

УДК 551.594.223:77.038:537.217

PACS: 52.80.Mg; 92.60.Pw

Условия существования связанных структур из тел, имеющих электрический заряд одного знака

А. И. Никитин, А. М. Величко, Т. Ф. Никитина, А. И. Степанов, И. Г. Степанов

В литературе и интернете имеется много свидетельств о наблюдении в атмосфере сферических светящихся объектов, представляющих собой взаимно связанные структуры – пары, треугольники, четырёхугольники и т. д. В статье проведён теоретический и экспериментальный анализ условий существования связанных структур из тел, обладающих электрическим зарядом одного знака. Показано, что сила кулоновского расталкивания таких объектов может быть скомпенсирована их отталкиванием от периферического облака зарядов того же знака, возникающего из-за стекания части заряда шара в атмосферу.

Ключевые слова: группы природных светящихся объектов, взаимодействие заряженных тел, стекание электрического заряда.

Введение

Во время гроз в атмосфере иногда появляются загадочные светящиеся шары, свободно плавающие в воздухе. Их появление часто фиксируется многочисленными обладателями смартфонов и видеокамер и привлекает интерес общественности. В англоязычных странах такие объекты называются «ball lightning», на немецком – это «Kugelblitz», на французском – «foudre en boule». В Древней Руси эти грозовые шары называли «родия» (что одновременно обозначало её «рдяной» цвет и «плод граната») [1]. В настоящее время для их названия принят термин «шаровая молния», что является буквальным переводом с европейских языков. Шаровые молнии наблюдаются в течение нескольких веков.

Данные о свойствах шаровых молний собраны в многочисленных монографиях и обзорах [2–31]. Согласно наблюдениям, шаровая молния – опасное природное явление. Описано много случаев поражения людей и животных током её разряда. Однако самым интригующим свойством шаровой молнии является её способность обладать большим запасом энергии, плотность которой может достигать до 10^{10} Дж/м³ [14, 20, 25, 32, 33].

Природа шаровой молнии до сих пор не понятна. Основная трудность, мешающая решению проблемы шаровой молнии, связана с кратковременностью её существования и непредсказуемостью места и времени её появления. В последнее время благодаря широкому распространению смартфонов и видеокамер появилась надежда несколько смягчить указанную трудность.

Решением проблемы шаровой молнии будет лабораторное воспроизведение её аналога, обладающего основными свойствами этого природного объекта. В течение последнего столетия попытки создания искусственной шаровой молнии предпринимались неоднократно. К сожалению, ни одна из них не увенчалась признанным успехом. Это, в частности, можно объяснить тем, что каждая раз идея, заложенная в основу конкретного эксперимента, недостаточно полно соответствовала той «идее», согласно которой шаровую молнию «умеет» делать природа. Однако часто получалось так, что результаты экспериментов и теоретических подходов, не приведшие к желаемой цели, оказывались полезными для развития новых направле-

Никитин Анатолий Ильич, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.

Величко Александр Михайлович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Никитина Тамара Фёдоровна, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Степанов Александр Иванович, стажёр-исследователь.

Степанов Илья Георгиевич, младший научный сотрудник.

Институт энергетических проблем химической физики им. В. Л. Тальрозе РАН (ИНЭПХФ РАН им. В. Л. Тальрозе). Россия, 117829, Москва, Ленинский проспект, 38, корп. 2. Тел. 8 (499) 137-35-06. E-mail: anikitin@chph.ras.ru

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2016 г.

© Никитин А. И., Величко А. М., Никитина Т. Ф., Степанов А. И., Степанов И. Г., 2017

ний науки. В качестве примеров таких «находок» можно привести новые результаты исследований химических реакций в мелкодисперсных порошках твёрдых тел в условиях воздействия на них сильных токов или мощного высокочастотного излучения [34–54], открытие и исследование нового вида электрического разряда («гатчинского разряда») [55–61], получение долгоживущих плазмоеидов в электрических разрядах [62–71]. Результатом теоретического поиска сил, обеспечивающих устойчивость плазмоеидов, было открытие нового класса квантовомеханических сил притяжения в плазме [72–82] и градиентных поляризационных сил в двухкомпонентных плазмоеидах [83–90]. Работа над моделью шаровой молнии, представляющей её в виде аэрогеля, привела к развитию теории фрактальных кластеров [91, 92].

Можно ожидать, что окончательное решение проблемы шаровой молнии приведёт к созданию новых важных и эффективных технологий. Время жизни типичной шаровой молнии невелико (около нескольких минут). Однако не исключено, что после разгадки её природы и воспроизведения в лаборатории будут найдены способы значительного продления её существования. Освоение шаровой молнии может позволить создать новый класс летательных аппаратов, основанных на взаимодействии заряженных тел с электрическими полями атмосферы. Способность шаровой молнии аккумулировать значительное количество энергии в небольшом объёме может быть использована для создания новых методов хранения и транспортировки энергии.

В последние годы к перечню словесных описаний случаев встреч с шаровой молнией добавилось огромное количество видеоматериалов, которые требуют пристального изучения. В частности, совершенно неисследованными остаются случаи наблюдения групп взаимно связанных шаровых молний. В настоящей статье сделана попытка найти объяснение существования устойчивых конфигураций из шаровых молний. Нами используется только одно свойство шаровой молнии – наличие у неё нескомпенсированного электрического заряда. При этом мы неизбежно сталкиваемся с необходимостью преодоления следствий теоремы Ирншоу, запрещающей существование устойчивых конфигураций из неподвижных электрических зарядов. В нашем случае решение задачи кажется вообще невозможным, так как мы хотим построить устойчивые конфигурации, состоящие из системы зарядов **одинакового** знака. Однако известная всем формула для силы кулоновского расталкивания одноимённых зарядов справедлива только для случая точечных зарядов. В реальных

объектах, например, в металлических шарах, под действием электрических полей происходит перераспределение зарядов. При этом возникает поляризационная сила, направленная противоположно действию кулоновской силы. Показано, что при малых расстояниях между шарами разного диаметра поляризационная сила может превысить силу кулоновского отталкивания [93–97]. Однако при больших расстояниях между заряженными объектами действие поляризационных сил приводит только к некоторому ослаблению кулоновской силы расталкивания зарядов, а не к её полной компенсации. Причина этого лежит в том, что обе эти силы (кулоновская и поляризационная) ослабевают с увеличением расстояния R между зарядами (первая – как R^{-2} , а вторая – как R^{-3}). Выходом из тупика представляется учёт действия среды, изменяющей свои свойства благодаря наличию в ней заряженных тел – то есть, в каком-то смысле, **нелинейность** системы. Эти тела неизбежно теряют заряд, который накапливается в окружающем воздухе и может создать силы, компенсирующие действие кулоновских сил. Во всяком случае, ясно, что если мы поместим два одноимённых заряда между двумя бесконечно протяжёнными плоскостями, несущими заряд того же знака, то можно надеяться, что в определённых случаях нам удастся скомпенсировать кулоновскую силу и создать устойчивую конфигурацию зарядов.

Случаи наблюдения групп шаровых молний

Первые описания случаев наблюдения пар шаровых молний можно найти в монографии Вальтера Бранда [4]. Интересный случай описан в обзоре Эгели [20]: 1. Бонта Лажосне из Тисзалука в Венгрии (Bonta Lajosne, Tiszaluc) рассказала: «В один из жарких дней августа 1984 года небо начали завлакивать облака. Когда между 8.30 и 9.00 после полудня я лежала на софе, я услышала скулёж собаки на дворе. Я выглянула в окно и увидела объект в форме искры, летящий сквозь ветви сливового дерева. Дерево находилось примерно в 4 метрах от окна. Огненный шар, похожий на искру, через несколько секунд вылетел из ветвей. Диаметр этого шарика был около 3 см, он двигался над землёй на высоте 2,5–3 м. Спустя некоторое время примерно на той же высоте, что и первый шарик, появились **две шаровые молнии** размером с теннисный мяч. **Они двигались на расстоянии 10 см друг от друга параллельно друг другу** в том же направлении, куда улетел первый шарик. Я была немного напугана, но не могла заставить себя отвернуться от окна. Вслед за

этим через несколько секунд на той же высоте появились **три маленьких огненных шара**. Они летели на расстоянии 30 см друг от друга, образуя **равносторонний треугольник**. Два из них были на расстоянии 15–20 см друг от друга, а третий отстоял от них на 30 см. Потом я потеряла их из вида. После этого новых огненных шаров не появилось» [20, С. 81]. Несколько случаев описания групп из нескольких шаровых молний можно найти в монографии И. П. Стаханова [23]: **2.** Летом 1955 года, во время грозы с сильным ветром, одновременно с громким ударом грома в кухню через печную трубу **влетели два шара** белого цвета. Диаметр шаров был приблизительно равен 10 и 15 см. **Шары летели один за другим** со скоростью 2–3 м/с на высоте 30–40 см от пола (расстояние 10 м было пройдено за 3–4 с). Через открытые двери шары влетели в другую комнату, где было проведено заземление. Подлетая к проволоке заземления, шары вытянулись, превратившись в эллипсоиды. Коснувшись её, они бесшумно исчезли в отверстии пола, в которое уходило заземление [23, С. 39]. В книге А. И. Григорьева [27] имеются описания поведения групп шаровых молний: **3.** Летом 1976 года в посёлке Раменье Псковской области в 22 часа во время сильной грозы из чёрной густой тучи вылетали шаровые молнии. Они беспорядочно **двигались одна за другой** по горизонтали на отрезке длиной около 100 метров. Расстояние между молниями было от двух метров до нескольких сантиметров, иногда они летели **группами по несколько штук**. Размер шаровых молний был равен примерно 15 см, они двигались на высоте около 2 м со скоростью бегущего человека [27, С. 45]. **4.** Летом 1920 года в городе Знаменка Кировоградской области во время сильной грозы с ливнем в центре площади, окружённой неисправными паровозами, стали одна за другой появляться шаровые молнии. Они были величиной с тарелку, их было около 20 штук. Они плавно «плясали» **на одном месте**, как надутые шары, то опускаясь, то поднимаясь, **одна от другой на расстоянии около метра**. Гроза и тучи уходили, но шаровые молнии не перемещались вслед за ними: где они возникали, там и исчезали. Одно было очевидно: они не спускались с неба [27, С. 58]. **5.** В конце августа 1970 года около города Шуя Московской области во время дождя с молниями и громом свидетельница наблюдала **пять огненных шаров**, летящих над крышами деревенских домов. Два были больше футбольного мяча, три – поменьше. Порядок их расположения **напоминал виноградную кисть**. Шары опустились к дороге и в середине её ушли в землю [27, С. 70]. **6.** В июле 1978 года в городе Псков во вре-

мя сильной грозы в комнату на первом этаже через форточку влетела шаровая молния, состоявшая из **четырёх шаров**: **впереди – большой** диаметром 10–15 см, а за ним, **цепочкой** на расстоянии около 10 см друг от друга, ещё **3 шарика** диаметром 3 см. Шары были жёлто-красные. Казалось, что они внутри пустые. Шары быстро пролетели к выключателям и ушли в них. Всё это заняло около секунды [27, С. 72]. Настоящий фейерверк случаев наблюдения групповых полётов природных светящихся объектов содержится в книге В. А. Черноброва [98]: **7.** Летом 1980 года в городе Мирный Самарской области свидетель, находившийся на четвёртом этаже, в 9 часов утра увидел на уровне первого этажа **два «мыльных пузыря»** диаметром около 15 см. Они кружились в воздухе и очень медленно поднимались вверх, удаляясь от стены дома. **Было впечатление, что они связаны между собой ниткой**. Они не были перламутровыми, как мыльные пузыри. Прошло несколько минут. Шарики двигались в сторону соседнего дома, находящегося на расстоянии около 50 м. Они поднялись выше крыши соседнего дома и полетели в сторону Самары, всё так же **как бы связанные между собой** [98, С. 238]. **8.** 8 марта 1999 года в 22 часа на Хорошевском шоссе вблизи Москвы наблюдался жёлтый объект из **трёх крупных светящихся шаров**, летевший с севера на юг. Объект совершал хаотические движения и покачивания. Складывалось впечатление, что шары, находящиеся на одной линии, сходились и расходились друг с другом. Наблюдение длилось 3 минуты [98, С. 375]. **9.** 25 августа 2002 года в Думиничском районе Калужской области в 18 часов с неба спустился **объект в виде трёх ярких огней**. Объект завис над деревьями и выжег на верхушках деревьев треугольный след размером 22×25 м. При этом слышался сильный гул. Местные жители, прибежавшие на это место, обнаружили треугольник выжженной земли и верхушек сосен. На повреждённых деревьях выступила смола [98, С. 442].

С появлением Интернета и широкого распространения видеокамер, цифровых фотоаппаратов и смартфонов появилась возможность получения и оперативной публикации видеоматериалов о таких мимолётных явлениях, как шаровые молнии.

На рис. 1 показан кадр видеofilmа о движении двух шаровых молний над пшеничным полем [99]. Согласно фильму, шаровые молнии беспорядочно движутся (вероятно, по причине осцилляции напряжённости электрического поля атмосферы), однако расстояние между ними остаётся неизменным. Они как бы связаны невидимой нитью, то есть обладают свойством, отмеченным в некоторых вышеприведённых описаниях наблю-

дений шаровых молний (случаи 1, 2, 4, 5, 7). Отношение расстояния между молниями к их диаметру примерно равно 15.



Рис. 1. Кадр видеофильма о движении пары шаровых молний над пшеничным полем [23].

Исследование сил, действующих в системе заряженных тел

Как уже говорилось, единственным предположением о свойстве шаровых молний, которое мы хотим привлечь для объяснения «группового» поведения изучаемых объектов, является наличие у них нескомпенсированного электрического заряда. Согласно электродинамической модели шаровой молнии, именно наличие у неё положительного заряда позволяет построить устойчивую систему из заряженных плазмидов, движущихся внутри оболочки из диэлектрика [33, 83–87]. Одноимённый заряд шаровых молний вызывает их отталкивание по закону Кулона. Однако в группе шаровых молний могут действовать силы, препятствующие их расталкиванию. Это – «градиентная» сила, возникающая благодаря поляризации вещества шаровой молнии, и силы, связанные с постепенным стеканием заряда шаровой молнии в атмосферу. Наша цель – оценить вклад этих сил в взаимодействие групп шаровых молний и попытаться найти условия существования устойчивых конфигураций из заряженных объектов.

Для моделирования взаимодействия шаровых молний мы провели опыты по измерению силы отталкивания одноимённо заряженных шаров. Для этого на медной проволочке диаметром 0,2 мм подвешивались два или три шарика, и на них подавался положительный потенциал. Заметим, что мы не ставили перед собой цели точной проверки закона Кулона. Как сказано выше, он нарушается даже при взаимодействии идеально проводящих металлических сфер. Более того, мы стремились максимально приблизить свою модель к «конст-

рукции» шаровой молнии, которая, по нашим представлениям, состоит из заряженного энергетического ядра и диэлектрической оболочки [33, 83–87]. Поэтому в качестве модели шаровой молнии нами были выбраны полые пластмассовые шарики для настольного тенниса диаметром $2a = 4$ см и массой $m_b = 2,72$ г. Масса подвески – медной проволоочки длиной $l = 57$ см – была равна $m_t = 0,43$ г. Шарики располагались в центре цилиндрического электрода из алюминиевой фольги диаметром 70 см и высотой 10 см, на который подавалось отрицательное напряжение.

Рассмотрим поведение двух одинаковых шариков, подвешенных в одной точке на двух проволочках одинаковой длины. При подаче на точку крепления проволочек электрического потенциала шарики заряжаются и расходятся. На некотором расстоянии друг от друга шарики останавливаются и остаются в этом положении – положении равновесия. Для того чтобы система тел находилась в равновесии, необходимо, чтобы сумма сил (и/или моментов сил), приложенных к этим телам, была равна нулю. Воспользуемся этим законом для анализа сил, действующих на заряженные шарики. Очевидно, что основными силами, действующими на нити и шарики, являются сила тяжести, стремящаяся сблизить шарики друг с другом, и сила кулоновского отталкивания, стремящаяся раздвинуть шарики на как можно большее расстояние. Вообще говоря, задача о взаимодействии двух одинаково заряженных проводящих, а тем более, диэлектрических шаров, не является такой простой, как могло бы показаться на первый взгляд, и до сих пор активно обсуждается в литературе [94–98]. Однако найдено, что заметное отличие силы взаимодействия шаров от кулоновской происходит лишь в случае сильного различия диаметров шаров и при очень малых расстояниях между ними. В нашем случае использовались шары одинакового размера, находящиеся на довольно большом расстоянии друг от друга. Поэтому мы не ставили перед собой задачи точного исследования этой проблемы, и могли позволить себе там, где это было возможно, сделать некоторые допущения и упрощения.

В эксперименте определялась зависимость равновесного расстояния между двумя шариками от приложенного к ним потенциала. Так как масса проволоочки много меньше массы шарика, а длина плеча приложения силы тяжести проволоочки в два раза меньше длины плеча приложения силы тяжести шарика, при расчётах мы пренебрегали весом проволоочки и учитывали только вес шарика. Пусть в равновесном положении проволоочка и шарик отклонены от вертикали на угол α . Тогда расстояние R между центрами шариков будет равно

$R = 2(l+a) \times \sin \alpha$, где l – длина нити, a – радиус шарика. Проекция силы тяжести на перпендикуляр к проволочке определяет величину силы (или момента силы), которая стремится сблизить шарики друг с другом. Величина этой проекции равна $F_{g\perp} = mg \times \sin \alpha = mgR/2(l+a)$. (Здесь g – ускорение свободного падения). Таким образом, измерение равновесного расстояния между шариками позволяет определить силу, которая стремится приблизить шарики друг к другу.

Силой, расталкивающей шарики, является кулоновская сила. Допустим, что весь заряд шариков Q сосредоточен в их центрах, то есть будем считать заряды точечными. В этом случае сила F_c кулоновского отталкивания зарядов, расположенных на расстоянии R друг от друга, равна $F_c = Q^2/(4\pi\epsilon_0 R^2)$. (Здесь ϵ_0 – электрическая постоянная в системе СИ, $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ Ф/м). При изменении потенциала, приложенного к шарикам, заряд шариков будет изменяться по закону $Q = CU$ (электрическая ёмкость уединённого шара радиусом a равна $C = 4\pi\epsilon_0 a$), и, соответственно, сила F_c :

$$F_c = \frac{(CU)^2}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{4\pi\epsilon_0 a^2 U^2}{R^2}. \quad (1)$$

В создание силы, расталкивающей шарики, вносит вклад и сила отталкивания заряженных проволочек. Для оценки величины этой силы мы воспользовались следующей процедурой. Каждая проволочка, несущая заряд q , была мысленно разделена на k равных отрезков длиной $\Delta l = l/k$. Заряд каждого отрезка q/k считался сосредоточенным в его центре, и учитывалось взаимодействие этого заряда со всеми зарядами второй проволочки. Заряд проволочки определялся как произведение её ёмкости C_w на потенциал U : $q = C_w U$. Ёмкость проволочки вычислялась по формуле для ёмкости цилиндрического конденсатора длиной l м с радиусом внутреннего цилиндра $s = 0,1$ мм и радиусом внешнего цилиндра $p \approx 50$ см: $C_0 = 2\pi\epsilon_0 / \ln(p/s) = 6,53 \times 10^{-12}$ Ф. Электрическая ёмкость проволочки длиной $l = 0,57$ м равна $C_w = C_0 l = 3,72 \times 10^{-12}$ Ф, а её заряд $q = C_w U = 3,72 \times 10^{-12} \times U$ Кл. Сравнив сумму моментов сил, действующих на заряженные проволочки, с моментом силы, которая расталкивает заряженные шарики, мы нашли, что эти величины практически совпадают друг с другом. Различие между ними составляло не более 10 %. Поэтому можно считать, что силы расталкивания шариков и проволочек одинаковы, следовательно, с учётом влияния проволочек мы можем для положения равновесия записать выражение:

$$F_{c\Sigma} = \frac{8\pi\epsilon_0 a^2 U^2}{R^2}. \quad (2)$$

Если предположить, что на взаимное расположение шариков влияют только силы $F_{g\perp}$ и $F_{c\Sigma}$, то в состоянии равновесия эти силы должны уравновешивать друг друга, и, соответственно, проекции этих сил должны быть равны по величине, но направлены в противоположные стороны: $F_{g\perp} = mg \times \sin \alpha = F_{c\Sigma\perp} = F_{c\Sigma} \cos \alpha$ или $mg \times \tan \alpha = F_{c\Sigma}$. Отсюда получаем выражение:

$$mg \times \frac{R}{2 \left((l+a)^2 - \frac{R^2}{4} \right)^{1/2}} = \frac{8\pi\epsilon_0 a^2 U^2}{R^2}. \quad (3)$$

Если считать, что шарики отклоняются от вертикали не слишком сильно и расстояние R между их центрами меньше длины проволочки ($R \ll l$), то выражение (3) можно упростить:

$$mg \times \frac{R}{2(l+a)} = \frac{8\pi\epsilon_0 a^2 U^2}{R^2}, \quad (4)$$

и отсюда найти равновесное расстояние R_{eq} между центрами шариков:

$$R_{eq} = \left(\frac{16\pi\epsilon_0 a^2 (l+a) U^2}{mg} \right)^{1/3}. \quad (5)$$

Подставляя R_{eq} в выражение (2), можно найти зависимость силы кулоновского отталкивания шариков в положении равновесия $F_{c\Sigma-req}$ от величины приложенного к шарикам потенциала U :

$$F_{c\Sigma-req} = k U^{2/3}, \quad (6)$$

где $k = 2^{1/3} (\pi\epsilon_0)^{1/3} \times (amg)^{2/3} \times (l+a)^{-2/3}$. Подставляя в (6) значения a , m , и l , получаем $k = 3,65 \times 10^{-6}$ Н \times В $^{-2/3}$ и $F_{c\Sigma-req} = 3,65 \times 10^{-6} \times U^{2/3}$ Н.

На рис. 2 верхняя кривая представляет зависимость силы $F_{c\Sigma-req}$ от потенциала U , построенную по формуле (6). Точками показана экспериментально найденная зависимость величины проекции силы тяжести на перпендикуляр к проволочке от потенциала шариков. При нахождении этой зависимости использовались пары пластмассовых полых шариков, обёрнутых алюминиевой фольгой, шариков с напылённой на них алюми-

ниевой плёнкой или шарики без покрытия. В пределах ошибки измерений (около 10 %) силы, действующие на шарики с разным покрытием при одинаковом значении потенциала, оказались одинаковыми. Видно, что рассчитанная сила кулоновского отталкивания шариков $F_{c\Sigma-eq}$ заметно превосходит силу притяжения шариков за счёт силы тяжести. Одной из причин различия результатов эксперимента и теоретических оценок может быть несоответствие принятых нами допущений и реального распределения зарядов в нашей системе. Во-первых, центры зарядов шариков не расположены точно в центрах шариков (например, очевидно, что при касании шариков их заряды смещены к их краям). Во-вторых, использованная нами формула связи заряда шара с приложенным к нему потенциалом справедлива только для уединённых шаров. Однако учёт этих поправок всё же не может согласовать результаты экспериментов и расчётов и приводит к выводу, что должна существовать ещё какая-то сила, которая стремится сблизить шарики.

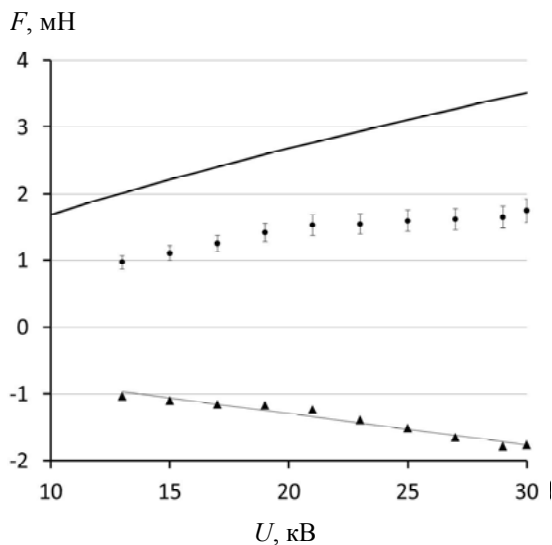


Рис. 2. Зависимость силы отталкивания двух полых пластмассовых шариков диаметром 4 см от потенциала. Верхняя кривая — кулоновская сила $F_{c\Sigma-eq}$ (расчёт). Точки — реально измеренная зависимость силы отталкивания от напряжения $F_{exp}(U)$. Нижняя кривая — разность сил $(F_{c\Sigma-eq} - F_{exp})$.

Нижняя кривая $(F_{c\Sigma-eq} - F_{exp})$ представляет собой зависимость от напряжения U величины силы, направленной противоположно действию кулоновской силы. Силой, ослабляющей действие кулоновской силы, может быть «градиентная» сила, обусловленная поляризацией вещества шарика в электрическом поле, создаваемом зарядом соседнего шарика. Например, если заряд первого шарика положительный, то на ближайшей к нему

поверхности второго шарика будут преобладать отрицательные заряды, а положительные заряды «выдаются» на дальнюю поверхность. В результате шарик приобретёт дипольный момент D , равный произведению его диаметра $2a$ на модуль зарядов $(+e)$ и $(-e)$, находящихся на его противоположных сторонах: $D = e2a$. Так как электрическое поле, создаваемое первым зарядом Q , в местах нахождения зарядов $(+e)$ и $(-e)$ разное, то возникает сила, заставляющая второй шарик приближаться к первому. Величина этой силы F_{gr} :

$$F_{gr} = -D \operatorname{grad} E. \quad (7)$$

Знак $(-)$ означает, что эта сила направлена против направления увеличения расстояния R . Приняв зависимость $E(R)$ равной зависимости напряжённости электрического поля от расстояния для уединённого заряда Q (т. е. $E = Q/4\pi\epsilon_0 R^2$), находим:

$$F_{gr} = -D 2Q/(4\pi\epsilon_0 R^3). \quad (8)$$

(При наличии заряда у второго шара форма электрического поля первого шара и, соответственно, градиент этого поля будут другими). Подставляя в формулу (8) $Q = 4\pi\epsilon_0 aU$ и выражение (5) для R , получаем формулу:

$$F_{gr} = -\frac{Dmg}{8\pi\epsilon_0 aU(l+a)}. \quad (9)$$

Будем считать, что нижняя кривая на рис. 2 — это, действительно, зависимость градиентной силы F_{gr} от потенциала U . Согласно рисунку, эту зависимость можно представить прямой $F_{gr} = A + B \times U$. Поскольку $F_{gr} \sim D/U$, это означает, что должна наблюдаться зависимость $D \sim U^2$.

Поиск новой сближающей силы

Однако градиентная сила не может стать причиной полной компенсации силы кулоновского расталкивания зарядов. Во-первых, как мы видим, она меньше кулоновской, и, во-вторых, она спадает с расстоянием R быстрее, чем кулоновская сила. Поэтому для объяснения причин существования устойчивых конфигураций заряженных тел мы должны обратиться к поиску другой силы, заставляющей заряды сближаться. Эта сила должна уменьшаться с расстоянием R медленнее кулоновской силы. Мы предположили, что причиной появления этой силы может стать стекание заряда тела в воздух и отталкивание тела от образовавшегося облака зарядов. Для проверки этой идеи мы

провели измерение силы, действующей на заряженный полый пластмассовый шарик, в одну сторону которого было воткнуто пять игл остриём наружу. При повышении потенциала шарик, подвешенный на проволочке, отклонялся от вертикали в сторону, противоположную той, где были расположены иглы. На рис. 3 показано, как меняется сила, действующая на шарик с иглами, при увеличении его потенциала U . Видно, что при изменении потенциала шара в 2 раза (с 14 кВ до 28 кВ) сила, действующая на него, изменяется в 8 раз (от 0,1 мН до 0,8 мН). Причина возникновения обсуждаемой силы – отталкивание заряда шарика от облака зарядов, покинувших шарик. Действительно, из-за трения о воздух эти заряды не сразу покидают пространство вблизи шара, а образуют вблизи него нечто вроде заряженного облака. Знак заряда этого облака совпадает со знаком заряда шара. При близком расположении двух одноимённых заряженных шаров их заряды будут стекать наружу в направлении прямой, соединяющей центры шаров. Это приведёт к образованию облаков зарядов на внешней стороне системы двух зарядов. Отталкивание заряженных шаров от этих облаков создаст силу, направленную противоположно кулоновской силе, стремящейся раздвинуть шары. При некотором расстоянии между шарами, когда сила кулоновского отталкивания станет довольно слабой, эта новая «облачная» сила может остановить «разбегание» одноимённых зарядов и привести к созданию устойчивой конфигурации из двух, трёх (и так далее) шаров. Обратим внимание на то, что в этом случае мы не нарушаем вывода теоремы Ирншоу, так как мы имеем дело с зарядами, погружёнными в среду, свойства которой были изменены этими же зарядами. Напомним, что такой же «механизм» образования «подушки» зарядов между шаровой молнией и проводником позволяет объяснить её левитацию над проводящими поверхностями [100, 101].

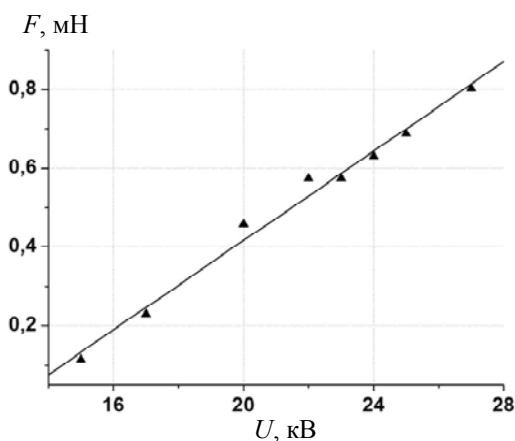


Рис. 3. Зависимость силы F , действующей на шарик с иглами, от его потенциала U .

Рассмотрим, как действуют на заряд шаровой молнии ионы, «просочившиеся» сквозь изолятор между её ядром и оболочкой и попавшие в атмосферу. Эти ионы имеют тот же знак заряда, что и остальной заряд шаровой молнии, поэтому они отталкивают её от себя. Поскольку шаровая молния находится в электрическом поле второй шаровой молнии, это ионное облако расположено снаружи шаровых молний на линии, соединяющей центры шаров. Шаровые молнии обычно появляются во время дождя во влажной атмосфере. В условиях высокой влажности парциальное давление насыщенных паров воды при 24 °С равно 3×10^3 Па, что составляет 3 % нормального атмосферного давления $P_a = 10^5$ Па [102, С. 254]. Это значит, что в одном кубическом метре воздуха содержится 8×10^{21} молекул воды. Эти молекулы слипаются в капли (кластеры). Их размер постоянно растёт и достигает критической величины $r_{0m} = 1,8 \times 10^{-6}$ м, при которой под действием силы тяжести они падают на землю [103, С. 138, 154]. Число n молекул в кластере воды с радиусом r_0 равно $n = (r_0/r_w)^3$, где $r_w = (3m_m/4\pi\rho)^{1/3}$ – радиус Вигнера-Зейтца [104]. (Здесь m_m – масса молекулы, ρ – плотность вещества). Для воды $\rho = 10^3$ кг/м³, $m_m = \mu/N_A = 18 \times 10^{-3} / (6,022 \times 10^{23})$ кг = 3×10^{-26} кг, и, следовательно, $r_w = 1,92 \times 10^{-10}$ м (использовано обозначение моля воды μ и числа Авогадро N_A).

Проследим за судьбой иона, «просочившегося» сквозь оболочку шаровой молнии. Этот ион непрерывно сталкивается с молекулами воздуха и с водяными кластерами. При прилипании иона к молекуле или капельке выделяется энергия. Для того чтобы отвести эту энергию от системы столкнувшихся частиц, необходимо, чтобы в момент соударения в ней присутствовало третье тело. Вероятность этого события (тройного столкновения) невелика, поэтому процесс прилипания ионов к молекулам воздуха идёт с малой скоростью. В то же время вероятность прилипания иона к водяному кластеру близка к единице [103, С. 109]. Причиной этого служит способность кластера перераспределять избыточную энергию между многими молекулами, из которых он состоит. Поэтому можно ожидать, что ион, покинувший шаровую молнию, в конце концов, прилипнет к водяному кластеру.

Найдём минимальное количество однократно заряженных кластеров, необходимое для транспортировки ионов, стекающих с шаровой молнии. Пусть полный заряд шаровой молнии равен $Q = 10^{-3}$ Кл, а время её жизни – $\tau = 10^2$ с. В этом случае ионный ток $I = Q/\tau = 10^{-5}$ А или $i = 6,25 \times 10^{13}$ элементарных зарядов в секунду. Примем среднюю скорость заряженных кластеров равной 1 м/с. Будем считать, что ионы движутся внутри цилиндра радиусом 0,1 м (что равно радиусу типичной

шаровой молнии). За одну секунду ионы займут объём $V = 3,14 \times 10^{-2} \text{ м}^3$, а плотность зарядов (кластеров) в цилиндре длиной 1 метр будет $\rho_c = i/V = 2 \times 10^{15} \text{ м}^{-3}$. Таким образом, для обеспечения тока $I = 10^5 \text{ А}$ необходимо, чтобы плотность заряженных кластеров воды была не меньше найденной величины. В качестве примера рассмотрим случай, когда перенос заряда осуществляется кластерами с числом молекул воды $n = 10^4$. Радиус такого кластера $r_0 = r_w/n^{1/3} = 4,14 \times 10^{-9} \text{ м}$, его поперечное сечение $\sigma = \pi r_0^2 = 5,37 \times 10^{-17} \text{ м}^2$. Масса кластера из 10^4 молекул воды равна $m_c = 3 \times 10^{-22} \text{ кг}$. В сильном электрическом поле E заряженные кластеры движутся в воздухе со скоростью [103, С. 68]:

$$v_{dr} = (eE / m_c N_a \sigma)^{1/2}. \quad (10)$$

Здесь $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$ – элементарный заряд иона, m_c – масса кластера, σ – поперечное сечение кластера. Подставляя в эту формулу $m_c = 3 \times 10^{-22} \text{ кг}$, $\sigma = 5,37 \times 10^{-17} \text{ м}^2$, а также величину плотности воздуха $N_a = 2,687 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$, получаем $v_{dr} = 6,11 \times 10^{-4} (E)^{1/2} \text{ м/с}$. Для изолированного шара, несущего заряд $Q = 10^{-3} \text{ Кл}$, $E = 8,99 \times 10^6 / R_{cl}^2$. На расстоянии 1 м от центра шара напряжённость электрического поля $E = 8,99 \times 10^6 \text{ В/м}$, а скорость дрейфа однозарядного кластера из 10^4 молекул воды равна 1,83 м/с (что близко к принятой нами величине предполагаемой скорости движения кластера 1 м/с).

В заключение оценим, достаточно ли будет в воды в воздухе, чтобы в одном кубическом метре оказалось не меньше 2×10^{15} кластеров из 10^4 молекул воды. Как мы нашли выше, в одном кубическом метре воздуха при температуре $24 \text{ }^\circ\text{С}$ может находиться 8×10^{21} молекул воды. Этого хватит для образования $N_c = 8 \times 10^{21} / 10^4 = 8 \times 10^{17}$ кластеров,

так что условие наличия минимального числа кластеров ($2 \times 10^{15} \text{ м}^{-3}$) выполняется с большим запасом.

Зависимость скорости дрейфа кластеров из 10^4 молекул воды от расстояния R_{cl} до центра заряда $Q = 10^{-3} \text{ Кл}$ описывается формулой $v_{dr} = 1,832/R_{cl} \text{ (м/с)}$. Вблизи поверхности шара при $R_{cl} = 0,2 \text{ м}$ $v_{dr} = 9,16 \text{ м/с}$, а при $R_{cl} = 10 \text{ м}$ $v_{dr} = 0,18 \text{ м/с}$. Если разбить пространство около шаровой молнии вдоль линии, соединяющей центры двух шаров, на отрезки одинаковой длины ΔR_{cl} , можно заметить, что плотность зарядов n в участках вблизи поверхности шаровой молнии больше, чем плотность зарядов в участках, удалённых от шаровой молнии. Это связано с тем, что скорость прохождения заряженными кластерами отрезков ΔR_{cl} уменьшается с ростом R_{cl} как A/R_{cl} . В результате плотность зарядов в различных ячейках объёмом $\Delta V_{cl} = \pi a^2 \Delta R_{cl}$ меняется как $n \sim 1/v_{dr} \sim R_{cl}$. Здесь a – радиус «столба», в котором находятся заряженные кластеры, принят равным радиусу шаровой молнии. Количество зарядов в ячейке равно $N = n \Delta V_{cl} = \pi a^2 R_{cl} \Delta R_{cl}$. Приписав каждому заряду величину $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$, находим заряд отдельной ячейки, находящейся на расстоянии R_{cl} от центра шаровой молнии, $eN = e \pi a^2 R_{cl} \Delta R_{cl}$. На рис. 4 показана схема такого «накопления» зарядов при удалении «ионного облака» от центра шаровой молнии. Сила, с которой заряды, находящиеся в ближней зоне, действуют на заряд шаровой молнии, больше, чем сила действия зарядов в дальних зонах. Однако первых – немного, а вторых – много. Сила взаимодействия заряда ячейки с зарядом Q шаровой молнии выражается формулой:

$$\Delta F_{cl}(R_{cl}) = \frac{eNQ}{4\pi\epsilon_0 R_{cl}^2} = \frac{ea^2Q}{4\epsilon_0 R_{cl}} \Delta R_{cl} \equiv A \frac{\Delta R_{cl}}{R_{cl}}. \quad (11)$$

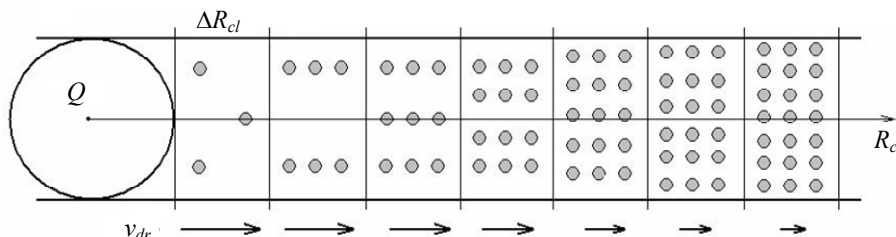


Рис. 4. Рост плотности зарядов, эмитированных с поверхности шаровой молнии, при удалении R_{cl} от центра её заряда. Считается, что плотность зарядов при росте расстояния R_{cl} увеличивается по закону $n \sim 1/v_{dr} \sim R_{cl}$.

Устремляя ΔR_{cl} к нулю и интегрируя (11) от R_{min} до R_{max} , получаем выражение:

$$F_{cl} = \int_{R_{min}}^{R_{max}} A \frac{dR_{cl}}{R_{cl}} = A \ln |R_{cl}|_{R_{min}}^{R_{max}}. \quad (12)$$

В качестве нижнего предела интегрирования в формуле (12) может быть выбран радиус шаровой молнии a , а верхним пределом R_{\max} может быть некоторая величина, сопоставимая с геометрическими размерами системы (например, с расстоянием от шаровой молнии до земли). Обратим внимание на то, что величина R_{cl} , используемая в формулах (11) и (12), это не то же, что величина R в формулах (4) и (8), представляющая собой расстояние между центрами двух шаровых молний. Сила $F_{cl} = Z (\ln R_{\max} - \ln a)$ не зависит прямо от расстояния R_{cl} . Эта сила может быть постоянной величиной, она может также уменьшаться с ростом R_{cl} по какому-то закону. На рис. 5 показано, как изменяется с расстоянием R между центрами двух шаровых молний, обладающих зарядом $Q = 10^{-3}$ Кл, результирующая сумма сил, действующих на заряды. F_c – сила кулоновского расталкивания зарядов ($F_c = Q^2/4\pi\epsilon_0 R^2$), F_{grad} – градиентная сила ($F_{grad} = -(D \times 2Q)/(4\pi\epsilon_0 R^3)$, принято $D = 2,5 \times 10^4$ Кл м), F_{cl} – сила отталкивания заряда шаровой молнии от заряда кластерного облака, принято $F_{cl} = \text{const} = 1,5 \times 10^3$ Н. Для наглядности (построения зависимости в виде «потенциальной ямы») представлена зависимость от R квадрата суммы сил $(F_c - F_{grad} - F_{cl})^2$. Минимум «потенциальной ямы» соответствует положению равновесия сил. Для принятого случая двух зарядов величиной $Q = 10^{-3}$ Кл равновесное положение наблюдается при расстоянии между ними $R_{\min} \approx 2$ м. Это сопоставимо с расстоянием между парой шаровых молний среднего размера (диаметром около 20 см), показанных на рис. 1.

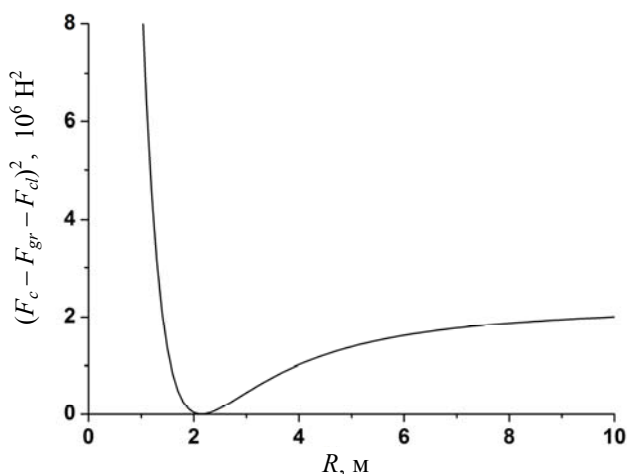


Рис. 5. Зависимость квадрата суммы сил $(F_c - F_{gr} - F_{cl})^2$ от расстояния R между двумя шаровыми молниями с зарядом каждой $Q = 10^{-3}$ Кл. F_c – сила кулоновского расталкивания зарядов, F_{gr} – градиентная сила, F_{cl} – сила отталкивания заряда Q от заряда кластерного облака. Сила F_{cl} считается не зависящей от расстояния R .

Заключение

Подводя итог сказанному, можно утверждать, что конфигурации из нескольких шаровидных светящихся объектов, неоднократно наблюдавшихся в природе, с большой долей вероятности могут быть группами шаровых молний. Устойчивое положение шаровых молний в группе объясняется наличием у них нескомпенсированных (вероятно, положительных) электрических зарядов. Кулоновское расталкивание одноимённых зарядов шаровых молний заставляет их расходиться на некоторое расстояние. Бесконечному расхождению зарядов препятствует сила отталкивания шаровых молний от облаков заряженных кластеров, находящихся снаружи группы шаровых молний. Эта сила направлена противоположно силе кулоновского расталкивания и зависит от скорости потери заряда шаровой молнии. По указанному принципу может образоваться система из двух, трёх, четырёх и т. д. шаровых молний. Изложенное здесь качественное описание характера сил, действующих в группе шаровых молний, несомненно, нуждается в более строгой количественной оценке. Существенно то, что шаровые молнии (и конфигурации шаровых молний) являются динамическими системами. Непрерывная потеря электрического заряда приводит к уменьшению силы кулоновского расталкивания зарядов и, соответственно, к уменьшению плотности зарядов в «кластерном облаке». Ясно, что время, в течение которого может поддерживаться равновесие сил в этих системах, ограничено.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбаков Б. А. Язычество древних славян. – М.: Наука, 1994.
2. Arago F. J. Sur le Tonnere. Annuaire au Roi par le Bureau des Longitudes. – Notices Scientifiques. 1838.
3. Араго Ф. Громъ и молния. – Санктпетербург: Императорская Академия наук. 1859.
4. Brand W. Der Kugelblitz. – Hamburg: Verlag von Henry Grand, 1923.
5. Леонов Р. А. Загадка шаровой молнии. – М.: Наука, 1965.
6. McNally J. R. Preliminary Report on ball lightning. – OAK Ridge Nat. Lab. No. 3938. 1966.
7. Rayle W. D. Ball Lightning Characteristics. – NASA Techn. Note D-3188, 1966.
8. Дмитриев М. Т. // Природа. 1967. № 6. С. 98.
9. Зильберг П. Шаровая молния. Проблемы электричества атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1969.
10. Дмитриев М. Т. // Природа. 1971. № 6. С. 50.
11. Дмитриев М. Т. // Природа. 1973. № 4. С. 60.
12. Сингер С. Природа шаровой молнии. – М.: Мир, 1973. – 239 с. [S. Singer. The Nature of Ball Lightning. Plenum Press, New York, 1971].
13. Charman W. N. // Physics Reports. 1979. Vol. 54. No. 4. P. 263.

14. *Имянитов И., Тихий Д.* За гранью законов науки. – М.: Атомиздат, 1980.
15. *Барри Дж.* Шаровая молния и чёточная молния. – М.: Мир, 1983. – 288 с. [J. D. Barry. Ball Lightning and Bead Lightning. Plenum Press, New York, 1980].
16. *Лихошёрстных Г. У.* // Техника – молодёжи. 1983. № 3. С. 38.
17. *Smirnov B. M.* // Physics Reports. 1987. Vol. 152. No. 4. P. 178.
18. *Ohtsuki Y.-H.*, ed. Science of Ball Lightning (Fire Ball). – Singapore: World Scientific, 1989.
19. *Григорьев А. И.* Огненные убийцы. Загадки и тайны шаровой молнии. – Ярославль:Дебют, 1990.
20. *Egely G.* Analysis of Hungarian Ball Lightning Observations. Progress in Ball Lightning Research. Ed. A. G. Keul. Proc. VIZOTUM Project. Salzburg, Austria, 1993.
21. *Лихошёрстных Г. У.* Аномальные случаи встреч с шаровой молнией. Шаровая молния в лаборатории. – М.: Химия, 1994. С. 218.
22. *Синкевич О. А.* // Теплофизика высоких температур, 1997. Т. 35. № 4. С. 651; 1998. Т. 36. № 6. С. 968.
23. *Стаханов И. П.* О физической природе шаровой молнии. – М.: Научный мир, 1996.
24. *Turner D. J.* // Physics Reports. 1998. Vol. 293. P. 1.
25. *Stenhoff M.* Ball Lightning. An Unsolved Problem in Atmospheric Physics. – New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999.
26. *Donoso J. M., Trueba J. L., Ranada A. F.* // The Scientific World Journal. 2006. No. 6. P. 254.
27. *Григорьев А. И.* Шаровая молния. – Ярославль: Изд-во ЯрГУ им. П. Г. Демидова, 2006.
28. *Nikitin A. I.* // J. Russian Laser Res. 2004. Vol. 25. No. 2. P. 169.
29. *Никитин А. И.* // Химическая физика, 2006. Т. 25. № 3. С. 18.
30. *Bychkov V. L., Nikitin A. I., Dijkhuis G. C.* Ball Lightning Investigations. In: The Atmosphere and Ionosphere. Dynamics, Processes and Monitoring. Eds. V. L. Bychkov, G. V. Golubkov, A. I. Nikitin. Dordrecht: Springer, 2010. P. 201–373.
31. *Bychkov V. L., Nikitin A. I.* Ball Lightning: A New step in Understanding. In: The Atmosphere and Ionosphere. Elementary Processes, Monitoring, and Ball Lightning. Eds. V. L. Bychkov, G. V. Golubkov, A. I. Nikitin. Cham: Springer, 2014. P. 201–367.
32. *Goodlet B. L.* // IEE Journ. London, 1937. Vol. 81. P. 1.
33. *Nikitin A. I., Bychkov V. L., Nikitina T. F., Velichko A. M.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2014. Vol. 42. No. 12. P. 3906.
34. *Ohtsuki Y.-H., Ofuruton H.* // Nature. 1991. Vol. 350. P. 139.
35. *Golka R. K.* // Journ. of Geophys. Res. 1994. Vol. 99. P. 10679.
36. *Abrahamson J., Dinnis J.* // Nature. 2000. Vol. 403. P. 519.
37. *Ofuruton H., Kondo N., Katogawa M., Aoki M., Ohtsuki Y.-H.* // Journ. of Geophys. Res. 2001. Vol. 106. No. D12. P. 12,376.
38. *Abrahamson J.* // Philosophical Trans. of the Royal Soc. A. 2002. Vol. 360. P. 61.
39. *Jerby E., Dikhtyar V., Actushev O., Groszlick U.* // Science. 2002. Vol. 298. P. 587.
40. *Dikhtyar V., Jerby E.* // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 96. P. 045002-1.
41. *Meir Y., Jerby E., Barkay Z., Ashkenazi D., Mitchel J. B., Narayanan T., Eliaz N., LeGarrec J.-L., Sztucki M., Mescheryakov O.* // Materials. 2013. Vol. 6. P. 4011.
42. *Bychkov V. L., Bychkov A.V., Stadnik S. A.* // Physica Scripta. 1996. Vol. 53. P. 749.
43. *Emelin S. E., Semenov V. S., Bychkov V. L., Belisheva N. K., Kovshik A. P.* // Tech. Phys. 1997. Vol. 42. No. 3. P. 269.
44. *Bychkov V. L.* // Phil. Trans. of Royal Soc. Lond. A. 2002. Vol. 360. P. 37.
45. *Lazarouk S. K., Dolbik A. V., Labunov V. A., Borisenko V. E.* // JETP Lett. 2006. Vol. 84. P. 581.
46. *Paiva G. S., Pavao A. C., de Vasconcelos E. A., Mendes O., da Silva E. F.* // Phys Rev. Lett. 2007. Vol. 98. P. 048501.
47. *Bychkov V. L.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. Vol. 38. P. 3289.
48. *Klimov A. I., Kutalaliev V. A.* Long-lived Dusty Plasmoid. In: Proc. 11th Int. Symp. on Ball Lightning. Zelenogradsk, Russia. 21–27 June 2010. (Eds. V. L. Bychkov, A. I. Nikitin). P. 98–100.
49. *Климов А., Молевич Н., Моралёв И., Заверишинский И.* // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. № 1. С. 157.
50. *Klimov A. I.* Votrex Plasmoids Created by High-Frequency Discharges. In: The Atmosphere and Ionosphere. Elementary Processes, Discharges and Plasmoids. Eds. V. L. Bychkov, G. V. Golubkov, A. I. Nikitin. Dordrecht: Springer, 2012. P. 191–273.
51. *Пащина А. С., Климов А. И.* // Химическая физика. 2014. Т. 33. № 2. С. 78.
52. *Klimov A.* // J. Condensed Matter Nucl. Sci. 2016. Vol. 19. P. 1.
53. *Klimov A., Grigorenko A., Efimov A., Evstigneev N., Ryabkov O., Sidorenko M., Soloviev A., Tolkunov B.* // J. Condensed Matter Nucl. Sci. 2016. Vol. 19. P. 10.
54. *Emelin S. E., Bychkov V. L., Astafiev A. M., Kovshik A. P., Pirozersky A. L.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2012. Vol. 40. No. 12. P. 3162.
55. *Егоров А. И., Степанов С. И.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 12. С. 102.
56. *Шабанов Г. Д.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 4. С. 81.
57. *Егоров А. И., Степанов С. И., Шабанов Г. Д.* // УФН. 2004. Т. 174. № 1. С. 107.
58. *Шабанов Г. Д., Жеребцов О. М.* // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 1. С. 6.
59. *Шабанов Г. Д., Соколовский Б. Ю.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 6. С. 560.
60. *Juettner B., Noak S., Versteegh A., Fussman G.* Long-living Plasmoids from a Water Discharge at Atmospheric Pressure. In: Proc. 28th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. 2007. Prague, Czech Republic. P. 2229–2234.
61. *Versteegh A., Behringer K., Fantz U., Fussman G., Juettner B., Noak S.* // Plasma Sources Science and Technology. 2008. Vol. 17. P. 024014.
62. *Bostik W. H.* // Phys. Rev. 1956. Vol. 104. No. 2. P. 292.
63. *Bostik W. H.* // Phys. Rev. 1957. Vol. 106. No. 3. P. 404.
64. *Koloc P. M.* // Fusion Technology. 1989. Vol. 15. P. 1136.
65. *Власов А. Н.* // ЖЭТФ. 1999. Т. 97. Вып. 2. С. 468.
66. *Власов А. Н.* // Вестник Рязанского Государственного Радиотехнического Университета. 2013. № 1 (43). С. 90.
67. *Власов А. Н., Дубков М. В., Буробин М. А., Жимолоскин С. В., Маношкин А. Б.* // Вестник Рязанского Государственного Радиотехнического Университета. 2012. № 2 (39). С. 108.
68. *Орешко А. Г.* // Доклады Академии Наук. 2001. Т. 376. С. 183.
69. *Oreshko A. G.* // Journal of Physics: Conference Series. 2006. Vol. 44. P. 127.
70. *Oreshko A. G.* The Obtaining of the Ball Lightning and the Prospects of the Using it for Problem of Nuclear Fusion. In: Proc. 28th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. 2007. Prague, Czech Republic. P. 1884–1887.
71. *Oreshko A. G., Mavlydov T.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2011. Vol. 39. P. 2124.
72. *Dijkhuis G. C.* // Nature. 1980. Vol. 284. No. 5752. P. 150.
73. *Dijkhuis G. C.* // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. No. 5. P. 3516.
74. *Dijkhuis G. C.* // Physica B. 1996. Vol. 228. P. 144.
75. *Кулаков А. В., Румянцев А. А.* // Доклады Академии Наук СССР. 1991. Т. 320. № 5. С. 1103.

76. Dvornikov M. // Journ. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys. 2012. Vol. 89. P. 62.
77. Dvornikov M. // J. Plasma Physics. 2011. Vol. 77. Part 6. P. 749.
78. Dvornikov M. // Nonlinear Processes Geophys. 2013. Vol. 20. P. 581.
79. Dvornikov M. // Proc. Royal Soc. A. 2012. Vol. 468. P. 415.
80. Dvornikov M., Dvornikov S. Electron Gas Oscillations in Plasma. Theory and Applications. In: Advances in Plasma Physics Research. Vol. 5. Ed. F. Gerard. New York: Nova Science Publishers, 2007. P. 197.
81. Dvornikov M. // J. Phys. A: Math. Theor. 2013. Vol. 46. P. 045501.
82. Dvornikov M. // Physica Scripta. 2010. Vol. 81. P. 055502.
83. Никитин А. И. // Электричество. 1998. № 11. С. 14.
84. Никитин А. И. // Электричество. 2004. № 3. С. 29.
85. Никитин А. И., Величко А. М., Никитина Т. Ф. // Известия Академии Наук. Энергетика. 2008. № 2. С. 115.
86. Никитин А. И. // Химическая физика. 2006. Т. 25. № 3. С. 38.
87. Никитин А. И. // Вестник РАН. 2012. № 3. С. 15.
88. Баранов М. И. // Электричество. 2009. № 9. С. 15.
89. Баранов М. И. // Электротехника і Електромеханіка. 2008. № 6. С. 51.
90. Баранов М. И. // Электротехника і Електромеханіка. 2013. № 3. С. 42.
91. Смирнов Б. М. Проблема шаровой молнии. – М.: Наука, 1988. .
92. Mesheryakov O. // Nanoscale Res. Lett. 2007. Vol. 2. P. 319.
93. Саранин В. А. // УФН. 2002. Т. 172. № 12. С. 1449.
94. Саранин В. А., Майер В. В. // УФН. 2010. Т. 180. № 10. С. 1109.
95. Граценков С. И. // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 7. С. 13.
96. Nakajima Y., Sato T. // Journ. of Electrostatics. 1999. Vol. 45. P. 213.
97. Муниров В. Р., Филиппов А. В. // ЖЭТФ. 2013. Т. 114. № 5 (11). С. 931.
98. Чернобров В. А. Хроника визитов НЛЮ. – М.: Дрофа, 2003.
99. Crop Circles – Crossover From Another Dimension, 2006. Toftenes Multivision a. s. Oslo, Norway, 2006. www.toftenes.no.
100. Никитин А. И., Лейпунский И. О., Никитина Т. Ф. // Прикладная физика. 2010. № 2. С. 15.
101. Никитин А. И., Никитина Т. Ф., Величко А. М. // Электричество. 2010. № 3. С. 16.
102. Физические величины. Справочник. Ред. И. С. Григорьев и Е. З. Мейлихов. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
103. Смирнов Б. М. Процессы с участием малых частиц. – М.: Логос, 2012.
104. Wigner E. P., Seitz F. // Phys. Rev. 1934. Vol. 46. P. 509.

PACS: 52.80.Mg; 92.60.Pw

The conditions for existing the structures consisting the bodies with electric charge of the same sign

A. I. Nikitin, A. M. Velichko, T. F. Nikitina, A. I. Stepanov, and I. G. Stepanov

Talrose Institute for Energy Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences
Bld. 2, 38 Leninsky av., Moscow, 117829, Russia
E-mail: anikitin@chph.ras.ru

Received November 28, 2016

There are many evidences in literature and on the Web concerning observation in atmosphere of spherical luminous objects which form combined structures – pairs, triangles, squares and so on. The conditions for the existence of bounded structures consisting of charged bodies of the same sign have been theoretically and experimentally analyzed. It has been shown that Coulomb repulsion of such objects could be balanced by their repulsion from a peripheral cloud of charges with the same sign created as a result of the leakage of a part of the ball charge into the air.

Keywords: groups of natural luminous objects, interaction of charged bodies, leakage of charge.

REFERENCES

1. B. A. Rybakov, *Paganism of Ancient Slaves* (Nauka, Moscow, 1994) [in Russian].
2. F. J. Arago, *Sur le Tonnerre*. Annuaire au Roi par le Bureau des Longitudes (Notices Scientifiques, 1838. P. 221) [in French].
3. F. Arago, *Thunder and Lightning* (Imperial Academy of Sciences Publ., Sanktpeterburg, 1859) [in Russian].
4. W. Brand, *Der Kugelblitz* (Verlag von Henry Grand, Hamburg, 1923) [in German].
5. R. A. Leonov, *An Enigma of Ball Lightning* (Nauka, Moscow, 1965) [in Russian].
6. J. R. McNally, *Preliminary Report on Ball Lightning* (OAK Ridge Nat. Lab. No. 3938, 1966).
7. W. D. Rayle, *Ball Lightning Characteristics* (NASA Techn. Note D-3188, 1966).
8. M. T. Dmitriev, *Priroda*, No. 6. 98 (1967) [in Russian].
9. P. Silberg, *Ball Lightning*. In: Problems of Atmospheric Electricity (Gidrometeoizdat, Leningrad, 1969) [in Russian].
10. M. T. Dmitriev, *Priroda*, No. 6. 50 (1971) [in Russian].
11. M. T. Dmitriev, *Priroda*, No. 4. 60 (1973) [in Russian].
12. S. Singer, *The Nature of Ball Lightning* (Plenum Press, New York, 1971).
13. W. N. Charman, *Physics Reports*, **54** (4), 263 (1979).

14. I. Imyanitov and D. Tikhii, *Beyond Boundary of Science Laws* (Atomizdat, Moscow, 1980) [in Russian].
15. J. D. Barry, *Ball Lightning and Bead Lightning* (Plenum Press, New York, 1980).
16. G. U. Likhoshyorstnykh, *Technika – Molodyoji*, No. 3. 38 (1983).
17. B. M. Smirnov, *Physics Reports*, **152** (4), 178 (1987).
18. Y.-H. Ohtsuki, ed. *Science of Ball Lightning (Fire Ball)*. (World Scientific, Singapore, 1989).
19. A. I. Grigor'ev, *Fiery Killers. Enigmas and Mysteries of Ball Lightning*. (Debyut, Yaroslavl, 1990) [in Russian].
20. G. Egely, *Analysis of Hungarian Ball Lightning Observations*. In: *Progress in Ball Lightning Research*. Ed. A. G. Keul. Proc. VIZOTUM Project (Salzburg, Austria, 1993).
21. G. U. Likhoshyorstnykh, *Anomalous Cases of Ball Lightning Meeting*. In: *Ball Lightning in Laboratory*. (Khimia, Moscow, 1994). 218–223 [in Russian].
22. O. A. Sinkevich, *Teplofizika Vysokich Temperatur*, **35** (4), 651 (1997); **36** (6), 968 (1998).
23. I. P. Stakhanov, *About Physical Nature of Ball Lightning* (Nauchny Mir, Moscow, 1996) [in Russian].
24. D. J. Turner, *Physics Reports*, **293**, 1 (1998).
25. M. Stenhoff, *Ball Lightning. An Unsolved Problem in Atmospheric Physics* (Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999).
26. J. M. Donoso, J. L. Trueba, and A. F. Ranada, *The Scientific World Journal*, No. 6. 254 (2006).
27. A. I. Grigoriev, *Ball Lightning* (YarGU Publisher, Yaroslavl, 2006) [in Russian].
28. A. I. Nikitin, *J. Russian Laser Res.* **25** (2), 169 (2004).
29. A. I. Nikitin, *Khimicheskaya Fizika*. **25** (3), 18 (2006).
30. V. L. Bychkov, A. I. Nikitin, and G. C. Dijkhuis, *Ball Lightning Investigations*. In: *The Atmosphere and Ionosphere. Dynamics, Processes and Monitoring*. Eds. V. L. Bychkov, G. V. Golubkov, and A. I. Nikitin (Springer, Dordrecht, 2010) P. 201–373.
31. V. L. Bychkov, and A. I. Nikitin, *Ball Lightning: A New Step in Understanding*. In: *The Atmosphere and Ionosphere. Elementary Processes, Monitoring, and Ball Lightning*. Eds. V. L. Bychkov, G. V. Golubkov, and A. I. Nikitin. (Springer, Cham, 2014). P. 201–367.
32. B. L. Goodlet, *IEE Journ. London*, **81**, 1 (1937).
33. A. I. Nikitin, V. L. Bychkov, T. F. Nikitina, and A. M. Velichko, *IEEE Transactions on Plasma Science*. **42** (12), 3906 (2014).
34. Y.-H. Ohtsuki, and H. Ofuruton, *Nature*, **350**, 139 (1991).
35. R. K. Golka, *Journ. of Geophys. Res.*, **99**, 10679 (1994).
36. J. Abrahamson, and J. Dinnis, *Nature*. **403**, 519 (2000).
37. H. Ofuruton, N. Kondo, M. Kamogawa, M. Aoki, and Y.-H. Ohtsuki, *Journ. of Geophys. Res.*, **106** (D12), 12,376 (2001).
38. J. Abrahamson, *Philosophical Trans. of the Royal Soc. A*. **360**, 61 (2002).
39. E. Jerby, V. Dikhtyar, O. Actushev, and U. Groszlick, *Science*. **298**, 587 (2002).
40. V. Dikhtyar, and E. Jerby, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 045002-1 (2006).
41. Y. Meir, E. Jerby, Z. Barkay, D. Ashkenazi, J. B. Mitchell, T. Narayanan, N. Eliaz, J.-L. LeGarrec, M. Sztucki, and O. Mescheryakov, *Materials*. **6**, 4011 (2013).
42. V. L. Bychkov, A. V. Bychkov, and S. A. Stadnik, *Physica Scripta*. **53**, 749 (1996).
43. S. E. Emelin, V. S. Semenov, V. L. Bychkov, N. K. Belisheva, and A. P. Kovshik, *Tech. Phys.* **42** (3), 269 (1997).
44. V. L. Bychkov, *Phil. Trans. of Royal Soc. Lond. A*. **360**, 37 (2002).
45. S. K. Lazarouk, A. V. Dolbik, V. A. Labunov, and V. E. Borisenko, *JETP Lett.* **84**, 581 (2006).
46. G. S. Paiva, A. C. Pavao, E. A. de Vasconcelos, O. Mendes, and E. F. da Silva, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 048501 (2007).
47. V. L. Bychkov, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38**, 3289 (2010).
48. A. I. Klimov, and V. A. Kutalaliev, *Long-lived Dusty Plasmoid*. In: *Proc. 11th Int. Symp. on Ball Lightning*. Eds. V. L. Bychkov and A. I. Nikitin (Zelenogradsk, Russia. June 21–27, 2010) p. 98–100.
49. A. Klimov, N. Molevich, I. Moralyov, and I. Zavershinski, *Teplofizika Vysokich Temperatur*, **48** (1), 157 (2010).
50. A. I. Klimov, *Vortex Plasmoids Created by High-Frequency Discharges*. In: *The Atmosphere and Ionosphere. Elementary Processes, Discharges and Plasmoids*. Eds. V. L. Bychkov, G. V. Golubkov, and A. I. Nikitin. (Springer, Dordrecht, 2012). P. 251–273.
51. A. S. Paschina, and A. I. Klimov, *Khimicheskaya Fizika*. **33** (2), 78 (2014).
52. A. Klimov, *J. Condensed Matter Nucl. Sci.* **19**, 1 (2016).
53. A. Klimov, A. Grigorenko, A. Efimov, N. Evstigneev, O. Ryabkov, M. Sidorenko, A. Soloviev, and B. Tolkunov, *J. Condensed Matter Nucl. Sci.* **19**, 10 (2016).
54. S. E. Emelin, V. L. Bychkov, A. M. Astafiev, A. P. Kovshik, and A. L. Pirozersky, *IEEE Transactions on Plasma Science*. **40** (12), 3162 (2012).
55. A. I. Egorov, and S. I. Stepanov, *Tech. Phys.* **72** (12), 102 (2002).
56. G. D. Shabanov, *Tech. Phys. Lett.* **28** (4), 81 (2002).
57. A. I. Egorov, S. I. Stepanov, and G. D. Shabanov, *Phys. Usp.* **174** (1), 107 (2004).
58. G. D. Shabanov, and O. M. Zherebtsov, *Optichesky Zhurnal*. **71** (1), 6 (2004).
59. G. D. Shabanov, and B. Yu. Sokolovsky, *Fizika Plasmy*. **31** (6), 560 (2005).
60. B. Juettner, S. Noak, A. Versteegh, and G. Fussman, *Long-living Plasmoids from a Water Discharge at Atmospheric Pressure*. In: *Proc. 28th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases*. (2007. Prague, Czech Republic). P. 2229–2234.
61. A. Versteegh, K. Behringer, U. Fantz, G. Fussman, B. Juettner, and S. Noak, *Plasma Sources Science and Technology*. **17**, 024014 (2008).
62. W. H. Bostik, *Phys. Rev.* **104** (2), 292 (1956).
63. W. H. Bostik, *Phys. Rev.* **106** (3), 404 (1957).
64. P. M. Koloc, *Fusion Technology*. **15**, 1136 (1989).
65. A. N. Vlasov, *Journ Exp. Teor. Phys.* **97** (2), 468 (1999).
66. A. N. Vlasov, *Vestnik Ryazanskogo Gosudarstvennogo Radiotekhnicheskogo Universiteta*, No. 1 (43). 90 (2013).
67. A. N. Vlasov, M. V. Dubkov, M. A. Burobin, C. V. Zhimoloskin, and A. B. Manoshkin, *Vestnik Ryazanskogo Gosudarstvennogo Radiotekhnicheskogo Universiteta*. No. 2 (39). 108 (2012).
68. A. G. Oreshko, *Doklady Akademii Nauk*. **376**, 183 (2001).
69. A. G. Oreshko, *Journal of Physics: Conference Series*. **44**, 127 (2006).
70. A. G. Oreshko, *The Obtaining of the Ball Lightning and the Prospects of the Using it for Problem of Nuclear Fusion*. In: *Proc. 28th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases*. (2007. Prague, Czech Republic). P. 1884–1887.
71. A. G. Oreshko, and T. Mavlydov, *IEEE Transactions on Plasma Science*. **39**, 2124 (2011).
72. G. C. Dijkhuis, *Nature*. **284** (5752), 150 (1980).
73. G. C. Dijkhuis, *J. Appl. Phys.* **53** (5), 3516 (1982).
74. G. C. Dijkhuis, *Physica B*. **228**, 144 (1996).
75. A. V. Kulakov and A. A. Rumyantsev, *Doklady Akademii Nauk SSSR*. **320** (5), 1103 (1991).
76. M. Dvornikov, *Journ. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.* **89**, 62 (2012).
77. M. Dvornikov, *J. Plasma Physics*. **77**. Part 6, 749 (2011).
78. M. Dvornikov, *Nonlinear Processes Geophys.* **20**, 581 (2013).
79. M. Dvornikov, *Proc. Royal Soc. A*. **468**, 415 (2012).

80. M. Dvornikov, and S. Dvornikov, *Electron Gas Oscillations in Plasma. Theory and Applications*. In: *Advances in Plasma Physics Research. Vol. 5*. Ed. F. Gerard. (New York: Nova Science Publishers, 2007). P. 197–212.
81. M. Dvornikov, J. Phys. A: Math. Theor. **46**, 045501 (2013).
82. M. Dvornikov, Physica Scripta. **81**, 055502 (2010).
83. A. I. Nikitin, Electricity, No. 11. 14 (1998).
84. A. I. Nikitin, Electricity, No. 3, 29 (2004).
85. A. I. Nikitin, A. M. Velichko, and T. F. Nikitina, Izvestia Akademii Nauk, Energetics. No. 2. 115 (2008).
86. A. I. Nikitin, Khimicheskaya Fizika. **25** (3), 38 (2006).
87. A. I. Nikitin, Vestnik RAEN. No. 3. 15 (2012).
88. M. I. Baranov, Electricity. No. 9, 15 (2009).
89. M. I. Baranov, Elektrotehnika I Elektromekhanika. No. 6, 51 (2008).
90. M. I. Baranov, Elektrotehnika I Elektromekhanika. No. 3, 42 (2013).
91. B.M. Smirnov, *Problem of Ball Lightning*. (Nauka, Moscow, 1988) [in Russian].
92. O. Mesheryakov, Nanoscale Res. Lett. **2**, 319 (2007).
93. V. A. Saranin, Phys. Usp. **172** (12), 1449 (2002).
94. V. A. Saranin, and V. V. Meier, Phys. Usp. **180** (10), 1109 (2010).
95. S. I. Graschenkov, Tech. Phys. **81** (7), 13 (2011).
96. Y. Nakajima, and T. Sato, Journ. of Electrostatics. **45**, 213 (1999).
97. V. R. Munirov, and A. V. Filippov, Journ. Exp. Theor. Phys. **114** (5), 931 (2013).
98. V. A. Chernobrov, *Chronics of UFO Visits* (Drofa, Moscow, 2003) [in Russian].
99. *Crop Circles – Crossover From Another Dimension, 2006. Toftenes Multivision a. s.* (Oslo, Norway, 2006). www.toftenes.no.
100. A. I. Nikitin, I. O. Leipunsky, and T. F. Nikitina, Prikl. Fiz., No. 2, 15 (2010).
101. A. I. Nikitin, T. F. Nikitina, and A. M. Velichko, Electricity. No. 3, 16 (2010).
102. *Physical Values. Handbook*. Eds. I. S. Grigor'ev, and E. Z. Meilikhov. (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
103. B. M. Smirnov, *Processes with Participation of Small Particles*. (Logos, Moscow, 2012) [in Russian].
104. E. P. Wigner, F. Seitz, Phys. Rev. **46**, 509 (1934).