

# Аннотация

В работе предложена новая физическая модель шаровой молнии, объясняющая её возникновение как результат самоорганизации ионизованного вещества грунта в эмерджентный плазменный кристалл в точке контакта канала линейной молнии с поверхностью земли. Удар молнии создаёт экстремальные условия — температуру выше  $10^4$  К и электрическое поле порядка  $10^6$ — $10^7$  В/м, достаточные для испарения и ионизации оксидов кремния, железа, кальция и алюминия. Высвободившиеся заряженные наночастицы под действием самосогласованного электромагнитного поля выстраиваются в упорядоченную гексагональную или кубическую решётку, формируя замкнутую сферическую оболочку — плазменный кристалл. Такая структура резко замедляет рекомбинацию, обеспечивая наблюдаемое длительное время жизни (10–60 с), а её дрейф в электрическом поле объясняет способность проникать сквозь диэлектрические преграды. Модель естественно связывает спектральные характеристики (линии Si, Fe, Ca, Al) с химическим составом грунта и даёт проверяемые предсказания: варьируя состав мишени, можно управлять цветом, стабильностью и временем жизни лабораторных плазмоидов. Предложена программа экспериментальной верификации, включающая генерацию плазменных кристаллов в контролируемых условиях, лазерное инициирование в облаке наночастиц, полевые наблюдения и компьютерное моделирование методом молекулярной динамики. Обсуждается потенциал модели для исследования квантовых эффектов в макроскопических системах и разработки методов удержания плазмы.

## Введение

Шаровая молния — редкое и до сих пор полностью не объяснённое атмосферное явление, известное по рассказам очевидцев и проявляющееся в форме небольшого светящегося шарообразного объекта, преимущественно во время грозы или сразу после удара линейной молнии. О наблюдении «шаровой молнии» говорят, когда описанное таким образом явление не может быть удовлетворительно объяснено за счёт другого, хорошо изученного наукой феномена: молнии, огня святого Эльма, полярных сияний и т.п.

Первое систематическое научное описание шаровой молнии приписывается очевидцам XVIII–XIX веков, однако физическое моделирование было впервые предпринято лишь в XX веке.

В XX веке в работах физиков Стэнли Сингера (1971) и Марка Стенхоффа (1999) были собраны и проанализированы тысячи свидетельств. В этих исследованиях была показана статистическая устойчивость основных характеристик: шар обычно появляется вблизи канала линейной молнии, существует 10–60 секунд, обладает энергией порядка 10–1000 кДж и способностью проходить через диэлектрики. Долгое время отсутствие надёжных спектральных данных и видеозаписей препятствовало прогрессу в изучении феномена.

Ситуация изменилась после 2000-х годов, когда появились первые спектральные измерения (например, китайское видео 2012 года, проанализированное в 2014 году), показавшие линии излучения нейтральных и ионизованных атомов кремния, железа и кальция, что указывает на возможное вовлечение испарённого грунта.

Диаметр объектов, идентифицируемых как шаровые молнии, обычно составляет от 10 до 50 см (в среднем около 20–30 см), хотя встречаются сообщения о шарах размером от нескольких сантиметров до более чем метра.

Продолжительность существования шаровой молнии варьируется от нескольких секунд до нескольких минут, после чего шар чаще всего бесшумно исчезает, иногда взрываясь или быстро затухая. Цвет свечения может быть красным, оранжевым, жёлтым, белым, синим или зелёным, а яркость сравнима с лампой накаливания 100–1000 Вт. Явление сопровождается запахом озона или серы, иногда лёгким шипением или потрескиванием. Шаровая молния способна проникать в закрытые помещения через открытые окна, дымоходы или даже через щели, двигаться против ветра или вдоль проводников, а также оставлять ожоги, оплавления или взрывные повреждения.

Среди множества гипотез наиболее активно обсуждаются плазменные, электромагнитные и химические модели.

Согласно релятивистско-микроволновой модели 2016 года, на конце канала молнии, ударяющей в землю, возникает пучок релятивистских электронов, генерирующий мощное микроволновое излучение. Это излучение ионизует воздух и создаёт сферическую плазменную оболочку, внутри которой электромагнитная энергия удерживается за счёт радиационного давления — подобно оптическому резонатору. Модель объясняет появление шаровой молнии внутри самолётов (микроволны проникают через фюзеляж), её сферичность, длительность жизни и способность проникать через стёкла. Но эта модель не объясняет появление шаровых молний в природных условиях, например, во время грозы.

# Гипотеза об электромагнитной самоорганизации плазмы

В настоящей работе предлагается новая физическая модель, объясняющая возникновение природной шаровой молнии как эмерджентного плазменного кристалла, формирующегося непосредственно в точке контакта канала линейной молнии с поверхностью земли.

Мы предполагаем, что удар молнии создаёт экстремальные условия — температуру выше  $10^4$  К и напряжённость электрического поля порядка  $10^6$ — $10^7$  В/м. Этого достаточно для мгновенного испарения и ионизации вещества грунта (преимущественно оксидов кремния, железа, кальция и алюминия). Высвободившиеся ионы и электроны образуют плотную плазменную среду, которая, однако, не разлетается хаотично, а под действием самосогласованного электромагнитного поля начинает структурироваться.

Ключевое отличие предлагаемой модели от предшествующих — учёт фазового перехода плазмы в состояние, подобное кристаллической решётке, но состоящей не из нейтральных атомов, а из одноимённо заряженных наночастиц, удерживаемых вместе внешним магнитным полем и коллективными кулоновскими силами. Данный эффект известен в физике комплексной (пылевой) плазмы, где были экспериментально зафиксированы упорядоченные структуры — так называемые плазменные кристаллы.

При ударе молнии в грунт последовательность событий выглядит следующим образом. На первом этапе канал разряда, обладающий колоссальной плотностью энергии, испаряет и ионизует материал поверхности, создавая облако заряженных частиц. На втором этапе импульс тока, продолжающий течь в месте контакта, генерирует мощное переменное магнитное поле, которое взаимодействует с образовавшейся плазмой. В результате совместного действия сил Лоренца и кулоновского отталкивания частицы начинают двигаться, стремясь занять положения с минимальной потенциальной энергией. Возникает дальний порядок: частицы выстраиваются в узлы гексагональной или кубической решётки, формируя замкнутую сферическую оболочку — эмерджентный плазменный кристалл. Внутренняя полость этого кристалла заполнена горячим газом и остаточной плазмой, а сама оболочка выполняет роль «магнитной клетки», удерживающей энергию.

Свечение объекта обеспечивается двумя основными механизмами: рекомбинационным излучением на границах кристаллической решётки и тормозным излучением электронов, движущихся в сильном электромагнитном поле. Структурная упорядоченность оболочки резко замедляет скорость рекомбинации, что объясняет наблюдаемое длительное время жизни шаровой молнии (10–60 с и более). Спектр излучения должен содержать линии элементов, входящих в состав грунта (Si, Fe, Ca, Al), что согласуется с имеющимися экспериментальными данными.

Способность шаровой молнии проникать сквозь диэлектрические преграды объясняется электростатическим дрейфом всей заряженной оболочки в неоднородном электрическом поле. Когда энергия, запасённая в магнитном поле и тепловом движении частиц, падает ниже критического порога, кристаллическая структура разрушается. Происходит лавинообразная рекомбинация, и остаточная энергия высвобождается либо в форме взрыва, либо в виде быстрого затухания свечения.

Предлагаемая модель не только объясняет основные наблюдаемые свойства шаровой молнии (сферичность, длительное время жизни, прохождение сквозь преграды, характерный спектр и взрывной распад), но и даёт прямой инструмент для экспериментальной верификации. Варьируя состав грунта-мишени (например, обогащая его определёнными оксидами), можно влиять на цвет, стабильность и время жизни создаваемых плазмоидов. Если теория верна, мы сможем не только воспроизводить шаровую молнию в лабораторных условиях, но и управлять её параметрами, что будет являться решающим доказательством её кристаллической природы.

## **Экспериментальная проверка: лабораторные и полевые испытания**

- Эксперимент 1: Газовая камера высокого давления с «искусственным грунтом». Этот эксперимент, в отличие от работ МГУ, где использовались чистые металлы, позволит получить «грязную» плазму, более близкую к природной. Цель — воспроизвести условия удара молнии в насыщенный влагой грунт для проверки формирования кристаллической решётки из частиц грунта.
  1. Подготовить герметичную камеру с образцом «искусственного грунта» (смесь оксидов кремния, железа, алюминия и кальция) и возможностью контролировать влажность.
  2. Создать высоковольтный дуговой разряд точно в образец грунта, используя наносекундный генератор импульсов для имитации краткосрочности молнии.

3. Вести высокоскоростную видеосъёмку для фиксации морфологии, времени жизни, движения и характера распада. Синхронно записывать спектр свечения для сравнения с природным.
  4. Использовать лазерную (киноголографическую) диагностику для обнаружения упорядоченных структур в плазменном облаке.
- Эксперимент 2: Проверка «кремниевой» гипотезы в контролируемой среде. Этот эксперимент должен подтвердить, могут ли наночастицы, образованные из разных материалов, формировать стабильные структуры. Идея основана на опытах с испарением кремниевой подложки, но с их расширением на другие химические элементы.
    1. В герметичной камере, заполненной смесью инертного газа и кислорода, создавать электрическую дугу между электродами из разных материалов.
    2. Провести по три теста для каждого электрода, фиксируя процесс на высокоскоростную камеру.
    3. Проанализировать зависимость стабильности и времени жизни светящихся объектов от материала электродов, что напрямую подтвердит или опровергнет роль химического состава наночастиц в кристаллизации.
  - Эксперимент 3: Лазерный «взрыв» в облаке наночастиц. Этот метод проверит процесс кристаллизации в объёме, независимо от электродов, что станет сильным аргументом в пользу гипотезы об электромагнитной самоорганизации плазмы.
    1. В специальной камере с помощью ультразвука создать стабильное облако из наночастиц оксида кремния.
    2. Сфокусировать в объёме этого облака мощный инфракрасный лазерный импульс для создания плазменного «затравочного» ядра.
    3. Зафиксировать процесс с помощью скоростной камеры и проанализировать спектр свечения. Если гипотеза верна, на записи будет видно, как облако наночастиц быстро «кристаллизуется» вокруг плазменного ядра, формируя стабильный светящийся шар.
  - Эксперимент 4: «Грозовой полигон» (полевые наблюдения). Этот эксперимент — попытка поймать и изучить природную шаровую молнию, чтобы подтвердить лабораторные выводы.
    1. Создать в грозоопасном регионе полигон, оснащённый скоростными камерами, широкополосными радиоспектрометрами и детекторами излучений, которые работают в автоматическом режиме.
    2. Дополнительно развернуть сеть из недорогих IoT-устройств (например, на базе Raspberry Pi) с датчиками для триангуляции и регистрации событий на большой площади.

Параллельно с экспериментами необходимо создать компьютерную модель, которая сможет симулировать поведение плазмы на основе этой гипотезы.

- **Задача 1: Самоорганизация плазменного кристалла.** Используйте метод молекулярной динамики или расчёты во временной области (FDTD), чтобы смоделировать, как электромагнитное поле заставляет ионизированные наночастицы грунта (кремний, железо, кальций) формировать упорядоченную кристаллическую решётку. Если модель предскажет стабильную сферу с определённым спектром свечения, это станет мощным подтверждением.
- **Задача 2: Долгоживущий плазмодид как терагерцовый солитон.** Как вариант, можно проверить, не является ли шаровая молния терагерцовым солитоном — устойчивой «волной-частицей», существующей за счёт баланса нелинейных эффектов. Это объясняет и сферическую форму, и долгое время жизни, и прохождение сквозь стёкла.

После подтверждения первых двух этапов можно будет задуматься о более глубоких проверках.

- **Эксперимент 5: Запутанность в плазме (микрогравитация).** Для проверки связи гипотезы с квантовой механикой необходим специальный «пылевой» реактор с лазерным охлаждением и манипуляцией отдельными наночастицами, который будет работать в условиях микрогравитации (например, на МКС). Там можно попытаться создать пары запутанных частиц внутри плазменного кристалла и измерить их квантовые состояния.
- **Эксперимент 6: Гравитационная суперпозиция (предел возможностей).** Самый амбициозный эксперимент. Для него потребуются уникальная установка, объединяющая сверхпроводящие магниты, лазерные пинцеты и сверхчувствительные детекторы гравитационных волн. Цель — попытаться зафиксировать, может ли «плазменный кристалл» проявлять квантовые свойства (например, находиться в суперпозиции) в масштабах, где заметны эффекты гравитации.

## Обсуждение

- Предложенная гипотеза эмерджентного плазменного кристалла позволяет с единых позиций объяснить несколько ключевых наблюдаемых свойств шаровой молнии, которые ранее требовали введения независимых и часто противоречащих друг другу допущений.
  - Сравнение с существующими моделями

- Традиционные плазменные модели, описывающие шаровую молнию как сгусток горячего газа, удерживаемый магнитным полем, сталкиваются с проблемой времени жизни: обычная плазма в атмосферных условиях рекомбинирует за миллисекунды, тогда как наблюдаемые объекты существуют десятки секунд. В рамках предлагаемой гипотезы эта трудность снимается естественным образом: формирование упорядоченной оболочки создаёт структурный барьер, который резко замедляет рекомбинацию и предотвращает мгновенное рассеивание энергии.
- Химические модели, связывающие феномен с горением кластеров кремния или других элементов, хорошо объясняют спектральные данные, но не дают ответа на вопрос, почему облако горящих частиц принимает строго сферическую форму и сохраняет её длительное время. Модель плазменного кристалла дополняет химическую гипотезу, указывая конкретный физический механизм, ответственный за наблюдаемую макроскопическую упорядоченность.
- Релятивистско-микроволновая модель (2016) успешно описывает ряд свойств, но её применимость ограничена случаями, когда разряд молнии происходит вблизи металлических конструкций. Предлагаемая модель, напротив, не требует внешнего резонатора и объясняет возникновение шаровой молнии в естественных условиях, при ударе молнии непосредственно в грунт.
  - Объяснительная и предсказательная сила гипотезы
- Предлагаемая теория не просто объясняет наблюдаемые свойства, но и даёт конкретные предсказания, которые могут быть проверены в лабораторных условиях. Эксперименты, предложенные в данной работе, нацелены на перекрёстную верификацию различных аспектов гипотезы и обладают высокой дискриминирующей способностью.
  - В частности, Эксперимент 1 по воспроизведению удара молнии в «искусственный грунт» заданного состава позволяет проверить центральный постулат модели: стабильный светящийся шар должен возникать лишь тогда, когда в зоне разряда присутствуют частицы, способные к самоорганизации. Более того, гипотеза предсказывает, что спектр излучения лабораторного плазмоида будет содержать линии тех элементов, которые входят в состав мишени. Обнаружение предсказанных линий Si, Fe, Ca и Al в спектре лабораторного шара и их соответствие природным данным стало бы сильным аргументом в пользу предлагаемой модели.
    - Эксперимент 2, варьирующий материал электродов, позволит экспериментально построить зависимость стабильности и времени жизни плазмоида от типа химических элементов. Если гипотеза верна, элементы с большей склонностью к образованию прочных оксидных связей должны давать более стабильные и долгоживущие объекты.

- Эксперимент 3 с лазерным инициированием кристаллизации в облаке наночастиц решает фундаментальную задачу: он позволяет отделить процесс формирования плазмы от процесса структурирования. Если светящийся шар возникнет и в этом случае, это станет прямым доказательством того, что ключевым механизмом является именно электромагнитная самоорганизация частиц, а не специфические процессы вблизи электродов.
- Наконец, предлагаемая компьютерная модель, основанная на методах молекулярной динамики, позволит исследовать динамику формирования плазменного кристалла *in silico*, воспроизводя последовательные стадии процесса от испарения грунта до установления дальнего порядка. Совпадение результатов моделирования с данными скоростной видеосъемки стало бы решающим подтверждением теории.
  - Связь с фундаментальной физикой
- Предлагаемая модель эмерджентного плазменного кристалла может иметь значение, выходящее за рамки атмосферного электричества. Плазменные кристаллы, формирующиеся при экстремальных температурах и давлениях, могли играть роль в процессах самоорганизации материи на ранних стадиях эволюции планетных систем. Их исследование открывает путь к новому классу экспериментов по изучению квантовых эффектов в макроскопических системах – от проверки принципов квантовой запутанности в плазме (Эксперимент 5) до поиска проявлений квантовой гравитации (Эксперимент 6). В долгосрочной перспективе понимание механизмов стабилизации высокотемпературной плазмы может найти применение в разработке новых методов удержания плазмы для управляемого термоядерного синтеза.

## **Заключение**

В настоящей работе предложена новая физическая модель шаровой молнии – эмерджентного плазменного кристалла, формирующегося в точке удара линейной молнии в грунт. Модель основана на экспериментально установленном факте самоорганизации заряженных частиц в упорядоченные структуры в комплексной (пылевой) плазме и распространяет этот принцип на экстремальные условия, создаваемые грозовым разрядом.

Ключевой научной новизной гипотезы является утверждение, что длительное время жизни и структурная целостность шаровой молнии обусловлены не

внешними факторами (резонаторами или химическим горением), а внутренним свойством самой плазмы — её способностью к спонтанному нарушению симметрии и образованию дальнего порядка в виде кристаллической решётки. Этот механизм естественным и единообразным образом объясняет совокупность наблюдаемых характеристик феномена — от спектрального состава до способности проникать сквозь диэлектрики.

Практическая ценность работы состоит в предложенной программе экспериментальной верификации. Шесть предложенных экспериментов — от лабораторного воспроизведения плазменного кристалла до тестов в условиях микрогравитации — обладают ясными критериями фальсифицируемости и позволяют провести перекрёстную проверку гипотезы. В случае успешного подтверждения модели исследование не только закроет вековую проблему атмосферного электричества, но и откроет новое направление в физике плазмы — изучение квантовых эффектов в макроскопических плазменных структурах.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на получение прямых доказательств существования плазменного кристалла в лабораторных условиях и на разработку детальной компьютерной модели, связывающей микроскопические параметры разряда с макроскопическими параметрами наблюдаемого объекта. В долгосрочной перспективе понимание механизмов стабилизации высокотемпературной плазмы может найти применение в управляемом термоядерном синтезе и в объяснении процессов самоорганизации материи на ранних стадиях эволюции планетных систем.

## Список литературы

1. *Singer S.* The nature of ball lightning. Plenum Press, New York, 1971. [Классическая монография, обобщившая тысячи свидетельств и заложившая основы современного изучения шаровой молнии.]
2. *Stenhoff M.* Ball lightning: an unsolved problem in atmospheric physics. Kluwer Academic Publishers, New York, 1999. [Фундаментальный обзор, систематизировавший статистику наблюдений и предложивший критерии проверки гипотез.]
3. *Cen J., Yuan P., Xue S.* Observation of the optical and spectral characteristics of ball lightning // *Physical Review Letters*. 2014. Vol. 112, No. 3. P. 035001.

[Первое надёжное спектральное измерение природной шаровой молнии, выявившее линии кремния, железа и кальция.]

4. *Wu H.-C.* Relativistic-microwave theory of ball lightning // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. P. 28263. [Релятивистско-микроволновая модель, объясняющая шаровую молнию как плазменный шар, удерживаемый микроволнами от электронного пучка.]
5. *Thomas H., Morfill G.E., Demmel V. et al.* Plasma crystal: Coulomb crystallization in a dusty plasma // *Physical Review Letters*. 1994. Vol. 73, No. 5. P. 652–655. [Первое экспериментальное наблюдение плазменного кристалла в комплексной (пылевой) плазме.]