



Ещё раз о феномене шаровой молнии

А. М. Асхабов

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия
askhabov@geo.komisc.ru

Кратко обсуждается современное состояние вопроса о природе и свойствах шаровой молнии. Рассмотрены существующие модели образования и функционирования в воздухе светящихся шарообразных объектов. Изложены основные черты кватаронной модели шаровой молнии, согласно которой она интерпретируется как кулоновский кристалл, образованный заряженными кластерами «скрытой» фазы — кватаронами. Главными факторами, обеспечивающими целостность и устойчивость шаровой молнии, являются её внутренняя кристаллическая структура и поверхностная энергия. Запасенная внутри шаровой молнии энергия, которая расходуется на излучение, не пополняется извне и не является химической энергией.

Ключевые слова: шаровая молния, свойства шаровой молнии, модели и гипотезы образования шаровой молнии, кватаронная модель шаровой молнии

Once again about the phenomenon of ball lightning

A. M. Askhabov

Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

We discuss the current understanding of the nature and features of the ball lightning. Existing models for the formation and function of luminous spherical objects in the atmosphere are observed. The core features of the author's kvataron model are presented in detail. According to this model, the ball lightning is interpreted as a Coulomb crystal composed of charged clusters from a "hidden" phase — referred to as kvatarons. The model posits that the structural integrity and stability of ball lightning are maintained primarily by its internal crystalline lattice and surface energy. Crucially, the energy stored within the ball lightning, which is irradiated, is neither replenished from an external source nor is it derived from chemical energy.

Keywords: ball lightning, properties of ball lightning, ball lightning formation models and hypotheses, kvataron model of ball lightning

Введение

Эта статья продолжает серию публикаций, посвященных выдающимся открытиям, знаменательным датам и людям, изменившим науку и направление ее развития. Они, как правило, касаются близких лично нам областей науки: кристаллографии, минералогии, физической химии, материаловедения и нанотехнологии. В очередном же сообщении речь идет о проблеме из несколько другой области: о феноменальном природном явлении — шаровой молнии, которая будоражит умы людей (и не только исследователей) на протяжении многих и многих лет. Считается, что шаровая молния как научная проблема существует начиная с первой публикации Франсуа Араго в 1838 г., члена Французской академии наук, принятого в нее в возрасте 23 лет. В его публикации было описано три десятка случаев наблюдения шаровых молний. В отечественной литературе обычно отсчет ведут с работ по изучению явлений атмосферного электричества М. В. Ломоносова и Г. В. Рихмана, погибшего в 1753 г. именно от шаровой молнии.

Установление природы шаровой молнии, решение проблемы её происхождения, как предполагают, станет одним из самых выдающихся достижений современной науки. Проблема, однако, далека от решения не только из-за сложности явления, но и из-за отсутствия возможностей для непосредственного ее изучения (нет в нашем распоряжении ни молнии, ни средств ее наблюдения). Кроме того, со стороны многих ученых со-

храняется скептическое отношение к феномену шаровой молнии, хотя научный характер проблемы ими не отрицается¹. На протяжении многих лет проводятся различного уровня международные форумы по шаровой молнии, созданы специализированные научные центры и лаборатории, часто появляются обобщающие обзоры в авторитетных научных журналах. Однако радикального прогресса в изучении феномена шаровой молний не произошло. Он продолжает оставаться для научного сообщества мощным интеллектуальным вызовом.

Мы однажды уже касались этой темы, не имеющей вроде бы прямого отношения к нашим научным интересам (Асхабов, 2007, 2008). Опубликованная нами почти два десятка лет назад модель шаровой молнии, где она интерпретировалась как кристаллоподобное образование из кватаронов воды, представляется до сих пор актуальной. Все больше наблюдаемых фактов по природной шаровой молнии и часть результатов по лабораторному воспроизведению похожих на нее объектов вполне удовлетворительно удается объ-

¹ Нередко до сих пор появляются также публикации, отрицающие реальность шаровых молний и интерпретирующие их как оптические иллюзии. В этом плане характерна статья австрийских ученых И. Пеера и А. Кендля (Peer, Kendl, 2010), где шаровые молнии описаны как некие зрительные образы (так называемые фосфены), которые появляются у человека при воздействии на мозг сильных электромагнитных полей.



яснить в рамках этой модели. В том числе и это обстоятельство заставило нас ещё раз вернуться к проблеме объяснения природы и механизма образования шаровой молнии.

О шаровой молнии и ее свойствах

Вначале кратко рассмотрим, что такое шаровая молния и каковы определяющие ее свойства. Существующие представления о шаровой молнии основаны исключительно на описательных данных наблюдений феномена в природе. По этой части накоплен огромный материал. Составлены и опубликованы в нашей стране и за рубежом многочисленные обзоры и крупные сводки по сбору и обработке данных наблюдений (Arago, 1838; Brand, 1923; Humphreys, 1936; McNally, 1966; Стаханов, 1979, 1985; Григорьев, 2010, Ohtsuki, Ofuruton, 1986 и др.), формируются банки данных. Много интересных данных имеется в обзорах Б. М. Смирнова (1990, 1992), В. Л. Бычкова (2006).

Шаровая молния в настоящее время определяется как обособленное светящееся образование в атмосфере, чаще всего имеющее сферическую форму и свободно движущееся в воздухе. Средний размер шаровой молнии по статистике составляет около 20 см, а время жизни — от нескольких секунд до нескольких минут. Основные параметры и наблюдаемые свойства шаровой молнии обобщены в работе Б. М. Смирнова (1992). Эти параметры, по существу, характеризуют усредненную модель шаровой молнии. В целом что такое шаровая молния, более или менее ясно, хотя точного определения не существует. Известно и то, какие факты наиболее часто проявляются в случаях непосредственного наблюдения шаровой молнии.

Обобщая многочисленные данные наблюдений, перечислим здесь наиболее часто упоминающиеся в разных источниках особенности шаровых молний.

1. Шаровые молнии — это светящиеся объекты в атмосферном воздухе, как правило сферической формы, имеющие определенный запас энергии, которая расходуется на излучение.

2. Они двигаются в основном горизонтально. Это значит, что плотность шаровой молнии примерно такая же, как и плотность воздуха. Движение вверх или вниз (что чаще) наблюдается гораздо реже. Скорость движения обычно меньше 10 м/сек.

3. Шаровая молния способна проходить через узкие отверстия и щели, после чего восстанавливает свою сферическую форму. Описаны также случаи изменения формы шаровой молнии в процессе ее эволюции.

4. Наиболее часто шаровые молнии образуются в летние месяцы. Максимум приходится на июль. Имеются определенные корреляции с грозовой погодой и с высокой влажностью воздуха.

5. Существование шаровой молнии заканчивается взрывом или же ее исчезновение происходит спокойно.

6. Наблюдались случаи распада шаровой молнии на несколько частей, которые также приобретали сферическую форму.

7. Время жизни шаровой молнии зависит от ее размера. Большие молнии живут дольше.

8. Цветовая гамма шаровых молний довольно разнообразна. Наиболее часто наблюдались белый, красный, желтый и оранжевый цвета молнии.

9. Энергетика шаровой молнии относится к числу важнейших и наиболее дискуссионных ее свойств. Точные количественные значения энергии шаровой молнии не установлены. Оценочные значения колеблются в широких пределах.

Мы далеки от мысли, что в этом списке отмечены все и в полном объеме принципиально важные свойства шаровых молний. Кроме того, нет уверенности также в том, что у разных наблюдателей речь идет об одном и том же явлении. Часто создается впечатление, что под термином «шаровая молния» подразумевается довольно широкий круг объектов с разнообразными по описанию очевидцев свойствами. Поэтому довольно трудно выделить только те факты, которые относятся именно к шаровой молнии, а не к разнородным похожим явлениям. Не исключено, что существуют различные виды шаровых молний. Тогда понятны и затруднения, связанные с построением всеобъемлющей модели шаровой молнии.

О моделях шаровых молний

В настоящее время никакая теоретическая модель шаровой молнии не может объяснить все, часто противоречащие друг другу, свойства из наблюдений очевидцев. В результате количество различных моделей и гипотез происхождения шаровых молний составляет несколько сотен.

Мы исходим из того, что шаровая молния — это объект единой физической природы, независимо от размера, цвета и энергии. Устройство и происхождение шаровых молний должны быть одинаковы. Поэтому нужна некая эталонная модель идеальной шаровой молнии. Образно говоря, для начала, как в кристаллографии, надо понять и описать структуру идеального кристалла, реальные кристаллы и присущие им свойства рассмотреть позже. Такая методологическая установка может оказаться полезной и применительно к реальным шаровым молниям. К сожалению, эталонная модель шаровой молнии ещё не предложена.

В целом ясно, какие ключевые моменты из наблюдаемых фактов непременно должна описывать приемлемая модель шаровой молнии. Речь должна идти об автономных обособленных в пространстве светящихся объектах с формой, близкой к сферической, обладающих поверхностной энергией, с плотностью, примерно равной плотности воздуха. Сюда можно добавить также требования к модели шаровой молнии, связанные с размерами, устойчивостью, наличием внутри объекта запасенной энергии, которая расходуется на излучение.

Со времен И. П. Стаханова принято делить модели шаровой молнии по механизму ее энергетического обеспечения. Необходимая энергия может поступать извне или находиться внутри. При этом модели с внешними источниками питания² сталкиваются

² Последовательным сторонником модели с внешним источником питания был П. Л. Капица (1955), который считал, что плазма шаровой молнии не может долго существовать без подвода к ней энергии извне. Это действительно так, если иметь в виду высокотемпературную плазму.



с реально непреодолимыми трудностями. В частности, невозможно указать на процессы и механизмы, обеспечивающие непрерывную подачу энергии в некоторую небольшую область пространства. Это касается также целого ряда современных вариантов моделей, предполагающих внешнюю подпитку шаровых молний.

По сравнению с ними более жизнеспособны модели с внутренними разнообразными источниками энергетического обеспечения. Такими источниками энергии, поддерживающими шаровую молнию, могут быть химические реакции или процессы горения. Дж. Барри (Barry, 1980) для обоснования таких моделей проводил соответствующие опыты с горением метана в воздухе и даже получал светящиеся шары, которые существовали 1—2 сек. Высказывались также идеи о том, что энергосодержащие реагенты являются лабильными веществами, тесно связанными с процессами грозовой деятельности (озон, окислы азота) (Смирнов, 1976). В таких моделях, однако, невозможно объяснить связанность вещества в молнии, ее целостность и сферическую форму.

В этом смысле интереснее более позднее предположение Б. М. Смирнова (1990, 1992) о наличии внутри шаровой молнии аэрозольного каркаса, содержащего в своих порах горючее (уголь, стеарин, озон, диоксид кремния) и небольшое количество зарядов одного знака. Наиболее полно его идея о существовании внутри шаровой молнии жесткого каркаса нашла отражение в так называемой фрактальной модели шаровой молнии (Смирнов, 1990). Фрактальная структура обладает большой удельной поверхностной энергией, которая может выделяться в процессе эволюции молнии. Фрактальная модель шаровой молнии объясняет также и ряд ее других свойств, в том числе низкую плотность. Ценность этой модели заключается в том, что здесь впервые дается представление о возможном внутреннем строении молнии, которое в большинстве моделей никак не обсуждается.

Широко известна классическая кластерная модель, которая впервые была предложена И. П. Стахановым (1979). Согласно этой модели, шаровая молния состоит из необычной плазмы — смеси положительных и отрицательных ионов, облепленных нейтральными молекулами (воды), которые тормозят рекомбинацию ионов, что обеспечивает длительное существование плазмы в метастабильном состоянии. Действительно, по оценкам Б. М. Смирнова (1992), время рекомбинации гидратированных ионов может на два порядка превосходить время рекомбинации плазмы, состоящей из «голых» ионов и электронов. Однако модель имеет существенный недостаток. В рамках этой модели невозможно объяснить причину, удерживающую шаровую молнию в ограниченном объеме и препятствующую смешиванию облака кластерных ионов с окружающим воздухом. Тем не менее кластерные модели продолжают обоснованно привлекать внимание. Появляются разные усложненные варианты таких моделей, не всегда сохраняющие основные положения исходной модели Стаханова.

В последующем была также предпринята попытка создать модель шаровой молнии на основе синте-

за моделей различных авторов. Она известна под названием конденсационной (Igolkin, Savelyev, 1997) и объединяет идеи Стаханова о кластерной природе, Смирнова о фрактальной структуре внутри молнии, Бычкова о полимерных нитях в составе шаровой молнии. Для нас важно отметить, что, согласно этой модели, шаровая молния образуется при неравновесной конденсации переохлажденного пара и основным источником энергии молнии признается энергия возбужденных кластеров.

Много вопросов возникает при обсуждении часто появляющихся необычных моделей шаровой молнии. Для сведения — в обзоре А. И. Никитина (2006) приведен следующий неполный список таких моделей:

- 1) ядерная модель шаровой молнии;
- 2) шаровая молния как термоядерный реактор;
- 3) шаровая молния как облако осциллирующих электронов;
- 4) шаровая молния как микроскопическая черная дыра;
- 5) шаровая молния как магнитный монополю;
- 6) шаровая молния — клубок флюксов (гипотетическое вещество, представляющее собой темную материю Вселенной);
- 7) итонная модель шаровой молнии (итонные кластеры — сильно сжатые атомы водорода);
- 8) шаровая молния как волна де Бройля (бозе-конденсат ультрахолодных электронов).

Понять суть перечисленных моделей довольно сложно. Они часто достаточно далеки от наблюдаемых фактов, а их экспериментальные проверки на данном этапе практически невозможны. Это же относится и к множеству других современных физических моделей и гипотез, объясняющих природу шаровой молнии на основе новых (как пишут авторы) физических принципов. Нам кажется, что особой пользы от таких моделей для понимания феноменологии шаровой молнии ожидать не приходится, хотя сходу отвергать их, возможно, и неразумно.

Поскольку наше сообщение рассчитано большей частью на широкий круг читателей, не являющихся физиками-профессионалами³, то желательно иметь достаточно простую для понимания модель шаровой молнии, которая должна, с одной стороны, объяснять наблюдаемые факты, с другой — не противоречить известным законам физики и химии.

Экспериментальное моделирование шаровых молний

На протяжении многих лет предпринимались многочисленные попытки лабораторного воспроизведения шаровых молний. Первые эксперименты по их искусственному получению были начаты Н. А. Гезехусом еще в конце XIX в. (1898). Лабораторные эксперименты к настоящему времени охватывают широкий диапазон условий, в которых удается получить короткоживущие светящиеся образования (Стаханов, 1985; Шаровая молния ..., 1994; Egorov et al., 2004; Шабанов, 2010; Oreshko, 2004; Shmatov, 2019 и др.). Многие, и не без оснований, полагают, что проблема шаровой мол-

³ Рассчитываем, что данная заметка будет особенно полезна для специалистов в области наук о Земле, интересующихся проблемами возникновения различных светящихся образований (плазматических) в так называемых геопатогенных зонах.

нии будет решена только после нахождения способов их контролируемого и управляемого искусственного создания. При этом мы должны быть уверены в том, что довольно легко получаемые в лабораторных экспериментах образования действительно представляют из себя то, что подразумевается под природной шаровой молнией. К сожалению, такой уверенности у нас нет. Остается во многом непонятным, какое отношение эти образования имеют к реальной шаровой молнии, представление о которой у нас сложилось на основе наблюдений очевидцев. Это же можно сказать также о редких случаях появления так называемых искусственных шаровых молний, случайно возникающих в различных устройствах. Интересно, что, по описаниям очевидцев, эти образования на самом деле очень похожи на обычные шаровые молнии и, возможно, они имеют с ними общую природу.

Более подробно с экспериментами по моделированию шаровой молнии можно ознакомиться в интенсивно пополняющейся оригинальной литературе. Заметим, что способов создания светящихся шаров в воздухе довольно много. Обычно это делается через их создание в СВЧ-разряде, посредством короткого замыкания батарей с большим запасом энергии, зажиганием искры в химически активной смеси и т. д. Известны также опыты Тесла по получению шаровой молнии, схема которых осталась неизвестной. В целом поток экспериментальных работ, воспроизводящих в лаборатории аналоги шаровых молний, продолжается, но это ещё не приблизило нас к пониманию природы шаровых молний.

Кватаронная модель шаровой молнии

Ниже изложены ключевые идеи кватаронной модели шаровой молнии, которые были опубликованы нами ранее (Асхабов, 2007, 2008). Модель основывается на идеях кватаронной концепции кластерной самоорганизации вещества на наноуровне (Асхабов, 2004, 2011). Ключевая идея этой концепции сводится к тому, что в пересыщенной среде образуются и могут существовать особые наноразмерные кластеры, названные кластерами «скрытой» фазы, или кватаронами. Они предшествуют зародышам новой фазы при конденсации и кристаллизации. Отличительные свойства кватаронов рассмотрены нами в ряде работ (Асхабов, 2019, 2020).

Новая гипотеза о природе шаровой молнии родилась как продолжение предложенной нами ранее кватаронной модели конденсации водяного пара (Асхабов, 2006). В этой работе были определены условия образования обычной жидкой воды (вода с плотностью 1 г/см^3), а также рассматривалась возможность образования различных не установленных еще экспериментально аномальных («твёрдой», «газообразной», «фрактальной») фаз воды при конденсации и агрегации электрически нейтральных кватаронов. Однако если кватароны одноименно заряжены, то ситуация с конденсацией кватаронов радикально изменяется. Образование конденсированной фазы в обычном понимании становится невозможным. Одноименно заряженные кватароны, естественно, не могут агрегироваться и конденсироваться с формированием жидкой фазы. Но при этом межкватаронное взаимодействие при определенных условиях неизбежно приведёт к формированию ими

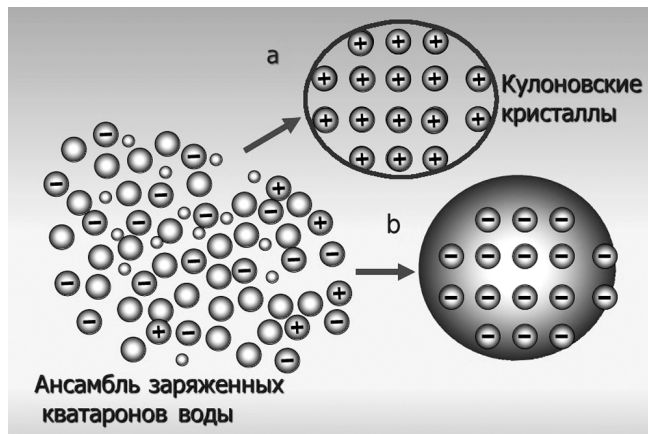


Рис. 1. Варианты образования шаровых молний (кулоновских кристаллов) из положительно (а) и отрицательно (б) заряженных кватаронов

Fig. 1. Variants of formation of ball lightning (Coulomb crystals) from positively (a) and negatively (b) charged kvatarons

пространственно-упорядоченных структур — кристаллов (рис. 1).

Впервые на возможность образования заряженными частицами в плазме кристаллоподобных структур указывалось в работе Х. Икези (Ikezi, 1986). В последующем такие структуры стали называть кулоновскими, или плазменными, кристаллами. Они установлены экспериментальными методами и достаточно хорошо изучены, к примеру для пылевидной плазмы (Нефедов и др., 1997).

Легко представить, что подобное явление может быть реализовано для заряженных кватаронов воды, и они сформируют особую фазу, аналогичную кулоновскому кристаллу. По-видимому, именно эта фаза и представляет собой образование, называемое шаровой молнией (по крайней мере, одна из форм светящихся объектов сферической формы, наблюдаемых в атмосфере). Если так, то шаровая молния — это особая «кристаллическая» плазма, в которой дисперсными частицами выступают электрически заряженные кватароны.

Таким образом, собственно процесс образования шаровой молнии в этой модели выглядит достаточно просто. В пересыщенном паре (воды) первоначально должны образоваться наэлектризованные кватароны. Далее происходит рекомбинация разноименно заряженных кватаронов. Если в результате в пересыщенном паре останутся одноименно заряженные кватароны, то в оставшемся ансамбле из-за взаимного электростатического отталкивания формируется решетчатая структура (кристалл) и кватароны окажутся фиксированными на определенном расстоянии друг от друга. Двумерный вариант такой структуры из заряженных кватаронов представлен на приведенном выше рисунке.

Поскольку кватароны являются относительно крупными частицами, до десятков или даже сотен молекул, то заряд на кватаронах может быть достаточно большим. Однако при значительных зарядах увеличивается среднее расстояние между кватаронами и уменьшается энергия кулоновского взаимодействия, что в конечном счете приводит к распаду шаровой молнии или делает её образование невозможным.

Легко предположить также, что цветовая гамма шаровой молнии будет зависеть от её примесного состава.



При этом примесные частицы могут находиться не только в виде дефектов решетки, но и как в эндокватаронной (внутри кватаронов), так и в экзокватаронной формах. Очевидно, что беспримесные шаровые молнии должны иметь одинаковый цвет, а если шаровая молния в процессе существования меняет свой цвет, то это свидетельствует о её примесной неоднородности.

В рамках кватаронной модели находит объяснение большинство свойств шаровой молнии, на которые указывают наблюдатели. Так, наличие «запирающей» фазовой границы и кристаллический характер облака заряженных кватаронов обеспечивают устойчивость шаровой молнии. Отпадает необходимость существования внутри шаровой молнии жесткого каркаса фрактальных кластеров (Смирнов, 1988) или органического полимера (Шаровая..., 1994). Модель не противоречит также существованию у шаровой молнии собственного электрического поля. Ряд свойств шаровой молнии (способность сохранять свою целостность, приобретать сферическую форму, проникать через щели и отверстия и т. д.) являются следствием существования фазовой границы и, соответственно, поверхностной энергии. Важную роль играет и своеобразная «текучесть» кристаллической структуры. Это следствие того, что кватароны внутри шаровой молнии не связаны химически. В результате структура в целом может деформироваться, легко изменять свою форму, а потом и восстанавливать её.

Просто решается также центральный вопрос о приходе накопленной в шаровой молнии (или полученной извне) энергии. Прежде всего из рассматриваемой модели следует, что необходимая для поддержания шаровой молнии и ее свечения энергия не подводится извне, а аккумулирована внутри самой молнии, в энергии образующих ее частиц (кватароны — высокоэнергетичные кластеры). Никаких химических реакций с выделением энергии в шаровой молнии не происходит.

Таким образом, интерпретация шаровой молнии как плазменного кристалла, образованного заряженными кватаронами воды, позволяет объяснить важнейшие ее свойства, отмечаемые наблюдателями. В конечном счете эти свойства определяются концентрацией и размерами кватаронов, а также величиной заряда на них, от которых зависит плотность энергии в объеме шаровой молнии. Энергетике шаровой молнии будет посвящена следующая статья этой серии.

Отметим также, что светящиеся образования по рассмотренному здесь механизму могут, в принципе, возникать и в парах (газах) других веществ. Не исключено, что многие полученные в лаборатории образования (плазмоды), напоминающие шаровую молнию, имеют такую природу.

Заключение

Обобщим главные элементы кватаронной модели шаровой молнии.

Шаровую молнию нельзя рассматривать как газовое или жидкое состояние — это плазма. Она состоит из заряженных кластеров «скрытой» фазы — кватаронов, которые по закону кулоновского взаимодействия образуют в пространстве устойчивое упорядоченное образование — кристалл.

В данной модели отсутствует принципиально важный вопрос: из каких частиц состоит вещество молнии — заряженных или нейтральных? Идея о нейтральных частицах была обусловлена тем, что при температуре шаровой молнии известные газообразные плазменные среды рекомбинируют. Кроме того, газы, состоящие из нейтральных молекул, не могут образовывать в других газах (в воздухе) отдельную автономно существующую фазу.

Обособленность в пространстве, устойчивость и целостность шаровой молнии обеспечивают поверхностная энергия и кристаллический характер внутренней структуры.

Запасенная внутри шаровой молнии энергия, которая расходуется на её внешней границе на излучение, не пополняется извне и не связана с химическими реакциями.

Примесные частицы в шаровой молнии, которые влияют на её цвет, могут находиться в виде дефектов решетки кристалла или быть связаны с кватаронами.

Генезис необычных явлений, аномальных фаз, переходных состояний, связанных с конденсацией минерального вещества, изучаются в рамках темы НИР ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ГР № 1220406000009-2).

Литература / References

- Асхабов А. М. Кластерная (кватаронная) самоорганизация вещества на наноуровне и образование кристаллических и некристаллических материалов // Зап. РМО. 2004. Т. 133. № 4. С. 108—123.
- Askhabov A. M. Cluster (kvataron) self-organization of matter at the nanolevel and the formation of crystalline and non-crystalline materials. Zapiski RMO, 2004, V. 133, No. 4, pp. 108—123. (in Russian)
- Асхабов А. М. Кластерный (кватаронный) механизм образования жидкой воды // Записки РМО. 2006. Т. 135. № 1. С. 123—130.
- Askhabov A. M. Cluster (kvataron) mechanism of liquid water formation. Zapiski RMO, 2006, Part 135, 3—1, pp. 123—129. (in Russian)
- Асхабов А. М. Шаровая молния как плазменный кристалл из кватаронов воды // Вестник Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН. 2007. № 9. С. 2—3.
- Askhabov A. M. Ball lightning as a plasma crystal from water kvatarons. Vestnik of Institute of Geology Komi SC UB RAS, 2007, No. 9, pp. 2—3. (in Russian)
- Асхабов А. М. Кватаронная модель шаровой молнии // Доклады Академии наук. 2008. Т. 418. № 5. С. 611—613.
- Askhabov A. M. Kvataron model of ball lightning. Doklady Earth Sciences, 2008, V. 418, No. 5, pp. 611—613. (in Russian)
- Асхабов А. М. Кватаронная концепция: основные идеи и некоторые приложения // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2011. № 3(7). С. 70—71.
- Askhabov A. M. Quataronic concept: basic ideas and some applications. Proceedings of the Komi SC UB RAS, 2011, No. 3(7), pp. 70—71. (in Russian)
- Асхабов А. М. О свойствах предзародышевых (протоминеральных) кластеров // Докл. АН. 2019. Т. 487, № 5. С. 524—527. DOI: 10.31857/S0869-56524875524-527
- Askhabov A. M. About the properties of pre-nucleus (protomineral) clusters. Doklady Earth Sciences, 2019, V. 487, No. 5, pp. 524—527. (in Russian)



- Асхабов А. М. О кватаронах и их необычных свойствах // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2020. № 6 (46). С. 21–27. DOI: 10.19110/1994-5655-2020-6-21-27
Askhabov A. M. About quatarons and their unusual properties. Proceedings of the Komi SC UB RAS, Syktyvkar, 2020, No. 6 (46), pp. 21–27. (in Russian)
- Бычков В. Л. О наблюдательных свойствах шаровой молнии // Химическая физика. 2006. Т. 25. № 3. С. 7–17.
Bychkov V. L. About the observational properties of ball lightning. Chemical Physics, 2006. V. 25, No. 3, pp. 7–17. (in Russian)
- Гезехус Н. А. О шаровой молнии. СПб.: Изв. технол. ин-та, 1898.
Gezekhus N. A. About Ball Lightning. St. Petersburg, Izvestia Technological Institute, 1898. (in Russian)
- Григорьев А. И. Шаровая молния: 2-е изд., доп. Ярославль: ЯрГУ, 2010, 200 с.
Grigoriev A. I. Ball Lightning: 2nd ed., supplemented. Yaroslavl, Yaroslavl State University, 2010, 200 p. (in Russian)
- Капица П. Л. О природе шаровой молнии // Доклады АН СССР. 1955. Т. 101, № 2. С. 245.
Kapitsa P. L. About the Nature of Ball Lightning. Doklady Earth Sciences, 1955, V. 101, No. 2, p. 245. (in Russian)
- Нефедов А. П., Петров О. Ф., Фортвов В. Е. Кристаллические структуры в плазме с сильным взаимодействием макрочастиц // Успехи физ. наук. 1997. Т. 167, № 11. С. 1215–1226.
Nefedov A. P., Petrov O. F., Fortov V. E. Crystalline structures in plasma with strong interaction of macroparticles. Physics-Uspekhi, 1997, V. 167, No. 11, pp. 1215–1226. (in Russian)
- Никитин А. Л. Удастся ли решить проблему шаровой молнии в 21-м веке? // Химическая физика. 2006. Т. 25. № 3. С. 18–37.
Nikitin A. L. Will the Ball Lightning Problem Be Solved in the 21st Century? Chemical Physics, 2006, V. 25, No. 3, pp. 18–37. (in Russian)
- Сингер С. Природа шаровой молнии. М.: Мир, 1973.
Singer S. The nature of ball lightning. New York, Plenum Press, 1971.
- Смирнов Б. М. Возникновение шаровой молнии // Доклады АН СССР. 1976. Т. 226, № 4. С. 806–809.
Smirnov B. M. Origin of ball lightning. Doklady Earth Sciences, 1976, V. 226, No. 4, pp. 806–809. (in Russian)
- Смирнов Б. М. Проблема шаровой молнии. М.: Наука, 1988. 208 с.
Smirnov B. M. Problem of ball lightning. Moscow: Nauka, 1988, 208 p. (in Russian)
- Смирнов Б. М. Физика шаровой молнии // Успехи физ. наук. 1990. Т. 160. Вып. 4. С. 1–46.
Smirnov B. M. Physics of ball lightning. Physics-Uspekhi, 1990, V. 160, No. 4, pp. 1–46. (in Russian)
- Смирнов Б. М. Наблюдательные свойства шаровой молнии // Успехи физических наук. 1992. Т. 162. № 8. С. 43–81.
Smirnov B. M. Observational properties of ball lightning. Physics-Uspekhi, 1992, V. 162, No. 8, pp. 43–81. (in Russian)
- Стаханов И. П. Физическая природа шаровой молнии. М.: Атомиздат, 1979.
Stakhanov I. P. Physical nature of ball lightning. Moscow: Atomizdat, 1979. (in Russian)
- Стаханов И. П. О физической природе шаровой молнии. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.
Stakhanov I. P. Physical nature of ball lightning. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 208 p. (in Russian)
- Шабанов Г. Д. Гипотезы и эксперименты по созданию шаровой молнии // УФН. 2010. Т. 180. № 2. С. 223–224.
Shabanov G. D. Hypotheses and Experiments on the Creation of Ball Lightning. Physics-Uspekhi, 2010, V. 180, No. 2, p. 223–224. (in Russian)
- Шаровая молния в лаборатории / Под ред. Р. Ф. Авраменко. М.: Химия, 1994. 256 с.
Ball Lightning in the Laboratory. Ed. R. F. Avramenko. Moscow: Chemistry, 1994, 256 p. (in Russian)
- Arago F. J. Annuaire au Roi par le Bureau des Longitudes. Notices Scientifiques. 1838. P. 221.
- Barry J. D. Ball lightning and bead lightning. N.J. and Lond., Plenum Press. 1980.
- Brand W. der Kuqelblitz. Hamburg: Henri Grand Verlag. 1923.
- Egorov A. E., Stepanov S. I., Shabanov G. D. Laboratory demonstration of ball lightning // Physics-Uspekhi. 2004. Vol. 147. No. 1. P. 99–104.
- Igolkin S. I., Savelyev S. K. Proc. Sth Intern. Sympos. on ball Lighning. Tsugawa, Japan. 1997. P. 80.
- Ikezi H. Conlomb solid of small particles in plasmas. Phys. Fluids. 1986. Vol. 29. P. 1764–1766.
- McNally J. R. Preliminary report on ball lightning. Oak Ridge Nat. lab. No. 3938. May, 1966.
- Ohtsuki Y. H., Ofuruton H. Nature of Ball Lighning in Japan // Nuovo Climento. 1987. 10. P. 577–580.
- Oreshko A. G. Generation of Laboratory Ball Lightning // J. of Physics. 2004. Vol. 44. P. 127–132.
- Peer J., Kendl A. Transeranian stimulability of phosphenes by long lightning electromagnetic pulses // Phys. Lett. A. 2010. Vol. 374. P. 2932–2935.
- Shmatov M. L., Stephan K. D. Advances in ball lighting research // Journal of Almospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2019. Vol. 195. P. 105–115. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.105115
- Xumphreys W. J. Ball lightning. Proc. Amer. Philos Soc. 1936. Vol. 76. No. 5. P. 613.

Поступила в редакцию / Received 30.07.2025

Редакторы издательства:

О. В. Габова, К. В. Ордин (английский)

Компьютерная верстка

Т. В. Хазовой

Выписка из реестра средств массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 30.11.2025. Формат бумаги 60 × 84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 6,5. Тираж 140. Заказ 1256. Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Редакция, издательство, типография: издательско-информационный отдел Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

Адрес редакции: 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Первомайская, 54. Тел.: (8212) 24-51-60. Эл. почта: vestnik@geo.komisc.ru

На обложке использованы фото Г. Каблиса, И. Голубевой, А. Журавлева, А. Шмырова, Н. Инкиной