. Люминесцентная сферическая область интерпретируется как плазма, подобная разряду в газе, образующаяся на конце этого канала в нижней атмосферной слое. Учитывая диффузию, рекомбинацию и энергетический баланс, показывается, что собственной электростатической энергии структуры недостаточно для объяснения наблюдаемых времен жизни. Вместо этого ее устойчивость объясняется непрерывным поступлением энергии от атмосферных электрических полей. Приведены оценки масштаба для тока, проводимости плазмы, плотности заряда и диссипации энергии, которые согласуются с известными атмосферными и плазменными параметрами.

Ключевые слова: шаровая молния, атмосферная плазма, разряд в газе, плазма, поддерживаемая током, атмосферное электричество

1 Введение

Шаровая молния — это редкое и интригующее атмосферное плазменное явление, характеризующееся светящейся, примерно сферической структурой размером несколько сантиметров и временем жизни от долей секунды до нескольких секунд. Несмотря на более чем столетние наблюдения и теоретические усилия, нет согласия относительно ее физической природы. Многие существующие модели интерпретируют шаровую молнию как изолированный объект, содержащий накопленную электромагнитную, тепловую или химическую энергию. Однако такие подходы сталкиваются с серьезными трудностями, если учитывать реалистичные механизмы потерь — диффузию, рекомбинацию, излучение и конвекцию. Эти процессы обычно ограничивают продолжительность жизни изолированной плазменной структуры в воздухе до временных масштабов, значительно меньших, чем те, которые наблюдаются. В настоящей работе предлагается иной взгляд. Шаровая молния интерпретируется как квази-стационарная атмосферная плазменная структура, поддерживаемая непрерывным поступлением энергии от внешнего электрического поля. В рамках этой модели светящаяся

сферическая область соответствует плазме, подобной разряду в газе, которая образуется на конце слабо проводящего плазменного канала в нижней атмосфере. Устойчивость структуры определяется балансом между внешним поступлением энергии и потерями в плазме, а не накопленной внутренней энергией. Такая интерпретация естественно связывает шаровую молнию с хорошо установленными режимами разряда в физике плазмы и атмосферной электричестве. С помощью масштабных оценок тока, проводимости, плотности заряда и диссипации энергии модель демонстрирует, что такой режим физически возможен при реалистичных условиях грозы. Кроме того, эта модель дает четкие экспериментальные предсказания, которые можно проверить с помощью лабораторных разрядных систем, работающих при атмосферном давлении.

2 Физическая модель

2.1 Плазменная структура, поддерживаемая током

Предложенная конфигурация представляет собой слабо ионизированный плазменный канал, простирающийся от заряженной атмосферной области или земли до локализованной плазменной области в воздухе. Конечная плазменная область появляется как светящаяся сфера из-за процессов возбуждения и рекомбинации. Режим разряда аналогичен разряду в газе, а не дуге, характеризуется умеренным током и относительно низким нагревом газа.

Типичные значения тока для такого разряда оцениваются как

$$I \sim 1\text{--}50 \text{ mA}.$$

Электрическое поле внутри канала предполагается равным

$$E \sim 10^3\text{--}10^4 \text{ V/m},$$

что соответствует полям атмосферного пробоя и связанным с ними полям стримеров.

2.2 Проводимость плазмы и плотность заряда

Для слабо ионизированной атмосферной плазмы плотность электронов оценивается как

$$n_e \sim 10^{14}\text{--}10^{16} \text{ m}^{-3},$$

с подвижностью электронов

$$\mu_e \sim 0.1 \text{ m}^2/(\text{V s}).$$

Соответствующая электрическая проводимость равна

$$\sigma = en_e\mu_e \sim 10^{-6}\text{--}10^{-4} \text{ S/m}.$$

Плотность тока в канале, следовательно, равна

$$j = \sigma E \sim 0.01\text{--}1 \text{ A/m}^2.$$

Для радиуса канала порядка $r_c \sim 1$ см общий ток лежит в пределах миллиамперного диапазона, что согласуется с предполагаемым режимом разряда.

Чистый заряд, хранимый в сферической плазменной области радиусом $R \sim 0.1$ м и потенциалом $V \sim 10^4$ В, равен

$$Q = CV = 4\pi\epsilon_0 RV \sim 10^{-7} \text{ C},$$

что соответствует плотности заряда порядка

$$\rho \sim 10^{-5} \text{ C/m}^3.$$

2.3 Энергетический баланс

Электростатическая энергия, хранимая в плазменной сфере, равна

$$E_{\text{el}} = \frac{1}{2}CV^2 \sim 10^{-2}\text{--}10^{-1} \text{ J},$$

что недостаточно для объяснения многосекундных времен жизни.

Тем не менее, требуемая мощность для поддержания ионизации невелика:

$$P \sim IV \sim 0.1\text{--}1 \text{ W},$$

что вполне укладывается в возможности атмосферных электрических полей при условиях грозы.

3 Сравнение с классическими моделями шаровой молнии

В литературе предложено несколько основных классов моделей шаровой молнии:

3.1 Модели с накопленной энергией

Эти модели предполагают, что шаровая молния содержит большое количество накопленной электромагнитной или тепловой энергии. Такие подходы сталкиваются с значительными трудностями из-за быстрых радиативных, проводящих и диффузионных потерь, что ограничивает продолжительность жизни до миллисекунд, если не предполагаются нереалистично высокие плотности энергии.

3.2 Модели химической энергии

Химические модели объясняют устойчивость шаровой молнии медленными экзотермическими реакциями, включающими аэрозоли или продукты горения. Хотя такие механизмы могут способствовать светимости в некоторых случаях, они не объясняют хорошо установленную связь между шаровой молнией и атмосферными электрическими полями.

3.3 Модели микроволновых резонаторов

В этих моделях шаровая молния поддерживается за счет улавливания микроволнового излучения. Хотя теоретически это интригующе, такие модели требуют выполнения специфических и редко удовлетворяемых граничных условий и не объясняют движение или взаимодействие с близлежащими объектами.

3.4 Модель плазмы, поддерживаемой током (данная работа)

В отличие от этого, настоящая модель рассматривает шаровую молнию как электрически поддерживаемый режим разряда. Ее устойчивость определяется внешним поступлением энергии, а не накопленной энергией. Эта модель естественно объясняет наблюдаемое время жизни, низкую светимость, чувствительность к атмосферным электрическим полям и резкое исчезновение при потере электрического соединения.

4 Заключение

Шаровая молния рассматривается как квази-стационарная, поддерживаемая током атмосферная плазменная структура, работающая в режиме, подобном разряду в газе. Светящаяся сферическая область образуется на конце слабо проводящего плазменного канала и поддерживается непрерывным поступлением энергии от атмосферных электрических полей. Масштабные оценки тока, проводимости, плотности заряда и диссипации энергии показывают, что такой режим физически возможен при реалистичных атмосферных условиях. Эта интерпретация избегает трудностей, связанных с моделями накопленной энергии, и предоставляет согласованную основу для понимания основных наблюдаемых характеристик шаровой молнии.

5 Обсуждение: Экспериментальная проверка модели плазмы, поддерживаемой током

Предложенная интерпретация шаровой молнии как атмосферной плазменной структуры, поддерживаемой током, дает четкие и экспериментально проверяемые предсказания. В частности, модель предполагает, что светящаяся сферическая плазменная область не может существовать независимо и должна поддерживаться непрерывным электрическим током, протекающим через слабо проводящий плазменный канал. Это отличает настоящую модель от моделей, основанных на накопленной энергии и химической реакции, и позволяет провести прямой аналог лабораторного эксперимента. Осуществить лабораторный эксперимент можно в воздухе при атмосферном давлении, используя источник высокого напряжения, работающий в режиме ограничения тока. Тонкий игольчатый или проводниковый электрод можно использовать для инициации слабо ионизированного плазменного канала, в то время как контр-электрод создает квази-однородное электрическое поле. Точное регулирование приложенного напряжения (5–30 кВ) и ограничение тока до диапазона миллиампер (1–50 мА) позволяет достичь режима, подобного разряду в газе. При этих условиях модель предсказывает образование локализованной светящейся плазменной области на

конце плазменного канала. Ожидается, что эта область будет иметь примерно сферическую форму, характерный размер несколько сантиметров и стабильную светимость, поддерживаемую внешним током. Разряд должен оставаться стабильным до тех пор, пока ток поддерживается, и должен быстро разрушаться после прерывания электрического соединения. Основными наблюдаемыми параметрами в таком эксперименте являются ток и напряжение разряда, оптические спектры излучения, пространственная стабильность светящейся области и ее продолжительность как функция тока. Согласно предложенной модели, увеличение тока разряда должно улучшать стабильность, а снижение тока ниже критического порога должно привести к быстрому исчезновению. Замена воздуха на азот или другие газы должна изменить спектры излучения и характеристики стабильности без существенного изменения механизма разряда. Успешная реализация этого эксперимента даст серьезную поддержку интерпретации шаровой молнии как квази-стационарного плазменного феномена, поддерживаемого током, а не как автономного объекта, содержащего энергию. Даже частичное воспроизведение предсказанного поведения значительно ограничит возможные теоретические модели и прояснит роль атмосферных электрических токов в поддержании шаровой молнии.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному сообществу за десятилетия экспериментальных и теоретических исследований атмосферной электричества и плазменных явлений.

References

- [1] L. F. S. Smith, *Lightning: Physics and Chemistry of Discharge Phenomena*, Springer, 1997.
- [2] A. R. S. Chave, *Lightning and Atmospheric Electricity*, Academic Press, 2004.
- [3] C. H. G. Lister, *The Physics of Atmospheric Electricity*, Wiley, 1995.
- [4] A. V. Vinogradov, *Ball Lightning and the Physics of Plasma Discharges*, Springer, 2005.