

# Радиоизлучение коронного разряда и шаровая молния

НИКИТИН А.И., НИКИТИНА Т.Ф., ВЕЛИЧКО А.М.

Приведены результаты исследований мощности радиоизлучения коронного разряда между иглами и плоскостью в оптическом диапазоне и в радиодиапазоне (5 кГц–10 МГц). Свечение разряда идентифицировано как излучение молекул  $\text{NO}_2$ . В положительной короне с матрицы с 409 иглами на 1 Вт энергии, вложенной в разряд, в радиодиапазоне излучалась мощность 0,7 мкВт. Радиоизлучения отрицательной короны обнаружено не было. Приведено объяснение найденного эффекта и дана оценка мощности радиоизлучения коронного разряда шаровой молнии.

К л ю ч е в ы е с л о в а: коронный разряд, радиоизлучение, шаровая молния

На популярных лекциях о действиях электричества докладчики любят показывать эффектный эксперимент. Они приглашают девушку с распущенными волосами встать на изолирующую подставку и предлагают ей прикоснуться проводящим стержнем к полюсу электростатического генератора. К другому полюсу присоединяют провод, уложенный на пол. При подъёме напряжения до  $U=300$  кВ волосы у девушки поднимаются и причёска принимает форму веера [1, с.180].

Оценим, при каком значении напряжённости электрического поля вблизи головы девушки создаётся сила, способная поднять её волосы. Для удобства расчётов заменим фигуру девушки эллипсоидом вращения с размером большой оси  $2a=1,6$  м и размером малой оси  $2b=0,3$  м. Для такого эллипсоида потенциал электрического поля определяется формулой [2]:

$$j = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\sqrt{a^2-b^2}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{a^2-b^2}{x^2+a^2}}, \quad (1)$$

а его ёмкость

$$C = 4\pi\epsilon_0\sqrt{a^2-b^2} / \operatorname{arch}(a/b). \quad (2)$$

Здесь  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  Ф/м.

В (1) мы заменили переменную  $x$  из [2] на  $x^2$  для обеспечения вида потенциала  $j = q/4\pi\epsilon_0 x$  при  $x \gg a$ . Напряжённость  $E$  электрического поля на поверхности эллипсоида (при  $x=a$ ) на оси  $x$  (вдоль большой полуоси эллипсоида) можно найти, про дифференцировав (1) по  $x$ :

$$E = - dj/dx = q/4\pi\epsilon_0\sqrt{2}(a^2+b^2). \quad (3)$$

Results obtained from an investigation aimed at studying the power of radio-frequency emission generated by corona discharge between pins and a plane in the optical band and in the radio-frequency band from 5 kHz to 10 MHz are presented. The discharge glow was identified as radiation from  $\text{NO}_2$  molecules. A power equal to 0.7  $\mu\text{W}$  was radiated in the radio-frequency band per watt of power applied to the discharge in a positive corona from a matrix containing 409 pins. No radio-frequency emission was detected from a negative corona discharge. An explanation to the found effect is given, and the power of radio-frequency emission from the corona discharge of ball lightning is estimated.

Key words: corona discharge, radio-frequency emission, ball lightning

При  $a=0,8$  м и  $b=0,15$  м  $E=q/4\pi\epsilon_0 \approx 9369$  В/м; при тех же значениях  $a$  и  $b$  ёмкость  $C=4\pi\epsilon_0 \approx 33322$  Ф. При потенциале эллипсоида  $U=3 \times 10^5$  В его заряд  $q=CU=4\pi\epsilon_0 \approx 99966 \times 10^5$  Кл, а напряжённость поля  $E=1,067 \times 10^5$  В/м. Таким образом, находим, что для поднятия волос напряжённость электрического поля должна быть не меньше 1 кВ/см.

Этот вывод был проверен экспериментально. В центр плоского электрического конденсатора, образованного двумя дисками из дюралюминия диаметром 105 и 160 мм, отстоящими друг от друга на 50 мм, был помещён отрезок хлопчатобумажной нити толщиной 0,3 мм и длиной 45 мм. Нить одним концом была прикреплена к нижнему электроду. При напряжении 10 кВ нить выпрямилась и заняла вертикальное положение. Таким образом, для её поднятия потребовалось электрическое поле  $E=10$  кВ/5 см = 2 кВ/см. Эта цифра близка к полученной оценке  $E=1$  кВ/см.

Запомним эти значения и ознакомимся с описанием двух случаев встреч людей с шаровой молнией.

1. А.А. Петров из Твери сообщил: «В гумне на сене сидели двое – мужчина и женщина. Вдруг к ним зигзагообразно подплыло на расстояние в один метр раскалённое до белизны тело крупнее яблока. Тело искрилось, и при этом волосы у женщины (длина их была 20–30 см) встали дыбом (веером), а у мужчины волосы зашевелились под фуражкой. Шар поколебался перед ними из стороны в сторону как кобра и покинул гумно через щель в кровле. Изумлённые наблюдатели, придя в себя, обнаружили странные вещи: у женщины исчезли кольца с пальцев, а у мужчины исчезли цепочка от складного ножа, металлический наконечник от авторучки и металлические ободки на бо-

тинках, закрепляющие края отверстий для шнурков» [3].

2. Е.Н. Кудрявцева описала событие, произошедшее летом 1947 г. в городе Черновцы Молдавской ССР: «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 ещё было затишье. Вдруг я взглянула на подругу и увидела, что волосы её 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, что 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 её, повернул вдоль стены и опять стал приближаться к нам. Мы сидели не двигаясь, не разговаривали. 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 всё быстро закончилось» [4].

В этих двух описаниях встречи с шаровой молнией есть два общих момента:

шаровая молния способна поднимать волосы свидетелей;

она каким-то образом передаёт энергию на расстоянии.

Естественно предположить, что и в том, и в другом случаях проявляются электрические свойства шаровой молнии. Подъём волос можно объяснить тем, что шаровая молния создаёт вблизи голов наблюдателей электрическое поле напряжённостью  $E_h = 2 \cdot 10^5$  В/м. Присутствие вблизи шаровой молнии людей искажает распределение электрического поля, создаваемого её зарядом. Заменяем сидящего человека проводящим шаром радиусом  $R_p = 0,5$  м. Если этот шар внести в однородное электрическое поле  $E_0$ , то потенциал на расстоянии  $r$  от центра шара будет равен [2]:

$$j_p = - E_0 r \cos \varphi \left( 1 - \frac{R_p^3}{r^3} \right) \frac{\ddot{\varphi}}{\varnothing} \quad (4)$$

Здесь  $\varphi$  – угол между направлением вектора  $E_0$  и радиусом-вектором  $r$ .

При  $E_0 \parallel r$

$$j_p = E_0 r \left( 1 - \frac{R_p^3}{r^3} \right) \frac{\ddot{\varphi}}{\varnothing} \quad (5)$$

Напряжённость электрического поля  $E_t$  на вершине шара можно найти, дифференцируя (5) по  $r$  и полагая  $r = R_p$ :

$$E_t = - \frac{dj_p}{dr} = E_0 R_p^3 \frac{1}{r^3} 3 E_0. \quad (6)$$

Поэтому, для того чтобы вблизи головы сидящего человека присутствовало электрическое поле  $E_h = 2 \cdot 10^5$  В/м, напряжённость внешнего поля должна быть  $E_0 = E_h / 3 = 6,7 \cdot 10^4$  В/м.

Предположим, что это поле создаётся униполярным электрическим зарядом  $Q$  шаровой молнии. Оценим значение этого заряда. В первом случае шаровая молния радиусом  $R_{b1} = 4$  см (радиус «крупного» яблока) создала на расстоянии  $R_1 = 1$  м электрическое поле  $E_0 = 6,7 \cdot 10^4$  В/м. Отсюда её заряд  $Q_1 = E_0 4\pi\epsilon_0 R_1^2 = 7,45 \cdot 10^{-6}$  Кл. При таком значении заряда напряжённость электрического поля на поверхности шаровой молнии  $E_1 = Q_1 / 4\pi\epsilon_0 R_{b1}^2 = 4,18 \cdot 10^7$  В/м, что в 13,5 раз больше напряжённости поля пробоя воздуха при атмосферном давлении  $E_{br} = 3,1 \cdot 10^6$  В/м.

Для второго случая расстояние от шаровой молнии до голов женщин не указано. Примем его тоже равным 1 м (похоже, что она находилась достаточно высоко и сначала женщины её не заметили). Тогда для заряда этой шаровой молнии получаем то же значение  $Q_2 = 7,45 \cdot 10^{-6}$  Кл. При радиусе шара 4 см напряжённость поля на его поверхности будет равна  $4,18 \cdot 10^7$  В/м, а при радиусе 7 см –  $1,37 \cdot 10^7$  В/м. Эти значения напряжённости в 4–13 раз больше напряжённости поля пробоя воздуха. Несмотря на это, в обоих случаях не сообщается о наличии разрядов между шаровой молнией и окружающими предметами даже тогда, когда она проходила на близком расстоянии от стен и металлических предметов типа вьюшки или конфорок печи.

Таким образом, оказалось, что даже «рядовые» шаровые молнии, не причинившие вреда здоровью наблюдателей, обладают сверхпробойными значениями напряжённости электрического поля вблизи поверхности, но это, однако, не приводит к развитию искрового разряда. Это, можно сказать, экспе-

риментально установленный факт, и он требует объяснения. Конечно, можно предположить, что волосы у женщин поднялись под действием не электрического поля, а, скажем, гравитационного. Модели шаровой молнии, в которых она считается чёрной дырой, действительно, существуют [5]. Но в этом случае она вместе с волосами должна была поднять в воздух и женщин. Поэтому, действуя по принципу английского философа и богослова XIV в. Вильяма Оккама («Бессмысленно затрачивать больше усилий на то, что может быть достигнуто меньшими»), не будем «усложнять сущность большего необходимого» и вернёмся к нашей гипотезе о существовании шаровой молнии, несущей нескомпенсированный электрический заряд.

Зададим вопрос: почему при повышении потенциала металлического шара, находящегося в воздухе или другой материальной среде (в жидкости, твёрдом диэлектрике) рано или поздно происходит пробой изолятора? Дело в том, что в этих средах изначально присутствует большое количество потенциальных поставщиков зарядов – ионов и электронов, только они до определённого момента связаны и проявляют себя как электронейтральные частицы (атомы и молекулы). При разрыве связи зарядов возникает проводящая среда. Наиболее радикальный способ повысить электрическую прочность пространства вокруг заряженного шара – это удалить из него потенциальные источники зарядов, создать вакуум [6]. Но и это может улучшить ситуацию лишь временно: при некоторых значениях напряжённости электрического поля (более высоких по сравнению с напряжённостью пробоя воздуха) начнётся полевая (автоэлектронная) эмиссия единичных зарядов (вырывание электронов из металла) или образование пакетов заряженных частиц при микровзрывах на поверхности электрода [7]. Помимо автоэлектронной эмиссии заряды с поверхности электрода могут вырываться под действием ультрафиолетового излучения, возникающего при ударе заряда, ускоренного в электрическом поле, о противоположный электрод [6]. Для того чтобы подавить оба источника эмиссии зарядов, нужно в качестве материала электрода использовать не металл, а некую субстанцию с очень большой работой выхода зарядов.

Указанными идеями руководствовались авторы статьи при разработке концепции электродинамической модели шаровой молнии [8–12]. Согласно этой модели положительные электрические заряды (протоны) удерживаются энергетическим ядром – структурой с большой работой выхода зарядов (динамическими электрическими конденсаторами), которые двигаются в вакууме внутри сферической диэлектрической оболочки. Сквозь вакуумный промежуток к оболочке в единицу времени способ-

на проникнуть лишь небольшая доля заряда ядра шаровой молнии. Из-за сильного ограничения силы тока большим сопротивлением вакуумного промежутка эти заряды стекают в атмосферу не в виде искр, а в виде тихого разряда.

В электрическом поле заряда ядра шаровой молнии происходит поляризация материала оболочки. В неоднородном электрическом поле этого заряда создаётся сила, стягивающая оболочку к центру сферы. Представим себе водяной пузырь типа тех, которые плавают на поверхности луж во время дождя. Обозначим радиус этого пузыря  $R$ , а толщину его стенки –  $a$ . Поместим внутрь этого пузыря электрический заряд  $Q$ . Пусть электрическое поле, создаваемое этим зарядом, будет достаточно большим для того, чтобы все молекулы воды в оболочке (которые являются электрическими диполями) повернулись и выстроились в цепочки вдоль силовых линий электрического поля. Каждая цепочка молекул станет электрическим диполем длиной  $a$  (толщина оболочки), на концах которого находятся элементарные заряды  $e = 1,6 \times 10^{-19}$  Кл разного знака. Число молекул воды на единице площади ( $1 \text{ м}^2$ ) равно  $N = 10^{19} \text{ м}^{-2}$ , поэтому плотность зарядов концов диполей на внутренней и внешней поверхностях оболочки  $s = Ne = 1,6 \text{ Кл/м}^2$ . Дипольный момент единицы поверхности площади оболочки  $d = sa$ , а дипольный момент всей оболочки  $D = d4\pi R^2 = 4\pi R^2 sa$ . В неоднородном электрическом поле на оболочку будет действовать сила  $F_{sh}$ , направленная в сторону увеличения напряжённости поля, пропорциональная градиенту поля [12]:

$$F_{sh} = 4\pi R^2 sa \text{grad} E = - 2saQ / \epsilon_0 R. \quad (7)$$

Силе  $F_{sh}$ , сжимающей оболочку, будет противостоять сила кулоновского отталкивания зарядов, стремящаяся растянуть оболочку. Если эти заряды будут распределены равномерно по внутренней поверхности оболочки, то эта сила будет равна [13]:

$$F_Q = Q^2 / 8\pi \epsilon_0 R^2. \quad (8)$$

Оценим возможное соотношение сил  $F_{sh}$  и  $F_Q$  для описанных случаев наблюдения шаровых молний. В обоих случаях заряд  $Q$  шаровой молнии может быть принят равным  $7,45 \times 10^{-6}$  Кл. Приравнивая  $F_{sh}$  и  $F_Q$ , из (7) и (8) находим, что компенсация кулоновской силы расталкивания зарядов  $F_Q$  «градиентной» силой  $F_{sh}$  может произойти при толщине оболочки, равной

$$a = Q / 16\pi s R. \quad (9)$$

Для шаровой молнии радиусом 4 см  $a = 3,7 \times 10^{-3}$  мм, а для радиуса 7 см  $a = 2,1 \times 10^{-3}$  мм. Согласно

электродинамической модели шаровой молнии внутри оболочки находится вакуум, поэтому к «градиентной» силе, сжимающей оболочку, добавится сила атмосферного давления  $F_a = P_a 4\pi R^2$ . В нормальных условиях атмосферное давление  $P_a = 10^5$  Па и сила  $F_a$ , действующая со стороны атмосферы на оболочку радиусом 4 см, равна  $2 \times 10^3$  Н. Сила  $F_{sh}$  при  $Q = 7,45 \times 10^{-6}$  Кл,  $R = 4$  см и  $a = 3,7 \times 10^{-3}$  мм равна  $2,5 \times 10^2$  Н, что меньше силы  $F_a$  в 8 раз. Однако при увеличении толщины диэлектрической оболочки заряда  $Q$ , который может удерживаться внутри оболочки благодаря действию силы  $F_{sh}$ , можно значительно увеличить. Так, внутри сферы радиусом  $R = 4$  см при толщине оболочки  $a = 2$  мм может находиться заряд  $Q = 16\pi R a = 6,43 \times 10^{-3}$  Кл. При этом сила  $F_{sh}$ , сжимающая сферу, станет равной  $F_{sh} = 2saQ / \epsilon_0 R = 1,16 \times 10^8$  Н, что больше силы атмосферного давления  $F_a = 2 \times 10^3$  Н в  $5,8 \times 10^4$  раз.

Таким образом, можно считать, что в рассмотренной системе возможно удержание нескомпенсированного электрического заряда внутри оболочки из диэлектрика. Если носители заряда будут обладать кинетической энергией, то дополнительная сила динамического давления этих носителей на оболочку может быть скомпенсирована увеличением толщины оболочки. Такова в общих чертах идея электродинамической модели шаровой молнии. (Ознакомиться с деталями этой модели можно в статьях [8–12].)

Согласно приведённым оценкам потенциал наблюдавшихся шаровых молний (радиусом  $R_{bl} = 4$  см) равен  $U = E_1 R_{bl} = 1,67$  МВ. Инженерам, испытывающим высоковольтные устройства, известно, что при потенциалах 2,5 МВ между электродами, разнесёнными на расстояние несколько десятков метров, может пройти искровой разряд [14]. В описанных двух случаях наблюдения шаровой молнии пробоя с её поверхности на окружающие предметы не наблюдалось. Причиной этого может быть высокое внутреннее сопротивление генератора тока — заряженного ядра шаровой молнии. Известно, что путь, по которому должен пройти искровой разряд, прокладывается лидером — тонким каналом с достаточно высокой температурой 3000–6000 К [15]. Для поддержания высокой температуры (и, значит, высокой проводимости) лидера в течение времени его «прорастания» ( $10^{-4}$  -  $10^{-3}$  с) нужно, чтобы по его каналу протекал ток, выделяющий мощность не менее 130 Вт на 1 см длины канала. При меньших мощностях канал остынет, его проводимость

уменьшится и продвижение лидера прекратится. Согласно оценкам для типичных случаев развития искры в воздухе при атмосферном давлении ток, текущий по каналу лидера, не может быть меньше 1 А [14, 15]. Однако для шаровой молнии из-за низкой проводимости вакуумного промежутка между заряженным ядром шаровой молнии и её оболочкой ток ограничен значениями  $10^{-3}$  -  $10^{-2}$  А. Это не может стать препятствием для появления тихого разряда с поверхности шаровой молнии, но, однако, подавляет возможность формирования канала искры. Это справедливо для «живой» шаровой молнии, находящейся в равновесном состоянии. В момент её гибели при нарушении изоляции между заряженным ядром и оболочкой она может разрядиться на окружающие предметы через искровой канал. Такие случаи действительно наблюдались [16–19].

Теперь обратимся к обсуждению других деталей поведения шаровой молнии, отмеченных её наблюдателями в цитированных описаниях. В первом из них говорится, что шаровая молния «испарилась» круглые металлические предметы, во втором — вызвала накаливание нити электрической лампы. Объяснить генерацию тока в нити тем, что при движении шаровой молнии (при приближении и удалении её от лампочки) менялось электрическое поле в месте нахождения лампочки, невозможно, так как шаровая молния двигалась медленно. Поэтому более естественно считать, что шаровая молния способна генерировать радиочастотное излучение. Согласно последствиям её присутствия, описанным в первом случае, мощность этого излучения должна быть достаточно высокой. Более того, размер «исчезнувших» кольцевых предметов (от 0,5 до 5 см) позволяет сделать какие-то предположения о диапазоне частот этого радиоизлучения.

Естественно считать, что причиной генерации этого радиоизлучения является периодическое движение зарядов в элементах ядра шаровой молнии. Например, в электродинамической модели шаровой молнии причиной испускания шаровой молнией света в видимом диапазоне спектра считается излучение релятивистских электронов, движущихся по замкнутым орбитам [8–12]. Однако некоторые из исследователей шаровой молнии считают, что причиной генерации мощного радиоизлучения может быть коронный разряд вблизи её поверхности [11]. Как следует из изложенного, создание условий развития коронного разряда вблизи шаровой молнии (при сверхпробойной напряжённости электрического поля) вполне реально.

Прочитав описание наблюдения шаровой молнии известным исследователем её свойств

М.Т. Дмитриева в изложении С. Сингера [17]. «Огненный шар возник после мощного разряда обычной молнии и пролетел над наблюдателем, находившимся в палатке на берегу реки Онеги. Шар был замечен, когда он двигался примерно в 1,5 м над водой, напоминая большую электрическую лампу. Светящаяся масса имела яркий бело-жёлтый центр 6–8 см в диаметре, окружённый двумя оболочками. Непосредственно вокруг яркого центра находился тёмно-фиолетовый слой толщиной 1–2 см, а вокруг него располагалась ярко-голубая оболочка толщиной 2 см, образующая внешнюю границу шара. Вся масса имела слегка овальную форму, и длина её превышала ширину на несколько сантиметров... Шар перемещался со скоростью 1,5 м/с или чуть быстрее, с каждым пройденным метром поднимаясь на несколько сантиметров. Огненный шар пролетел над головой наблюдателя к лесу, находившемуся позади него. Над сушей его скорость уменьшилась примерно до 0,4 м/с, но подниматься он стал круче – на 0,5 м или больше на каждый пройденный метр. Над небольшим пригорком он застыл в неподвижности на 30 секунд».

Дмитриев сделал заборы воздуха из следа шаровой молнии в вакуумные колбы. «Анализ собранного таким образом газа показал присутствие как озона, так и двуокиси азота в количествах, заметно превышающих их нормальные концентрации в воздухе. Концентрация других газов, обычно присутствующих в воздухе, не изменилась. Наблюдатель заметил также сильный запах, напоминающий тот, который возникает в воздухе под действием радиации высокой энергии. В транзисторном приёмнике в палатке сначала резко усилились помехи, которые вскоре превратились в непрерывный рокот, становившийся всё громче. На близком расстоянии очевидец слышал, как сам шар громко потрескивал. Шар оставлял за собой след голубоватого едкого дыма, который медленно рассеивался... Шар исчез, пробыв в поле зрения наблюдателя 60–65 секунд».

В этом сообщении, в отличие от первых двух, где шаровая молния была монохромной, она имела кроме бело-жёлтого ядра фиолетовую и голубую оболочки. Одной из причин появления этих оболочек мог стать коронный разряд, в котором фиолетовым цветом светятся электронно-возбуждённые молекулы двуокиси азота. Присутствие этого вещества в колбах было обнаружено Дмитриевым, что подтверждает наше предположение о коронном разряде вблизи шаровой молнии. Транзисторный приёмник зарегистрировал сильное радиоизлучение, источником которого могли быть как коронный разряд, так и циклическое движение зарядов в веществе шаровой молнии.

Помимо описанного случая имеются фото- и видеоматериалы, на которых видно, что шаровая молния окружена ореолом светящегося газа. Например, в [18] приведён снимок шаровой молнии, снятой в 1985 г. жителем Читы Е.П. Потаповым на озере Ундугун. Снимок был сделан за полчаса до восхода солнца. На снимке (см. рис. 1,а) шаровая молния выглядит как яркое ядро диаметром 30 см, окружённое светящейся оболочкой диаметром 3 м. Результаты фотометрического анализа изображения шаровой молнии опубликованы в [20]. Авторы этой статьи считают причиной появления гало рассеянием света «в слабом тумане вокруг шаровой молнии». Однако появившийся недавно цветной видеофильм о наблюдении шаровой молнии в г. Долгопрудный в 2009 г. [21] даёт основания усомниться в выводе авторов [20], которые исследовали чёрно-белую фотоплёнку. На кадрах видеофильма (см. рис. 1,б) цвет гало (сиреневый) резко отличается от цвета ядра шаровой молнии (жёлтого). Если бы гало было результатом рассеяния света, излучаемого ядром, то их цвета должны были быть одинаковыми. Более того, если бы гало создавалось рассеянием света, то оно не имело бы резкой границы, ясно видимой как на фотографиях (рис. 1,а) [18, 20], так и на кадрах видеофильма [21] (рис. 1,б). В случае, если причиной появления гало является коронный разряд, то резкая граница области свечения – это место, где напряжённость электрического поля, создаваемого зарядом шаровой молнии, становится меньше напряжённости пробоя воздуха  $E_{br} = 31$  кВ/см. В этом случае знание радиуса гало  $R_h$  позволяет оценить заряд  $Q$  шаровой молнии:

$$Q = 4\pi\epsilon_0 R_h^3 E_{br}. \quad (10)$$

Например, для шаровой молнии, снятой на озере Ундугун, радиус гало которой равен 1,5 м, заряд был равен  $0,75 \times 10^{-3}$  Кл.

Изложенное даёт основания считать, что в ряде случаев вокруг шаровой молнии образуется коронный разряд и он может внести вклад в формирование радиоизлучения шаровой молнии. Экспериментам по определению значения этого вклада посвящена эта статья.

**Оптическое излучение коронного разряда.** Исследовался разряд между концом швейной иглы диаметром 0,7 мм с радиусом закругления кончика  $r = 0,07$  мм и плоским электродом, находящимся на расстоянии 18 мм от острия иглы. При подаче на иглу положительного потенциала наблюдались две формы коронного разряда. При напряжении 11 кВ вблизи конца иглы возникала неявная область свечения размером около 3 мм, разряд был бесшумным. При повышении напряжения яркость разряда

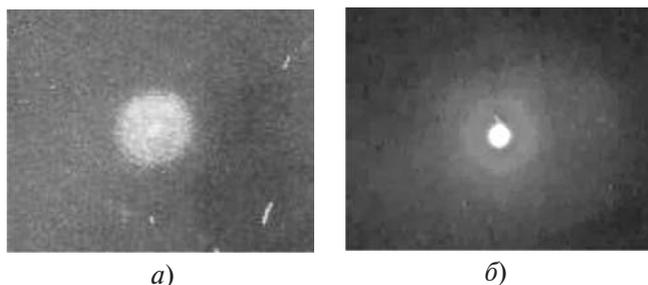


Рис. 1. Фотография шаровой молнии, наблюдавшейся в 1985 г. на озере Ундугун [18, 20] (а); кадр видеофильма, снятого в 2009 г. в г. Долгопрудный [21] (б)

увеличивалась, и при напряжении 15 кВ стали слышны потрескивания. В области напряжений от 16 до 19 кВ разряд принял форму факела диаметром около 3 мм, заполняющего область между концом иглы и катодом. Разряд светился ярким фиолетовым цветом и сопровождался свистящим звуком. Спектр этого излучения, снятый с помощью спектрографа iHR320 и электронно-оптической камеры K008 фирмы VIFO, был идентифицирован как спектр излучения электронно-возбуждённых молекул  $\text{NO}_2$ , образующихся в химической реакции с участием радикалов  $\text{NO}$  и атомов  $\text{O}$  [22]. Такое же фиолетовое свечение наблюдалось и при разряде в техническом азоте. Это указывает на то, что реакция образования  $\text{NO}_2$  идёт и при малых концентрациях кислорода. При разряде в гелии при атмосферном давлении фиолетового свечения не было. При подаче на иглу отрицательного напряжения свечение было сосредоточено в области размером несколько миллиметров вблизи конца иглы. Цвет разряда был жёлтым. В спектре этого разряда наряду с линиями излучения  $\text{NO}_2$  были обнаружены линии атомов железа. По-видимому, они придавали разряду жёлтую окраску.

**Радиоизлучение коронного разряда.** Измерение мощности радиоизлучения коронного разряда в диапазоне частот от 5 кГц до 10 МГц проводилось на установке, схема которой показана на рис. 2. Исследовался коронный разряд между концами игл и плоской пластиной 5 диаметром 140 мм. Иглы помещались в кассету 8 диаметром 120 мм, число игл в кассете может изменяться от 1 до 409. Расстояние между концами игл и плоским электродом 5 варьировалось от 1 до 5 см. Напряжение на иглы поступало от источника высокого напряжения 1, оно измерялось электростатическим киловольтметром 2. Для измерения тока разряда в цепь между пластиной 5 и заземлённым электродом включен микроамперметр 6. Мощность радиоизлучения измерялась с помощью тороидальной катушки 7 с 6000 витками провода, расположенной вокруг кассеты с коронирующими иглами. Диаметр катушки был равен 20 мм, внутренний диаметр тора состав-

лял 200 мм. Катушка была расположена в плоскости, перпендикулярной оси игл. Её центральная плоскость находилась примерно на уровне центра зазора между концами игл и плоским электродом. Параллельно концам катушки был подсоединён переменный воздушный конденсатор 8, а последовательно — диод 9 и микроамперметр 11, зашунтированный конденсатором 10. Для исследования резонансной кривой приёмного контура на катушку было намотано 20 витков провода, на которые через конденсатор 0,1 мкФ подавалось синусоидальное напряжение 10 В от генератора Г4-154. Частота менялась от 100 кГц до 10 МГц. Ток, наведённый в контуре, измерялся микроамперметром 11. На рис. 3. показан вид резонансной кривой использованного контура. Для определения частоты следования импульсов на расстоянии 30 см от оси катушки устанавливалась антенна 12 в виде отрезка провода длиной 10 см, ориентированного параллельно оси игл. Через кабель длиной 40 см антенна подсоединялась к входу осциллографа 13.

На рис. 4 показаны импульсы, регистрируемые антенной при подаче на иглы отрицательного напряжения. В соответствии с результатами измерений других исследователей [23, 24] в системе с одной иглой импульсы наблюдались в диапазоне напряжений от 5 до 25 кВ и при размере межэлектродного зазора от 1 до 5 см. Частота следования импульсов увеличивалась с ростом мощности  $P_{in}$ , «вкладываемой» в разряд. Так, при мощности 0,1 Вт частота импульсов была 0,3 МГц, а при увеличении  $P_{in}$  до 2 Вт частота увеличивалась до 3,3 МГц. В кассете с числом игл, большим единицы, наблюдались импульсы от разных иголок. Период следования импульсов от каждой отдельной иглы сохранялся постоянным, а в целом интервал между импульсами от разных игл менялся хаотически. При увеличении числа игл от 1 до 9 суммарная частота импульсов увеличивалась примерно пропорционально числу игл, а при большем числе игл увели-

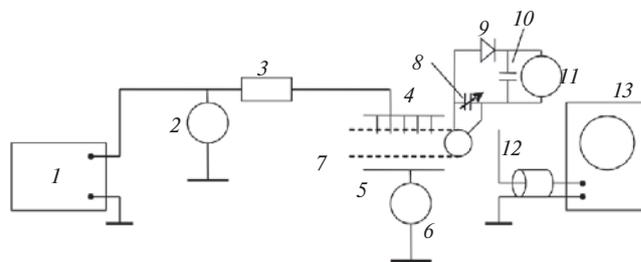


Рис. 2. Схема установки: 1 — источник постоянного напряжения 0–30 кВ; 2 — киловольтметр С96; 3 — резистор 30 кОм; 4 — кассета с иглами; 5 — плоский электрод; 6 — микроампер 0–1000 мкА; 7 — тороидальная катушка; 8 — переменный конденсатор 0–300 пФ; 9 — диод КД 102Б; 10 — конденсатор 0,1 мкФ; 11 — микроампер 0–30 мкА; 12 — антенна; 13 — осциллограф TEKTRONIX TDS2014В

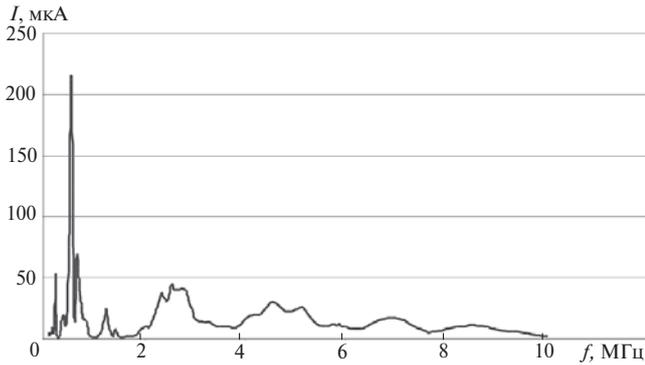


Рис. 3. Вид резонансной кривой измерительного контура в диапазоне частот от 0,1 до 10 МГц

чение частоты происходило медленнее, чем по линейному закону.

При подаче на иглы напряжения положительной полярности при расстоянии между иглой и катодом, равном 18 мм, область существования импульсов составила от 16 до 19 кВ, а средняя частота следования импульсов уменьшилась до 7 кГц. На Рис. 5 показан типичный вид импульсов, генерируемых положительным коронным разрядом между иглами и плоскостью. Частота следования импульсов, как и для отрицательной короны, увеличивалась с ростом мощности, вкладываемой в разряд (от 5,6 кГц при  $P_{in} = 0,4$  Вт до 9,1 кГц при  $P_{in} = 2$  Вт). При увеличении числа игл тоже наблюдался рост средней частоты следования импульсов.

При достижении режима факельного разряда положительной короны в цепи, детектирующей радиоизлучение, возникал ток. При отрицательной короне во всём исследованном диапазоне токов короны (от 10 до 1000 мкА) тока в измерительной цепи обнаружено не было. На рис. 6 показан график зависимости максимальных значений логарифма  $h$  — отношения мощности радиоизлучения положительного коронного разряда  $P_{out}$  к мощности  $P_{in}$ , «вкладываемой» в разряд, от логарифма  $n$  — числа игл в кассете. Мощность  $P_{in}$  определялась как произведение напряжения, подаваемого на иглы, на ток разряда, регистрируемый микроамперметром  $I$  (см. рис. 3). Мощность  $P_{out}$  находилась как произведение квадрата силы тока, изме-

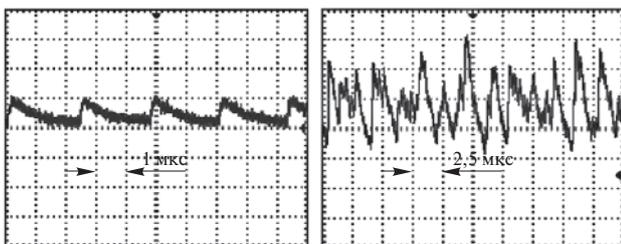


Рис. 4. Импульсы, излучаемые коронным разрядом при подаче на иглы отрицательного напряжения 8 кВ (расстояние между концами игл и плоским электродом 18 мм; слева — импульсы в системе с одной иглой, справа — импульсы в системе с 9 иглами

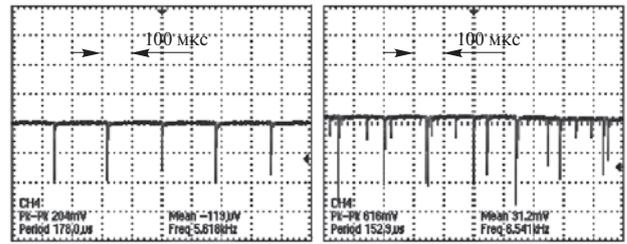


Рис. 5. Импульсы, излучаемые коронным разрядом при подаче на иглы положительного напряжения 16 кВ (расстояние между концами игл и плоским электродом 18 мм; слева — система с одной иглой, справа — с 9 иглами)

ряемого микроамперметром  $I$ , на внутреннее сопротивление микроамперметра (710 Ом). При проведении измерений напряжение на иглах поднималось до значения, на 300–500 В меньшего значения напряжения, при котором происходил искровой пробой между отдельными иглами и плоским катодом. Согласно графику коэффициента преобразования мощности  $h = P_{in} / P_{out}$  увеличивается с ростом числа игл  $n$  приблизительно по линейному закону:

$$\lg h = - 8,495 + 0,904 \lg n. \quad (11)$$

Оценим, какой может быть мощность радиоизлучения типичной шаровой молнии. Пусть её заряд  $Q$  равен  $10^{-3}$  Кл, а радиус  $R_{bl} = 0,1$  м (среднее значение размера шаровой молнии [18, 19]). В этом случае потенциал её поверхности  $U = Q / 4\pi\epsilon_0 R = 10^8$  В, а напряжённость электрического поля  $E = Q / 4\pi\epsilon_0 R^2 = 10^9$  В/м. Будем считать, что проводимость зазора между ядром шаровой молнии и оболочкой достаточна для того, чтобы обеспечить протекание тока величиной в несколько микроампер. Ток, стекающий с поверхности шаровой молнии, из-за малой проводимости воздуха не может

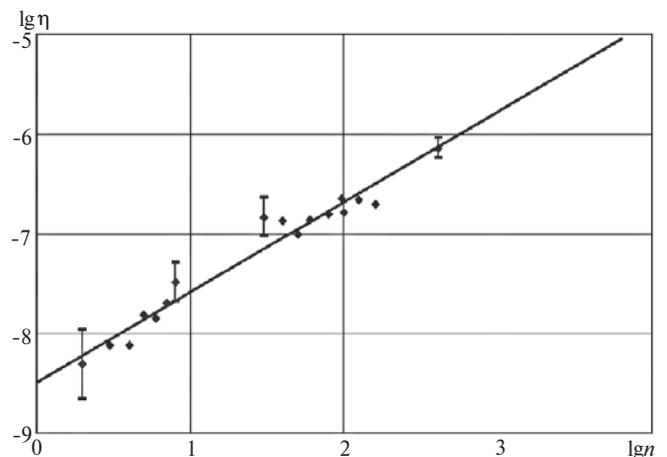


Рис. 6. Зависимость логарифма — отношения мощности и  $P_{out}$  излучаемой положительным коронным разрядом, к мощности  $P_{in}$ , вкладываемой в разряд, от логарифма  $n$  — числа игл в кассете (расстояние между концами игл и плоскостью  $l = 30$  мм)

быть слишком большим. Примем для проводимости воздуха значение  $\lambda_a = 3,5 \times 10^{-14}$  (Омжл)<sup>-1</sup> [25]. Плотность тока  $j = E \lambda_a$ , а полный ток, стекающий в атмосферу с поверхности шаровой молнии,  $I_c = j 4\pi R^3 = Q \lambda_a / \epsilon_0 = 4$  мкА. При таком токе предельная мощность коронного разряда  $P_m = UI_c = 400$  Вт. Известно, что при коронном разряде с поверхности хорошо отполированной тонкой проволоки она светится неравномерно, светятся отдельные точки её поверхности [26]. Будем считать, что также происходит коронирование поверхности шаровой молнии. Если расстояние между соседними коронирующими точками принять равным 2 мм, то на 1 см<sup>2</sup> поверхности уместится 25 точек, а на поверхности сферы радиусом  $R_{bl} = 10$  см поместится  $3,14 \times 10^4$  точек. Согласно (11) при таком числе точек  $n$  коэффициент преобразования  $h_{bl} = 3,717 \times 10^{-5}$ . Умножив это значение на значение мощности  $P_m = 400$  Вт, находим мощность радиоизлучения коронного разряда шаровой молнии  $O_{em} = h_{bl} P_m = 15 \times 10^{-3}$  Вт. Если расстояние между коронирующими точками будет равно 1 мм, то мощность  $P_{em}$  увеличится в 4 раза: до 60 мВт. Излучение такой мощности может вызвать появление шумовых помех в радиоприёмнике, но оно совершенно недостаточно для того, чтобы привести к накаливанию нити электрической лампы, рассчитанной на мощность 40 Вт. Таким образом, можно сделать вывод, что причиной интенсивного радиоизлучения шаровой молнии служит не коронный разряд, а другие процессы. Скорее всего, источник её радиоизлучения — это периодическое движение зарядов внутри её энергетического ядра. Эти процессы нуждаются в специальном изучении.

**Процессы, ответственные за излучение импульсов в коронном разряде.** Попробуем понять причину обнаруженного нами факта исключительно малой мощности радиоизлучения отрицательного коронного разряда. Согласно измерениям мощность сигнала, регистрируемого нашей системой, оказалась в 1000 раз меньше мощности сигнала от положительной короны. Объяснить это тем, что частота импульсов для отрицательной короны в 100 раз больше, чем для положительной короны, не удаётся. Согласно графику (см. рис. 3) чувствительность нашей системы в области частот 1–10 МГц всего в 5–7 раз ниже, чем в области частот 50–100 кГц. Поэтому причину этого эффекта надо искать в различии условий движения электронов — излучателей радиоволн в положительной и отрицательной коронах.

Рассмотрим детали процесса развития коронного разряда между концом иглы и плоскостью, удалённой от конца иглы на расстояние  $l$ . Напряжённость  $E$  электрического поля вблизи конца

иглы гиперболической формы радиуса  $r$  на расстоянии  $x$  от конца иглы при напряжении на игле  $U$  можно представить формулой [27]:

$$E = \frac{2U}{(r+x) \ln(4l/r)}. \quad (12)$$

Для использованных игл  $r = 0,07$  мм. При  $l = 20$  мм и потенциале  $U = 20$  кВ  $E = 0,568 \times 10^4 / (0,07 - x)$  В/мм. Электроны, двигаясь в сильном электрическом поле, при столкновениях с молекулами воздуха ионизируют их. В результате этого образуются положительный ион и новый электрон. Коэффициент размножения электронов на единице пути (коэффициент ударной ионизации) обычно обозначают  $a$ . Одновременно часть электронов «выходит из игры» из-за прилипания к молекулам, главным образом к молекулам кислорода. Коэффициент прилипания электронов обозначают  $b$ . Если  $a > b$  происходит образование лавины электронов. В случае, если на иглу подан отрицательный потенциал, лавина движется в направлении от кончика иглы к плоскому аноду. Если на иглу подается положительный потенциал, электронная лавина, рождённая первичным электроном, находившимся в газе на некотором расстоянии от конца иглы, движется к острию. На расстоянии  $x_0$  от конца иглы, где коэффициент размножения электронов  $a$  становится равным коэффициенту прилипания  $b$ , развитие лавин становится невозможным. Примем, что это происходит при напряжённости электрического поля, равной напряжённости пробоя воздуха между плоскими электродами  $E_{br} = 3 \times 10^3$  В/мм. Из (12) при  $r = 0,07$  мм,  $l = 20$  мм и  $U = 20$  кВ находим  $x_0 = 1,8$  мм. Вблизи кончика иглы при  $U = 20$  кВ и  $x = 0$  напряжённость электрического поля  $E_{\max} = 8,16 \times 10^4$  В/мм. Это в 27 раз больше напряжённости пробоя воздуха  $E_{br}$ .

Вероятнее всего при коронном разряде основным излучателем радиоволн являются электроны. Мощность излучения движущегося электрона пропорциональна значению ускорения его движения, а ускорение, в свою очередь, пропорционально напряжённости электрического поля. Электрическое поле наивысшей напряжённости сосредоточено вблизи конца иглы. Следовательно, основной вклад в радиоизлучение должны давать электроны, движущиеся в непосредственной близости от поверхности иглы. Однако в случае отрицательной короны в этой области имеются лишь единичные электроны, эмитированные поверхностью иглы. Для положительной короны ситуация обратная: в область вблизи конца иглы влетает лавина электронов, родившаяся от первичного электрона, находившегося на расстоянии 1–2 мм от конца иглы. Количество вторичных электронов в лавине может

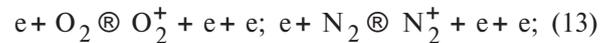
доходить до  $10^9$  [26]. Если для грубой оценки принять, что излучают только электроны на конечной стадии формирования лавины, а токи лавин для положительной и отрицательной корон равны, то можно сделать вывод, что интенсивность радиоизлучения положительной короны должна быть в  $s = E_{\max} / E_{br} \gg 30$  раз больше, чем интенсивность радиоизлучения отрицательной короны. Если учесть уменьшение чувствительности системы регистрации радиоизлучения в 5–7 раз, то сигнал от отрицательной короны должен быть в 150–200 раз меньше сигнала от положительной короны. На самом деле это различие ещё больше – в 500–1000 раз. Возможно, что помимо описанных есть и другие причины, приводящие к указанному различию интенсивности.

В 1938 г. Тричел обнаружил, что ток отрицательного коронного разряда является прерывистым и процессы зарождения и гибели электронных лавин происходят с определённым периодом [23]. Качественно процесс формирования импульсов в отрицательной короне можно описать следующим образом [26, 28]. Во время развития электронной лавины в области ионизации газа вблизи конца иглы образуется равное количество электронов и положительных ионов. Облако положительных ионов движется к катоду. Когда расстояние между ним и катодом становится слишком малым для развития лавин, ток прекращается. Электрическое поле со значением напряжённости, достаточным для образования новой лавины, может восстановиться только тогда, когда зону ионизации покинут электроны. От скорости ухода электронов из зоны ионизации зависит период следования импульсов. В положительной короне процессы, приводящие к импульсному режиму, в общих чертах те же самые, что и для отрицательной короны. В процессе разряда образуется плазма, из которой электроны уходят в иглу, а оставшееся облако положительных ионов «блокирует» поле вблизи иглы и выключает ток. Условия разряда восстанавливаются после ухода положительных ионов из зоны ионизации [29]. Пока нет общего мнения о причинах возникновения первичных электронов в газе, служащих началом развития лавин. Эти электроны могут появиться благодаря ионизации газа ультрафиолетовым излучением или из-за отлипания электронов от отрицательных ионов при их столкновениях с молекулами  $O_2$  ( $^1S_g^+$ ), находящимися в возбуждённом метастабильном состоянии.

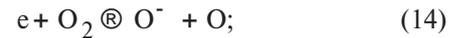
Для того чтобы понять причину различия периодов следования импульсов в положительной и отрицательной коронах, более подробно рассмотрим процессы, происходящие внутри зоны ионизации, а также в зоне дрейфа ионов на некотором расстоянии от границы зоны ионизации. В воздухе

при значениях напряжённости электрического поля, близких к пробойным, основными процессами, приводящими к образованию и гибели электронов, являются [30, 31]:

1) ионизация молекул кислорода и азота при столкновениях с электронами



2) диссоциативное прилипание электронов к молекулам кислорода



3) отлипание электронов от ионов  $O^-$  при столкновениях с молекулами азота



Для лучшего пояснения физического смысла явления мы сознательно выбрали из большого числа процессов лишь несколько самых быстрых. Из рассмотрения исключены не только такой сравнительно медленный процесс, как рекомбинация заряженных частиц, но и такие быстрые процессы, как отлипание электронов от молекулярных ионов  $O_2^-$  при столкновениях с нейтральными молекулами и процессы перезарядки при столкновениях ионов  $O^-$  с молекулами кислорода.

В таблице приведены значения констант скоростей процессов по пп. 1) – 3) для различных значений отношения напряжённости электрического поля  $E$  (В/см) к числу молекул в кубическом сантиметре  $N$  ( $cm^{-3}$ ) при атмосферном давлении ( $N = 3 \times 10^{19} cm^{-3}$ ). Отношение  $E/N$  выражено в таунсендах ( $1 \text{ Тд} = 10^{-17} \text{ В}\cdot\text{см}^2$ ) [30, 31]. Можно видеть, что при значениях напряжённости электрического поля  $E < 3 \times 10^4$  В/см константа скорости ионизации  $k_1$  меньше константы скорости прилипания электронов  $k_2$ , поэтому в этой области напряжённостей развитие электронных лавин невозможно. Такие значения напряжённости электрического поля характерны для зоны, отстоящей от конца иглы на расстоянии больше 2 мм. В зоне, расположенной ближе 2 мм от конца иглы, где  $E > 3 \times 10^4$  В/см, константа скорости  $k_1$  больше константы скорости  $k_2$ . Поэтому в этой области идёт лавинное размножение электронов и образуется плазма, состоящая из положительных ионов  $N_2^+$  и  $O_2^+$  и электронов.

В отрицательной короне сгусток положительных ионов с большой скоростью движется к игле, сокращая длину промежутка, на котором происходит размножение электронов, и тем самым прерывает ток. Для того чтобы ток восстановился, надо чтобы носители отрицательного заряда отошли к аноду на некоторое расстояние от зоны их образо-

вания. Для оценок примем, что это расстояние равно 5 мм [28]. Вблизи внешней границы зоны плазмы (при  $E = 2,4 \times 10^4$  В/см) согласно реакции (14) практически все электроны должны прилипнуть к молекулам  $O_2$ . При концентрации  $O_2$ , равной  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>, характерная скорость реакции (14)  $k_2 [O_2] = 5 \times 10^7$  с<sup>-1</sup>, а характерное время реакции  $t = (k_2 [O_2])^{-1} = 2 \times 10^{-8}$  с. Таким образом, «рассасывание» отрицательного заряда будет происходить благодаря дрейфу отрицательных ионов в электрическом поле.

Напряжённость $E$ , В/см	Отношение $E/N$ , Тд	Константы скорости (см <sup>3</sup> с <sup>-1</sup> )		
		$k_1$	$k_2$	$k_3$
$1,2 \times 10^4$	40	$1 \times 10^{-15}$	$2 \times 10^{-13}$	$8 \times 10^{-13}$
$1,8 \times 10^4$	60	$8 \times 10^{-14}$	$1 \times 10^{-12}$	$9 \times 10^{-13}$
$2,4 \times 10^4$	80	$1 \times 10^{-12}$	$5 \times 10^{-12}$	$9 \times 10^{-13}$
$3,0 \times 10^4$	100	$5 \times 10^{-12}$	$8 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-12}$
$3,6 \times 10^4$	120	$2 \times 10^{-11}$	$9 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{-12}$

Типичное значение подвижности ионов  $\mu = 2$  см<sup>2</sup>/Вс [32]. Согласно (12) при  $l = 20$  мм и  $U = 20$  кВ на расстоянии 5 мм от конца иглы напряжённость электрического поля  $E(5) = 10^4$  В/см. Скорость дрейфа иона в таком поле  $v_{dr} = \mu E = 2 \times 10^4$  см/с.

Ион пройдёт путь 5 мм за время  $t = 2,5 \times 10^{-5}$  с. Отсюда находим среднюю частоту следования импульсов  $f = 1/t = 40$  кГц. Однако согласно измерениям при отрицательной короне частота следования импульсов оказывается примерно в 25 раз больше. Если бы заряд переносился электронами, подвижность которых в 225 раз больше подвижности ионов ( $\mu_e = 450$  см<sup>2</sup>/Вс [32]), то характерная частота импульсов должна была увеличиться до 10 МГц. На самом деле она примерно в 10 раз меньше. Это заставляет предположить, что вынос отрицательного заряда из зоны ионизации осуществляется как отрицательными ионами, так и свободными электронами. Действительно, как видно из таблицы, уже при  $E = 2,4 \times 10^4$  В/см наряду с прилипанием электронов (14) происходит их отлипание (15) и скорости процессов (14) и (15) относятся как 5:1. Однако по мере уменьшения напряжённости поля  $E$  (при всё большем удалении от зоны ионизации) это отношение меняется. При  $E = 1,8 \times 10^4$  В/см скорости процессов прилипания и отлипания электронов становятся равными, а при  $E = 1,2 \times 10^4$  В/см скорость отлипания в 4 раза больше скорости прилипания. Это означает, что заметную часть времени электроны проводят в свободном состоянии. Это, по-видимому, и является причиной увеличения скорости дрейфа зарядов в отрицательной ко-

роне по сравнению со скоростью дрейфа ионов в положительной короне.

В ней перенос заряда в дрейфовой зоне осуществляется только положительными ионами с подвижностью  $\mu = 2$  см<sup>2</sup>/Вс. Поэтому частота импульсов в положительной короне меньше, чем в отрицательной. Согласно приведённой оценке она равна 40 кГц. Однако измеренная частота импульсов положительной короны не превышала 10 кГц. Наиболее вероятная причина несоответствия результатов эксперимента и численных оценок – неправильная оценка значения электрического поля  $E(5) = 10^4$  В/см на расстоянии 5 мм от конца иглы. Такое значение поля получается при условии, что в области вблизи иглы отсутствуют электрические заряды. На самом деле это не так: во время разряда между концом иглы и катодом всегда находится какое-то количество слоёв положительных зарядов, образованных в предыдущих импульсах [29]. Эти слои относительно медленно движутся к катоду. Электрическое поле этого пространственного заряда направлено противоположно электрическому полю между иглой и катодом и уменьшает его значение. Если вместо  $E(5) = 10^4$  В/см подставить значение  $E_Q(5) = 2 \times 10^3$  В/см, то частота импульсов уменьшится до 8 кГц.

**Заключение.** Коронный разряд вокруг шаровой молнии возникает как следствие того, что шаровая молния обладает нескомпенсированным электрическим зарядом. Для того чтобы вокруг шаровой молнии появился коронный разряд, нужно, чтобы её радиус был меньше  $R_c = (Q/4\pi\epsilon_0 E_{br})^{1/2}$ . Однако наличие сверхпробойного поля вблизи поверхности шаровой молнии – условие необходимое, но не достаточное для развития коронного разряда. Необходимо, чтобы проводимость изолятора между ядром шаровой молнии и её поверхностью была достаточно большой для того, чтобы поддерживать ток, питающий коронный разряд. В этом случае свидетели сообщают о наличии лилового свечения вокруг шаровой молнии, шума, а также запахов озона и горящей серы [16, 17, 19, 33]. В противном случае (при значении напряжённости поля на поверхности ниже  $E_{br}$  или при очень большом сопротивлении вакуумного промежутка) коронный разряд вокруг шаровой молнии не образуется и она представляется наблюдателям монохромной, имеющей чёткий контур, беззвучной и не оставляющей после себя запаха. Кроме этого известно, что шаровая молния является источником радиоизлучения. Оно регистрируется как шум в радиоприёмнике [17]. Иногда его интенсивность оказывается столь большой, что оно способно заставить заглухнуть двигатель автомобиля [19] или зажечь выключенную из сети лампу накаливания [4].

Наши исследования свойств коронного разряда в воздухе показали, что причиной его свечения служит излучение молекул двуокиси азота. Как для положительной, так и для отрицательной короны радиоизлучение происходит в виде импульсов. Интенсивность радиоизлучения положительной короны оказалась в 1000 раз больше, чем для отрицательной короны. Размер области свечения разряда положительной короны значительно больше, чем для отрицательной короны. Это позволяет предположить, что довольно протяжённая область свечения воздуха вокруг шаровой молнии [21] была вызвана положительной короной и, следовательно, заряд ядра шаровой молнии был положительным. Найденный чрезвычайно малый коэффициент преобразования мощности коронного разряда в радиоизлучение приводит к выводу, что причиной интенсивного радиоизлучения шаровой молнии является не коронный разряд, а процессы, связанные с движением зарядов в её ядре.

*Авторы признательны проф. А.Р. Корявину, замечания которого позволили значительно улучшить содержание статьи.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ford R.A. *Homemade Lightning*. — New York: McGraw-Hill, 2001.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Электродинамика сплошных сред*. — М.: Наука, 1982.
3. Лихошёрстных Г.У. Аномальные случаи наблюдений шаровых молний. — Шаровая молния в лаборатории/Ред. Р.Ф. Авраменко, В. Л. Бычков, А.И. Климов, О.А. Синкевич. — М.: Химия, 1994.
4. Григорьев А.И. *Шаровая молния*. — Ярославль: ЯрГУ, 2006.
5. Никитин А.И. Удастся ли решить проблему шаровой молнии в 21-м веке? — *Химическая физика*, 2006, т. 25, № 3.
6. Александров Г.Н., Иванов В.Л. *Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения*. — Л.: Энергоатомиздат, 1984.
7. Месяц Г.А. *Эктоны*. — Екатеринбург: УИФ Наука, 1993.
8. Никитин А.И. Электрический конденсатор как элемент энергетического ядра шаровой молнии. — *Электричество*, 1998, № 11.
9. Никитин А.И. Электродинамическая модель шаровой молнии. — *Химическая физика*, 2006, т. 25, № 3.
10. Никитин А.И., Величко А.М., Никитина Т.Ф. Принципы поиска условий создания упорядоченных плазменных структур. — *Известия АН. Энергетика*, 2008, № 2.
11. Bychkov V.L., Nikitin A.I., and Dijkhuis G.C. *Ball lightning investigations*. — In: *The Atmosphere and Ionosphere. Dynamics, Processes and Monitoring*/Eds. V.L. Bychkov, G.V. Golubkov, A.I. Nikitin. — Dordrecht: Springer, 2010.
12. Никитин А.И. Новый подход к решению проблемы шаровой молнии — смена парадигмы. — *Вестник РАЕН*, 2012, № 2.
13. Стрелков С.П., Сивухин Д.В., Хайкин С.Э. и др. *Сборник задач по общему курсу физики. Электричество и магнетизм*. — М.: Наука, 1977.
14. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. *Искровой разряд*. — М.: Изд-во МФТИ, 1997.
15. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. *Физика молнии и молниезащиты*. — М.: Физматлит, 2001.
16. Brand W. *Der Kugelblitz*. — Hamburg: H. Grand, 1923.
17. Сингер С. *Природа шаровой молнии*. — М.: Мир, 1973.
18. Стаханов И.П. *О физической природе шаровой молнии*. — М.: Научный Мир, 1996.
19. Stenhoff M. *Ball lightning. An unsolved problem in atmospheric physics*. — New York: Kluwer/Plenum, 1999.
20. Рябцев А.Н., Стаханов И.П. Анализ фотографического изображения шаровой молнии. — *ЖТФ*, 1987, т. 57, вып. 3.
21. <http://rutube.ru/tracks/3787124html?v=c6f3d5dd780052ab6ca48c0825685>
22. Meshchanov A. V., Rousseau A., Roespcke J. et al. Diode laser-absorption diagnostics of NO and NO<sub>2</sub> in gas discharge air plasma and investigation of mechanisms of their creation — In: *Laser investigations in St. Petersburg State University*. — St. Petersburg: SPGU Publishing, 2004, № 3.
23. Trichel G.W. The mechanism of the negative point to plane corona near onset. — *Phys. Rev.*, 1938, vol. 54.
24. Loeb L.B., Kip A.F., Hudson G.G. Pulses in negative point-to-plane corona. — *Phys. Rev.*, 1941, vol. 60.
25. Чалмерс Дж. А. *Атмосферное электричество*. — Л.: Гидрометеиздат, 1974.
26. Капцов Н.А. *Коронный разряд*. — М.: Гостехиздат, 1947.
27. Loeb L.B. *Electrical coronas. Their basic physical mechanisms*. — Berkeley: Univ. California Press, 1965.
28. Napartovich A.P., Akishev Yu.S., Deryugin A.A. et al. A numerical simulation of Trichel-pulse formation in a negative corona. — *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1997, vol. 30.
29. Morrow R. The theory of positive glow corona. — *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1997, vol. 30.
30. Александров А.Ф., Бычков В.Л., Волков С.А. Предпробные характеристики воздуха в нижних слоях атмосферы. — *Вестник МГУ. Серия 3. Физика и астрономия*, 2001, № 1.
31. Бычков В.Л., Волков С.А., Кочетов И.В. Процессы ионизации во влажном воздухе в нижней тропосфере. — *Химическая физика*, 2011, т. 30, № 11.
32. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. — Долгопрудный: Интеллект, 2009.
33. Барри Дж. *Шаровая молния и чёточная молния*. — М.: Мир, 1983.

[12.04.13]

*А в т о р ы: Никитин Анатолий Ильич окончил в 1961 г. физический факультет Московского государственного университета (МГУ). В 1989 г. защитил докторскую диссертацию «Индукционное излучение и химические реакции при неравновесном колебательном возбуждении молекул» в Научно-исследовательском физико-химическом институте им. Л.Я. Карпова. Главный научный сотрудник Института энергетических проблем химической физики РАН.*

*Никитина Тамара Фёдоровна окончила в 1961 г. физический факультет МГУ. В 1968 г. защитила кандидатскую диссертацию «Исследование инжекционных полупроводниковых квантовых генераторов из GaAs, работающих при комнатной температуре» в Физическом институте АН СССР им. П.Н. Лебедева. Старший научный сотрудник Института энергетических проблем химической физики РАН.*

*Величко Александр Михайлович окончил в 1982 г. Московский физико-технический институт (МФТИ). В 1987 г. защитил кандидатскую диссертацию «Вторичные химические и фотохимические процессы при лазерном разделении изотопов углерода» в МФТИ. Старший научный сотрудник Института энергетических проблем химической физики РАН.*