Электромагнитное излучение шаровой молнии

***А. И. Григорьев, С. О. Ширяева**

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова,
*г. Ярославль, 150000, Россия, *e-mail: grig@uniyar.ac.ru*

Поступила 24.02.2020
После доработки 05.06.2020
Принята к публикации 07.06.2020

На основе общефизических соображений и данных наблюдений шаровых молний в естественных условиях проводится оценка интенсивности электромагнитного излучения от шаровой молнии по порядку величины, которая оказалась $I \sim 10^{-4}$ Вт. Причиной наличия у шаровой молнии электромагнитного излучения может быть ускоренное движение (движение по криволинейным траекториям) заряженных частиц вещества шаровой молнии.

Ключевые слова: шаровая молния, электромагнитное излучение, моделирование

УДК 551.594.2
DOI: 10.5281/zenodo.4299702

ВВЕДЕНИЕ

Шаровой молнии (ШМ) посвящено значительное количество литературных источников (см., например, научно-популярные книги, обзоры и монографии [1–13]), охватывающих многие ее свойства. Но данное рассмотрение посвящено только одному из них: способности вызывать свечение не включенных электрических лампочек и создавать радио- и телепомехи. О таком свойстве ШМ упоминалось еще в одной из первых книг, целиком посвященных ШМ, – монографии В. Брандта [2]. Об этом свойстве говорилось и в последующих изданиях. По данным авторов данной работы, по массиву из 5000 описаний очевидцев существования ШМ в естественных условиях такое свойство ШМ встречается примерно в 1,3 процентов случаев [12]. Вот некоторые из них [12]:

Середина сентября 1980 года, г. Учалы Башкирской АССР. Наблюдатель Л.К. Кудоярова

«Это произошло во время несильного затяжного дождя. Молний и грома, по-моему, не было. Вечером я смотрела телевизор и, видимо, уснула. Проснулась от какого-то неприятного ощущения и оттого, что затрещал телевизор. Я взглянула на телевизор, хотела встать и выключить его, но замерла на месте: над телевизором мимо комнатной антенны медленно двигался по воздуху светящийся шарик. Он был размером с маленькое куриное яйцо или теннисный мячик тускло-красного цвета (как нить накала в постепенно гаснущей лампочке мощностью ~ 15–20 Вт). Мне показалось, что центр шара был темнее, более насыщенного цвета, и он как-то вибрировал внутри более светлой оболочки. Шар, двигаясь мимо антенны, но, не касаясь ее, вызвал сильные помехи: по экрану телевизора пошли полосы, изображение исказилось, слышалось потрескивание. Затем шар обогнул антенну, совершив полный круг, и еле заметными толчками поплыл к окну. Форточка и само окно были закрыты, но, видимо, следуя току воздуха через небольшую щель в раме, шар приблизился к щели и остановился. Тут я нечаянно сильно кашлянула. Шар стал ярче, как-то растекся вокруг щели и втянулся в нее. Но с другой стороны стекла, то есть на улице, шара мне не было видно. Все это продолжалось, как мне показалось, несколько минут, но, скорее всего, прошло несколько десятков секунд. Только после исчезновения шара я смогла встать и подойти к телевизору. Никаких следов ни на телевизоре, ни на раме окна шар не оставил, хотя я осмотрела все с лупой».

Середина июля. Озеро Кандрыкуль, Башкирия. Наблюдатель И. Илларионов, инженер.

«В то памятное лето я и мой близкий друг поехали на велосипедах по Башкирии отдыхать. Однажды после грозы мы остановились на ночь возле озера Кандрыкуль, раскинули палатку, развели костер. Все вокруг было мокрым, костер горел плохо. Я сидел на стульчике около большого влажного валуна и слушал радиоприемник. Внезапно я увидел целое облако светящихся шаров диаметром от трех–четырех миллиметров до 50 сантиметров. Светились они тоже по-разному: одни – как лампочки от карманного фонарика, другие – как лампочки от прожектора. Стало светло как днем. Приемник мой не работал, а только трещал. Мой друг, возившийся с удочками, замер на месте и медленно поднял голову. Самый большой шар отделился от общей кучи и ткнулся в лицо моего друга. Он упал.

© Григорьев А.И., Ширяева С.О., Электронная обработка материалов, 2020, **56**(6), 34–40.

Я шевельнулся, и шары полетели ко мне. Я медленно поднялся, вскочил на валун и прыгнул спиной с обрыва. Мне повезло: я упал на куст. Шары замерли, покачиваясь и будто бы совещаясь. Затем они все сразу разорвались. Я влез на обрыв. Валун, над которым висели шары, был как бы оплавлен. Друг мой был мертв. На лбу у него было пятно размером с копеечную монету. Все это продолжалось не более одной минуты, но показалось мне целой вечностью. У самого большого шара мне запомнилось то, что я ясно видел его «внутренности». Это была настолько сложная структура, что я не берусь описывать ее».

Лето 1947 года, г. Черновцы Украинской ССР. Наблюдатель Е.Н. Кудрявцева, 1922 года рождения.

«Я была на гастролях с ансамблем. После репетиции, часа в 2–3 дня, я зашла к коллеге в дом, где она временно жила. Домик одноэтажный. Мы сидели у окна напротив друг друга и вязали. Форточка была открыта. На улице собиралась гроза, где-то далеко сверкали молнии, но здесь еще было затишье. Вдруг я взглянула на подругу и увидела, что волосы ее все поднялись вверх (дыбом). Она же смотрит на меня расширенными от испуга глазами, так как со мной, как оказалось, происходит то же самое. Это мы потом друг другу рассказали, а каждая на себе ничего необычного не ощущала. Тут мы увидели, как над нами проплыл шар диаметром 8–14 сантиметров. Он был матовый, как матовая лампочка, светился с яркостью полной луны. Двигался он очень медленно. Комнатка была маленькая: напротив окна выдавалась печь, в центре на длинном шнуре свисала лампочка (40 Вт). Когда шар пролетал мимо лампы, то волосок накаливания засветился красноватым цветом, хотя выключатель был выключен (мы проверили). Когда шар отлетел от лампы, погасла и нить накаливания. Затем шар облетел печку, осторожно обходя все уголки и не касаясь ее, повернул вдоль стены и опять стал приближаться к нам. Мы сидели не двигаясь, не разговаривая. Когда шар отлетел от нас первый раз, волосы у нас опали. Теперь же при его приближении они вновь поднялись дыбом. Шар проплыл над нашими головами и вылетел в форточку. Вскоре после этого разразилась гроза, дождь лил как из ведра, но все быстро закончилось».

Июль 1952 года, г. Волковыск Гродненской обл. БССР. Наблюдатель А.И. Солдатенков, 1939 года рождения.

«Однажды летним днем разыгралась гроза. Мы втроем (мама, я и брат) были дома. Я читал книгу за столом, мать сидела рядом с вышивкой. Мощный удар грома заставил нас вздрогнуть. Вдруг яркий светящийся шарик, неизвестным образом проникший через стекло балконной двери, приковал мой взгляд, я испуганно прижался к матери. Шарик был оранжевого цвета около пяти сантиметров в диаметре, по яркости напоминал лампу в 25 Вт. Проникнув в комнату, он остановился как бы в раздумье, чуть постояв, медленно, со скоростью около 1 м/с, поплыл вдоль стен на уровне 2 м от пола. Иногда он останавливался, как бы «топтался» на месте и, немного «подумав», снова плавно пускался дальше. При этом он то вытягивался в длину, как капля ртути, то снова принимал сферическую форму. Так он совершил один круг по комнате и пошел на второй. Мы находились в центре комнаты и испуганно поворачивали головы вслед за шариком. Вдруг его «внимание» привлекла блестящая оркестровая труба, висевшая на стене. Плавное движение шарика заметно ускорилось, и он устремился к этой трубе. Шар влетел в широкий раструб, раздался взрыв (точнее, треск сухого сломанного дерева), сопровождающийся оглушительным металлическим звоном. Звон медленно затихал, а мы, испуганные и завороженные, все не могли прийти в себя. Потом мы осмотрели трубу, она вся почернела, местами оплавилась, была вся покорежена. Все это произошло примерно за 25–30 секунд и сопровождалось сильным треском репродуктора. После исчезновения шара остался резкий запах озона».

18 июня 1981 года, г. Одесса. Наблюдатель Т.В. Бородина

«Это случилось в 12–13 часов дня. В тот день с утра была очень плохая погода: ветер, моросил дождь, но к этому времени небо прояснилось. Я с четырехлетней дочерью стояла на перекрестке, ожидая, когда пройдет поток транспорта. Мы обратили внимание на необычную картину. У троллейбуса, повернувшего на перекресток, соскочил бугель, при этом он несколько раз ударил по проводам, вызывая кратковременные замыкания, раздался треск, посыпались искры. Вдруг от общей массы искр отделился круглый яркий шар диаметром 15–20 сантиметров, по цвету и яркости напоминающий дугу электросварки, но несколько мягче, так как глаза после наблюдения не болели. Шар пересек проезжую часть дороги (машины стояли перед светофором) на высоте троллейбусных проводов и опустился на провода противоположной троллейбусной линии и стал продвигаться вдоль них со скоростью, несколько

большей, чем прежде. Провода были укреплены на столбах с осветительными лампами. По мере того как шар проходил под лампами, они по очереди вспыхивали. Так шар проплыл мимо 3–4 ламп. Потом, отделившись от проводов, влетел под плафон лампы, и та начала гореть: сыпались искры, шел дым. Затем огонь прекратился, а дым еще шел некоторое время. За это время свет светофора переключился, и транспорт стал продвигаться. Подошел троллейбус, проехав по той линии, где проплывал шар, но ни искр, ни чего-то другого необычного не случилось. Наблюдали мы все происходящее с расстояния 50–60 метров в течение нескольких минут (за это время свет светофора изменился с красного на зеленый). Скорость шара была сравнима со скоростью пешехода».

Конец июня 1981 года, г. Калуш Ивано-Франковской обл. Наблюдатель П.С. Циж

«Живу я в пятиэтажном доме на четвертом этаже. Я в квартире был один, сидел на диване. Вдруг через открытую балконную дверь в комнату на уровне примерно полутора метров от пола влетел очень яркий шар диаметром 5–6 сантиметров, похожий на пушистого игрушечного цыпленка. Шар двигался очень медленно, как будто что-то искал, с легким шипением. Пролетел около двух метров прямо, постепенно поднимаясь вверх, затем повернул обратно, чуть приостановился на расстоянии 1 м от меня, направился к окну. У окна стояли телевизор старой марки «Рекорд-6» и громкоговоритель, сзади находилась отопительная батарея. Шар вдруг резко опустился между задней стенкой телевизора и батареей, в этот же миг раздался резкий взрыв. Экран телевизора ярко засветился, хотя телевизор был выключен. Светился экран недолго, не более одной секунды (примерно, как при фотовспышке). От неожиданности я закрыл глаза, а шар исчез. С места взрыва в открытую балконную дверь потянулась полоса какого-то «тумана», остался слабый запах, похожий на запах обгоревшей изоляции и шоколада. Через некоторое время я включил телевизор, удивительно, но он работал. Наблюдал я этот загадочный шар в течение 5–7 секунд, за это время он пролетел примерно четыре метра. Когда шар был рядом со мной, я почувствовал исходящее от него тепло. Шар светился довольно ярко, как дуга электросварки в сильно задымленном помещении, внутренняя структура была похожа на поролон и светилась яркими непонятными красками. Комнатный цветок, стоявший на окне в детском металлическом ведерке, после этого происшествия стал как будто сваренным и через два дня засох».

Последнее описание указывает на интенсивное электромагнитное излучение, возникающее во время взрыва шаровой молнии. С позиций физики ударных волн в этом описании нет ничего неожиданного, так как сильные взрывы в атмосфере всегда сопровождаются появлением интенсивной электромагнитной волны. Интересно то, что такое излучение образовалось при взрыве именно шаровой молнии.

Как ни экзотично упоминаемое свойство ШМ, до сих пор никто не взялся проверить его на соответствие законам физики. Этому и посвящена настоящая публикация.

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЕ, СПОСОБНОЙ ЗАСТАВИТЬ СВЕТИТЬСЯ НИТЬ ЛАМПОЧКИ НАКАЛИВАНИЯ

Предположим, что у ШМ имеется свойство излучать электромагнитные волны. Не останавливаясь на природе этого излучения, оценим из общефизических соображений, какова должна быть интенсивность такого излучения для того, чтобы вызвать свечение нити накаливания электрической лампочки.

Оценим напряжение, которое нужно приложить к нити накаливания лампочки для начала ее свечения, исходя из параметров электрических лампочек (см., например, соответствующие статьи в Интернете).

Сопротивление нити накаливания электрической лампочки $R \sim 10$ Ом, но по мере разогрева нити ее сопротивление увеличивается, и в рабочем режиме оно достигает нескольких сотен Ом. Ток, текущий через нить накаливания, при этом уменьшается и в рабочем режиме составляет десятые доли ампера. В рассматриваемой ситуации, когда нить накаливания только начинает светиться, для оценок по порядку величины примем, что $i \sim 1$ А.

Тогда для напряжения, которое нужно приложить к лампочке, чтобы ее нить накаливания начала светиться, получим:

$$U_* = i \times R \sim 1\,\text{А} \times 10\,\text{Ом} \sim 10\,\text{В}. \qquad (1)$$

Такую же величину должна иметь электродвижущая сила индукции $\varepsilon_{ин}$, вызываемая в нити накаливания лампочки, близко находящейся и излучающей электромагнитные волны ШМ.

Для вычисления электродвижущей силы индукции воспользуемся законом Фарадея:

$$\varepsilon_{ин} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t},$$

здесь Ф – поток индукции магнитного поля через площадь, ограниченную замкнутым контуром, в котором и возникает электродвижущая сила;

t – время. Электродвижущая сила индукции, возникающая в нити накаливания лампочки, которую будем моделировать прямым соленоидом с количеством витков на единицу длины n, длиной l, при прохождении через площадь его сечения потока электромагнитного поля, может быть оценена по формуле:

$$\varepsilon_{ин} = -\pi r^2 n l \omega \times \mu\mu_0 H_0 \sin\left[-\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right], \qquad (2)$$

в которой r – радиус спирали; μ – магнитная проницаемость среды; μ_0 – магнитная постоянная; ω – частота волны; H_0 – амплитудное значение напряженности магнитного поля; c – скорость распространения электромагнитного сигнала; x – пространственная координата вдоль направления распространения волны.

В обычных электрических лампочках накаливания длина средней линии спирали l по порядку величины обычно измеряется сантиметрами; радиус спирали r составляет десятые доли миллиметра. Спираль обычно двойная: то есть проволочка, свернутая в спираль, закручивается в спираль еще раз. Сама проволочка, как правило, вольфрамовая, имеет толщину порядка одной десятой миллиметра. В соответствии со сказанным для проведения оценки по порядку величины примем $\mu = 1$; $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Г/м; $l = 0{,}05$ м; $n = 25000$ м$^{-1}$; $r = 0{,}0005$ м; $c = 3\times10^8$ м/с; $\omega = 3\times10^{12}$ Гц.

Принимая теперь, что $\varepsilon_{ин} \approx U_*$, из (2) можно определить по порядку величины амплитудное значение напряженности магнитного поля H_0 в электромагнитной волне от ШМ, у ее поверхности, считая, что синус в (2) равен единице:

$$H_0 \sim \frac{U_*}{\omega \pi r^2 n \mu\mu_0 l} \sim 0{,}002 \text{ A/m}.$$

Объемную плотность энергии w в электромагнитной волне определим выражением [14, с. 299]:

$$w = \mu\mu_0 H^2 \equiv \mu\mu_0 H_0^2 \times \cos^2\left[-\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right].$$

Тогда плотность потока энергии электромагнитной волны или энергию, которую электромагнитная волна переносит за единицу времени через единицу площади, перпендикулярной к направлению распространения волны, запишем в виде [14, с. 300]:

$$\vec{P} = \langle w \rangle \times \vec{V} \equiv = \frac{1}{2}\mu\mu_0 H_0^2 \times \vec{V},$$

здесь V – скорость волны; $\langle w \rangle$ – среднее за период волны значение объемной плотности энергии.

В итоге плотность потока энергии в электромагнитной волне от ШМ, если принять $\mu = 1$, $V \approx c$, по порядку определится как:

$$W \approx \frac{1}{2}\mu\mu_0 H_0^2 c \sim 10^{-3} \text{ Вт/м}^2.$$

Полная энергия электромагнитного излучения ШМ за единицу времени, или интенсивность излучения, будет равна произведению W на величину площади сферы, заключающей в себе ШМ. При $R_{шм} \sim 0{,}15$ м:

$$I = W \times 4\pi R_{шм}^2 \sim 10^{-4} \text{ Вт}. \qquad (3)$$

В итоге оценочное значение интенсивности электромагнитного излучения ШМ получилось не противоречащим данным наблюдений [12].

Принятые выше для проведения оценки по порядку величины значения физических величин достаточно близки к реальным, но условны. Тем не менее полученная оценка правдоподобна с энергетической точки зрения. Энергия ШМ, идущая на излучение электромагнитных волн за ~ 100 сек ее существования, составит лишь незначительную долю ее полной энергии, оценки которой по результатам повреждений ею различных предметов в величину $\geq 10^5$ Дж, можно найти в большинстве книг, посвященных ШМ (см., например, [6,–7, 11–12, 15]).

О ВОЗМОЖНОМ ФИЗИЧЕСКОМ МЕХАНИЗМЕ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Говоря о возможных физических механизмах возникновения электромагнитного излучения ШМ, можно предложить два различных механизма его генерации, связанных: 1) с осцилляциями заряженной поверхности ШМ [16]; 2) с ускоренным движением заряженных частиц в ее объеме по криволинейным орбитам [17].

Что касается первого механизма, то оценки интенсивности такого излучения дают весьма малую величину как для квадрупольного, так и для дипольного типов излучения [18], недостаточную для возбуждения свечения электрической лампочки. Остается второй механизм. Итак, физический механизм генерации электромагнитного излучения в ШМ связан с ускоренным движением внутри нее электрических зарядов по криволинейным орбитам, которое обеспечит наличие центростремительного ускорения.

На данном этапе уместно задаться вопросом о структуре вещества ШМ. Что видят очевидцы внутри ШМ, когда она проходит на малом

расстоянии от них? Около 13 % очевидцев, видевших ШМ с близкого расстояния, сообщают о наличии движущейся внутренней структуры ШМ [12]. Они говорят о хаотически движущихся светящихся точках; о переплетенных светящихся линиях; о движущихся в объеме ШМ маленьких светящихся шариках [12]. Иногда сравнивают видимую структуру ШМ с «рыхлым, слабо намотанным клубком шерстяных нитей».

Вот несколько примеров [12]:

1950 год, г. Оренбург. Наблюдатель Ю.Н. Афанасьев

«Мы жили в двухэтажном доме. Вход в нашу квартиру был со двора. Летом была сильная гроза. Двери в коридор, в зал, в дом были открыты. Было открыто и окно на улицу из зала, а потому был сквозняк. Нас было двое: мать, Афанасьева М.Д., и я. Вдруг в комнату влетел шар с ярко выраженным ядром диаметром около 300 миллиметров. Он светился, чем дальше от центра, тем меньше. Вокруг ядра что-то вращалось, оставляя после себя полосы в виде белых ниток, и шипело. Шар спокойно с остановками вылетел в зал, а оттуда, ничего не задев, в окно.»

13 мая 1982 года, г. Новосибирск, Академгородок. Наблюдатель Н.Н. Бельченко

«Около 17 часов местного времени началась сильная гроза. За окном недалеко вспыхнула молния, и почти одновременно в форточку кухни, которая была закрыта от комаров металлической сеткой, влетел ярко-оранжевый шар размером с крупный апельсин (10 см в диаметре). Он светился как лампочка в 100 Вт и был похож на клубок золотисто-оранжевых ниток или, вернее, точек. Пролетев, перекатываясь, с шипящим звуком над моей головой, он ударился о выключатель, расположенный на противоположной окну стене. От удара шар взорвался с сильным звуком и рассыпался. На какой-то миг каждая точка шара превратилась в маленькую молнию-искорку, отчего шар резко увеличился в объеме и рассыпался бесследно. На выключателе не осталось никаких следов. Минут через сорок мы решились до него дотронуться. Он работал исправно. Двигался шар со скоростью не более 1 м/с.»

Июль 1950 года, г. Теплогорск Ворошиловградской обл. Наблюдатель В.А. Лиходзеевская

«Вечером часов в 20 начиналась гроза, дождя еще не было, но с северной стороны надвигались черные тучи. Возле дома во дворе стояли жильцы, бегали дети. Мы с соседкой стояли у летней плиты. Соседка начала помешивать в плите, а я смотрела. Вдруг соседку и плиту осветило ярким, каким-то электрическим светом. Я оглянулась и увидела ослепительно яркий шар величиной с футбольный мяч кремового цвета. Он был похож на клубок ярких ниток или, скорее, на сплетение тонкой проволоки. Шар этот как-то не спеша со скоростью не более 3 м/с двигался в сторону детей. Все замерли, стояла тишина. Шар проплыл мимо детей и исчез. Я не уловила точно, куда он делся, так как в это время смотрела на ярко освещенные лица детей. Все это продолжалось не более пяти секунд».

Конец июня-начало июля 1962 года, с. Нечаевка Мокшанского района Пензенской обл. Наблюдатель П.С. Журавлев

«Днем была сильная гроза и очень сильный дождь, такой, что картофель выбивало из земли. Мы с женой решили посмотреть из сеней в небольшое окошко, что делается с картошкой. Из-за частых грозовых разрядов вскоре отошли от окна, и тут справа от себя в полутора метрах я увидел шар диаметром 20–25 сантиметров, висевший на высоте полутора метров от земляного пола. Шар был белый, слабо светился, как лампочка в 15 Вт. Он казался каким-то неплотным, неравномерным по плотности, состоящим из шевелящихся маленьких бело-красноватых искорок. Потом шар стал двигаться рывками: вверх-вниз, вперед-назад. Рывки он совершал на расстояние примерно 1–1,5 своего диаметра. Такими скачками он проплыл мимо меня всего примерно в 30 сантиметрах от моего лица, потом, повисев немного, таким же образом стал двигаться назад, немного снижаясь, и в полуметре от земли пропал. Я даже не заметил соприкосновения с землей. Никакого звука и шума взрыва не слышал, может быть, мешал сильный грохот грозы. А вот запах после исчезновения шара стоял сильный. Его сложно описать, он напоминал запах дыма от серы спичек, или, может, озона. Я испугался и стал искать, не загорелось ли где. После грозы включили свет, но оказалось, что он не горит: сгорел конец катушки напряжения в счетчике. Наблюдали мы этот шар, как мне показалось, десять-пятнадцать секунд, никакого тепла я не ощутил. Вид у шара был мирный, безобидный, хотелось его потрогать рукой. Шар как будто имел оболочку 5 мм толщиной.»

Естественно предположить, что в виде переплетенных светящихся линий в силу инерционности зрительного восприятия могут прини-

маться следы быстро движущихся светящихся точек. Не задаваясь вопросом о природе такого свечения, предположим, что они несут электрические заряды и могут быть источником электромагнитного излучения.

Согласно [19] ШМ имеет не скомпенсированный электрический заряд $Q_{шм}$ порядка нескольких микрокулон. Этот заряд может быть распределен между описанными выше движущимися светящимися точками.

В дипольном приближении полная интенсивность излучения движущегося с ускорением a заряда на расстояниях, много больших длины волны и линейных размеров области, в которой происходит движение заряда, в системе СИ можно записать в виде [20, с. 436]:

$$I = \frac{q^2 a^2}{6\pi\varepsilon_0 c^3}, \qquad (4)$$

где ε_0 – электрическая постоянная; $\varepsilon_0 \approx 8{,}85\times10^{-12}$ Ф/м. Как упоминалось выше, выражение (4) определяет интенсивность поля в волне на расстоянии, много большем размеров системы, в которой происходит движение заряженных частиц, то есть $R_{шм}$.

Чтобы полную интенсивность излучения, рассчитываемую по формуле (4), можно было сравнить с найденной по (3) интенсивностью электромагнитного излучения у поверхности ШМ $I_{шм} \sim 10^{-4}$ Вт, последнюю нужно умножить на коэффициент X, учитывающий ослабление напряженности поля в сферической волне с расстоянием. Численное значение этого коэффициента определится выражением $X \sim \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^2$. Принимая, что $L_1 \sim 3$ м – расстояние до точки наблюдения, $L_2 \sim 2R_{шм} \sim 0{,}3$ м – характерный линейный размер области, в которой происходит движение заряда, получим $X \sim 10^{-2}$.

Чтобы заряд $Q_{шм} \sim 6\times10^{-6}$ Кл [19] при ускоренном движении излучал с интенсивностью $I \sim 10^{-4}$ Вт непосредственно рядом с ШМ, он должен иметь ускорение

$$a = \frac{1}{q}\sqrt{6\pi\varepsilon_0 c^3 \times I \times X} \sim 10^{10}\ \text{м/сек}^2. \qquad (5)$$

Это очень большое ускорение, особенно если принять во внимание характерный линейный размер ШМ. Оно плохо согласуется с законами физики.

Учтем, что ускорение будет центростремительным: $a = \left(V^2 / R_{шм}\right)$. Из этого соотношения можно найти скорость движения светящихся точек: $V \sim \sqrt{aR_{шм}}$, или, переходя к цифрам, получим $V \sim 30000$ м/с.

В итоге значения ускорения и скорости движения заряженных частиц, оцененные выше, весьма велики и, можно сказать, малоправдоподобны, с физикой согласуются слабо. Но найденные значения ускорения и скорости можно существенно уменьшить и войти в согласие со здравым смыслом, если учесть, что, кроме не скомпенсированного заряда, ШМ может нести и скомпенсированные заряды двух противоположных знаков, если принять, что ее вещество представляет собой плазму. Иначе говоря, предположим, что вещество ШМ состоит из положительно заряженных ионов и электронов. Характерной особенностью плазмы является ее макроскопическая электронейтральность, поддерживающаяся из-за взаимной компенсации пространственного заряда положительно заряженных ионов и электронов. Такая компенсация имеет место лишь в среднем: в объемах, много больших дебаевского радиуса, и за достаточно большие интервалы времени: много большие характерного времени плазменных или ленгмюровских колебаний [21]. Вовлечение этих зарядов во вращательное движение может позволить существенно снизить оценочные значения ускорения и скорости движения заряженных частиц в объеме ШМ.

В самом деле, объем ШМ радиусом 0,15 м будет около 0,01 м^3. Число Лошмидта порядка 3×10^{25} м$^{-3}$ при нормальных условиях. Считая, что плазма ШМ также находится при нормальных условиях (согласно собранным данным, ШМ не вызывает у наблюдателей ощущения тепла в 50 раз чаще, чем вызывает), найдем, что в ШМ радиуса 0,15 м может содержаться порядка 10^{23} заряженных частиц обоих знаков. Примем, что каждая заряженная частица несет один элементарный заряд, и получим, что общий движущийся в ШМ заряд по модулю будет порядка 10^4 Кл, но в целом вещество ШМ будет электронейтрально. Ускоренное движение заряженных частиц в объеме ШМ вызовет генерацию электромагнитного излучения. Количество излучающих, ускоренно движущихся частиц при этом увеличится на десять порядков, и для величины ускорения движения частиц в ШМ получим оценку, существенно меньшую. В итоге оценка ускорения и скорости движения светящихся точек в объеме ШМ дадут $a \sim 20$ м/сек^2 и $V \sim 1$ м/сек.

Человеческий глаз не различает явления, происходящие быстрее, чем за 0,1 сек [22], поэтому если светящаяся точка движется с большой скоростью, то человек воспримет ее как светящуюся линию. Разделив длину половины

окружности на скорость движения заряда, мы сможем определить время наблюдения τ на обращенной к очевидцу половинке ШМ. Если τ < 0,1 сек, то человеческий глаз воспримет траекторию движения как светящуюся линию, если τ > 0,1 сек, то глаз зафиксирует движение светящейся точки. Именно эти варианты ответов респондентов на вопрос о наличии видимой структуры ШМ и регистрируются в реальности.

При характерном радиусе ШМ $R_{шм}$ ~ 0,15 м скорость движения V ~ 1 м/сек как раз и попадает в область границы, разделяющей описанные выше сценарии: сплошные светящиеся линии внутри ШМ или движущиеся светящиеся точки.

Хочется также напомнить, что наличие электромагнитного излучения у ШМ регистрируется весьма редко, как и сообщения о наличии внутренней структуры у нее. Поэтому не следует ожидать, что все ШМ функционируют в соответствии с описанным сценарием.

Можно также отметить, что наличие собственного (нескомпенсированного) заряда у ШМ, не является обязательным для излучения ею электромагнитных волн, если ее вещество представляет собой плазму.

Причиной возникновения движений заряженных частиц по криволинейным траекториям может, например, явиться магнитное поле в объеме ШМ в момент ее возникновения. В пользу такого предположения свидетельствует и факт наблюдения ШМ кольцевых форм. Об этом, кроме авторов настоящей работы, сообщают Стаханов [6] и Рейли [9]. Вероятность наблюдения ШМ сферической формы, по данным всех упомянутых авторов [6, 9, 12], около 0,9, а вероятность наблюдения кольцевой формы ШМ в среднем составила 0,003, различаясь по данным разных авторов [6, 9, 12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с данными наблюдений ШМ в естественных условиях оценена интенсивность электромагнитного излучения ШМ радиусом $R_{шм}$ ~ 0,15 м в узкий телесный угол вблизи ее поверхности $P \sim 10^{-3}$ Вт/м^2, а полная интенсивность электромагнитного излучении ШМ (во всех направлениях) $I \sim 10^{-4}$ Вт. Электромагнитное излучение такой мощности может быть вызвано ускоренным движением (движением по криволинейным траекториям) заряженных частиц в объеме ШМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Араго, Ф., *Гром и молния*, СПб: Изд. Императорской АН, 1859. 424 с.
2. Brand, W., *Der Kugelblitz*, Probleme der Kosmischen Physik. Hamburg: H. Grand, 1923. 170 p.
3. Леонов, Р.А., *Загадка шаровой молнии*, М.: Наука, 1965. 75 с.
4. Имянитов, И.М., Тихий, Д.Я., *За гранью закона*, Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 141 с.
5. Сингер, С., *Природа шаровой молнии*, Пер. с англ. М: Мир, 1973. 239 с.
6. Стаханов, И.П., *Физическая природа шаровой молнии*, М: Атомиздат, 1979. 242 с.
7. Смирнов, Б.М., *Проблема шаровой молнии*, М: Наука, 1988. 209 с.
8. McNally, J.R. Jr., *Preliminary report on the ball lightning Second Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of the American Physical Society*, Gatlinburg, 1960, № 2–5, Paper J-15. p. 1.
9. Rayle, W.D., *Ball lightning characteristics*, Rept. N.A.S.A., T.N.O. 3188. 1966.
10. Charman, W.N., Ball lightning. *Phys. Rep.*, 1979, vol. 54, no. 4, p. 261.
11. Барри, Дж., *Шаровая молния и чёточная молния*, Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 285 с.
12. Григорьев, А.И., *Шаровая молния*, Ярославль: Изд. ЯрГУ, 2010. 200 с.
13. *Science of Ball Lightning*. Ed. Y.H. Ohtsuki. Singapure: World Scientific, 1989. 340 p.
14. Яворский, Б.М., Детлаф, А.А., *Справочник по физике*, М.: Наука, 1985. 512 с.
15. Козлов, Б.Н., О максимальном энерговыделении шаровой молнии, *ДАН СССР*, 1978, т. 238, № 1, с. 61.
16. Калечиц, В.И., Нахутин, И.Е., Полуэктов, П.П., О возможном механизме радиоизлучения конвективных облаков, *ДАН СССР*, 1982, т. 262, № 6, с. 1344.
17. Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М. Теоретическая физика. т. 2. *Теория поля*. М.: Наука, 1973. 504 с.
18. Григорьев, А.И., Колбнева, Н.Ю., Ширяева, С.О., Излучение электромагнитных волн осциллирующей сильно заряженной каплей, *ЖТФ*, 2016, т. 86, № 8, с. 68.
19. Григорьев, А.И., Петрушов, Н.А., Ширяева, С.О., Об электрическом заряде шаровой молнии, *ЖТФ*, 2016, т. 86, № 9, с. 39.
20. Ахиезер, А.И., Ахиезер, И.А., *Электромагнетизм и электромагнитные волны*, М: Высшая школа, 1985. 504 с.
21. Голант, В.Е., Жилинский, А.П., Сахаров, С.А., *Основы физики плазмы*, М.: Атомиздат, 1977. 384 с.
22. Луизов, А.В., *Глаз и свет*, Л.: Энергоатомиздат, 1983. 140 с.

Summary

From general physical considerations and observations of ball lightning in natural conditions, the intensity of electromagnetic radiation from ball lightning is estimated according to the order of the value. Electromagnetic radiation can be the cause of accelerated movement of charged particles of the substance of a fireball (the movement on curvilinear trajectories).

Keywords: ball lightning, electromagnetic radiation, simulation