

03;04;12

## Свойства короткоживущих шаровых молний, полученных в лаборатории

© А.И. Егоров, С.И. Степанов

Санкт-Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН,  
188300 Гатчина, Ленинградская область, Россия  
e-mail: stepanovs@mail.ru

(Поступило в Редакцию 16 июля 2007 г.)

Создана экспериментальная установка, которая позволяет с высокой воспроизводимостью получать искусственные шаровые молнии. С помощью этой установки получены тысячи летящих, светящихся плазмоидов, диаметром 12–20 см. Разработана аппаратура для исследования свойств плазмоидов. Установлено, что короткоживущие шаровые молнии живут около 1 с и несут электрический заряд. Они имеют сложное строение — центральный kern, содержащий обильную популяцию гидратированных ионов и аэрозоль продуктов распада, окружает тонкая отрицательно заряженная оболочка.

PACS: 52.80.Mg, 52.27.Lw, 52.70.-m

### Введение

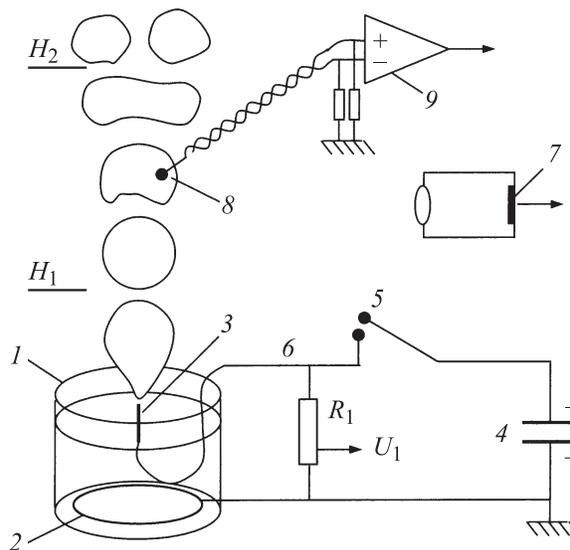
Сообщения о появлении шаровой молнии регулярно появляются в печати, но до последнего времени суть этого феномена оставалась загадочной. Обычно шаровая молния выглядит как плывущий в воздухе светящийся сфероид диаметром 10–20 см, со временем жизни 1–2 с [1,2], значительно реже шаровая молния наблюдается в течение десятков секунд [3].

Барри предположил, что появлению шаровой молнии предшествует образование токовой струи с округлой светящейся головкой [2, с. 14]. При определенных условиях головная часть струи может отделиться и просуществовать 1–2 с в виде автономного образования. Мощный отрицательный заряд, стекающий на поверхность Земли в виде линейной молнии или токовой струи, продолжает свое движение в земле по электропроводному каналу. В тех редких случаях, когда этот токовый канал снова выходит на влажную поверхность, из него выбрасывается плазменная струя, от которой отделяется и плывет в воздухе шаровая молния.

Для получения искусственной шаровой молнии моделировались грозовые условия — создавался высоковольтный разряд в атмосфере, содержащей водяные пары. Экспериментальная установка для получения плазменных струй и короткоживущих шаровых молний [4,5] представлена на рис. 1. Она состоит из медного токопровода, на который приходит отрицательный заряд от конденсаторной батареи и центрального электрода, расположенного у поверхности заземленного объема воды. Полиэтиленовая чаша диаметром 20 см заполнялась на высоту 15 см проводящей водой. В наших экспериментах использовались жесткая природная вода, содержащая 5–7 мМ/л бикарбонатов кальция и магния. На дне чаши находился медный электрод в виде кольца, соединенный изолированной медной шиной с положительным полюсом конденсаторной батареи и заземлением. Конденсаторную батарею емкостью 0.6 мФ

можно было заряжать до 5.5 кВ. Отрицательный заряд конденсаторной батареи переносился на токопровод с помощью разрядника.

Центральный цилиндрический электрод из металла или угля окружала кварцевая трубка. Она возвышалась над электродом и над поверхностью воды на 3–5 мм. В большинстве наших экспериментов электрод диаметром 5–6 мм был изготовлен из угольного стержня, используемого для дугового спектрального анализа. Такой пористый электрод можно было пропитывать различными растворами, эмульсиями и суспензиями, в том числе природными.



**Рис. 1.** Установка для получения плазменных струй и автономных плазмоидов: 1 — полиэтиленовая емкость, 2 — кольцевой электрод (анод), 3 — центральный электрод, 4 — конденсаторная батарея, 5 — разрядник, 6 — токопровод, 7 — фотодатчик, 8 — электрический зонд, 9 — усилитель сигнала зонда.

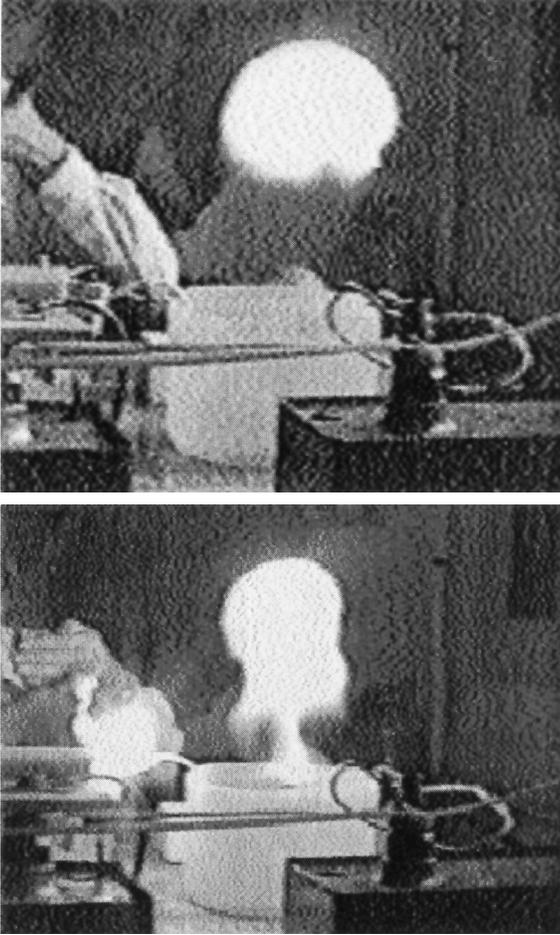


Рис. 2. Стадия рождения и полета плазмоида.

Для получения искусственной шаровой молнии центральный электрод смачивают каплей воды. При быстром замыкании–размыкании разрядника из электрода с хлопком вылетает плазменная струя, которая замедляется в воздухе, и от нее отделяется автономный светящийся сфероид (рис. 2). Ток при разряде протекает от отрицательного полюса конденсаторной батареи по токопроводу к центральному электроду и через ионизованный воздух — к заземленной поверхности воды. Детали развития плазменной струи можно видеть в [6].

Округлость шаровой молнии зависит от формы канала центрального электрода и величины поданного напряжения. Светящееся образование может иметь форму короны или тора. Варьируя размеры электрода и параметры разряда, всегда можно придать шаровой молнии сферическую форму.

Цвет шаровой молнии зависит от состава вещества, попавшего в дуговой разряд между центральным электродом и поверхностью воды. Окраска плазмоидов, вылетающих из металлических электродов, определяется линейчатым спектром металла. С железного электрода срываются ослепительные белесые плазмоиды, с

медного — зеленоватые, с алюминиевого — белые с красноватым отливом. Из угольного электрода, пропитанного перегнанной или дождевой водой, вырываются водо-воздушные плазмоиды с серо-голубым керном и сиреневой оболочкой. Водная вытяжка из почвы, содержащая соли аммония, калия, натрия, кальция и магния, окрашивают шаровую молнию в характерный желто-красный цвет. Наблюдатели чаще всего называют его „апельсиновым“. Визуальная окраска шаровой молнии зависит еще и от фона, на котором ее наблюдают [7]. Спектры плазмоидов получены в работе [8].

## Исследование электрических свойств плазмоида

Природная шаровая молния имеет электрический заряд [9]. Это послужило побудительным мотивом для исследования электрических свойств плазмоидов с помощью специально созданной аппаратуры (рис. 1). Для измерения напряжения между центральным и водяным электродами, параллельно им, подключался резистор  $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ , с части которого напряжение подавалось на АЦП. Светимость плазмоида регистрировал кремневый фотодатчик размером  $24 \times 36 \text{ mm}$ , снабженный объективом. Поле зрения фотодатчика охватывало траекторию светящегося сфероида от высоты  $15 \text{ cm}$  над поверхностью воды до высоты  $50 \text{ cm}$ .

На рис. 3 представлен график, показывающий зависимости напряжения на электродах и светимости летящего плазмоида от времени, полученных на этих приборах. Вылетающая из центрального электрода плазменная струя поднимается на высоту  $15\text{--}20 \text{ cm}$  за  $0.1 \text{ s}$  — только в это время между электродами существует разность потенциалов и протекает ток ( $\sim 50 \text{ A}$  в начале разряда). Через  $0.1 \text{ s}$  электрический разряд прекращается, и плазмоид начинает свой автономный полет. Он медленно поднимается вверх и светится, постепенно угасая, за счет аккумулированной энергии. Через  $0.5 \text{ s}$  плазмоид выходит из поля зрения фотодатчика и гаснет. Исследовались наиболее простые водо-воздушные

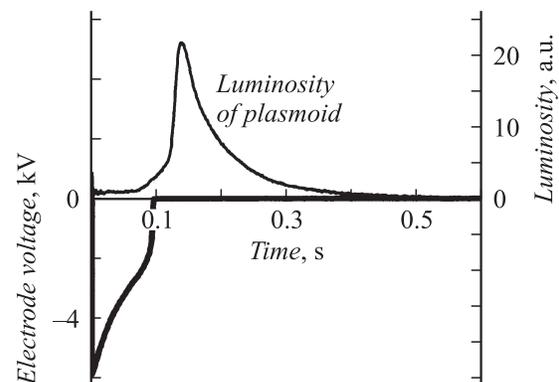


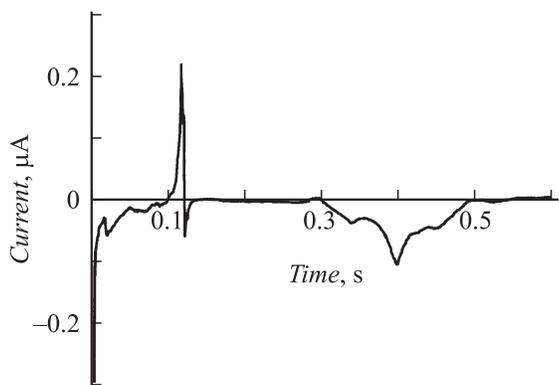
Рис. 3. Зависимость светимости летящего плазмоида и напряжения между электродами от времени.

плазмоиды, которые срываются с угольного электрода, пропитанного дистиллированной водой.

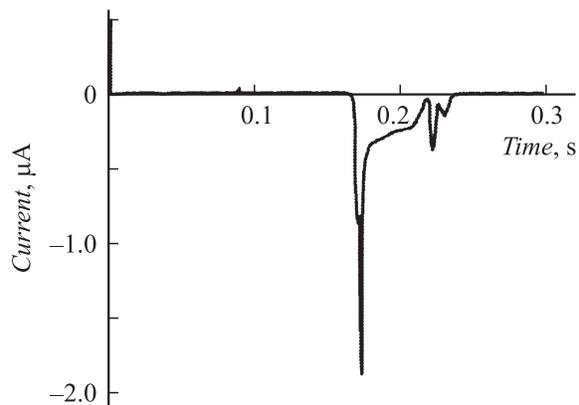
Существенно, что шаровая молния поддерживается внутренней, а не внешней энергией. Из рис. 3 видно, что напряжение на части установки, наиболее близко расположенной к плазмоиду, равно нулю после окончания разряда. Эта часть включает: один контакт разрядника, медный токопровод, центральный электрод. Следовательно, ток не может протекать от земляной шины установки через плазموид на эту часть установки, поскольку она имеет нулевой потенциал. Резистор  $R_1$  только ускорял снятие остаточного напряжения на токопроводе.

Для измерения электрического заряда плазмоида на его пути был установлен сетчатый цилиндр Фарадея. Цилиндр имел диаметр 25 см и находился на высоте 30 см от поверхности воды. Для уменьшения наводок сетчатый цилиндр окружал экран из заземленных проволочек. Сетка цилиндра соединялась с землей через резистор 2 М $\Omega$ , к которому был подключен усилитель с большим входным сопротивлением. График тока, стекающего с цилиндра на землю, приведен на рис. 4. Сначала регистрировалась электрическая наводка от разряда; затем электрический сигнал отсутствовал — в это время плазмоид поднимался к цилиндру; потом появлялся ток, вызванный перетеканием заряда плазмоида на сетку цилиндра. Проинтегрировав этот ток, смогли определить нескомпенсированный заряд плазмоида:  $-(8-12) \cdot 10^{-9}$  С. Если принять, что отрицательный заряд сосредоточен на сферической поверхности плазмоида радиусом  $R = 6$  см, то потенциал плазмоида относительно земли будет близок к  $-1300$  V.

Внутреннее распределение зарядов в плазмоиде изучалось с помощью одиночного электрического зонда. Это был шарик из нихрома диаметром 0.4 mm. Зонд через резистор 5 М $\Omega$  соединялся с землей. К резистору подключался усилитель, сигнал с которого поступал на АЦП. Для того чтобы вычистить из сигнала зонда синфазную помеху, возникающую от изменений электрического поля, отводящий провод зонда скручивался с компенсирующим проводом. Он через такой же рези-



**Рис. 4.** Зависимость от времени тока, стекающего с сетчатого цилиндра Фарадея. Острые пики в начале вызваны наводками. Плазмоид достиг цилиндра через 0.3 с после начала разряда.



**Рис. 5.** График зависимости тока электрического зонда от времени. Всплеск тока виден при 0.17 s, когда всплывающий плазмоид своей верхней поверхностью касался зонда. Затем следует ток от внутреннего объема плазмоида.

стор подключался к инверсному входу усилителя. Оба провода были помещены в экран и в стеклянную трубку.

Зависимость тока зонда от времени приведена на рис. 5. Сигнал зонда соответствовал сбору отрицательных зарядов и состоял из нескольких стадий. Большой, но короткий импульс тока появлялся в тот момент, когда плазмоид всплывал и касался зонда своим верхним краем. Более длительный, но меньший сигнал поступал от внутреннего светящегося ядра. Продолжительность этой стадии (около 60 ms) соответствовала высоте всплывающего плазмоида. В большинстве случаев наблюдался небольшой всплеск тока от нижнего края плазмоида.

Ток с зонда, помещенного в плазму, зависит от величины поверхности зонда, массы и концентрации носителей заряда и от разности потенциалов между зондом и плазмой. Острый пик тока от края сфероида, скорее всего, вызван резким увеличением количества отрицательных зарядов в поверхностном слое. Проинтегрировав ток зонда по времени, можно определить заряд шаровой молнии, который стекает через зонд. Этот заряд (примерно  $-10^{-8}$  С) оказался близким к некомпенсированному заряду, измеренному сетчатым цилиндром Фарадея. Изменяя сопротивление нагрузочного резистора зонда, оказалось возможным менять долю заряда плазмоида, которая стекает на землю. В этих опытах выяснилось, что чем большая доля заряда плазмоида стекает, тем меньше время светимости.

По совокупности исследований выяснилось, что плазмоид наследует заряд от верхней части плазменной струи. Это происходит за счет того, что центральная часть струи имеет довольно большую электрическую проводимость. Дополнительные исследования с электрическим зондом, помещенным на высоту 10–20 см, т. е. в область струи, показали, что она имеет потенциал около 2.0 kV. Детали этих опытов и результаты представлены в [10].

Стандартная методика измерения параметров плазмы электрическим зондом включает измерение вольт-амперных характеристик плазмы. Для этого на зонд подается напряжение разной полярности и измеряется ток зонда. Таким способом можно определить концентрацию заряженных частиц, обычно электронов, и потенциал плазмы в месте расположения зонда [11]. Эта методика осуществима, если плазма стационарная и однородная. Применять эту методику для изучения свойств шаровой молнии не представляется возможным. Светящийся плазмоид поднимается в воздухе, и электрические параметры в каждой точке сильно меняются. Однако мы нашли возможность применить зондовую методику в упрощенном виде. В каждом конкретном опыте на зонд подавалось некоторое постоянное напряжение смещения в диапазоне  $-500 - \pm 500$  V. В зависимости от того, какого знака и величины разность потенциалов между зондом и точкой сфероиды, в которой он находится, ток через зонд будет течь в ту или иную сторону. Наиболее впечатляет тот факт, что при смещении  $-500$  V ток зонда в момент касания верхней поверхности плазмоида становится положительным. Это свидетельствует о том, что потенциал верхней поверхности плазмоида несколько меньше  $-500$  V, поэтому ток изменяет направление; кроме того, шаровая молния содержит и положительные гидратированные ионы. Именно они собираются на зонд при большом отрицательном смещении [10].

Электрические поля разрушают плазмоид. В большом плоском конденсаторе шаровой плазмоид расщепляется и растягивается в стороны. Популяция гидратированных или пылевых ионов, находящихся в керне плазмоида, состоит из примерно равного количества положительных и отрицательных ионов, но отрицательных зарядов при этом несколько больше и они сосредоточены в поверхностном слое.

## Структура искусственной шаровой молнии

Компьютерное моделирование процесса взаимодействия молекул  $H_2O$  с ионами  $H^+$  и  $OH^-$  в воздухе, содержащем водяные пары, выполнено в работах [12,13]. Установлено, что при сближении гидратированных ионов разного знака между ними встраиваются дополнительные молекулы воды. В результате образуются долгоживущие кластеры с большим дипольным моментом.

Молекулы воды препятствуют рекомбинации ионов, и время их жизни в кластере возрастает до десятков секунд, т.е. на 10–12 порядков. Вследствие диполь-дипольного взаимодействия кластеров в шаровой молнии возникают цепочечные и пространственные структуры [1,12]. Как показали наши эксперименты, особую роль в создании сферической формы шаровой молнии играют избыточные электроны. Они „убегают“ к поверхности плазмоида и создают на его поверхности отри-

цательную оболочку, скорее всего, из гидратированных ионов  $O_2^- \cdot (H_2O)_n$ .

Скорость рекомбинации ионов резко возрастает на металлических поверхностях. Металл при этом расплывается. Кольцо из медной или золотой проволоки, подвешенное на пути плазмоида, теряет часть своей массы, что можно проконтролировать взвешиванием. Чем ниже на пути плазмоида помещалось проволочное кольцо, тем значительней была потеря массы.

Свободно летящий плазмоид не обугливает бумагу и не поджигает хлопчатобумажные нити. Еще Стаханов на основании показаний оцевидцев пришел к выводу, что средняя температура шаровой молнии близка к комнатной [1, стр. 83]. Анализ случаев энерговыделения природной шаровой молнии в жилых помещениях (вне факторов, способных увеличить энергетику, — природных электрических полей, разрядов, солнечного света) показал, что ее энергия не превышает 2000 J [14]. Среднюю температуру плазмоида можно грубо оценить по скорости его вертикального перемещения. Расчет показывает, что температура клуба теплого влажного воздуха диаметром 14 см, который всплывает в атмосфере, при 293 K, со скоростью 0.8–1.0 m/s, не может превышать 320 K.

Анализ показаний очевидцев свидетельствует, что „чистые“ водно-воздушные плазмоиды встречаются крайне редко. Шаровую молнию исключительной красоты такого типа наблюдал Дмитриев [3]. Как правило, в шаровую молнию попадает стороннее вещество, диспергированное при разряде. Это может быть сажа, обугленная органика, частицы почвы, глина, различные органические и неорганические соединения.

Для получения шаровых молний с углеродным аэрозолем наносим на центральный электрод суспензию из коллоидного графита или тонко измельченного древесного угля, ацетона (в качестве смачивателя) и поверхности воды. При разряде из центрального электрода вылетала яркая шаровая молния. Это был клуб теплого влажного воздуха, содержащий обильную популяцию положительных и отрицательных гидратированных ионов разного вида, органических радикалов и частицы аэрозоля. Реакция накаливаемых частиц угля с водяными парами приводит к появлению в керне молнии водорода и углеводородов.

Большинство шаровых молний имеют сложный состав. Однако зондовые измерения показывают, что и в этих случаях электроны, которые находились в верхней части плазменной струи, мигрируют к поверхности шаровой молнии и концентрируются в тонком сферическом слое, обогащая его отрицательными зарядами.

Плазмохимические реакции окисления органических веществ и углерода увеличивают продолжительность свечения шаровой молнии. Данные от фотодатчика свидетельствуют, что водо-воздушные плазмоиды живут в среднем 0.4–0.6 s, тогда как шаровые молнии с углеродным аэрозолем заметны в течение 0.8–1.2 s.

Шаровая молния — это одно из красочных явлений природы. Мы получили в ходе исследования более 3000 шаровых плазмOIDов. Г.Д. Шабановым были сделаны сотни фотографий, на которых зафиксированы вариации формы и цвета молний.

При демонстрации шаровой молнии желающим посмотреть на редкое явление природы, мы столкнулись с существованием физиологического эффекта послеобраза [2, стр.34]. У некоторых наблюдателей вспышка плазменной струи вызвала стойкое пятно на сетчатке глаза, которое сохранялось около 10 с и перемещалось в пространстве при повороте головы.

Большинство очевидцев природного явления подтверждало видимое сходство искусственных и естественных шаровых молний. По мнению Барри [2, стр.46], шаровые молнии в природе существуют в течение 1–2 с. Такое или меньшее время жизни отмечалось в 80% собранных им сообщений, остальные 20% связаны с эффектом послеобраза и долгоживущими феноменами, которые еще предстоит исследовать. На самом деле, эти цифры крайне условны из-за наблюдательной селекции — маленьких и короткоживущих регистрируется меньше, чем реально возникает, а большие и долгоживущие молнии регистрируются все.

В последние годы интенсивно исследуется природное явление, близкое к шаровой молнии, — образование в атмосфере токовых струй с округлой светящейся головкой. Чаще всего проводящий канал, по которому стекает атмосферное электричество, создают, запуская в грозовое облако ракету с проволочным хвостом [15].

Для получения долгоживущих шаровых молний можно использовать громоотводы на высотных зданиях и сооружениях, в которые часто попадают линейные молнии. Их нужно только дополнить заземленным баком с проводящей водой, аналогично устройству, приведенному на рис. 1.

Авторы благодарят В.М. Лобашева за поддержку работы на всех этапах, Г.Д. Шабанова — за плодотворное участие в экспериментах, С.Е. Емелина и А.Л. Пирозерского — за помощь в экспериментах, плодотворные дискуссии и представленные материалы, Ю.П. Райзера — за полезную дискуссию, Е.А. Дробченко — за помощь в конструировании измерительной аппаратуры и А.М. Пирогова — за помощь в подготовке статьи.

## Список литературы

- [1] Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. М.: Научный мир, 1996.
- [2] Барри Дж.Д. Шаровая молния и четочная молния. М.: Мир, 1983.
- [3] Дмитриев М.Т. // Природа. 1967. № 6. С. 98–106.
- [4] Егоров А.И., Степанов С.И. // ЖТФ. 2002. Т. 72. С. 102–104.
- [5] Егоров А.И., Степанов С.И., Шабанов Г.Д. // УФН. 2004. Т. 174. С. 107–109.
- [6] Emelin S., Pirozerski A. <http://www.balllightning.narod.ru>.

- [7] Шабанов Г.Д. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 8. Вып. 4. С. 81–86.
- [8] Emelin S.E., Pirozerski F.L., Vassiliev N.N. <http://arxiv.org/abs/physics/0604115>.
- [9] Степанов С.И. // Природа. 1995. № 6. С. 107–117.
- [10] Степанов С.И. [http://biod.pnpi.spb.ru/pages\\_ru/Stepanov/index.html](http://biod.pnpi.spb.ru/pages_ru/Stepanov/index.html).
- [11] Демидов В.И., Колоколов Н.Б., Кудрявцев А.А. Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1996.
- [12] Шевкунов С.В. // ЖЭТФ. 2001. Т. 119. С. 485–508.
- [13] Шевкунов С.В. // ДАН. 2001. Т. 379. С. 181–186.
- [14] Степанов С.И. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 2. С. 211–212.
- [15] Rahman M., Cooray V. et al. // Geophys. Res. Lett. 2007. Vol. 34. N 3. P. L03.816.