

УДК 551.594.2

Физическая теория шаровой молнии

С. Г. Федосин, А. С. Ким

Пермский государственный университет, г. Пермь, Россия

Анализ современных моделей шаровой молнии показывает, что они неудовлетворительны по ряду критериев. Предложена модель шаровой молнии, внешняя электронная оболочка которой удерживается внутренним объемным положительным зарядом. Согласованное движение электронов во внешней оболочке создает сильное магнитное поле, управляющее состоянием ионизованного горячего воздуха внутри шаровой молнии. Рассмотрены условия возникновения, сделаны оценки параметров шаровых молний различной мощности.

Среди редких и до сих пор загадочных явлений природы одно из первых мест по праву принадлежит шаровой молнии (ШМ). Действительно, ШМ обладают немалым количеством совершенно противоречивых свойств. Перечислим их в соответствии с данными из [1–3]:

ШМ появляются при ясном небе и во время проливного дождя у земли, либо падая из облаков;

цвет — красноватый или голубой, а иногда и то и другое, или другие цвета;

иногда неподвижны, а иногда двигаются достаточно быстро;

парят в воздухе или катятся вдоль проводов или краев предметов;

исчезают бесшумно или со взрывом, повреждая иногда окружающие вещи;

форма может быть четко очерченной или расплывчатой;

иногда избегают хороших проводников, а иногда притягиваются к ним;

бывают спокойными и искрящимися, издают сильный треск и шипение,

или оставляют сильный запах;

чаще всего ШМ наблюдаются в связи с разрядами линейных молний при грозах, ураганах, штормах, смерчах, снежных или песчаных буранах, землетрясениях, но иногда ШМ сами разделяются на более мелкие ШМ. Встречаются даже конструкции из двух ШМ, соединенных цепью светящихся бусин.

Неудивительно поэтому, что при наличии десятков моделей, объясняющих те или иные свойства ШМ, до сих пор не существует какой-то одной всеобъемлющей модели их внутреннего строения. Ситуацию осложняет и то, что мы не располагаем экспериментальной техникой, которая позволяла бы в любой момент времени создавать искусственные ШМ, не отличающиеся по своим свойствам от природных аналогов.

Целью данной работы является анализ некоторых моделей ШМ по ряду критериев, чтобы выбрать из них модели, наиболее полно отражающие основные свойства ШМ.

Условия наблюдения и характерные параметры ШМ

Время жизни наблюдаемых ШМ достигает десятков секунд, и, учитывая их внезапное появление, его слишком мало для детального исследования. Поэтому основными источниками информации о ШМ становятся последствия их взаимодействия с окружающими предметами и показания очевидцев. По данным опроса, проведенного журналом "Наука и жизнь" в 1976 г. [4], ШМ обычно представляет собой светящееся сферическое образование диаметром 10–40 см. Согласно [2], средний диаметр ШМ составляет (28 ± 4) см. Появление ШМ очень хорошо повторяет распределение грозовой активности в тече-

ние суток и частоту гроз по месяцам в течение года практически во всех странах, что говорит о тесной связи между ШМ и линейными молниями.

Вероятность наблюдения ШМ невелика, и по статистике фиксируется одна ШМ на 1000—2000 обычных молний, что связано с разным масштабом явлений и условиями их наблюдения. В среднем лишь один человек из 300 в течение своей жизни может увидеть ШМ. Как показывают опросы сотрудников NASA [5], 409 чел. видели вблизи место попадания линейной молнии в землю, а 180 чел. наблюдали ШМ. Это означает, что вероятность наблюдения ШМ всего в 2,5 раза меньше вероятности наблюдения точки поражения линейной молнии. Тогда если ШМ возникает при разряде линейной молнии, то можно ожидать ШМ почти при каждом таком разряде. И действительно, имеются непосредственные наблюдения образования одной или нескольких ШМ в месте удара линейной молнии, в ее канале или вблизи него. Во многих случаях это отмечается на высоких предметах, вышках, опорах линий электропередачи, молниеотводах.

Кроме того, проводились и специальные эксперименты по использованию естественной молнии для образования ШМ, например, с помощью ракет, соединенных с землей металлической проволокой для задания пути молнии [1]. По данным из [1—2], характерные параметры линейной молнии таковы: сечение основного канала около 10^{-2} м²; токи в главном разряде от 10^4 до $5 \cdot 10^5$ А; за время короткого разряда порядка 10^{-3} с может быть перенесено 20 Кл электричества; температура воздуха в канале молнии достигает 25000 К; скорости теплового движения у ионов не менее 10^4 м/с, у электронов — более 10^6 м/с. Свечение линейной молнии в основном обеспечивается нейтральными или однократно ионизованными атомами азота и кислорода, а в ее канале содержится $4 \cdot 10^{18}$ электронов в 1 см³ [3]. Давление ионов достигает 18 атм, а электронов — 14 атм, так что быстрый распад канала сопровождается таким звуковым эффектом, как удар грома. Если напряжение между облаком и землей равно 10^8 В, а переносимый заряд 20—30 Кл, то энергия молнии равна $(2 \div 3) \cdot 10^9$ Дж [4]. При средней длине молнии 3—5 км энергия на единицу длины составит $5 \cdot 10^5$ Дж/м, что вполне достаточно, чтобы снабдить энергией образующуюся ШМ. Наблюдения показывают, что 68 % ШМ двигаются горизонтально, 18 % — вниз, 5 % — вверх, причем 17 % ШМ передвигаются скачкообразно, а 83 % — плавно. Скорости движения лежат в пределах 0,1—10 м/с, что, по данным [5], составляет 70 % всех случаев, а для оставшихся 30 % — скорости не превышают 40 м/с.

Парящие ШМ обычно красные, избегают хороших проводников и часто проникают в закрытые помещения через окна, двери, дымоходы, узкие каналы и щели. Прикрепленные к предметам ШМ в основном ослепительно яркие, белые или голубые, задерживаются на хороших проводниках (вода, металлическая поверхность, провода) или могут катиться по ним. Они нагревают предметы, с которыми соприкасаются, и часто исчезают как бы кипя и выбрасывая искры. Переход парящей ШМ в прикрепленную и наоборот вполне реален и может произойти внезапно.

Многочисленные свидетельства показывают о том, что даже вблизи ярко светящейся ШМ не ощущается тепла, однако обнаруживается сильное радиоизлучение, фиксируемое шумами и тресками в радиоприемниках и даже в телефонных трубках при прохождении ШМ возле них. В видимом диапазоне мощность излучения ШМ составляет единицы ватт, так как визуально она соответствует электролампочке мощностью около 100 Вт. Иногда отмечаются нерегулярность свечения и вспышки, а изменение цвета ШМ обычно сопровождается ее взрывом.

По данным [4], из 335 сообщений о взрывах ШМ в 34 случаях наблюдались повреждения предметов, причем в 19 случаях это были деревянные предметы или столбы. Нередко ШМ пробивают дыры в фанерных перегородках и дверях или глиняных стенах, испаряют небольшое количество вещества при соприкосновении с металлическими предметами, прожигают одежду, ковры и оставляют другие следы. В частности, сообщается о том, что ШМ сбивали на пол кастрюли и телефонные аппараты, проникали в помещения через стекла, повреждали электропроводку и электрооборудование с оплавлением деталей.

В работах [1—3] имеются описания различных аварийных ситуаций, при которых спонтанно возникали ШМ. Как следует из опыта контактов с ШМ, они обычно образуются вблизи источников сильных электромагнитных разрядов при ударе молнии, при замыкании-размыкании высоковольтного или сильноточного электрооборудования постоянного или переменного тока, при высокочастотных импульсах мощных генераторов. Например, получали ШМ при напряжении 12 кВ и мощности 10^7 Вт при разряде за время порядка 10^{-3} с. По данным из [6], при аварийном отключении батарей в субмарине ШМ диаметром 12 см возникла возле контактов переключателя, при этом протекающий ток достигал величины $1,6 \cdot 10^5$ А.

Результаты экспериментов, в которых создавались светящиеся плазменные образования, напоминающие по форме ШМ, представлены в [1, 3, 7]. Если газ или жидкость находятся в зоне контакта с разрядниками с высоким напряжением или сильным током, то разряд часто принимает сферическую форму. В эксперименте [8] использовался разряд от двух загнутых электродов в газах при различных давлениях. При этом появлялось светящееся облако, свечение которого сильно увеличивалось при добавлении малой концентрации углеводородов. Авторы работы [9] производили разряд в камере при давлении 10^{-5} атм так, что стенки камеры из диэлектрика разрушались, превращаясь в светящуюся плазму со временем жизни 10 мс. На фотографиях было видно, что вначале плазма имела форму шара, а затем становилась вихреобразной.

История с безэлектродными разрядами, по-видимому, начинается с экспериментов Тесла в конце XIX века с высоковольтными трансформаторами. В других опытах мощные сфокусированные СВЧ-импульсы с частотой 75 МГц и мощностью 30 кВт возбуждали воздух до температуры 2500 К, причем время его после свечения достигало 2 с [10]. Тем не менее, следует констатировать, что результаты этих и многих других экспериментов не могут в полной мере моделировать все основные свойства ШМ. Например, хотя 59 % ШМ живет в среднем 3 с, а 26 % — 29 с, но в 15 % случаев отмечено время 213 с [11].

Модели ШМ и критерии их анализа

Поскольку количество различных моделей ШМ достаточно велико, далее кратко будут представлены лишь основные и наиболее разработанные модели. При их анализе мы будем опираться на следующие критерии [4]:

- механизм образования ШМ, связь с атмосферным электричеством;
- источник энергии и способ ее хранения;
- характер движения, перемещения и равновесия ШМ в атмосфере;
- устойчивость формы и ее трансформация, характерные размеры;
- механизмы свечения и радиоизлучения, образования искр и характерного звука от ШМ, а также специфического запаха;
- причины взрыва или тихого исчезновения, время жизни.

Некоторые примеры расчетов [1, 2] повреждения предметов после контакта с ШМ позволяют сделать оценки ее внутренней энергии. В случае, когда ШМ оплавил одежду на теле человека и кольцо, одетое на палец, требуемая энергия составляет 440 Дж. При диаметре 10 см плотность энергии в ШМ будет $0,8 \text{ Дж/см}^3$. В другом случае ШМ опустилась на асфальт и образовала в нем ямку. Считая, что битум нагрелся до 170°C , при видимом диаметре 14 см, энергия ШМ должна достигать 3 кДж. Из сообщения В. В. Варсонофьева [4] следует, что ШМ разрядилась в батарею водяного отопления. В результате появилась лунка диаметром 4–5 см и глубиной 0,5 мм. Масса испаренного металла составила 0,08 г, на что потребовалось 700 Дж. В случае с Я. В. Березовским ШМ диаметром 10–20 см испарила металл массой 0,22 г на шомполе ружья, затратив энергию до 2 кДж. Минимальную плотность энергии ШМ можно оценить по акустическому шуму от ее взрыва, а также по ее излучению и светимости при времени жизни 1 с. В первом случае получается величина более $0,006 \text{ Дж/см}^3$, а во втором — порядка $0,2 \text{ Дж/см}^3$, что для ШМ с радиусом 1 см дает энергию 0,8 Дж.

Перейдем теперь к обзору моделей ШМ. В некоторых *плазменных моделях* предполагается, что ШМ состоит либо из положительных и отрицательных ионов; либо из электронов и положительных ионов. Плотность энергии полностью ионизованной плазмы воздуха может достигать 180 Дж/см^3 (из них 30 Дж на диссоциацию молекул и 150 Дж на однократную ионизацию), что достаточно для объяснения энергетике ШМ. Однако представление о ШМ как о сгустке рекомбинирующей неидеальной плазмы плохо согласуется с критерием времени жизни — плазма под действием кулоновских сил исчезнет слишком быстро, за время не более 10 мс. Не спасает положения и *кластерная модель* [4], в которой ионы окружены оболочками из нейтральных частиц (например воды), затрудняющими рекомбинацию. В этой модели предполагается температура ионов $500\text{--}700^\circ\text{C}$, а для объяснения взрывов ШМ постулируется существование двух каналов рекомбинации — медленного и быстрого. Слишком быстрое выделение энергии получается и в *аэрозольной модели*, в которой положительные и отрицательные заряды сосредоточены на частицах пыли, дыма или на каплях.

Квантовомеханическая модель описана в [12], где рассматривается квазинейтральная плазма из ионов и электронов. Если спины электронов направлены противоположно, то кинетические силы расширения газа могли бы быть уравновешены силами обменного взаимодействия электронов. Однако в этой модели объяснение многих особенностей ШМ требует дополнительных предположений.

В нейтральном газе с долгоживущими возбужденными атомами и молекулами может быть достаточно энергии (объем шара с радиусом 20 см содержит до 10 кДж), но его люминесценция, как следует из опыта, длится не более 0,1 с. Малое время жизни получается и в *моделях*, в которых ШМ рассматривается как *светящаяся сфера* из испаренных линейной молнией веществ.

Большое разнообразие имеют *химические модели*. В одной из самых старых моделей [13] считается, что в ШМ происходит горение углеводородных смесей. Светящийся желто-зеленый шарик размером 4 см при времени жизни до 2 с был получен в [14] при поджигании электрической искрой смеси воздуха и 1,4–1,8 % пропана, плотность энергии составила $7 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^3$. Другими кандидатами в качестве активного вещества назывались водород, метан, угольная пыль или химически активный аэрозоль, которые могли быть или образоваться в месте удара линейной молнии (например в районе болот или угольных шахт). Недостатком этих моделей является то, что для несвязанных

между собой частиц трудно объяснить устойчивую форму ШМ при движении против ветра и при прохождении через стекла, электрические явления ШМ, а также то, что при горении радиус стремится быстро увеличиться. Кроме этого, ШМ образуются и в тех местах, которые заведомо лишены источников горючих веществ. Источником энергии ШМ могла бы быть реакция разложения озона. При концентрации озона в 2%-ном в воздухе плотность его химической энергии равна $0,13 \text{ Дж/см}^3$ [2], но время жизни ШМ получается слишком маленьким, если учесть, что скорость реакции увеличивается за счет повышения температуры.

Для объяснения устойчивости формы ШМ в [15] была предложена *нитевидная модель* ШМ на основе аэрогелей типа SiO_2 или Al_2O_3 , далее развитая в [2], [29]. Для поддержания формы и поверхностного натяжения, необходимого для объяснения упругости ШМ, нити следует считать заряженными до 10^{-6} Кл. Из-за того, что каркас нагрет до высокой температуры, возникает подъемная сила Архимеда. Вдоль нитей располагаются химически активные вещества, ответственные за световое излучение. Вопросы, требующие доработки в этой модели, таковы: состав аэрогеля и активного химического вещества, объяснение радиоизлучения, искрения и запаха от ШМ и ее возможного взрыва.

Похожей по конструкции является *пузырьковая модель* [16], в которой ШМ имеет ядро типа пузыря из металла или силиката, а его плавучесть в воздухе возникает за счет силы Архимеда. В одной из модификаций пузырьковых моделей ШМ представляет собой биполярно заряженный пузырь, имеющий оболочку из воды с упорядоченным расположением молекул и толщиной 10 мкм [17].

Известны *модели ШМ*, в которых *основной энергией является энергия электрического поля*. Общий заряд ШМ не может превышать такой величины, при которой напряженность электрического поля на ее поверхности превышает $E_0 = 30 \text{ кВ/см}$ во избежание пробоя атмосферного воздуха. Отсюда при радиусе ШМ $r = 0,07 \text{ м}$ находим ее заряд и электрическую энергию:

$$Q_0 = 4\pi\epsilon\epsilon_0 E_0 r^2 = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ Кл};$$

$$W = \frac{KQ_0^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} = 0,34 \cdot \text{К, Дж}, \quad (1)$$

здесь ϵ_0 — электрическая постоянная;

ϵ — диэлектрическая проницаемость (принимаем здесь $\epsilon = 1$);

коэффициент K равен 0,5 или 0,6, соответственно, для случаев, когда заряд распределен либо по поверхности сферы, либо в объеме шара.

Как видно из (1), электростатическая энергия слишком мала, чтобы объяснить энергосодержание в ШМ. Эту трудность обходят, рассматривая не один заряд, а два разноименных заряда как в сферическом конденсаторе или объемные заряды. Однако, остается еще проблема устойчивости ШМ при быстрой разрядке этих зарядов вследствие действия кулоновских сил. В одной из моделей [18] внутри плазмоида находится положительно заряженное ядро; снаружи которого идет слой отрицательных ионов и область ионизации электронным ударом, а затем — области фотоионизации газа УФ-излучением и рекомбинации ионов. Отсюда электроны и отрицательные ионы идут внутрь, а положительные ионы — наружу. По мнению автора, ШМ должны образовываться из положительно заряженных молний или в областях с положительным зарядом.

Увеличения устойчивости можно добиться в *вихревых моделях*. Вращающийся кольцевой вихрь плазмы с замороженным в него магнитным полем описан в [19]. В модели [20] заряженные частицы вращаются по поверхности тора в меридиональном направлении, создавая внутри тора магнитное поле как в соленоиде. Как показывают расчеты, если энергия плазмоида складывается из кинетической энергии частиц и энергии магнитного поля, то полная энергия в силу теоремы Виряла не превышает величины $3PV$, где V — объем плазмы; P — внешнее давление. Если $P = 1$ атм, радиус ШМ 10 см, то ее энергия может быть до 1000 Дж. Однако согласно исследованиям по теории устойчивости магнитогидродинамических конфигураций [21], система, удерживаемая собственным магнитным полем, устойчива лишь при наличии внешнего давления.

Одной из наиболее разработанных моделей ШМ с внешним источником энергии является *модель Капицы* [22], согласно которой наблюдаемая постоянная интенсивность свечения ШМ объясняется поступлением энергии от грозových облаков по радиоволноводу. Для обоснования модели были проведены эксперименты [23], показавшие принципиальную возможность существования светящихся плазменных образований в радиочастотном поле. Тем не менее, проблема с энергией решена не была, так как сильное радиоизлучение от молний длится всего лишь тысячные и сотые доли секунды, а в необходимом для резонанса с объемом ШМ диапазоне при длине волны 30–70 см плотность энергии слишком мала. Имеется еще ряд моделей с внешним источником энергии, например [24], но поведение и движение ШМ часто таково, что она кажется автономной и не зависящей ни от каких каналов или волноводов.

Представляемая в следующем разделе электронно-ионная модель ШМ содержит в себе многие положительные черты более ранних теорий и в принципе допускает экспериментальную проверку.

Схема образования и структура ШМ в электронно-ионной модели

Если не учитывать появление ШМ при срабатывании мощного электрооборудования, то практически во всех остальных случаях ШМ наблюдается в связи с обычными линейными молниями или просто в облачно-грозовую погоду. В рамках электронно-ионной модели природная ШМ может быть непосредственным следствием линейной молнии, когда грозовая туча разряжается на землю, передавая ей свое отрицательное электричество (или при разряде соседних облаков). На рис. 1, *а* показаны вторичные ветви и основной канал молнии, наполненные, соответственно, покоящимися и движущимися электронами. Быстрое движение электронов и основная вспышка молнии начинаются после соединения основного канала с землей, таким образом светящаяся часть молнии растет от земли к туче. Электроны, находящиеся во вторичных ветвях, также движутся к основному каналу и сбываются через него на землю. При этом возможен почти замкнутый контур электронного тока (рис. 1, *б*), когда в его центре появляется магнитное поле с индукцией B . В наэлектризованном воздухе вокруг молнии находится много положительных ионов, которые начинают закручиваться вокруг силовых линий магнитного поля и тем самым фиксируются в центре.

В свою очередь ток электронов из канала 2 может перескочить на ветвь 1 через область 3, образуя далее замкнутый ток. Необходимым условием для этого должна быть сила, удерживающая электроны на замкнутой орбите.

При достаточном количестве положительных ионов в центре они могут притягивать к себе электроны и тем самым обеспечивать их устойчивое вращение. Данный процесс может происходить и в относительно слабом вторичном канале, что объясняет возникновение ШМ в стороне от ярко сверкающего главного канала линейной молнии. Кроме этого, образование ШМ возможно не только у земли или у высоких предметов, но и вдоль всего канала линейной молнии, начало которого теряется в облаках. В некоторых случаях, когда линейная молния ударяла в токопроводящие провода, наблюдали ШМ, выходящими из телефонных аппаратов, розеток для радио, счетчиков, патронов от электролампочек, здесь ШМ возникали благодаря замыканию импульсов тока линейной молнии через воздух возле контактов в виде электрической дуги.

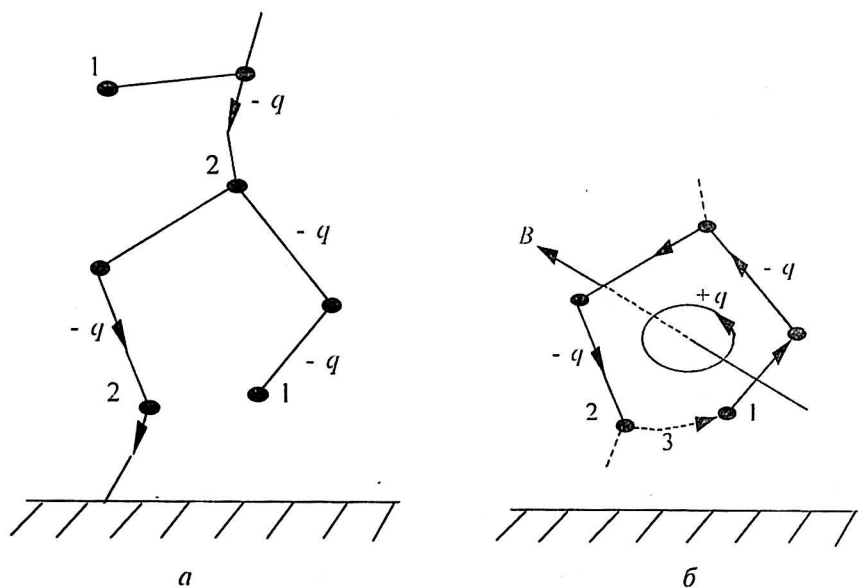


Рис. 1, а — вторичные ветви молнии (1) и (2), основной канал, в котором движутся электроны (q); б — движение электронов из вторичной ветви 1 в основной канал 2 молнии может быть замкнуто через область 3; В — индукция магнитного поля от тока электронов. Ионы с зарядом $+q$ вращаются вдоль линий магнитного поля

Исходя из данной картины, на рис. 2 представлено экваториальное сечение модели ШМ в виде осесимметричной конфигурации с параллельными сферическими токами. Положительные ионы находятся при атмосферном давлении в очень горячем воздухе внутри ШМ, оставшемся после удара линейной молнии. Быстродвижущиеся во внешней оболочке электроны генерируют магнитное поле с индукцией B , которое удерживает положительные ионы на орбитах внутри ШМ. При каком-то радиусе R скорость вращения ионов совпадает с тепловой скоростью, что выделяет отдельную равновесную оболочку в ШМ. Наконец, электрическое притяжение положительных ионов и отрицательно заряженных электронов удерживает электроны во внешней оболочке от разлета, являясь основной частью центростремительной силы. Исходя из приблизительно сферической формы ШМ, радиус вращения r внешнего электронного облака вокруг общей оси уменьшается по мере перехода от экватора к полюсам.

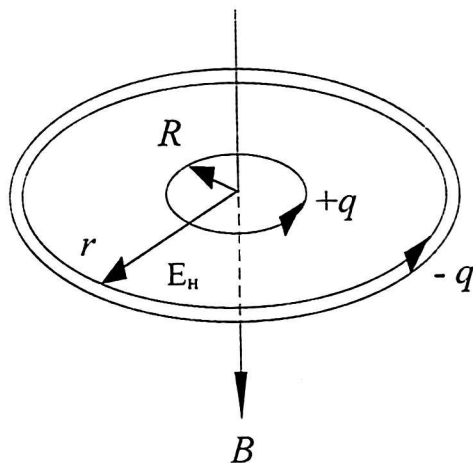


Рис. 2. Экваториальное сечение модели шаровой молнии, выделяющее кольца на токовых оболочках сферидальной формы:

R — радиус вращения ионов в равновесной оболочке вокруг магнитного поля индукцией B ; r — радиус внешней электронной оболочки

Данная относительно устойчивая конфигурация позволяет объяснить наблюдаемое время жизни ШМ, существенно превышающее время жизни однородной ионно-электронной плазмы при атмосферном давлении. Электронная оболочка эффективно изолирует нагретый до высокой температуры воздух внутри ШМ, замедляя перенос энергии в окружающую среду. Положительные ионы внутри ШМ практически не притягиваются электронами из внешней оболочки, так как электрическое поле от электронов внутри сферы равно нулю из-за уравнивания всех электрических сил. Поэтому ионы могут распределяться равномерно по всему объему ШМ, а рекомбинация ионов и электронов существенно замедляется.

Как видно на рис. 1, б, ШМ фактически есть небольшой кусок линейной молнии, закрученный в клубок с характерным размером 10—40 см. Соответственно в обоих типах молний токи и магнитные поля могут быть близки по величине.

Для того чтобы представить устройство ШМ более наглядно, приведем весьма подробное свидетельство М. Т. Дмитриева, специалиста-химика, имевшего опыт работы с низкотемпературной плазмой и ставшего очевидцем явления ШМ [25]:

“Светимость молнии была значительной, особенно при расстоянии в несколько метров, тем не менее, ее все же можно было свободно рассматривать, без чрезмерного напряжения. Было заметно, что цвет молнии неоднороден. Центральная часть представляла собой шар диаметром около 6—8 см, несколько вытянутый в вертикальном направлении. Эта часть была и наиболее яркой, по своему внешнему виду (кроме формы) весьма напоминая электро-разрядный факел в воздухе, получаемый в плазмотронах с температурой плазмы порядка 13000—16000 °С. Центральная часть молнии была окружена областью толщиной 1—2 см с густым фиолетовым свечением, очень похожим на свечение воздуха при давлении 0,1 мм рт. ст., бомбардируемого электронами с энергией в несколько десятков электронвольт. Следующая, наружная оболочка, толщиной около 2 см, также была неоднородна, напоминая по цвету тихий электрический разряд при атмосферном давлении или периферийное свечение электронного пучка с энергией в несколько десятков кило-

электронвольт, попадающего из вакуумной трубки в воздух при обычном давлении. Светло-голубое свечение этой части молнии быстро убывало с увеличением расстояния от центрального шара, постепенно сходя на нет. Оболочки молнии хорошо просматривались только в горизонтальном направлении. В нижней части они, вероятно, были сжаты и их можно было различить только при сопоставлении с боковыми частями молнии. Над молнией сверху оболочки были значительно толще, но не так резко выражены. Кроме того, в них можно было видеть отдельные яркие конвективные струи (как над обычным костром, только цвет их был с беловатым оттенком). Общий диаметр шара составлял около 11—12 см в горизонтальном направлении и около 14—16 см — в вертикальном. С расстояния в несколько десятков метров наблюдалась, по-видимому, только центральная часть шара. Издали молния имела синеватый оттенок... В молнии, по-видимому, все время выделялась энергия. На это указывали сплошной шорох и сильные отдельные потрескивания. Вероятно, непрерывно происходила и утечка ее заряда. Выделение энергии резко увеличивалось при соприкосновении молнии с поверхностями (листьями или сучками) и сопровождалось более сильным треском и искрением. Молния оставила после себя сильный запах, по своему характеру почти совпадающий с запахом воздуха, подвергнутого воздействию ионизирующего излучения”.

Как видно из приведенного текста, шаровая молния Дмитриева имела вертикальную ось симметрии, совпадающую с осью вращения электронного облака в нашей модели ШМ и с направлением внутреннего магнитного поля. Внутреннее ионное облако молнии было вытянуто в вертикальном направлении, а все оболочки хорошо просматривались только в горизонтальном направлении. О вращении частиц в оболочках с дифференциальной скоростью говорили отдельные яркие конвективные струи. Наличие большой напряженности электрического поля возле ШМ и энергичных частиц подтверждается многочисленными наблюдениями их шипения, потрескивания и испускания искр как при электрическом разряде. Кроме того, пробы воздуха, взятые после прохождения ШМ, показали повышенное содержание озона и окислов азота (приблизительно в 50—100 раз выше нормы). По данным из [25], требуемое соотношение концентраций озона и окислов азота можно получить при электрическом разряде в воздухе с напряженностью до 400 кВ на 1 м, а оценка необходимой электрической энергии в таком эквивалентном разряде за все время жизни ШМ дает значение 530 Дж [1].

Для дальнейшего рассуждения обозначим:

M, V, R и m, v, r — массы, скорости движения и радиусы вращения ионов и электронов, соответственно;

B — индукция магнитного поля;

N_i — количество нескомпенсированных положительных ионов внутри ШМ;

N_e — количество свободных электронов во внешней оболочке ШМ;

q — элементарный электрический заряд;

i — ток электронов на орбите радиуса r ;

μ, μ_0 — относительная магнитная проницаемость среды и магнитная постоянная, соответственно.

Выделенная внутри ШМ оболочка является границей, где тепловая скорость ионов выравнивается со скоростью вращения ионов в магнитном поле. В этом месте справедливо соотношение

$$\frac{MV^2}{R} = qVB, \quad (2)$$

и ионы вращаются по окружности радиуса R в плоскости, перпендикулярной магнитному полю.

С другой стороны, заряженные частицы беспрепятственно могут двигаться вдоль линий магнитного поля. Следовательно, при радиусе R вместо хаотического движения ионов встречаются упорядоченные взаимно перпендикулярные ионные потоки, что сопровождается сильным трением в газе и соответствующим выделением энергии в виде излучения.

Характерная энергия U_i ионизации молекул воздуха составляет величину около 13 эВ. Если считать, что существует тепловое равновесие между ионами и электронами внутри ШМ, то можно найти их температуру из условия

$$U_i = \frac{3}{2} kT,$$

где k — постоянная Больцмана.

Отсюда получаем температуру $T = 10^5$ К, требуемую для полной ионизации воздуха, однако, учитывая, что не весь газ был ионизирован при образовании ШМ из нагретого воздуха вблизи линейной молнии, средняя температура в $1,4 \cdot 10^4$ К внутренней оболочки при радиусе R , по наблюдению Дмитриева, вполне возможна.

Верхние значения параметров ШМ не могут превышать соответствующих параметров линейных молний. Вблизи основного канала молнии при токе $I_M = 2 \cdot 10^5$ А и радиусе $R_M = 0,1$ м индукция магнитного поля достигает величины $B = \frac{\mu_0 I_M}{2\pi R_M} \sim 0,4$ Т. Если электрон вращается в таком магнитном поле с радиусом орбиты r_e , то его скорость должна быть меньше скорости света

$$v = \frac{Bqr_e}{m} < c, \quad r_e < \frac{mc}{Bq} = 4 \cdot 10^{-3}, \text{ м.}$$

Поскольку $r_e \ll R_M$, то в магнитном поле вблизи канала молнии могут удерживаться и накапливаться даже релятивистские электроны. С другой стороны, при токах более 1000 А в импульсных вакуумных разрядах электронная температура в энергетических единицах достигает 1 кэВ, а скорости движения электронов — до 10^7 м/с [26]. В качестве верхнего значения тока в плазме следует, по-видимому, использовать величину $1,4 \cdot 10^6$ А [27], так как дальнейшее увеличение напряженности электрического поля приводит к сжатию токового шнура и увеличению излучения при неизменных токе и температуре частиц.

Для упрощения расчетов будем считать, что заряды и токи в основном сконцентрированы вблизи экваториальной плоскости или имеют цилиндрическую симметрию, а ионы — однозарядны. Выразим электронный ток во внешней оболочке и магнитное поле этого тока, действующее на ионы:

$$i = \frac{qN_\varepsilon v}{2\pi r}, \quad B = \frac{\mu_0 i}{2r}. \quad (3)$$

Скорость ионов во внутренней оболочке V можно оценить по средней температуре свечения T с помощью соотношения между кинетической и тепловой энергиями

$$\frac{MV^2}{2} = \frac{3kT}{2}.$$

При $T = 1,4 \cdot 10^4$ К и средней массе иона $M = 4,7 \cdot 10^{-26}$ кг как у молекулы азота скорость ионов будет равна $V = 3,5 \cdot 10^3$ м/с. Решая теперь (2), (3), при радиусе ШМ $r = 7$ см и радиусе выделенной оболочки $R = 4$ см находим индукцию магнитного поля и электронный ток:

$$B = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}, \quad i = 2,9 \cdot 10^3 \text{ А.}$$

При температуре воздуха в ШМ $T = 1,4 \cdot 10^4$ К и атмосферном давлении концентрация частиц $n = 5,2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ их общее число в объеме ШМ достигает $7 \cdot 10^{20}$. При степени ионизации в 22 % число зарядов будет равно $1,5 \cdot 10^{20}$, что существенно больше, чем число электронов N_e на внешней оболочке ШМ, или нескомпенсированный положительный заряд в объеме ШМ. Условие равновесия для электронов, движущихся во внешней оболочке, связывает центростремительную и электрические силы:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{N_i q^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} - \frac{N_e q^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \quad (4)$$

Первое выражение в правой части (4) описывает силу притяжения между электроном и внутренним объемным ионным зарядом, второе — силу отталкивания электронов во внешней оболочке друг от друга. Баланс сил (4) будет выполняться в том случае, когда общее число нескомпенсированных положительных зарядов N_i будет незначительно превышать число свободных электронов во внешней оболочке N_e . Следовательно, ШМ в целом должна быть заряжена положительно. Предположим, что между количествами ионов и электронов существует следующее соотношение:

$$\Delta N = N_i - N_e = \frac{1}{50} N_e.$$

Тогда из выражения для уже найденного тока (3) и с помощью (4) можно оценить скорость движения электронов во внешней оболочке, количество ионов и электронов, а также эффективный заряд ШМ:

$$v = 8,7 \cdot 10^7 \text{ м/с}; N_i \approx N_e = 9,2 \cdot 10^{13}; Q = q\Delta N = 2,9 \cdot 10^{-7} \text{ Кл.} \quad (5)$$

Кинетическая энергия электронов во внешней оболочке ШМ будет равна

$$E_k = \frac{N_e m v^2}{2} = 0,3 \text{ Дж.} \quad (6)$$

Умножая объем ШМ на плотность магнитной энергии, оценим энергию магнитного поля

$$E_m = \frac{4\pi r^3}{3} \frac{B^2}{2\mu\mu_0} \approx \frac{\pi\mu\mu_0 r i^2}{6} = 0,4 \text{ Дж.} \quad (7)$$

Электростатическая энергия ШМ вычисляется как интеграл от плотности энергии электрического поля u по объему:

$$W = \int_0^\infty u dV,$$

где $u = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2}$; E — напряженность электрического поля.

За пределами ШМ напряженность поля E мала из-за частичной компенсации положительного ионного заряда и отрицательного заряда от электронов во внешней оболочке. В самой электронной оболочке поле достаточно большое, но объем оболочки существенно зависит от ее толщины; при малой толщине энергия в оболочке может быть невелика. Энергия поля внутри ШМ легко рассчитывается, при равномерном распределении положительных зарядов по объему с их общим зарядом qN_i энергия шара с учетом (5) равна

$$W_+ = \frac{q^2 N_i^2}{40\pi\epsilon\epsilon_0 r} = 2,8 \text{ Дж.} \quad (8)$$

Полная электростатическая энергия ШМ будет немного больше, чем величина (8).

По данным из [25], плотность энергии плазмы в ШМ при температуре $T = 1,4 \cdot 10^4$ К составляет $0,35$ Дж/см³. Умножая эту плотность на объем нашей модели ШМ при ее радиусе 7 см, находим максимально возможную энергию плазмы, включая кинетическую энергию частиц

$$E_i = 500 \text{ Дж.} \quad (9)$$

Таким образом, основная энергия в ШМ среднего размера согласно (6) — (9) заключена в энергии ионизованных частиц.

Найденный нами в (5) заряд Q в $5,5$ раз меньше, чем предельный заряд ШМ согласно (1). Найдем напряженность электрического поля E вблизи поверхности ШМ и соответствующий электрический потенциал

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} = 530 \text{ кВ/м,} \quad \varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} = 37 \text{ кВ.} \quad (10)$$

Данной напряженности поля вполне достаточно, чтобы вызвать появление в воздухе вокруг ШМ озона и окислов азота, запах которых, как правило, сопровождает явление ШМ. Поскольку заряд ШМ положительный, то она будет бомбардироваться электронами и отрицательными ионами из окружающей атмосферы. Приобретаемая ими энергия в электрическом поле ШМ (10) может достигать значения вплоть до величины 37 кэВ, считая в энергетических единицах.

Известно, что пробег электронов в воздухе ограничивается различными потерями и при начальной энергии электронов в 40 кэВ не превышает 2 см. На самом деле начальная энергия электронов воздуха мала, и они в электрическом поле ШМ приобретут существенно меньшую энергию. Если считать, что зона ускорения электронов вблизи ШМ равна $\Delta r = 1$ см, то из (10) для их энергии следует:

$$q\Delta\varphi = \frac{qQ\Delta r}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} = 5 \text{ кэВ,}$$

что соответствует наблюдениям Дмитриева [25] о свечении оболочки ШМ подобно периферийному свечению электронного пучка в воздухе.

Для проверки устойчивости ШМ следует проверить, какое давление на внешнюю электронную оболочку оказывают электрические силы расталкивания нескомпенсированных положительных ионов внутри ШМ. Вблизи электронной оболочки при радиусе r на положительный ион с зарядом q действует сила со стороны всех нескомпенсированных ионов, общее число которых N_i почти точно равно числу электронов N_e во внешней оболочке

$$F = \frac{N_i q^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}.$$

Используя известную концентрацию n частиц воздуха внутри ШМ при атмосферном давлении и температуре $T = 1,4 \cdot 10^4$ К, можно записать характерный объем, приходящийся на одну частицу, в виде величины $\frac{1}{n}$, а площадь в

расчете на одну частицу — в виде $\sigma = \left(\frac{1}{n}\right)^{2/3}$. Разделив силу F на σ , получим дополнительное давление на один ион

$$\bar{P}_i = \frac{F}{\sigma} = 2,8 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

Данная величина на порядок меньше атмосферного давления, так что с учетом малого числа ионов N_i по отношению к общему числу частиц газа в ШМ и фиксирующего действия магнитного поля в отношении плазмы электронная оболочка должна удерживать ионы внутри себя.

Оценим толщину d внешней электронной оболочки ШМ с помощью условия для давления в плазме в магнитном поле

$$P_m + P_{\perp} = \text{const},$$

где $P_m = \frac{B^2}{2\mu_0}$ — магнитное давление;

P_{\perp} — давление плазмы поперек линий магнитного поля.

Предположим, что основное давление во внешней оболочке поддерживается самим воздухом, а магнитное давление равно добавочному давлению P_e от движения электронов:

$$P_e = n_e kT = \frac{N_e kT}{4\pi r^2 d}, \quad \text{где} \quad \frac{3kT}{2} = \frac{mv^2}{2}.$$

При условии $P_m \approx P_e$ получаем $d = 1,3$ см. В другом предельном случае, когда давление P_e равно атмосферному и превышает магнитное давление, толщина электронной оболочки должна быть тоньше, достигая величины $3 \cdot 10^{-5}$ м.

Движущиеся с большими скоростями во внешней оболочке электроны при столкновениях с частицами воздуха должны ионизировать их, что является основной причиной малого пробега электронов в воздухе при рассматриваемых энергиях. Однако получающиеся при ионизации вторичные электроны за счет эффекта электронной лавины могут вполне заменить первичные электроны, двигаясь под действием центростремительной силы от внутреннего положительного заряда ШМ. Кроме того, между внешним давлением, электронным током и магнитным полем в плазме имеется обратная связь — сдвигание ШМ (например при ее остывании) увеличивает токи и магнитное поле, а магнитное поле за счет самоиндукции старается поддержать исходный ток.

Благодаря своему заряду (5) ШМ может двигаться под влиянием электрических полей. Как отмечается в [3], ШМ иногда выпадают из облаков и быстро направляются к земле, ударяются об нее и взрываются. Часто это движение происходит вдоль канала только что возникшей линейной молнии. На тесную связь между местами появления ШМ и ударов линейных молний указывает свидетельство физика Лэба, известного специалиста в области газового разряда [4]: *“Летом 1898 или 1899 г. в Спрингфильде (штат Массачусетс) разразилась сильная гроза, которую он наблюдал из окна дома родителей. Он заметил шар, светящийся так, как светятся возбужденные атомы азота. Шар медленно спускался с крыши соседнего дома по плавной криволинейной траектории. Диаметр его был равен диаметру двух детских воздушных шаров. Упав на лужайку перед домом, он подпрыгнул и исчез. После этого дом напротив поразил удар линейной молнии”.*

Отмечается, что в некоторых случаях ШМ образуется от одной линейной молнии и уничтожается другой линейной молнией. ШМ, возникшие вблизи земли, обычно двигаются медленно и могут останавливаться у некоторых предметов, перемещаться против ветра или даже подниматься в облака. Эти особенности поведения ШМ вполне могут быть объяснены действием на нее сильных электрических полей между облаками и выступающими предметами

на земле, периодически колеблющимися при разрядах линейных молний и движении облаков вплоть до изменения направления напряженности поля. Кроме того, вследствие высокой температуры воздуха внутри ШМ ее средняя плотность отличается от плотности окружающего воздуха, так что к электрическим силам нужно добавить подъемную силу Архимеда. Следует учесть, что из-за разной плотности воздуха на уровне облаков на высоте 300—500 м и у земли сила Архимеда изменяется приблизительно на 6 %. Баланс указанных сил осуществляется, по-видимому, у привязанных или прикрепленных ШМ либо парящих неподвижно, либо связанных с предметами. В течение жизни ШМ ее заряд может изменяться из-за взаимодействия с окружением или при частичном распаде, приводя к изменению равновесного состояния. Так, при переходе от прикрепленной ШМ к свободной она обычно взмывает вверх, а затем по наклонной линии уходит к облакам.

Рассмотрим процесс уравнивания ШМ в атмосфере более подробно. Если воздух внутри ШМ сильно нагрет, то сила Архимеда много больше веса самой ШМ. С другой стороны, при своем образовании ШМ обычно находится в районе вхождения линейной молнии в землю или у высоких предметов, несущих потенциал земли. Благодаря заряду ШМ создает в земле как в проводнике наведенные заряды и притягивается к ним. Силу притяжения можно определить с помощью метода изображений из электростатики. Найдем высоту h над землей, при которой ШМ находится в равновесии, из равенства силы Архимеда и электрической силы

$$\rho g V_b = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0(2h)^2}, \quad (11)$$

где $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$ — плотность атмосферного воздуха вокруг ШМ;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение силы тяжести;

$V_b = 1,43 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ — объем ШМ.

При заряде Q из (5) высота $h = 10 \text{ см}$, что близко к размеру ШМ. По мере остывания воздуха в ШМ уменьшается ее объем, а при потере электронов с наружной оболочки может увеличиваться и заряд Q . Поэтому ШМ может всплыть над землей и далее плавно перемещаться в зависимости от рельефа местности, ветра и электрических полей от грозových облаков. Для примера вычислим электрическое поле, которое бы уравнило силу Архимеда

$$E = \frac{\rho g V_b}{Q} = 6,2 \cdot 10^4 \text{ В/м}. \quad (12)$$

Известно, что разность потенциалов между облаками и землей может достигать величины вплоть до 10^8 В , что при высоте облака над землей в 1 км дает напряженность поля 10^5 В/м (вместо тех 100 В/м , которые наблюдаются при ясной погоде). Сравнение с (12) показывает, что действительно электрические поля грозových облаков могут управлять движением ШМ.

Шаровые молнии экстремально малой и большой мощности

Потенциальная энергия ШМ по абсолютной величине не может быть меньше, чем кинетическая энергия электронов, что является условием целостности ШМ так же, как и любого другого объекта. Одному из экстремальных состояний ШМ соответствует приближенное равенство между магнитной, электрической и кинетической энергиями движущихся заряженных частиц (например при образовании плазмоида типа ШМ в фокусе концентрированной электромагнитной волны). Для такого состояния из равенства

магнитной и кинетической энергии электронов с учетом (7), (3) и формулы для E_k из (6) можно найти число зарядов

$$E_m = \frac{\pi\mu_0 r i^2}{6} = \frac{\mu\mu_0 q^2 N^2 v^2}{24\pi r} = E_k = \frac{N m v^2}{2}, \quad N = \frac{12\pi m r}{\mu\mu_0 q^2}.$$

При радиусе самых малых ШМ порядка $r = 1$ см для числа зарядов получается величина $N = 10^{13}$. Подставляя величину N вместо N_i в (8), найдем электрическую энергию $W_+ = 0,23$ Дж. При той же плотности энергии плазмы, что и в (9), энергия плазмы ШМ будет порядка 1,5 Дж. Учитывая, что для ШМ малого размера было принято $E_m \approx W_+ \approx E_k$, полная энергия данной ШМ не превысит значения 2,2 Дж.

Рассмотрим теперь ШМ максимально большой мощности. Общий заряд ШМ не может превышать такой величины, при которой напряженность электрического поля на ее поверхности превышает $E_0 = 30$ кВ/см во избежание пробоя атмосферного воздуха. Отсюда находим максимальный заряд ШМ

$$Q_0 = 4\pi\epsilon\epsilon_0 E_0 r^2. \tag{13}$$

Выражая заряд ШМ $Q = q(N_i - N_e)$ из (4) и приравнявая к (13), получаем:

$$\frac{v^2}{r} = \frac{qE_0}{m}. \tag{14}$$

В правой части (14) находятся постоянные величины. Принимая, что максимально возможная скорость электронов v равна скорости света c , находим наибольший радиус ШМ с предельной величиной электрического заряда Q

$$r = 17 \text{ см}, \quad Q = Q_0 = 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \tag{15}$$

при условии $v \approx c$.

Предположим, что электронный ток во внешней оболочке ШМ настолько большой, что магнитное давление P_m сравнивается по величине с атмосферным давлением P_a :

$$P_a = P_m = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}, \quad \text{где } B = \frac{\mu\mu_0 i}{2r}, \quad i = \frac{q N_e v}{2\pi r} \text{ как в (3)}.$$

Из данных соотношений с учетом (15) находим предельные величины индукции магнитного поля, тока и числа электронов во внешней оболочке ШМ

$$B = 0,5 \text{ Тл}; \quad i = 1,4 \cdot 10^5 \text{ А}; \quad N_e = 3,1 \cdot 10^{15}. \tag{16}$$

Примем, согласно [25], в качестве температуры ШМ величину $T = 1,4 \cdot 10^4$ К и соответствующую скорость ионов $V = 3,5 \cdot 10^3$ м/с. Тогда из (2) следует, что ионы должны вращаться по окружностям радиуса $R = 2$ мм в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. С другой стороны, заряженные частицы беспрепятственно могут двигаться вдоль линий магнитного поля. Следовательно, в модели ШМ с сильным магнитным полем заряженные частицы двигаются по винтовым линиям и периодически отражаются от наружной электронной оболочки. В магнитных полях, на порядок меньших, чем в (16), радиус вращения ионов R вырастает приблизительно до величины половины радиуса ШМ. При этом возникает только одна устойчивая ионная орбита, которая отмечает положение ядра ШМ.

Оценки кинетической, магнитной и электрической энергий мощной ШМ по (6) — (8) дают: $E_k = 0,13$ кДж; $E_m = 2$ кДж; $W_+ = 1,3$ кДж. Поскольку плотность энергии плазмы в ШМ при температуре $T = 1,4 \cdot 10^4$ К составляет $0,35$ Дж/см³, можно найти максимально возможную энергию плазмы, умножая на объем данной модели ШМ при ее радиусе 17 см: $E_i = 7,2$ кДж. Та-

ким образом, основная энергия в мощной ШМ заключена в энергии ионизованных частиц и в энергии электромагнитного поля, причем суммарная энергия величиной 10,6 кДж попадает в диапазон верхних значений энергий у ШМ, вычисляемых по результатам их воздействия на окружающие предметы.

С помощью формулы (11), известного заряда ШМ (15) и объема ШМ $V_b = 0,02 \text{ м}^3$ можно оценить высоту h над землей, при которой ШМ находится в равновесии в случае баланса силы Архимеда и электрической силы: $h = 90 \text{ см}$. Используя (10), для электрического потенциала мощной ШМ находим величину около 500 кВ. Под действием электрического поля электроны и отрицательные ионы будут разгоняться по направлению к ШМ. Полагая, что участок разгона частиц возле ШМ равен $\Delta r = 1 \text{ см}$, соответствуя пробойному промежутку при напряженности поля 30 кВ/см, вычисляем энергию частиц

$$E_k = q\Delta\varphi = \frac{qQ\Delta r}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} = 30 \text{ кэВ}.$$

По данным из [25], светло-голубое свечение внешней оболочки ШМ действительно напоминает тихий электрический разряд с энергией электронов в десятки килоэлектронвольт. Если заряд ШМ достаточно велик, то ее наблюдаемый радиус может быть больше настоящего за счет светящейся вокруг нее короны.

Некоторые случаи появления шаровой молнии

Появление ШМ часто отмечается после удара молнии в дерево, телефонный столб, металлические конструкции, линии электропередач, а также при прохождении молнии возле антенных и телефонных проволок с их оплавлением и испарением. В этих случаях следует ожидать появления нескольких каналов разряда линейной молнии и дополнительного количества положительных ионов в воздухе из-за испарения вещества, что увеличивает вероятность возникновения ШМ. Попадание линейной молнии в опору высоковольтной линии наблюдал в 1973 г. В. В. Вендеревских [4]: *“Появился сноп огня и искр, из которого выскочил огненный шар, светящийся как горящий магний. Шар (диаметром 20—25 см) начал двигаться вдоль по проводу от места возникновения до следующей опоры, перескочил на тот же провод по другую сторону опоры и, пройдя еще некоторое расстояние, поднялся на верхний провод (по-видимому, заземленный). После этого шар исчез, причем участок провода вблизи места исчезновения шара накалился и стал красно-желтым. При исчезновении шара от него отделился маленький светящийся шарик, который упал вниз и погас”*.

В работе [28] описано появление ШМ при замыкании куском медной проволоки контактов электрической сети 110 В. ШМ была желто-белого цвета, диаметром около 3 см, она прокатилась по столу и исчезла, оставив медный шарик размером 1 мм. По-видимому, включение в состав ШМ испаренных металлов утяжеляет ее, так что ШМ с самого начала имеет сильную связь с предметами, вблизи которых она образовалась. Если в оболочке ШМ образуется дырка, то из нее возможно истечение горячей воздушной плазмы, эффективно нагревающей предмет, с которым контактирует ШМ. В вышеописанном случае ШМ раскалила электрический провод, выделив на нем всю свою энергию.

Согласно [29], световой поток от средней ШМ составляет $1600 \pm 200 \text{ Лм}$. Данную светимость можно объяснить излучательными переходами атомов и молекул и постепенной рекомбинацией ионов воздуха внутри ШМ, так что ее энергия только за счет излучения непрерывно убывает со скоростью до 2 Дж/с. Отношение площади поверхности к объему растет по мере уменьше-

ния радиуса, следовательно, маленькие ШМ израсходуют всю свою энергию на излучение быстрее, за время порядка долей и единиц секунд, и это действительно наблюдают как у природных, так и у искусственных ШМ при коротких замыканиях электрооборудования.

ШМ довольно редко представляет собой идеальную сферу, в 91 % наблюдений это масса неправильной шарообразной формы, иногда с несколькими выступами. Некоторые ШМ кажутся полыми, овальными (2,7 %), ленточными (2,6 %), бесформенными (1,4 %), изредка встречаются сердцевидные, грушевидные, яйцевидные или в виде тора, диска, цилиндра, веретена, кольца [29]. Одно из наблюдений описано в [3]: *“После грозы ШМ возникла над квадратным камнем со сторонами 80 см, который намеревались поднять 4 чел., на высоте 90 см от камня. Это был желтый прозрачный шар диаметром 20 см, он равномерно покачивался с амплитудой 4 см. В центре шара было голубоватое пламя грушевидной формы длиной около 4 см, обращенное острием вниз. Пламя вращалось по вертикальной окружности диаметром 7 см внутри большого шара. Через несколько секунд ШМ с треском исчезла. Позднее выяснилось, что в 100 м молния ударила в каменоломню”*.

Согласно [2], бывают ШМ, похожие на змею, веревку, жгут, колбасу, палку с толщиной 1—4 см и длиной 30—60 см. При этом наблюдается волокнистая структура излучения. Иногда ШМ из такой формы преобразуется в клубок. Характерный пример трансформации ШМ приведен в [4] в соответствии с сообщением К. К. Потерс из Нижнеудинска: *“Шар находился в 10—15 см от наших лиц, и мы хорошо видели, как он стал проходить через отверстие, принимая форму дыни. Он вытянулся, стал меньше диаметром и прошел через отверстие. Когда шар проходил через отверстие и уменьшался в размерах, он как бы все время дрожал, и казалось, что он весь состоит из студня, а с его поверхности постоянно исходили синие лучи длиной около 1,5 см и заканчивались на концах вспышками искр”*. В случае с С. Б. Сергиевой в 1943 г. ШМ пролезла в отверстие в окне шириной 1 см, *“вытянувшись сосиской”*. Нередко после прохождения ШМ через стекла находят маленькие оплавленные трещинки. Отмечено несколько случаев проникновения ШМ внутрь самолетов [30]. Одна ШМ образовалась после удара линейной молнии в нос самолета, впоследствии там было найдено отверстие размером 8 мм и вокруг еще множество мелких дырочек. Другая ШМ возникла в Ил-18, полностью герметичном самолете, причем оказалось, что пластмассовый обтекатель антенны радиолокатора стал в дырках как сито для муки.

В связи со строением ШМ рассмотрим еще несколько конкретных случаев. Вот отрывок из письма г-жи Эспер к Ф. Араго [31]: *“Погода была удушливая, и небо казалось в ту минуту спокойным, но со всех сторон видно было сверкание зарницы. Проходя перед моим окном, которое очень низко, я была удивлена видом большого красного шара, совершенно подобного луне, окрашенной и увеличенной действием паров. Этот шар спускался медленно и перпендикулярно с неба на одно из деревьев места Божсон. Первая мысль была, что это воздушный шар Гримма, но цвет шара и время дня вскоре убедили меня в ошибке, а пока ум мой искал разгадки этого явления, я увидела, что огонь обнаружился снизу шара, висевшего на высоте от 5 до 7 м над деревом. Казалось, как будто бы горела легонько бумага с небольшими искрами и вспышками, потом, когда отверстие увеличилось вдвое или втрое более руки, внезапный ужасный взрыв разорвал всю оболочку и из середины этой адской машины вылетело с дюжину лучей змеистой молнии, которые разлетелись по разным сторонам и из которых один ударил в дом № 4 и пробил в стене дыру, как будто пушечное ядро. Дыра эта существует и поныне. Наконец, остаток электрической материи стал гореть белым ярким и блестящим пламенем и вертеться как фейерверочное колесо”*.

В 1949 г. в ФРГ [3] после распада ШМ осталась ее часть, напоминающая по форме молодой месяц, повернутый рогами вниз. Распад этой ШМ сопровождался искрами длиной до 30 см.

В 1973 г. в Люберецком районе г. Москвы наблюдалась ШМ, спускавшаяся с высоты деревьев [4]. Цвет ее менялся от ослепительно белого с переходом в желтый, ярко-красный и затем в темно-красный, после чего в центре появилось черное пятно, и ШМ исчезла. При падении она теряла куски вещества и испускала искры.

В рамках нашей модели описанные выше свойства ШМ можно объяснить тем, что наружная оболочка может иметь не только сферическую, но и ступенчатую форму, демонстрируя некоторую независимость и гибкость отдельных электронных колец и тем самым изменчивость формы ШМ при прохождении через узкие отверстия. Логично предположить, что при движении в узких каналах ШМ идет так, что ось вращения ее частиц направлена вдоль скорости. В течение жизни ШМ отдельные кольца в силу взаимодействия с воздухом и окружающими предметами разрываются и из внешней электронной оболочки ШМ вылетают потоки быстрых электронов в виде искр, создавая характерное потрескивание, запах озона и радиоизлучение. При этом из ШМ будет вырываться и нагретый до высокой температуры воздух, в котором выделяется энергия за счет рекомбинации ионов. Температура воздуха может достигать температур воздуха в канале линейной молнии, захваченного при образовании ШМ, т. е. вплоть до величины порядка десятков тысяч градусов. При такой температуре нетрудно объяснить такие эффекты от ШМ, как оплавление стекол и испарение металлических предметов. Выделение энергии может принять и взрывной характер с уничтожением внешней электронной оболочки, предохраняющей ШМ от контакта с окружающей атмосферой. Иногда ШМ просто разделяется на несколько маленьких ШМ. При определенной равновесной форме искрение и звук от ШМ минимальны.

Следует ожидать, что расплывчатость или, наоборот, четкость формы ШМ связана с конфигурацией токовых оболочек, силой протекающего в них тока и зазором между оболочками. По статистике до 50 % всех наблюдаемых ШМ оканчивают свою жизнь с небольшим взрывом, что, по-видимому, связано с их неустойчивостью в условиях потери заряда и энергии на излучение, а также возникающего дисбаланса электромагнитных и центростремительных сил и давления газа, действующих на частицы. Маломощные ШМ в отсутствие взаимодействий с окружением будут просто разряжаться почти беззвучно и без особых эффектов.

Заключение

По данным наблюдений, 30 % парящих ШМ вращаются в воздухе, а часть прикрепленных ШМ катятся по притягивающим их предметам. При опускании на рыхлую землю или торф ШМ способны вырыть ямы или разбросать землю. На быстрое движение электронов в оболочке ШМ и большие скорости частиц нагретого воздуха в ШМ указывает и то обстоятельство, что в некоторых случаях контакта с ней люди получали травмы как от электрического тока, а предметы нагревались или оплавливались. По данным из [32], смертельная доза при поражении человека электротоком порядка 2 кДж, что попадает в диапазон энергий ШМ. Согласно предлагаемой нами модели физическая природа ШМ такая же, как и у обычной молнии. Так как движение частиц в ШМ в основном вращательное, а в линейной молнии — поступательное, то с философской точки зрения оба типа молний дают еще один пример действия принципа дополненности в природе. Любопытной особенностью ШМ является также то, что ее полная энергия положительна, а сама ШМ при этом относительно стабильна. Другой противоположностью являются гравитационно-связанные тела, стабильность которых сопровождается отрицательностью их полной энергии. В обоих случаях полная энергия растет по модулю при уменьшении объема объекта при неизменном количестве частиц. Так, в

ШМ как в плазменном объекте дополнительное внешнее давление приводит к увеличению токов и магнитного поля (это характерное свойство плазмы), а при уменьшении объема вырастает и электростатическая энергия. Следует сказать, что для построения модели ШМ были использованы те же идеи, что и в [33] при описании схемы возникновения электрического заряда у элементарных частиц.

Л и т е р а т у р а

1. Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния. — М.: Мир, 1983. — 288 с.
2. Смирнов Б. М. Проблема шаровой молнии. — М.: Наука, 1988. — 208 с.
3. Сингер С. Природа шаровой молнии. — М.: Мир, 1973. — 239 с.
4. Стаханов И. П. Физическая природа шаровой молнии. — М.: Атомиздат, 1979. — 240 с.
5. Rayle W. D. Ball lightning characteristics // NASA. Tech. Note / NASA—TN—D—3188, 1966.
6. Silberg P. A. // J. Geophys. Res. 1962. V. 67. № 12. P. 4941.
7. Стаханов И. П. О физической природе шаровой молнии. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 209 с.
8. Nauer H. Wie Entsteht ein Kugelblitz? // Umschau. 1956. V. 56. P. 75.
9. Андрианов А. М., Сидицын В. И. Использование эрозионного разряда для моделирования одного из возможных видов шаровой молнии // ЖТФ. 1977. Т. 47. С. 2318.
10. Powell J. R., Finkelstein D. Ball Lightning // American Scientist. 1970. V. 58. P. 262.
11. Григорьев А. И., Григорьева И. Д. // Труды III Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. — г. Тарту: Изд-во Тарт. гос. ун-та, 1986. С. 228.
12. Neugebauer T. Zu dem Problem des Kugelblitzes // Zeit. Phys. 1937. V. 106. № 7, 8. P. 474.
13. Hildebrandsson H. H. Foudre Globulaire // Meteorologie. 1885. V. 31. P. 364.
14. Barry J. D. Fireball, Ball Lightning and St. Elmo's Fire // Weatherm. 1968. V. 23. P. 180.
15. Александров В. Я., Голубев Е. М., Подмошенский И. В. // ЖТФ. 1982. Т. 52. С. 1987.
16. Саранин В. А. Пузырьковая модель шаровой молнии // Исследования электрических разрядов в атмосфере: Сб. науч. тр. ЯрГУ, 1991. С. 100.
17. Месеняшин А. И. Об электростатической и пузырьковой природе шаровой молнии // Там же. С. 110.
18. Новиков А. А. Оценка и сравнение параметров шаровых молний и положительно заряженного коронирующего плазмоида в свободной атмосфере // Там же. С. 117.
19. Wooding E. R. Ball Lightning // Nature. 1963. V. 199. № 4890. P. 272.
20. Johnson P. O. Ball Lightning and Self-containing Electromagnetic Fields // American Journal of Physics. 1965. V. 33. № 2. P. 119.
21. Шафранов В. Д. О равновесных магнитогидродинамических конфигурациях // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. Вып. 3. С. 710.
22. Капица П. Л. О природе шаровой молнии // ДАН СССР. 1955. Т. 101. № 2. С. 245.
23. Капица П. Л. Свободный плазменный шнур в высокочастотном поле при высоком давлении // ЖЭТФ. 1969. Т. 57. Вып. 6. С. 1801.
24. Finkelstein D., Rubinstein J. Ball Lightning // Phys. Rev. 1964. V. 135. № 2A. P. 390.
25. Дмитриев М. Т. Природа шаровой молнии // Природа. 1967. № 6. С. 98.
26. Заверев Е. А., Крикберг И. А. Нагрев токового шнура и образование перетяжек в импульсном вакуумном разряде // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 18. С. 50.
27. Брагинский С. И. О поведении полностью ионизованной плазмы в магнитном поле // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. Вып. 3. С. 645.
28. Jones A. T. A Laboratory Illustration of Ball Lightning // Science. 1910. V. 31. P. 114.
29. Смирнов Б. М. Физика фрактальных кластеров. — М.: Наука, гл. редакция физ.-мат. лит., 1991. — 133 с.
30. Имянитов И., Тихий Д. За гранью закона. — Л.: Гидрометеоиздат, 1967. — 143 с.
31. Араго Ф. Гром и молния: Пер. с фр. — СПб., 1859.
32. Lee W. R. // Lightning / Ed. R. H. Golde. — London: Acad. Press, 1977. P. 521.
33. Федосин С. Г. Физика и философия подобия от преонов до метagalactic. — г. Пермь: Стиль-МГ, 1999. — 544 с.

The physical theory of ball lightning

S. G. Fedosin, A. S. Kim
Perm State University, Perm, Russia

The analysis of modern models of ball lightning displays, that they are unsatisfactory on a series of tests. The model of ball lightning is offered, which exterior electronic envelope is retained by interior volumetric positive charge. The compounded electron motion in an outer envelope creates the strong magnetic field driving a state of ionized hot air inside ball lightning. The conditions of origin surveyed, the estimates of parameters of ball lightnings of different power are made.