

Реквизиты автора: Федосин Сергей Григорьевич

Email: [intelli@list.ru](mailto:intelli@list.ru)

08 ноября 2001 г.

## Шаровая молния, её свойства и модели строения

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]:

1. ШМ появляются и при ясном небе и во время проливного дождя либо у земли, либо падая из облаков.
2. Цвет их бывает красноватый или голубой, а иногда и то и другое или другие цвета.
3. ШМ иногда неподвижны, а иногда двигаются достаточно быстро.
4. Могут парить в воздухе или катиться вдоль проводов или краёв предметов.
5. Могут исчезнуть бесшумно или со взрывом, повреждая иногда окружающие вещи.
6. Форма ШМ может быть чётко очерченной или расплывчатой.
7. Иногда ШМ избегают хороших проводников, а иногда притягиваются к ним.
8. При наблюдении ШМ бывают как спокойными, так и искрящимися или издающими сильный треск и шипение, или оставляющими сильный запах.
9. Чаще всего ШМ наблюдают 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, соединённых 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 по ряду критериев некоторых моделей ШМ, представление электронно-ионной модели и сравнение её предсказаний с основными свойствами ШМ.

### **Условия наблюдения и характерные параметры шаровых молний**

Время жизни наблюдаемых ШМ достигает десятков секунд, и учитывая их внезапное появление, слишком мало для детального исследования. Отсюда основными источниками информации об ШМ становятся показания очевидцев и последствия их взаимодействия с окружающими предметами. По данным опроса, проведённого журналом «Наука и жизнь» в 1976 году [4], ШМ обычно представляет собой светящееся сферическое образование диаметром 10–40 сантиметров. Согласно [2] средний диаметр ШМ составляет  $28 \pm 4$  см. Появление ШМ очень хорошо повторяет распределение грозовой активности в течение 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 наблюдения. В среднем лишь один человек из 300 в течение своей жизни может увидеть ШМ. Как показывают опросы сотрудников NASA [5], 409 человек видели вблизи место попадания линейной молнии в землю, а 180 человек наблюдали ШМ. Это означает, что вероятность наблюдения ШМ всего в 2,5 раз 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 не-

посредственные наблюдения образования одной или нескольких ШМ в месте удара линейной молнии, в её 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, соединённых с землёй металлической проволокой для задания пути молнии [1]. По данным из [1–2], характерные параметры линейной молнии таковы: радиус сечения основного канала около 6 см ; электрические токи в главном разряде от  $10^4$  и вплоть до  $5 \cdot 10^5$  ампер ; за время короткого разряда порядка миллисекунды может быть перенесено 20 кулон электричества; температура воздуха в канале молнии достигает 25000 градусов; скорости теплового движения у ионов воздуха не менее  $10^4$  м/с, у свободных электронов более  $10^6$  м/с. Свечение линейной молнии в основном обеспечивается нейтральными или однократно ионизованными атомами азота и кислорода, а в её канале содержится  $4 \cdot 10^{18}$  электронов в одном кубическом сантиметре [3]. Давление разогревшихся под действием тока ионов достигает 18 атмосфер, а электронов – 14 атмосфер, так что быстрый распад канала молнии сопровождается таким звуковым эффектом, как удар грома. Если напряжение между облаком и землёй равно  $10^8$  В, а переносимый заряд 20–30 кулон , то энергия молнии равна  $(2–3) \cdot 10^9$  джоулей [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, причём 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.

Палящие ШМ обычно красные, избегают хороших проводников и часто проникают в закрытые помещения через окна, двери, дымоходы, узкие каналы и щели. Прикреплённые 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 прикреплённую и наоборот вполне возможен и может произойти внезапно.

Многочисленные свидетельские показания говорят о том, что даже вблизи ярко светящейся ШМ не ощущается тепла, однако обнаруживается сильное радиоизлучение, фиксируемое шумами и тресками в радиоприёмниках и даже в телефонных трубках при прохождении ШМ возле них. В видимом диапазоне мощность излучения ШМ составляет единицы ватт, так как визуально она соответствует электролампе мощностью около 100 ватт. Иногда отмечаются нерегулярность свечения и вспышки, а изменение цвета ШМ обычно сопровождается её взрывом. По данным из [4], при 335 сообщений о взрывах ШМ в 34 случаях наблюдались повреждения предметов, причём 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 стёкла, 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 киловольт и мощности  $10^7$  ватт при разряде за время порядка  $10^{-3}$  секунды. По данным из [6], при аварийном отключении батарей

в субмарине ШМ диаметром 12 см возникла возле контактов переключателя, при этом протекающий ток достигал величины  $1,6 \cdot 10^5$  ампер.

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 очень малом давлении порядка  $10^{-5}$  атмосфер так, что стенки камеры из диэлектрика разрушались, превращаясь в светящуюся плазму со временем жизни 10 миллисекунд. На фотографиях было видно, что вначале плазма имела форму шара, а затем становится вихреобразной. История с безэлектродными разрядами по-видимому начинается с экспериментов Тесла в конце 19 века с высоковольтными трансформаторами. В других опытах мощные сфокусированные СВЧ-импульсы с частотой 75 мегагерц и мощностью 30 киловатт возбуждали воздух до температуры 2500 градусов, причём время его послесвечения достигало 2 секунд [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 живёт в среднем 3 секунды, а 26 % – 29 секунд, но в 15 % случаев отмечено время 213 секунд [11].

### **Модели шаровых молний 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]:

1. Механизм образования ШМ, связь с атмосферным электричеством.
2. Источник энергии и способ её хранения.

3. Характер движения, перемещения и равновесия ШМ в атмосфере.
4. Устойчивость формы и её трансформация, характерные размеры.
5. Механизмы свечения и радиоизлучения, образования искр и характерного звука от ШМ, а также специфического запаха.
6. Причины взрыва или тихого исчезновения, время жизни.

Некоторые примеры из [1–2] расчётов повреждения предметов после контакта с ШМ позволяют сделать оценки её внутренней энергии. В случае, когда ШМ оплавил одежду на теле человека и кольцо, одетое на палец, требуемая энергия составляет 440 джоулей. 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 нём ямку. Считая, что битум нагрелся до 170 градусов Цельсия, при видимом диаметре 14 см энергия ШМ должна достигать 3000 джоулей. Из сообщения В.В. Варсонофьева согласно [4] следует, что ШМ разрядилась в батарею водяного отопления. В результате появилась лунка диаметром 4 – 5 см и глубиной 0,5 мм. Масса испарённого металла составила 0,08 грамм, на что потребовалось 700 Дж. В случае с Я.В. Березовским ШМ диаметром 10–20 см испарила металл массой 0,22 грамма на шомполе ружья, затратив энергию до 2000 джоулей. Минимальную плотность энергии ШМ можно оценить по акустическому шуму от её взрыва, а также по излучению и светимости при времени жизни около одной секунды для маленьких ШМ. 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 сантиметр даёт энергию 0,8 джоуля.

Перейдём 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 ионизированной плазмы воздуха может достигать  $180 \text{ Дж/см}^3$  (из них 30 джоулей на диссоциацию молекул и 150 джоулей на однократную ионизацию), что достаточно для объяснения энергетики ШМ. Однако представление о ШМ как о сгустке рекомбинирующей неидеальной плазмы плохо согласует-

ся с критерием времени жизни – плазма под действием кулоновских (электрических) сил исчезнет слишком быстро, за время не более 10 миллисекунд. Не спасает положения и кластерная модель [4], в которой ионы окружены оболочками из нейтральных частиц (например, воды), затрудняющими рекомбинацию, то есть слияние ионов и электронов в атомы и молекулы. В этой модели предполагается температура ионов 500–700 градусов, 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. Квантово-механическая 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 возбуждёнными атомами и молекулами может быть достаточно энергии (объём шара с радиусом 20 см содержит энергию до 10000 джоулей), но его люминесценция, как следует из опыта, длится не более 0,1 секунды. Слишком малое время жизни получается и в моделях, в которых ШМ рассматривается как светящаяся сфера из испарённых линейной молнией веществ.

Большое разнообразие имеют химические модели. В одной из самых старых моделей [13] считается, что в ШМ происходит горение углеводородных смесей. Светящийся жёлто-зелёный шарик размером 4 см при времени жизни до 2 секунд был получен в [14] при поджигании электрической искрой смеси воздуха и 1,4–1,8 % пропана, плотность энергии составила  $7 \cdot 10^{-3}$  Дж/см<sup>3</sup>. 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 несвя-

занных между собой частиц трудно объяснить устойчивую форму ШМ при движении против ветра и при прохождении через стёкла, 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 % в воздухе плотность его химической энергии равна 0,13 Дж/см<sup>3</sup> [2], но время жизни ШМ получается очень маленькой, если учесть, что скорость реакции увеличивается за счёт повышения температуры.

Для объяснения устойчивости формы ШМ в [15] была предложена нитевидная модель ШМ на основе аэрогелей типа SiO<sub>2</sub> или Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, далее развитая в [2], [29]. Для поддержания формы и поверхностного натяжения, необходимого для объяснения упругости ШМ, нити из окислов кремния и алюминия следует считать заряженными до 10<sup>-6</sup> кулон. Из-за того, что нитевидный каркас ШМ нагрет до высокой температуры, возникает подъёмная 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 её 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 счёт 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 микрон [17].

Известны модели ШМ, в которых основной энергией является энергия электрического поля. Общий заряд ШМ не может превышать такой величины, при которой напряжённость электрического поля вблизи её поверхности превышает 30 киловольт на сантиметр длины. Данная напряжённость поля показывает электрическую прочность обычного сухого воздуха, при которой

на зазоре в один сантиметр может проскочить искра и начнётся пробой атмосферного воздуха. Отсюда при радиусе 7 сантиметров для ШМ среднего размера можно вычислить её заряд и электрическую энергию, получается  $1,6 \cdot 10^{-6}$  кулон и 0,34 джоуля соответственно. Как видно, электростатическая энергия слишком мала, чтобы объяснить энергосодержание в ШМ. Эту трудность обходят, рассматривая не один заряд, а два разноимённых заряда как в сферическом конденсаторе или объёмные заряды. Однако остаётся ещё 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 идёт слой отрицательных ионов и область ионизации электронным ударом, а затем – области фотоионизации газа ультрафиолетовым 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. Однако ясного механизма образования такой сложной конструкции ШМ не видно.

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 расчёты, если энергия плазмоида складывается из кинетической энергии частиц и энергии магнитного поля, то полная энергия в силу теоремы вириала не превышает величины  $3PV$ , где  $V$  – объём плазмы,  $P$  – внешнее давление. Если  $P = 1$  атмосфера, радиус ШМ 10 см, то её энергия может быть до 1000 джоулей. Однако согласно исследованиям по теории устойчивости магнитогидродинамических конфигураций [21], система, удерживаемая собственным магнитным полем, устойчива лишь при наличии внешнего давления.

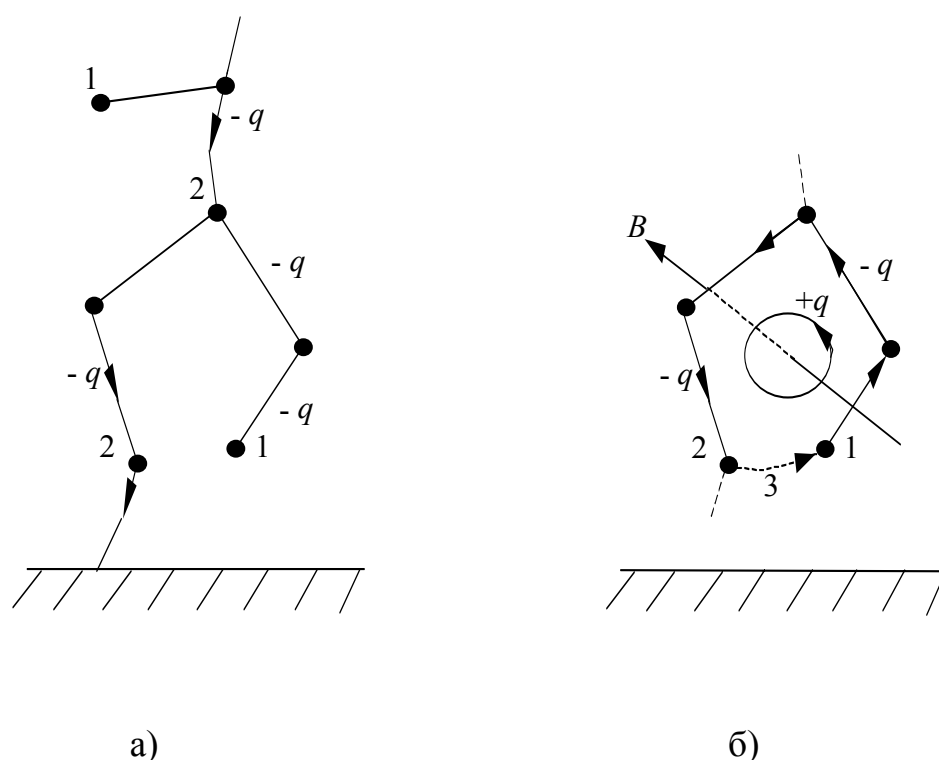
Одной из наиболее разработанных моделей ШМ с внешним источником энергии является модель Капицы [22], согласно которой наблюдаемая постоянная интенсивность свечения ШМ объясняется поступлением энергии от грозовых облаков по радиоволноводу. В обоснование модели были проведены эксперименты [23], показавшие 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 электромагнитной волны с объёмом ШМ диапазоне при длине волны 30–70 см плотность энергии слишком мала. Имеются ещё 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 шаровой молнии 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 своё отрицательное электричество (или при разряде соседних облаков). На рис. 1а 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; при этом первыми начинают своё движение электроны основного канала вблизи земли, таким

образом светящаяся часть молнии под действием электрического тока как бы растёт от земли к туче. Электроны, находящиеся во вторичных ветвях, также движутся к основному каналу и ссыпаются через него на землю. При этом возможна почти замкнутая конфигурация вторичной ветви (рис. 1б), тогда в её центре за счёт кругового электронного тока появляется магнитное поле. В наэлектризованном воздухе вокруг молнии находится много положительных ионов, которые начинают закручиваться вокруг силовых линий магнитного поля и тем самым фиксируются в центре контура.



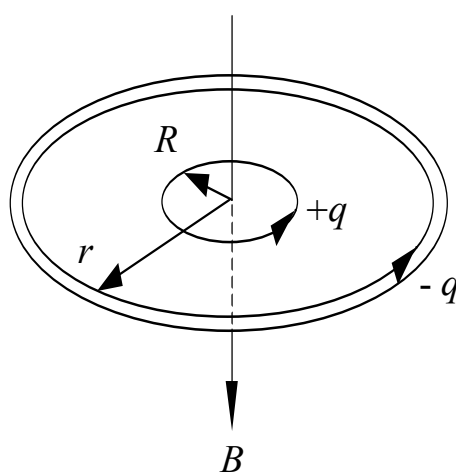
**Рис.1. а)** 1 – вторичные ветви молнии, 2 – основной канал, в котором движутся электроны (обозначены  $-q$ ).

**б)** Движение электронов из вторичной ветви 1 в основной канал 2 молнии может быть замкнуто через область 3.  $B$  – индукция магнитного поля от кругового тока электронов. Ионы с зарядом  $+q$  вращаются вдоль линий магнитного поля.

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 обеспечить 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, счётчиков, патронов от электроламп. Как видно, здесь ШМ возникали благодаря замыканию импульсов тока линейной молнии через воздух возле контактов в виде электрической дуги.

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



**Рис. 2.** Экваториальное сечение модели паровой молнии, выделяющее кольца на токовых оболочках с фероидальной формы.  $R$  – радиус вращения ионов в равновесной оболочке вокруг магнитного поля с индукцией  $B$ ,  $r$  – радиус внешней электронной оболочки.

магнитное поле, которое удерживает положительные ионы на орбитах внутри ШМ. На какой-то из орбит скорость вращения ионов совпадает с их хаотической тепловой скоростью, что выделяет отдельную равновесную оболочку в ШМ. Наконец, электрическое притяжение положительных ионов и отрицательно заряженных электронов удерживает электроны во внешней оболочке от разлёта, являясь основной частью центростремительной силы. Исходя из сферической формы ШМ, радиус вращения внешнего электронного облака вокруг общей оси уменьшается по мере перехода от экватора к полюсам.

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 этой оболочки внутри сферы равно нулю из-за уравнивания всех электрических сил. Поэтому ионы могут распределяться равномерно по всему объёму ШМ, а рекомбинация ионов и электронов существенно замедляется.

Как видно из рис. 1б, ШМ фактически есть небольшой кусок линейной молнии, закрученный в клубок с характерным размером 10 – 40 сантиметров. 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 её всё 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°. 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 килоэлектронвольт, 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, всё время выделялась энергия. На это указывали сплошной шорох и сильные отдельные потрескивания. Вероятно, непрерывно происходила и утечка её 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 приведённого текста, шаровая молния Дмитриева имела вертикальную ось симметрии, совпадающую с общей осью вращения ионного и электронного облаков в нашей модели ШМ. 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 напряжённости электрического поля возле ШМ и энергичных частиц подтверждается многочисленными наблюдениями их шипения, потрескивания и испускания искр как при электрическом разряде. Кроме этого, 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 киловольт на 1 метр, а оценка необходимой электрической энергии в таком эквивалентном разряде за всё время жизни ШМ даёт значение 530 Дж [1].

Выделенная внутри ШМ оболочка является границей, где тепловая скорость ионов выравнивается со скоростью вращения ионов в магнитном поле. В этом месте можно приравнять центростремительную силу, действующую на вращающиеся ионы, и магнитную силу Лоренца, действующую на ионы в экваториальной плоскости, перпендикулярной магнитному полю. С другой стороны, заряженные частицы могут беспрепятственно двигаться вдоль линий магнитного поля, проходящих вдоль оси ШМ в сторону полюсов. Следовательно, внутри ШМ возможна такая оболочка, где 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 ионизации молекул воздуха составляет величину около 13 электронвольт. Если считать, что существует тепловое равновесие между ионами и электронами внутри ШМ, то можно оценить их максимальную температуру как величину в 100000 градусов, 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 14000 градусов внутренней оболочки по наблюдению Дмитриева вполне возможна.

Верхние значения параметров ШМ не могут превышать соответствующих параметров линейных молний. Вблизи основного канала молнии при токе  $2 \cdot 10^5$  ампер и радиусе 10 сантиметров индукция магнитного поля достигает величины 0,4 тесла. В таком сильном магнитном поле вблизи канала могут удерживаться и накапливаться даже релятивистские электроны. С другой стороны, при токах более 1000 ампер в импульсных вакуумных разрядах электронная температура в энергетических единицах достигает 100 электронвольт, а скорости движения электронов до  $10^7$  м/с [26]. В качестве верхнего значения тока в плазме, а значит и в молнии, по-видимому следует использовать величину  $1,4 \cdot 10^6$  ампер согласно [27], так как дальнейшее увеличение напряжённости электрического поля приводит к сжатию токового шнура и увеличению излучения при неизменном токе и температуре частиц.

Приведём данные расчётов для ШМ с общим радиусом 7 сантиметров и радиусом выделенной оболочки 4 сантиметра, а также с другими параметрами ШМ из описания Дмитриева [25]. При этом будем считать, что заряды и токи в основном сконцентрированы вблизи экваториальной плоскости или имеют цилиндрическую симметрию, а ионы однозарядны. Выражая электронный ток во внешней оболочке и магнитное поле этого тока, действующее на ионы, через количество электронов и их скорость при известной температуре, и используя условие равновесия сил для ионов, находим суммарный ток электронной оболочки 2900 ампер и магнитную индукцию внутри ШМ, равную 0,026 тесла. Подробности расчётов приведены в [33]. В свою очередь,

баланс сил для электронов во внешней оболочке позволяет вычислить все остальные параметры ШМ, например, общий объёмный заряд положительных ионов, общий заряд отрицательно заряженных электронов во внешней оболочке и общий заряд ШМ. Следовательно, ШМ в целом должна быть заряжена положительно, чтобы ионы внутри ШМ могли удерживать электронную оболочку. Суммарная энергия ШМ складывается из энергии движения электронов, магнитной энергии, электростатической энергии и энергии плазмы. При радиусе ШМ 7 сантиметров её энергия получается равной 500 джоулей, почти вся она заключена в энергии ионизованных частиц. Данная величина попадает в диапазон значений энергий у ШМ, вычисляемых по результатам их воздействия на окружающие предметы.

Напряжённость электрического поля вблизи поверхности рассматриваемой ШМ достигает величины 5,3 киловольт на сантиметр, а соответствующий электрический потенциал около 37 киловольт. Такой напряжённости 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 данной ШМ может достигать значения вплоть до величины 37 килоэлектронвольт, считая в энергетических единицах. Известно, что пробег электронов в воздухе ограничивается различными потерями и при начальной энергии электронов в 40 килоэлектронвольт 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 1 сантиметр, то их энергия должна быть равной 5 килоэлектронвольт. Тем самым диапазон возможных энергий электронов соответствует наблюдениям Дмитриева [25] о свечении оболочки ШМ подобно периферийному свечению электронного пучка с энергией в несколько десятков килоэлектронвольт в воздухе.

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 счёт эффекта электронной лавины могут вполне заменить первичные электроны, двигаясь под действием центростремительной силы от внутреннего положительного заряда ШМ. Кроме этого, между внешним атмосферным давлением, электронным током и магнитным полем в плазме имеется обратная связь – сдавливание ШМ (например, при её остывании) увеличивает токи и магнитное поле, а магнитное поле за счёт самоиндукции старается поддерживать исходный ток.

Благодаря своему заряду ШМ может двигаться под влиянием электрических полей. Как отмечается в [3], ШМ иногда выпадают из облаков и быстро направляются к земле, ударяются об неё 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 возбуждённые 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 неё сильных электрических полей между облаками и выступающими предметами на земле, периодически ко-

леблющимися при разрядах линейных молний и движении облаков вплоть до изменения направления напряжённости поля. Кроме этого, вследствие высокой температуры воздуха внутри ШМ её средняя плотность отличается от плотности окружающего воздуха, так что к электрическим силам нужно добавить подъёмную силу Архимеда. Следует учесть, что из-за разной плотности воздуха на уровне облаков на высоте 300–500 метров и у земли сила Архимеда изменяется приблизительно на 6 %. Баланс указанных сил осуществляется, по-видимому, у привязанных или прикреплённых ШМ, либо парящих неподвижно, либо связанных с предметами. В течение жизни ШМ её заряд может изменяться из-за взаимодействия с окружением или при частичном распаде, приводя к изменению равновесного состояния. Так, при переходе от прикреплённой 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 своём образовании ШМ обычно находится в районе вхождения линейной молнии в землю или у высоких предметов, несущих потенциал земли. Благодаря заряду ШМ создаёт в Земле как в проводнике наведённые заряды и притягивается к ним. Силу притяжения можно определить с помощью метода изображений из электростатики. Из равенства силы Архимеда и электрической силы высота, при которой ШМ находится в равновесии над землёй, будет не менее высоты самой ШМ. По мере остывания воздуха в ШМ уменьшается её объём, а при потере электронов с наружной оболочки может увеличиваться и общий заряд. Поэтому ШМ может всплыть над землёй и далее плавно перемещаться в зависимости от рельефа местности, ветра и электрических полей от грозовых облаков. Известно, что разность потенциалов между облаками и землёй достигает величины вплоть до  $10^8$  В, что при высоте облака над землёй в 1 км даёт напряжённость поля  $10^5$  В/м. Такие сильные поля легко воздействуют на ШМ, обладающую в целом положитель-

ным зарядом, так что электрические поля грозových облаков могут эффективно управлять движением ШМ.

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 приблизительное равенство между магнитной, электрической и кинетической энергиями движущихся заряженных частиц (например, при образовании плазмоида типа ШМ в мощной электромагнитной волне). Для такого состояния из равенства магнитной и кинетической энергии электронов получается однозначное выражение для числа электронов во внешней оболочке ШМ в зависимости от её радиуса. Отсюда при радиусе самых малых ШМ порядка 1 сантиметра её полная энергия не превышает значения 2,2 джоуля.

Рассмотрим теперь ШМ максимально большой мощности. Общий заряд ШМ не может превышать такой величины, при которой напряжённость электрического поля на её поверхности превышает  $E_0 = 30$  киловольт на сантиметр во избежание пробоя атмосферного воздуха. Таким образом, получается первое соотношение между общим зарядом и радиусом ШМ. Второе соотношение вытекает из уравнения баланса сил для электронов во внешней оболочке, куда входит и скорость вращения электронов. Поскольку скорость электронов не может превысить скорости света  $c$ , то для максимального радиуса и заряда ШМ находим следующее:

$$r = \frac{mc^2}{qE_0} = 17 \text{ сантиметров}, \quad Q_0 = 10^{-5} \text{ кулон},$$

здесь  $m$ ,  $q$  – масса и заряд электрона.

Из условия равенства магнитного давления внутри ШМ и давления окружающего атмосферного воздуха находим предельные величины индукции магнитного поля, тока и числа электронов во внешней оболочке ШМ:

$$B = 0,5 \text{ тесла}, \quad i = 1,4 \cdot 10^5 \text{ ампер}, \quad N_e = 3,1 \cdot 10^{15}.$$

Видно, что максимальный электронный ток в ШМ действительно близок к току в канале линейной молнии.

Основная энергия мощной ШМ оказывается заключенной в энергии ионизованных частиц и в энергии электромагнитного поля, причём суммарная энергия величиной 10,6 килоджоулей попадает в диапазон верхних значений наблюдаемого энергосодержания ШМ.

Интересно, что высота над землёй, при которой мощная ШМ находится в равновесии в случае баланса силы Архимеда и электрической наведённой на Землю силы, равна уже 90 см, то есть достигает метровой величины.

Появление ШМ часто отмечается после удара молнии в дерево, телефонный столб, металлические конструкции, линии электропередачи, а также при прохождении молнии возле антенн 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. Вендеровских [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 ещё некоторое расстояние, поднялся на верхний провод (по-видимому заземлённый). После этого шар исчез, причём участок провода вблизи места исчезновения шара накалился и стал красно-жёлтым. 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 с напряжением 110 В. ШМ была жёлто-белого цвета, диаметром около 3 см, она прокатилась по столу и исчезла, оставив медный шарик размером 1 мм. По-видимому, включение в состав ШМ испарённых металлов утяжеляет её, так что ШМ с самого начала имеет сильную связь с предметами, вблизи которых она образовалась.

Если в оболочке ШМ образуется дырка, то из неё возможно истечение горячей воздушной плазмы, эффективно нагревающей предмет, с которым контактирует ШМ. В выше описанном случае ШМ раскалила электрический провод, выделив на нём всю свою энергию.

Согласно [29], световой поток от средней ШМ составляет  $1600 \pm 200$  люмен. Данную светимость можно объяснить излучательными переходами атомов и молекул и постепенной рекомбинацией ионов воздуха внутри ШМ, так что её энергия только за счёт излучения непрерывно убывает со скоростью до 2 джоулей в секунду. Отношение площади поверхности к объёму растёт по мере уменьшения 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 человека, на высоте 90 см от камня. Это был жёлтый прозрачный шар диаметром 20 см, он равномерно покачивался с амплитудой 4 см. В центре шара было голубоватое пламя грушевидной формы длиной около 4 см, обращённое 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 метрах молния ударила в каменоломню.

Согласно [2], бывают ШМ, похожие на змею, верёвку, 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 приведён в [4] в соответствии с со-

общением 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 прошёл через отверстие. Когда шар проходил через отверстие и уменьшался в размерах, он как бы всё 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 стёкла находят маленькие оплавленные трещинки. Отмечено несколько случаев проникновения ШМ внутрь самолётов [30]. Одна ШМ образовалась после удара линейной молнии в нос самолёта, впоследствии там было найдено отверстие размером 8 мм и вокруг ещё множество мелких дырочек. Другая ШМ возникла в ИЛ-18, полностью герметичном самолёте, причём оказалось, что пластмассовый обтекатель антенны радиолокатора стал в дырках как сито для муки.

В связи со строением ШМ рассмотрим ещё 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 Божон. 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 метров 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 про-

бил 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 случае 1949 г. в ФРГ [3] после распада ШМ осталась её часть, напоминающая по форме молодой месяц, повернутый рогами вниз. Распад этой ШМ сопровождался искрами длиной до 30 см. В случае 1973 г. в Люберецком районе г. Москвы наблюдалась ШМ, спускавшаяся с высоты деревьев [4]. Цвет её менялся от ослепительно белого с переходом в жёлтый, ярко-красный и затем в тёмно-красный, после чего в центре появилось чёрное 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 идёт так, что ось вращения её 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 счёт рекомбинации ионов. Температура воздуха может достигать температур воздуха в канале линейной молнии, захваченного при образовании ШМ, то есть вплоть до величины порядка десятков тысяч градусов. При такой температуре нетрудно объяснить такие эффекты от ШМ, как оплавление стёкол 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 определённой равновесной форме искрение и звук от ШМ минимальны.

Следует ожидать, что расплывчатость или наоборот чёткость 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 прикреплённых 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 энергии при поражении человека электротоком составляет величину порядка 2000 джоулей, 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 ещё один пример действия принципа дополнительности в природе. Следует сказать, что для построения модели ШМ были использованы те же идеи, что и в [34] при описании схемы возникновения электрического заряда у элементарных частиц.

### Библиографический список

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. N12. 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., Сеницын 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. Тарту: Изд. Тарт. гос. ун-та, 1986, С.228.
12. Neugebauer T. Zu dem Problem des Kugelblitzes // Zeit.Phys. 1937. V.106. N7,8. 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. 1968b. 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. научных трудов. ЯрГУ, 1991. С.100–102.

17. Месеняшин А.И. Об электростатической и пузырьковой природе шаровой молнии // Исследования электрических разрядов в атмосфере. Сб. научных трудов. ЯрГУ, 1991. С.110–116.
18. Новиков А.А. Оценка и сравнение параметров шаровых молний и положительно заряженного коронирующего плазмоида в свободной атмосфере // Исследования электрических разрядов в атмосфере. Сб. научных трудов. ЯрГУ, 1991. С.117–121.
19. Wooding E.R. Ball Lightning. // Nature. 1963. V.199. N4890. P.272–273.
20. Johnson P.O. Ball Lightning and Self-containing Electromagnetic Fields // American Journal of Physics. 1965. V.33. N2. P.119–123.
21. Шафранов В.Д. О равновесных магнитогидродинамических конфигурациях // ЖЭТФ. 1957. Т.33. Вып.3. С.710–722.
22. Капица П.Л. О природе шаровой молнии // ДАН СССР. 1955. Т. 101. N2. С.245–248.
23. Капица П.Л. Свободный плазменный шнур в высокочастотном поле при высоком давлении // ЖЭТФ. 1969. Т. 57. Вып.6. С.1801–1866.
24. Finkelstein D., Rubinstein J. Ball Lightning // Phys. Rev. 1964.V.135. N.2A. P.390.
25. Дмитриев М.Т. Природа шаровой молнии // Природа. 1967. N6. С.98–106.
26. Зверев Е.А., Кринберг И.А. Нагрев токового шнура и образование перетяжек в импульсном вакуумном разряде // Письма в ЖТФ. 1998. Т.24. N18. С.50–56.
27. Брагинский С.И. О поведении полностью ионизованной плазмы в магнитном поле // ЖЭТФ. 1957. Т.33. Вып.3. С.645–654.
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. ред. физ.-мат. лит. 1991. 133 с.
30. Имянитов И., Тихий Д. За гранью закона. Ленинград: 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., Ким А.С. Физическая теория шаровой молнии // *Прикладная физика*. 2001. N1. С.69–87.
34. Федосин С.Г. Физика и философия подобия от преонов до метagalactic. Пермь: Стиль-МГ, 1999. 544 с.