

Природа шаровой молнии

С. И. Степанов

Петербургский институт ядерной физики
им. Б. П. Константинова РАН
Гатчина

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Первыми экспериментальными исследованиями механизма образования шаровой молнии (ШМ), проведенными в России, были опыты Н. А. Гезехуса, как сказано в предыдущей статье. Их постановка типична для экспериментов по получению лабораторных аналогов ШМ. Создается электрический разряд, как правило высоковольтный, в специально подобранных условиях. В их число входят материал электродов, их форма, длительность разряда, дополнительное вещество, введенное в область разряда. На этом пути во второй половине XX в. исследователи достигли значительных успехов в получении лабораторных аналогов ШМ. Современные лабораторные генераторы шаровых молний представляют собой сложные устройства, с помощью которых удается получать светящиеся шарики или объекты другой формы, существующие некоторое время после окончания разряда. Так, в опытах Дж. Барри, исследовавшего длительный (около 1 мс) разряд в воздухе, к которому был добавлен в небольших количествах горючий газ (типа бутана), возникал светящийся шарик. Он двигался по камере в течение примерно 1 с, мог отскакивать от ее стенок и оставаться целым¹.

А. Г. Аскарьян и А. А. Лерман на специальной разрядной установке — коаксиальном инжекторе — получали устойчивый объект, который двигался со скоростью 50—70 м/с, не увеличивая своих первоначальных размеров².

При действии СВЧ разряда на пары воды в экспериментах Е. Т. Протасевича возникал светящийся шар, существовавший около 1 с. Внутри шара были обнаружены большие электрические поля, электроны в высокой концентрации и водород, образовавшийся из воды под действием СВЧ излучения³.

«Вещество шаровой молнии» в виде струи удалось получить Р. Ф. Авраменко с коллегами⁴. Эти результаты, на наш взгляд, наиболее интересны. В опытах создается длительный разряд, проходящий через канал в диэлектрике, из канала вылетает светящаяся струя (длиной 20—40 см), которая состоит из керна (диаметром 1—2 мм) и оболочки (6—10 мм). В состав струи входят в основном продукты эрозии диэлектрика и электродов. Она имеет большую (относительно ожидаемой в низкотемпературной плазме) концентрацию заряженных частиц и содержит значительную долю энергии, вложенной в разряд. Необходимое условие — ламинарное истечение струи из капилляра, тогда как при турбулентном получается обычная плазма.

Струя имеет весьма необычные свойства: как и шаровая молния, она

² Аскарьян Г. А., Лерман А. А. Направленный выброс концентрированного компактного сгустка из коаксиального инжектора в атмосферу // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 1. С. 49—51.

³ Протасевич Е. Т. «Шаровая молния» на лабораторном столе // Химия и жизнь. 1986. № 8. С. 49—50.

⁴ Авраменко Р. Ф., Бахтин В. И., Николаев В. И. и др. Исследование плазменных образований, индуцируемых эрозионным разрядом // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 12. С. 57—64.

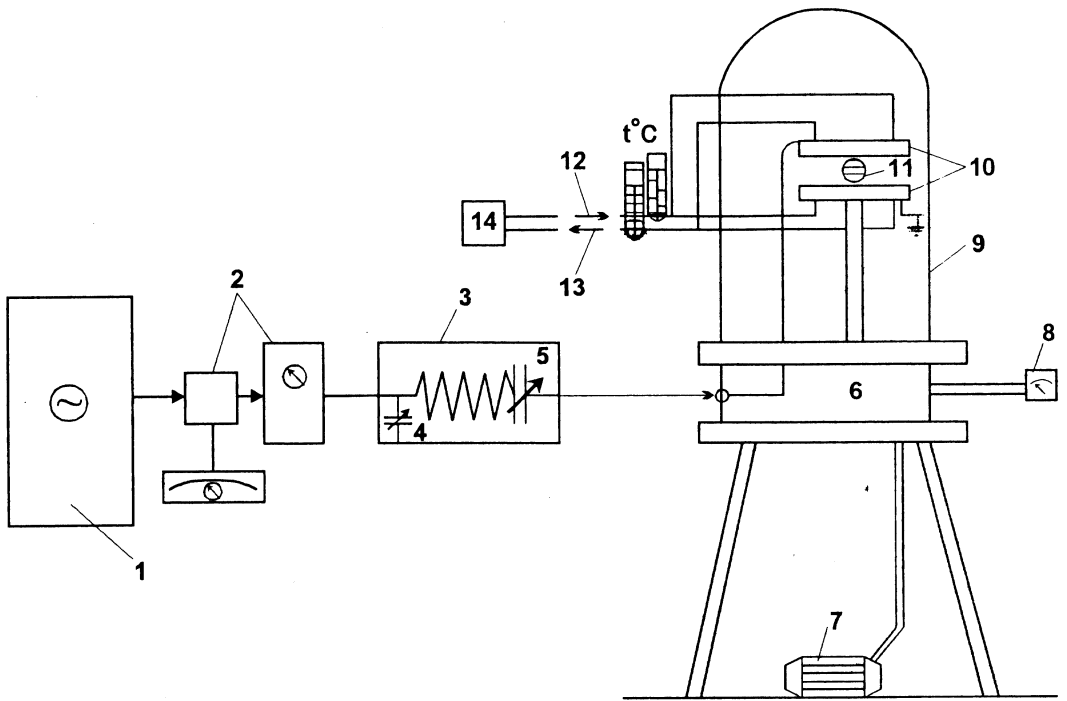
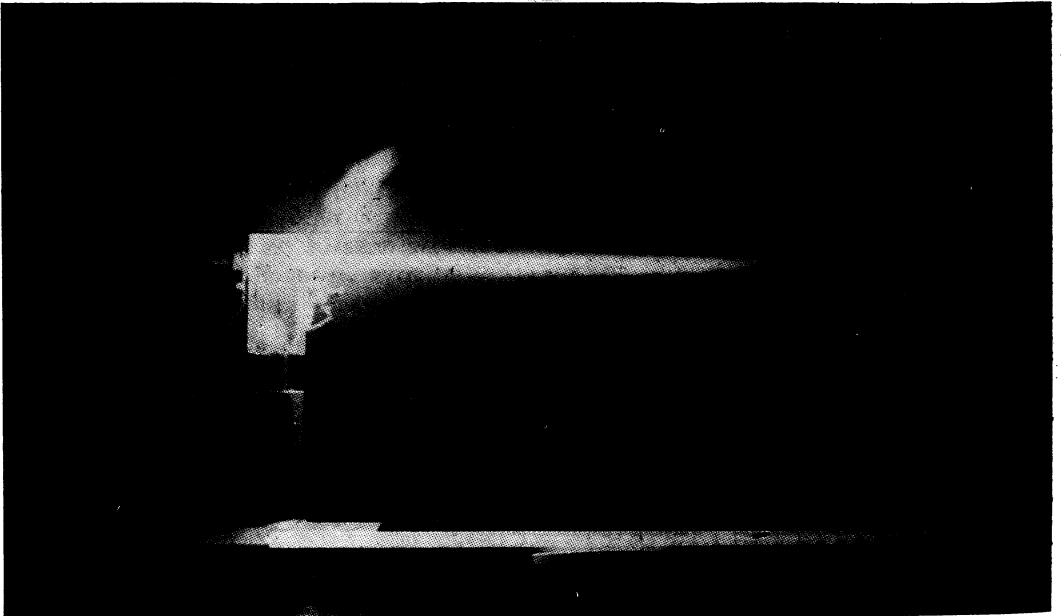


Схема одной из лабораторных установок для генерации шаровых молний. 1 — высокочастотный (ВЧ) генератор; 2 — ВЧ-ваттметры; 3 — согласующее устройство; 4 — нагрузка; 5 — настройка; 6 — вакуумная камера; 7 —

форвакуумный насос; 8 — вакуумметр; 9 — стеклянный колпак; 10 — ВЧ-электроды; 11 — шаровая молния; 12 — холодная вода; 13 — горячая вода; 14 — расходомер.



Интегральная во времени струя, возникающая в атмосфере сухого воздуха и газов (аргон,

гелий) при разряде в цилиндрическом канале из диэлектрика.

прожигает металлическую фольгу, но не повреждает бумагу и другие диэлектрики, способна проходить через отверстие в пластине, теряя при этом свою оболочку. Но если струю направить между двумя отверстиями в пластине, то она отклоняется и проникает только в одно из них! Таким образом, струя Авраменко демонстрирует удивительную способность сохраняться как единое целое. Такая устойчивость совершенно не типична для обычной плазмы.

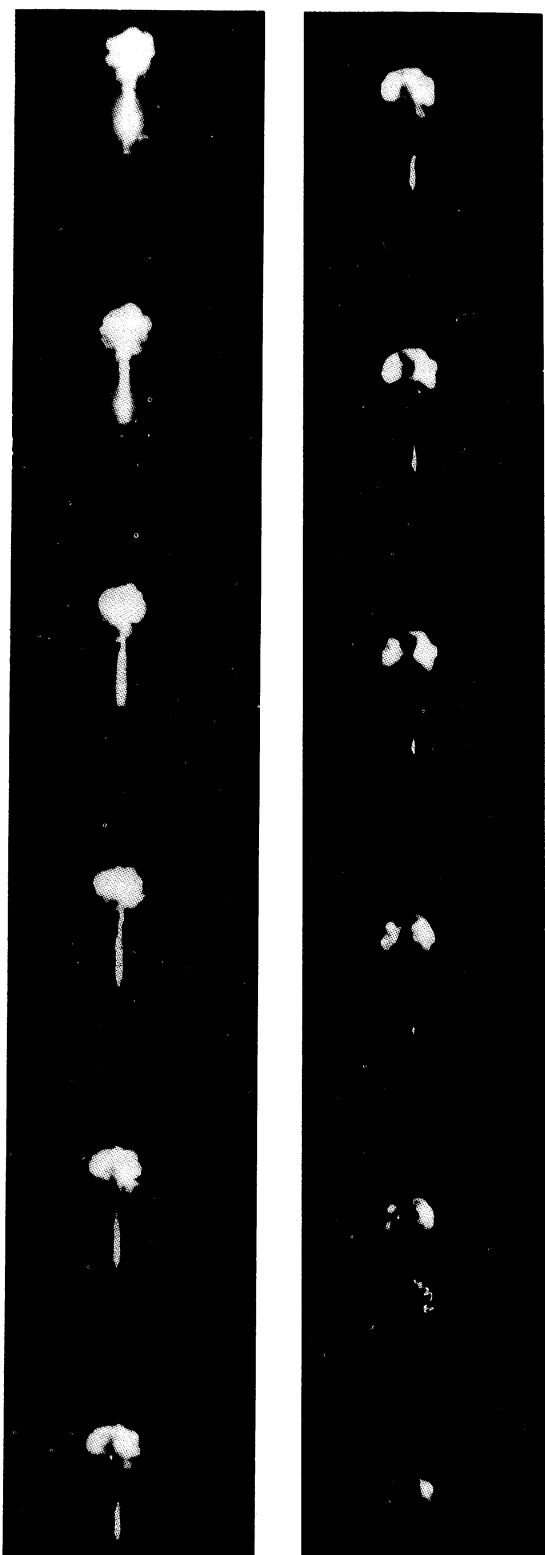
Обнаружено, что керн струи может как ослаблять, так и усиливать зондирующий луч гелий-неонового лазера с длиной волны 633 нм. Факт усиления излучения весьма нетривиален. Дело в том, что излучение могло бы усиливаться в такой же среде, в которой работает сам лазер, т. е. в смеси гелия и неона. Однако струя не содержит этих веществ и поэтому непонятно, каким образом осуществляется усиление на данной длине волны.

При исследовании взаимодействия струи с пересекающим ее сверхзвуковым потоком воздуха выяснилось, что она делится на три части: первая сносится потоком, вторая демонстрирует неожиданное поведение — проходит через него без отклонения, а третья движется ему навстречу.

Кроме струи, которая существует во время разряда, при измененных условиях эксперимента на установке Авраменко получены и автономно существующие плазменные объекты, в частности, сферической формы.

Исследовалось встречное столкновение автономного плазменного объекта с ударной волной. Плазменный объект расщеплялся на два, из которых один сносился движущимся за ударной волной потоком, а второй

Кинограмма образования автономного шаровидного плазменного объекта. При разряде в среде, содержащей мелкодисперсный водный аэрозоль, возникают автономные, отделенные от генераторов плазменные объекты. (Фотографии предоставлены Р. Ф. Авраменко и Л. П. Поскачевой.)



двигался сквозь нее, не уменьшая своей скорости. Подчеркнем, что речь идет не о делении объекта на одинаковые, а о расщеплении его на два объекта различной природы. Эти опыты, как и опыты со струей, экспериментаторы сопоставляют с наблюдениями движения шаровой молнии против ветра.

В последнее время струя Авраменко успешно исследуется и другими научными группами, описываются многочисленные опыты с ней, а также с автономными плазменными объектами, обсуждаются их свойства в сравнении со свойствами природной шаровой молнии⁵.

По общему мнению, установление физической природы струи Авраменко станет решающим шагом к пониманию того, чем же является шаровая молния.

ПРИРОДА БОЛЬШИХ ЭНЕРГИЙ

По наиболее обоснованной точке зрения, энергия ШМ имеет химическое происхождение. Однако известно, что иногда шаровая молния способна выделять большую энергию — 1 МДж и более, а это не может быть объяснено запасом только химической энергии в молнии. Подобные факты сбивают с толку тех, кто размышляет о природе ШМ. Все случаи ее наблюдения, когда выделение энергии могло быть корректно оценено, сведены в таблицу⁶. При ее составлении мы исходили из предположения И. П. Стаханова, что разрушительное действие молнии обусловлено не ее собственной энергией, а энергией внешнего электрического поля, выделяющейся при протекании тока через нее⁷. Тогда сила воздействия должна быть различ-

Таблица

Действия, вызываемые шаровой молнией, и энерговыделение

Энергетическое действие ШМ	Энергия, Дж
НАБЛЮДЕНИЯ В ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ	
Нагрев пластика и золота	440
Воздействие вспышки света	10
Акустическое воздействие взрыва	10
Нагрев, плавление, испарение железа	2000
Нагрев и испарение железа	700
Поднятие воды в ведре	10
НАБЛЮДЕНИЯ ВНЕ ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЙ	
Нагрев воды	3
Расщепление сваи причала	0.15
Нагрев воды и битума	0.016
Выжигание травы	0.9
Нагрев высоковольтного провода	0.15
Нагрев железной трубы	0.1
Прожигание железной трубы	0.1
Нагрев, испарение воды	180
Расщепление древесины (4 случая)	10—200

ной в зависимости от того, находилась ли ШМ в областях с большим полем или нет. В последнем случае это могут быть жилые помещения, поскольку атмосферное поле не проникает в них.

Из таблицы следует, что выделение больших энергий действительно наблюдалось только на открытой местности. Поражает разница в поведении ШМ в помещении и вне его, если она попадает в сосуды с водой: так, в помещении молния совсем не нагрела воду, лишь выплеснула ее часть из ведра, на улице же вода в одном случае закипела в бочонке, в другом — даже вся испарилась, что требовало в миллионы раз большей энергии. Таким образом, предположение Стаханова подтверждается: на открытой местности ШМ может выделять энергию внешнего электрического поля. В помещениях же проявляется энергия самой молнии. Судя по таблице, она невелика (сотни Дж) и имеет, несомненно, химическую природу. Между прочим, отсюда следует практическая рекомендация: не следует бояться ШМ

⁵ См., например: Шаровая молния в лаборатории. М., 1994.

⁶ Степанов С. И. Об энергии шаровой молнии // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 2. С. 211—212.

⁷ Стаханов И. П. Физическая природа шаровой молнии. М., 1979.

в комнате, хорошо изолированной электрически.

НЕКОТОРЫЕ МОДЕЛИ

Главная трудность при построении гипотезы ШМ — объяснить устойчивость ее формы. Обычно исходят из того, что шаровая молния больше всего похожа на облако, т. е. рассматривают ее как дисперсную среду. Но облако, состоящее из плазмы, газа или аэрозоля, не устойчиво, так как нет сил, которые способны противостоять внешним силам, изменяющим его форму. К настоящему времени такие гипотезы так и не смогли объяснить устойчивость формы ШМ.

По-иному объясняет это Б. М. Смирнов, исходя из каркасной гипотезы⁸, по которой ШМ представляет собой каркас, комок, сгусток нитей или маленьких фрактальных кластеров⁹. По Смирнову, химические реакции происходят во многих точках каркаса, в них развивается высокая температура (тысячи градусов) и появляется свечение. В целом температура ШМ остается незначительной, и это соответствует наблюдениям.

Имеется вариант модели, в котором каркас состоит из органического полимера¹⁰.

Рассмотрим критически основные положения гипотезы Смирнова. Главное утверждение состоит в том, что устойчивость ШМ обусловлена жесткостью ее каркаса, т. е. жесткостью твердого тела. Сам по себе каркас имеет ту форму, какая была у него в

момент возникновения; сферическая — только одна из многих возможных. Тогда с равной вероятностью должна существовать как сферическая, так и, например, кубическая молния. Чтобы все же объяснить наличие сферической формы у ШМ, приходится вводить дополнительные предположения. Согласно одному варианту, ШМ вращается в сдвиговых течениях¹¹ и приобретает сферическую форму, наподобие комка пуха, катающегося по земле. Но если форма каркаса легко меняется в сдвиговых потоках воздуха, то она должна меняться и в других течениях, например, турбулентных, а в спокойной атмосфере (в закрытых помещениях) быть вообще неопределенной. Напротив, известно, что ШМ везде появляется сразу в виде шара. Другой вариант — ШМ только кажется нам сферической из-за быстрого вращения в сдвиговых течениях. Но для этого она должна вращаться весьма быстро, что при реальных градиентах скорости ветра маловероятно.

Кроме того, в горячих точках каркаса вещество будет находиться в расплавленном состоянии, но это сильно ослабит жесткость, а именно она должна обеспечить устойчивость формы. Что касается варианта гипотезы, где каркас состоит из органического полимера, то его существование вообще не совместимо с высокой температурой.

ШАРОВАЯ МОЛНИЯ КАК ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

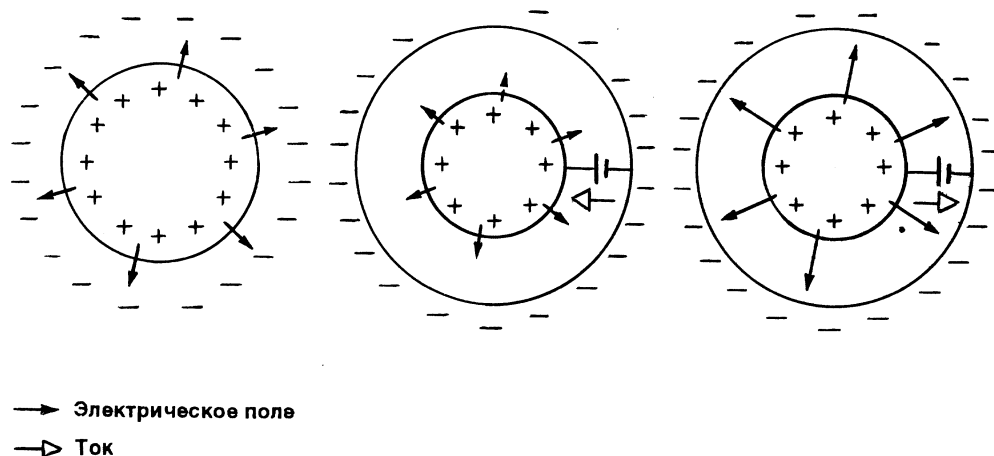
Возможно, трудности в понимании ШМ возникли потому, что не учтена какая-либо ее важная особенность. Обратим внимание, что молния испускает искры, ударяет током человека, плавит и испаряет металлические предметы при контакте с ними и на некотором расстоянии от них. Существенно, что эти связанные с электричес-

⁸ Смирнов Б. М. Шаровая молния — что же это такое? // Природа. 1987. № 2. С. 15—26; он же. Загадка шаровой молнии // Новое в жизни, науке, технике. М., 1987.

⁹ Фрактал — это структура, имеющая дробную размерность. Примером является ветвь дерева: она делится на мелкие ветви, те делятся снова и так далее. Фрактал подобен сам себе на различных пространственных масштабах.

¹⁰ Vyckov V. L. Polymer Ball Lightning Model // Physica Scripta. 1994. № 50. P. 591—599.

¹¹ Сдвиговое течение — это течение, в котором скорость плавно меняется в соседних слоях. Такое течение имеется, в частности, вблизи поверхности земли, обдуваемой ветром.



Модель шаровой молнии как аналог электрохимического аккумулятора. Молния представляет собой аэрозольное облако (слева), в нем происходят химические реакции с образованием заряженных частиц, что служит причиной возникновения стороннего тока, который поддерживает собственное электрическое поле. Внутренняя и внешняя части молнии заряжены противоположно, давление внутри молнии чуть меньше, чем снаружи. При мгновенном значении поля меньше величины, соответствующей ЭДС (в середине), течет сторонний ток, происходит разделение зарядов за счет превращения химической энергии в электрическую.

Поле увеличивается. Если поле больше величины, соответствующей ЭДС (справа), возникает ток проводимости. Поле уменьшается. В зависимости от мгновенного значения электрического поля результирующий ток может течь в одну или другую сторону. Внешняя оболочка молнии может быть частично потеряна во время ее эволюции, например, сдута при движении. На следующих рисунках молния изображена без внешней оболочки, т. е. представлена своим ядром, в основном и определяющим рассматриваемые здесь свойства ШМ.

кими силами явления происходят как вне помещений, так и в них. Последнее свидетельствует о том, что ШМ имеет собственное электрическое поле. Предположим, что внутри молнии есть постоянно действующий источник, который поддерживает ее электрическое поле и способен создавать ток во внешней среде. Возьмем собственное электрическое поле в качестве отправной точки при построении модели ШМ¹².

Пусть ШМ представляет собой не каркас, а аэрозольное облако, в котором протекают химические реакции с выделением энергии и появлением заряженных частиц (электронов или ионов). Примеры таких реакций извест-

ны и изучены. Основное наше утверждение состоит в следующем: в ШМ имеется сторонний ток, который создается возникающими заряженными частицами, т. е. работает электродвижущая сила, происходит разделение зарядов, что и приводит к возникновению в ШМ радиального электрического поля с большим потенциалом¹³. Таким образом, в шаровой молнии осуществляется преобразование химической энергии в энергию поля.

В состоянии равновесия возникающее таким образом поле задано величиной ЭДС и ток в ШМ отсутству-

¹² Stepanov S. I. How Can an Electrochemical Model Solve the Mysteries of Ball Lightning? // Proc. of Europ. Interdisciplinary Congress on Ball Lightning, Sept. 1993. Salzburg, Austria.

¹³ Сторонний ток — это ток, вызванный неэлектрическими силами. Аналогичные явления — это сторонние токи и поля с большими потенциалами, наблюдаемые в других дисперсных средах (в плазме, выхлопных газах реактивных двигателей, при взрыве), а также поля с небольшими потенциалами, возникающие в обычном электрохимическом аккумуляторе.

ет (аналог — отключенный электрохимический аккумулятор). Если по какой-то причине величина поля изменилась, то в зависимости от знака этого изменения ток внутри молнии может течь в одну или другую сторону. Если поле меньше значения, соответствующего ЭДС, ток течет против поля — это и есть сторонний ток (аккумулятор преобразует химическую энергию в электрическую). Если поле больше того, которое соответствует ЭДС, ток течет по полю — это ток проводимости (аккумулятор заряжается от внешнего источника энергии).

Поскольку ШМ является дисперсной средой, протекание токов в ней имеет некоторые особенности: и концентрация, и энергия заряженных частиц здесь могут меняться, вызывая изменение тока. В результате одному значению напряженности поля могут соответствовать различные значения плотности тока. Часто протекание тока демонстрирует гистерезис: при увеличении поля плотность тока меньше, чем при уменьшении поля (при той же напряженности). Эта особенность приводит к развитию тех или иных неустойчивостей в токовых явлениях. Известным примером таких неустойчивостей являются страты — непостоянство свечения в люминесцентных лампах.

В ШМ равновесное состояние в принципе устойчиво, однако в силу того, что связь между напряженностью поля и плотностью тока в ней не вполне однозначна, в устойчивом состоянии появляются небольшие спонтанные токи (сторонний или ток проводимости), а поле колеблется вокруг некоторого «среднего».

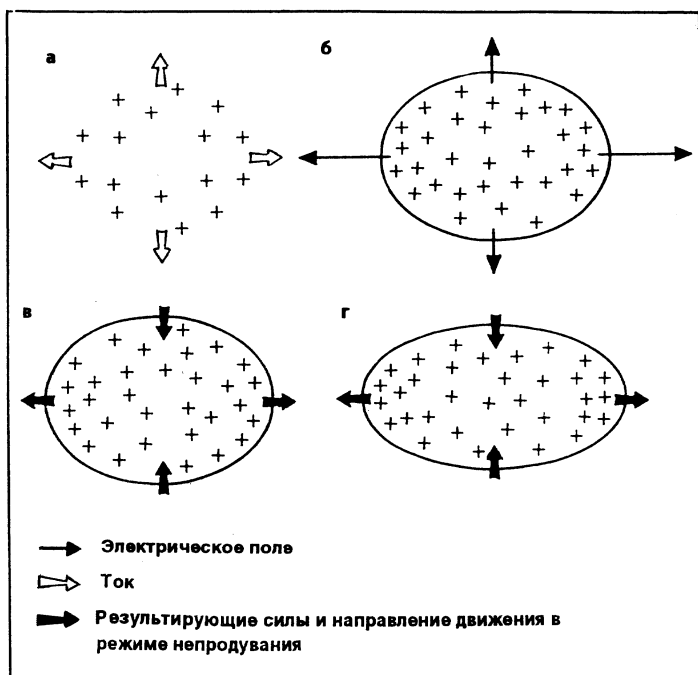
С колебаниями поля и возникновением спонтанных токов в нашей модели можно связать радиопомехи, которые природная ШМ вызывает в близко расположенных приемниках, колебание свечения всей молнии, неравномерность интенсивности свечения и цвета по поверхности, выбрасывание «искр» или кусков светящегося вещества, звуки (обычно это шипение или потрескивание).

До сих пор речь шла лишь о разделении зарядов в молнии. Будем считать, что ШМ состоит из более плотного ядра и внешней оболочки. Предположим, что часть этой оболочки «сдувается» во время движения и у молнии остается нескомпенсированный электрический заряд. Рассмотрим устойчивость формы такой системы.

Любое заряженное облако под действием кулоновских сил отталкивания стремится к расширению в радиальном направлении. Заряженные частицы при дрейфе в собственном электрическом поле облака сталкиваются с молекулами воздуха и увлекают их за собой, что облегчает движение частиц, так как они все движутся в потоках от соседей.

Движение заряженных частиц в поле вместе с увлеченным воздухом известно под названием «электрический, или ионный, ветер». Под высоковольтной линией слышится потрескивание — это и есть электрический ветер, т. е. движение зарядов вместе с воздухом в электрическом поле проводов. В облаке из редко расположенных частиц эффект увлечения воздуха незначителен, а в достаточно плотном облаке весь внутренний воздух «захватывается» движущимися частицами, и возникает явление непродуваемости: внешний воздух обтекает облако как единое целое. Непродуваемость больше известна нам по движению в поле силы тяжести. Отдельная пушинка падает довольно медленно. Если собрать пушинки в комок, то комок падает значительно быстрее, поскольку наружный воздух обтекает комок как целое и сопротивление движению уменьшается.

Аналогично этому непродуваемое заряженное облако быстрее перемещается во внешнем электрическом поле, но, казалось бы, оно должно скорее рассеяться в пространстве из-за более эффективного разлета отталкивающихся друг от друга частиц. Однако это не так. В сферическом заряженном облаке, разлетающемся в собственном поле, непродуваемость приво-



Неустойчивость формы заряженного облака: а — облако из редко расположенных частиц расширяется во всех направлениях за счет их дрейфового движения; б — заряды и поля в плотном (непродуваемом) деформированном заряженном облаке, возникшем из сферического. В выступающих частях облака поля больше, чем в плоских частях; в — силы в том же облаке. Кулоновская сила преобладает над перепадом давления в выступающих частях и выталкивает их наружу. Перепад давления преобладает над кулоновской силой на плоских частях и вдавливает их внутрь; г — облако продолжает деформироваться и распадается.

дит к тому, что внутри облака появляется разрежение и возникает перепад между внешним давлением и давлением внутри облака. Когда вскоре этот перепад в точности уравновесит кулоновскую силу, быстрое радиальное движение заряженных частиц наружу прекратится и останется лишь медленный их дрейф. Заметим, что для реальной ШМ скорость дрейфа частиц в собственном поле молнии очень мала, поэтому время разлета ШМ за счет дрейфа значительно больше, чем время ее жизни.

Баланс перепада давления и кулоновской силы дает для первого выражение:

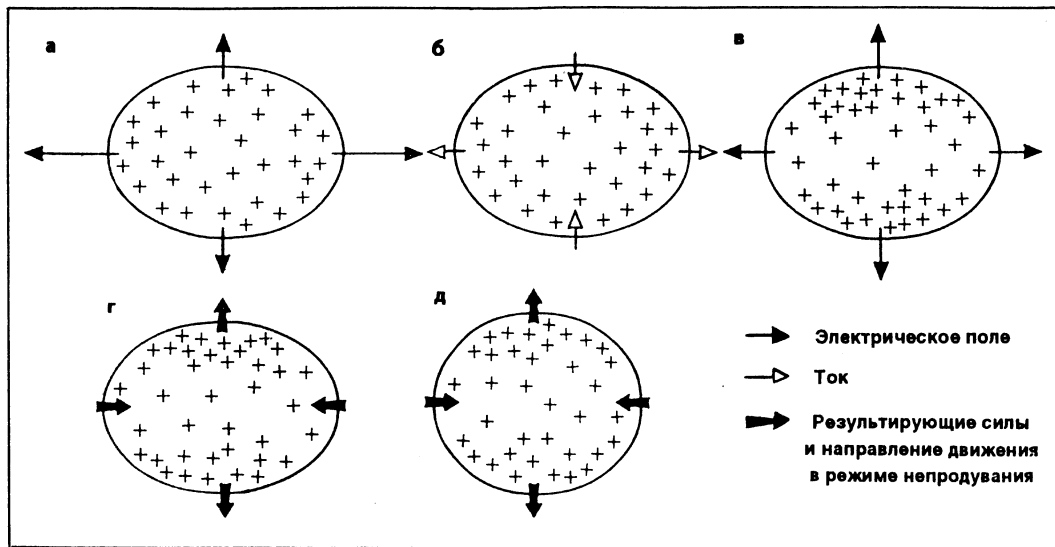
$p = E^2 / 8\pi$, где E — поле на границе облака. Оценивая перепад давления для поля пробоя воздуха (30 кВ/см), получаем $p = 0,0005$ атм, т. е. небольшую величину.

Пусть далее наше облако деформировалось под влиянием какого-либо внешнего воздействия. При этом поля в каждой точке облака изменились. В выступающих частях поля и соответственно кулоновские силы стали больше,

чем в сферическом облаке, на плоских частях — меньше¹⁴. Перепад давления между внешней средой и внутренней частью облака одинаков для всех его частей. Поэтому в выступающих частях кулоновская сила превышает перепад давления и эти части выталкиваются наружу, а в плоских, наоборот, перепад давления превышает кулоновскую силу и эти части вдавливаются внутрь, деформация увеличивается, и облако в конечном итоге распадается.

Итак, обычное заряженное облако не устойчиво к деформации. А как поведет себя в этом случае ШМ, в которой действуют сторонние силы? Пусть ШМ получила деформацию. Сразу после этого распределение зарядов и полей в ней выглядит так же, как в обычном деформированном облаке. Теперь в выступающих частях поле стало больше, чем равновесное, соответствующее ЭДС, а в плоских —

¹⁴ Это качественное утверждение можно формализовать: при эллипсоидальной форме облаков соответствующие поля поддаются строгому расчету.



Устойчивость формы шаровой молнии: а — заряды и поля, которые есть в ШМ непосредственно после деформации. В выступающих частях поля больше значения, соответствующего ЭДС, в плоских — меньше; б — токи возникают в деформированной ШМ потому, что поля отличаются от значения, соответствующего ЭДС. В выступающих частях имеется ток проводимости, в плоских — сторонний ток; в — заряды и поля, которые

возникают под действием этих токов. Поля близки к значению, соответствующему ЭДС, плотность заряда на плоских частях больше, чем на выступающих; г — силы в деформированной ШМ. Кулоновская сила преобладает над перепадом давления на плоских частях, она выталкивает их наружу. Перепад давления преобладает над кулоновской силой в выступающих частях и вдавливает их внутрь; д — сферическая форма ШМ восстанавливается.

меньше. В соответствии с этим в выступающих частях течет ток проводимости и плотность зарядов уменьшается, а в плоских частях текут сторонние токи и плотность увеличивается.

Изменение полей происходит, в первом приближении, до тех пор, пока поля снова не станут равны полю, соответствующему ЭДС. Для эллипсоидов можно точно решить задачу поиска распределения зарядов на основе известного поля. Оказывается, что плотность заряда на плоских частях становится больше, чем на выступающих, а направление сил противоположно силам в обычном деформированном облаке: в выступающих частях ШМ перепад давления преобладает над кулоновской силой, он толкает эти части внутрь, в то же время кулоновская сила, превосходящая перепад давления, выталкивает наружу плоские части. Тем самым ШМ восстанавливает сферическую форму.

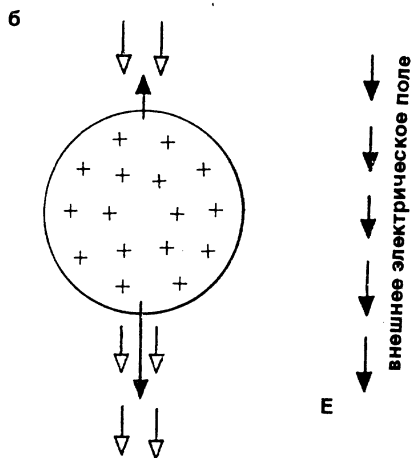
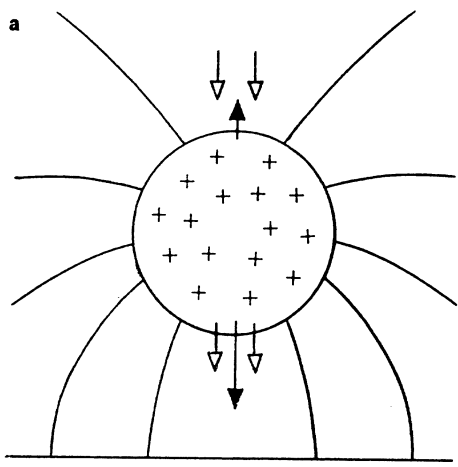
Учет гистерезиса не меняет принципиально обрисованной картины, правда, он может и способствовать, и препятствовать восстановлению формы.

Химическая реакция, дающая заряженные частицы, может прекратиться, например, из-за того, что исчерпан запас исходных веществ. Тогда механизм устойчивости перестанет работать и ШМ превратится в обычное заряженное облако, которое распадается. Этим можно объяснить такое странное явление, как взрыв или погасание молнии без видимых причин.

МОДЕЛЬ И ПОВЕДЕНИЕ МОЛНИИ

Попробуем объяснить некоторые известные свойства ШМ в рамках нашей гипотезы.

Природная ШМ плавит и испаряет металлические предметы, не трогая, как правило, диэлектрики. Известен случай, когда молния расплавилась и испарила катушку репродуктора, совер-



→ Электрическое поле

→ Ток

шенно не затронув соседних картонных деталей. Если ШМ находится возле проводящего или диэлектрического тела, то при ее приближении к телу в нем появляются наведенные заряды, и молния притягивается к нему. Поле в ШМ, в свою очередь, перераспределяется: в области, обращенной к телу, оно увеличивается, а в области, удаленной от тела, уменьшается. Так как поля в обеих областях не равны теперь полю, соответствующему ЭДС, возникают токи — ток проводимости и сторонний, соответственно. Вследствие

Шаровая молния вблизи проводящего или диэлектрического тела (вверху). Будучи заряженной, она приводит к появлению в теле наведенного заряда, что вызывает перераспределение поля в молнии. На стороне, обращенной к телу, поле становится больше значения, соответствующего ЭДС, на противоположной — меньше. Вследствие этого возникают ток проводимости и сторонний ток, и через ШМ к телу течет сквозной ток. Он лежит в основе явлений, сопровождающих контакт с телами, — возникновения искр между молнией и металлическим телом, расплавления проводников, распада ШМ, гидрирования.

Молния во внешнем электрическом поле (внизу). Внешнее поле накладывается на поле самой молнии. На одной стороне молнии поле становится больше поля, соответствующего ЭДС, на другой — меньше. Через молнию потечет ток, для которого она поставляет заряженные частицы. Протекание тока приводит к выделению дополнительной энергии, которую наблюдатели принимают за энергию самой шаровой молнии.

этого при приближении ШМ к телу течет сквозной ток. Если тело состоит из проводников и диэлектриков, ток проходит только через проводники. Это может вызвать их плавление и испарение.

Напомним, что струя Авраменко также расплавляет металлическую фольгу и не действует на диэлектрики, например на бумагу. Это свойство имеет то же самое объяснение, если считать, что воздействие на металлы оказывает электрический ток, причем струя Авраменко имеет постоянно действующий источник стороннего тока.

Между ШМ и металлическими телами наблюдаются искры, причем одна и та же молния может испускать их неоднократно. Как мы отметили, при приближении ШМ к телу возникает ток, который при большой напряженности поля может переходить в пробой. Заметим, что если бы в ШМ не было стороннего тока, постоянно возобновляющего поле, то многократное испускание искр оказалось бы невозможным.

Встреча ШМ с массивными металлическими предметами — например с отопительными батареями, водопроводными трубами — иногда оканчивается

взрывом или ее исчезновением. В нашей модели при взаимодействии ШМ с телами происходит искажение ее поля и сферически симметричного распределения зарядов. Следовательно, нет полной компенсации кулоновской силы и перепада давления. Это может приводить к распаду ШМ, который, в зависимости от ее энергии, наблюдается как взрыв или тихое угасание.

В случае встречи ШМ с диэлектриком она, как правило, отскакивает. Предположим, что ток проводимости между ШМ и телом приводит к переносу заряда на его поверхность и тем самым к компенсации наведенных на нем зарядов. Таким образом, поле наведенных зарядов, а след за ним и притяжение ШМ к диэлектрику исчезают. Вот почему встреча с диэлектриками не приводит к распаду молнии. Вместо этого она восстанавливает форму так, как об этом уже говорилось. Поскольку тело препятствует восстановлению формы сплюсненной ШМ с одной стороны, то появляется импульс, направленный от тела, и ШМ отскакивает. То же самое может происходить, если небольшой проводник изолирован или покрыт краской.

ШМ движется на некоторой высоте от земли, пола, способна следовать по тропинке, дороге, ручью. Наблюдали, как она двигалась над рекой и, встретив мост на своем пути, поднялась и перелетела через него. Это свойство, называемое гидированием, выглядит весьма загадочно. Ясно, что в этом состоянии сумма всех вертикальных сил, действующих на ШМ, равна нулю, но как это получается?

С нашей точки зрения, ток, текущий через ШМ и вызванный перераспределением ее поля при нахождении вблизи земли, приводит к тому, что молния разогревается джоулевым теплом. Вследствие нагрева ее

плотность уменьшается и появляется выталкивающая сила, направленная вверх. Можно предположить, что она больше, чем кулоновская сила притяжения, тогда будет происходить всплывание молнии. Когда она поднимается вверх, все эти явления ослабевают и на какой-то высоте сумма вертикальных сил станет равной нулю.

Известно, что ШМ может выделять большую энергию, и ранее мы показали, что она обусловлена энергией внешнего электрического поля. В нашей модели взаимодействие молнии с внешним электрическим полем выглядит следующим образом. С одной стороны ШМ поле увеличивается, с противоположной — уменьшается. Поскольку поля не равны полю, соответствующему ЭДС, появляются токи сторонний и проводимости, и через ШМ течет сквозной ток. Если он очень велик, то и выделяется та большая энергия, которую наблюдатели принимают за энергию ШМ.

Исследования шаровой молнии, берущие начало в конце XIX в., сейчас быстро развиваются. Прогресс налицо и в получении ее лабораторных аналогов, и в теоретических исследованиях, и в изучении свойств природной ШМ.

Хочется надеяться, что данная публикация послужит побудительным мотивом для привлечения исследователей к изучению молнии, а также будет способствовать возникновению новых идей в теоретических представлениях о ней. Сбор наблюдений о шаровой молнии в природе по-прежнему актуален¹⁵.

¹⁵ Этим специально занимается группа исследователей в Ярославле. Ее адрес: 150000, Ярославль, ул. Советская, 14, Госуниверситет. «Шаровая Молния», Григорьеву Александру Ивановичу.