

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРА  
РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ШАРОВЫХ  
МОЛНИЙ И ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ ОБ ИХ  
ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ**

В.В. Копейкин

(Геомагнетизм и аэрономия, 2014, том 54, № 1, с. 124-133)

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радио-  
волн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк

*E-mail: [kopeikin@izmiran.ru](mailto:kopeikin@izmiran.ru)*

Поступила в редакцию 27.04.2012 г.  
После доработки 19.09.2013 г.

Приведены результаты измерений спектра радиоволн, излучаемых искусственными шаровыми молниями. Измерения проводились на двух различных установках: на генераторе импульсного напряжения (ГИН) и на трехконтурном трансформаторе Теслы. Результаты этих измерений подтверждают гипотезу о том, что шаровая молния – это автогенератор высоковольтных импульсов радиочастотного диапазона.

**DOI:** 10.7868/S0016794014010064

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Шаровую молнию относят к проявлениям атмосферного электричества, поскольку в природе она чаще всего наблюдается в грозу, после разряда линейной молнии.

По всей видимости, впервые искусственную шаровую молнию получил Никола Тесла в 1899 г. в своей лаборатории в Колорадо Спрингс. Описание установки было найдено в его лабораторных тетрадах, и она была воспроизведена в 1988 г. братьями Кеннетом и Джеймсом Корумами, членами общества памяти Николы Теслы в Нью-Йорке [Корум и Корум, 1990].

После экспериментов с установкой Теслы авторы пришли к выводу, что возникающие долгоживущие (единицы и десятки секунд) светящиеся образования есть не что иное, как шаровые молнии, идентичные наблюдаемым в природе, и что Николе Тесле в свое время их действительно удалось получить.

Мы также воспроизвели установку Теслы по описаниям, опубликованным в научной печати Корумами, провели с ней эксперименты и присоединяемся к высказанному ими заключению: установка Теслы генерирует искусственные шаровые молнии.

Получив их на трехконтурном трансформаторе, одна из вторичных обмоток которого настроена на вторую гармонику основного колебания, Никола Тесла, с нашей точки зрения, до конца не понял физическую природу явления. Он предполагал, что шаровая молния – это горение органических веществ, в его случае – горение резиновой изоляции кабелей трансформатора.

В опубликованной в УФН статье братья Корумы также придерживаются гипотезы о химической природе шаровой молнии, хотя их собственные эксперименты, например, с прохождением молнии через оконное стекло, никак не укладываются в эту гипотезу.

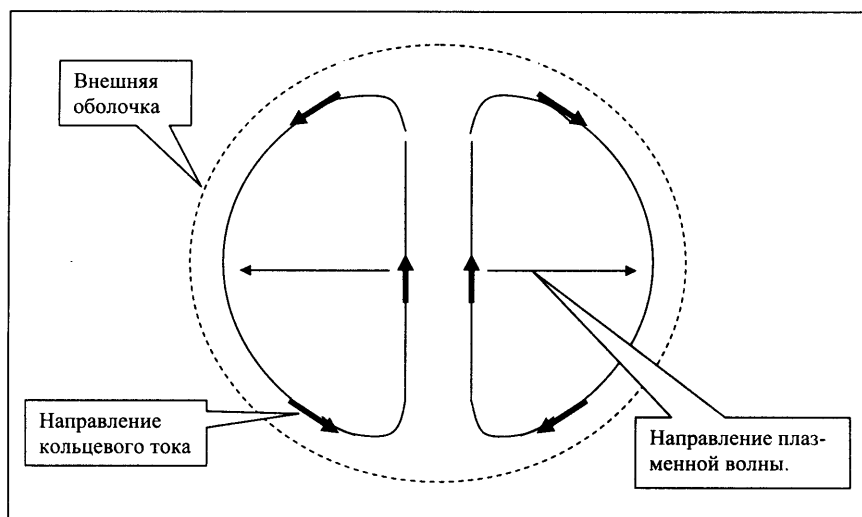
Основная цель настоящей работы – измерение спектров радиоизлучения на двух различных установках, генерирующих искусственные шаровые молнии.

## 2. ГИПОТЕЗА О ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ

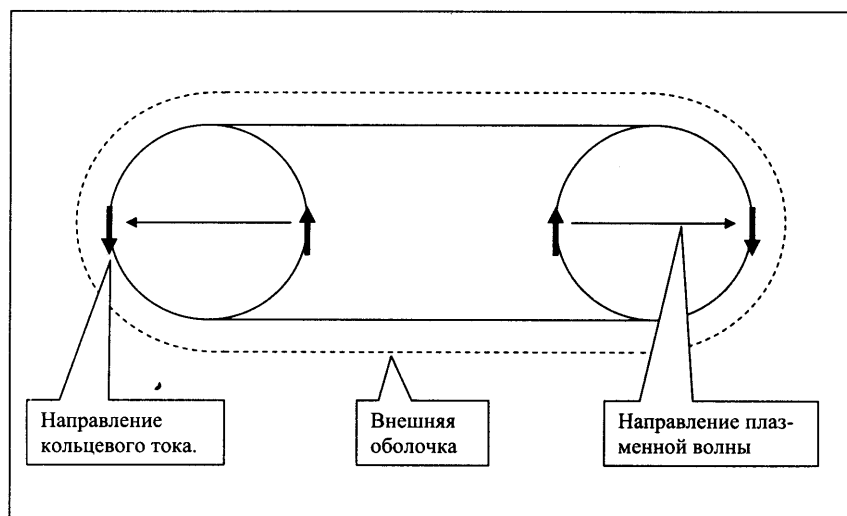
### ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Нами высказана плазмохимическая гипотеза о природе шаровой молнии, в соответствии с ней первой составной частью шаровой молнии является автогенератор высоковольтных импульсов, который возникает в неравновесной азотно-кислородной плазме (в воздухе) при определенных соотношениях между величиной магнитного поля и скоростью электронов. Иницилирующее магнитное поле природной шаровой молнии возникает в результате разряда обычной линейной молнии. В этих условиях генерируется нелинейная плазменная волна (волна Холла), идущая от центра молнии к ее внешней оболочке.

В процессе распространения волны растет амплитуда магнитного поля и крутизна его фронта, что приводит к появлению больших электрических полей. Возле границы плазмы волна исчезает, а часть ее энергии переходит в импульс кольцевого тока. Этот импульс возбуждает внутри молнии новое магнитное поле, которое служит исходным для возникновения очередной плазменной волны. При определенных условиях этот процесс может повторяться бесконечно долго. Здесь существуют две основные составляющие автогенератора: положительная обратная связь через кольцевой ток и линия задержки, которую представляет собой плазма как среда распространения нелинейной электромагнитной волны. Энергия, поддерживающая плазменную волну – это тепловая энергия электронов.



*Рис.1. Сечение сфероидальной шаровой молнии.*



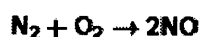
*Рис.2. Сечение тороидальной шаровой молнии.*

Схема распространения плазменной волны и протекания кольцевого тока для возможных конфигураций шаровой молнии – сфероидальной и тороидальной – показана на Рисунках 1 и 2. Магнитное поле для обоих рисунков перпендикулярно плоскости сечения.

Второй составной частью шаровой молнии является плазмохимический реактор, возникающий на ее внешней оболочке. В холодной неравновесной плазме под действием высоковольтных импульсов нелинейной электромагнитной волны происходит колебательное возбуждение молекул и плазмохимическая реакция окисления азота воздуха с выделением энергии. Часть ее расходуется на разогрев электронов, поддерживающих плазменную волну, остальная часть в виде светового и радиоизлучения уходит во внешнее пространство [Копейкин, 2010].

Информацию о том, что азот воздуха при некоторых условиях окисляется с выделением энергии, можно найти, например, в Интернете [<http://ru.wikipedia.org/wiki/>]

Оксид азота (II) — единственный из окислов азота, который можно получить непосредственно из свободных элементов соединением азота с кислородом при высоких температурах (1200—1300°C) или в электрическом разряде. В природе он образуется в атмосфере при грозовых разрядах (тепловой эффект реакции - 180,9 кДж/моль):



*и тотчас же реагирует с кислородом*



Важным фактом, подтверждающим справедливость предположения о том, что энергию шаровая молния получает из реакции окисления азота, служат результаты химического анализа следа природной шаровой молнии, пробы которого удалось взять М.Т. Дмитриеву. В результате анализа было обнаружено превышение концентрации

двуокиси азота в 110 раз, озона в 52 раза по отношению к обычному воздуху. Никаких дополнительных химических веществ в пробах обнаружено не было [Дмитриев, 1969].

Насколько нам известно, теории протекания плазмохимической реакции окисления азота пока не существует. Но, тем не менее, понятно, что она происходит в холодной неравновесной плазме при колебательном возбуждении молекул. Как для азота, так и для кислорода максимальная энергия, передаваемая электронами на колебательный уровень возбуждения молекул, наблюдается при их собственной энергии в 1 эВ. Исходя из этого, можно вычислить напряженность электрического поля, необходимую для эффективного протекания плазмохимической реакции в нормальных условиях, 2.7 МВ/м.

Изложенная выше гипотеза о природе шаровой молнии, основой которой служит плазменная волна Холла, пока может быть использована, в основном, лишь для качественного описания физико-химических процессов в ней. Объясняется это тем, что многие параметры разряда и его динамика остаются неясными, а потому количественная модель малоинформативна. Это касается, прежде всего, процесса окисления азота. Необходимость задания целого ряда параметров модели, к настоящему времени не известных, приводит к необходимости ничем не обоснованного выбора их значений.

### 3. ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОЙ ВОЛНЫ

Нелинейное волновое уравнение для магнитного поля в идеальной плазме [Копейкин, 2005, 2010], получено при рассмотрении траекторий столкнувшихся с нейтральными частицами электронов, движущихся по ларморовским орбитам под действием поля самой волны. Уравнение для  $B_z$  - компоненты вектора магнитной индукции имеет вид:

$$\frac{\partial B_z}{\partial t} - K_1 B_z \left( \frac{\partial B_z}{\partial x} - \frac{\partial B_z}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

Электрическое поле описывается следующим уравнением:

$$E = K_2 B_z \left( \frac{\partial B_z}{\partial x} 1_x + \frac{\partial B_z}{\partial y} 1_y \right) \quad (2)$$

Здесь  $K_1$  и  $K_2$  - коэффициенты, определяемые параметрами плазмы,  $1_x$  и  $1_y$  - единичные векторы по осям  $x$  и  $y$ .

Численный расчет уравнений для магнитного (1) и электрического (2) полей в различные моменты времени приведен на рис. 3. Из рисунка следует, что в процессе движения крутизна левого фронта нелинейной магнитной волны растет, и возникают большие величины напряженности электрического поля.

Плазменный автогенератор шаровой молнии вырабатывает последовательность коротких высоковольтных импульсов, параметры которых однозначно связаны с характером их спектра (Рисунки 4 -5).

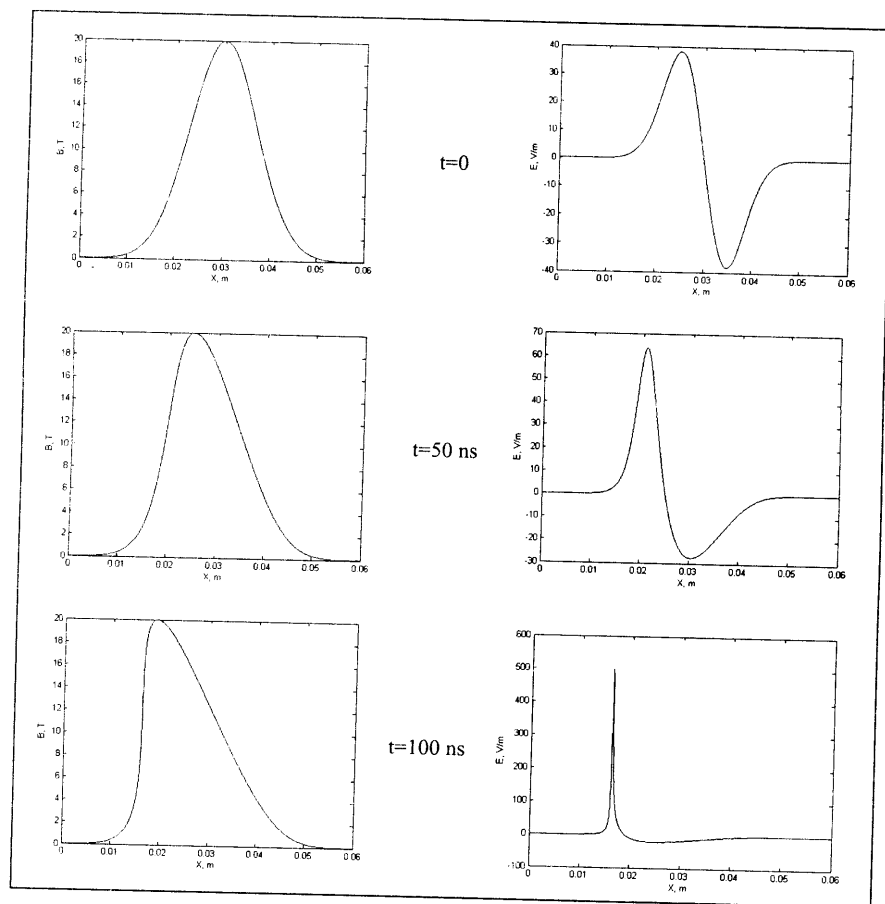
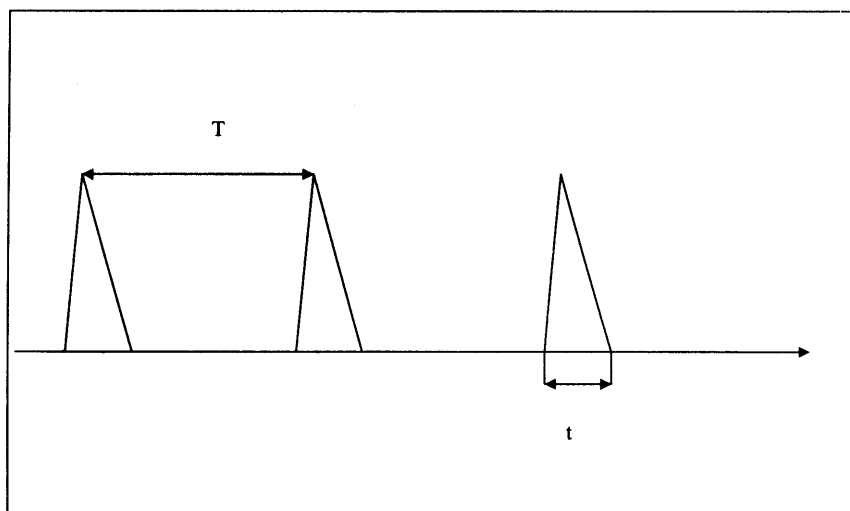
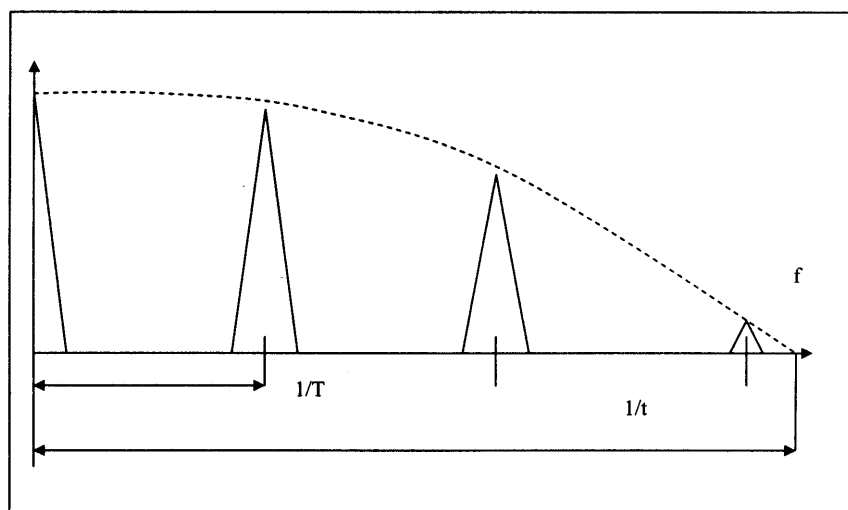


Рис.3. Численный расчет индукции магнитного и напряженности электрического поля в нелинейной плазменной волне.



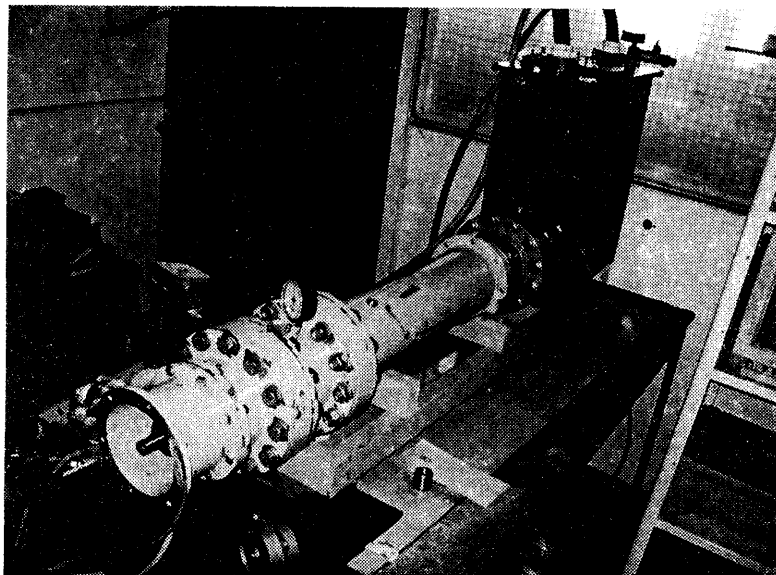


**Рис.4.** Последовательность импульсов во времени.



**Рис.5.** Спектр последовательности.

#### 4. ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ (ГИН)



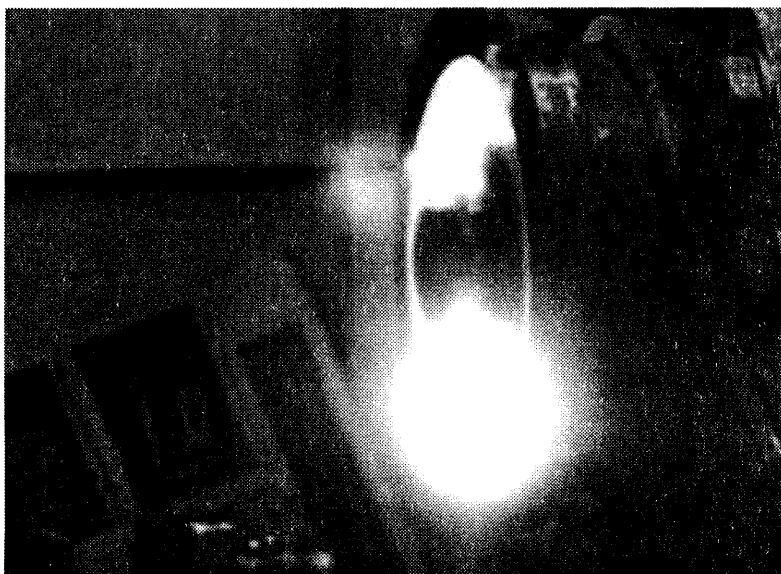
*Рис. 6. Внешний вид установки ГИН*

Установка ГИН, показанная на Рис. 6, разрабатывалась специально для проверки плазмохимической гипотезы о природе шаровой молнии.

Ее основные параметры:

1. Выходное напряжение	160 КВ
2. Энергия импульса	8 Дж
3. Частота повторения импульсов	1 КГц
4. Длительность пачки	до 1 с

Параметры установки выбирались, исходя из условия колебательного возбуждения молекул азота и кислорода в неравновесной плазме и из условия существования нелинейных волн Холла. Фотография шаровой молнии, полученной на установке ГИН, приведена на Рис. 7.



*Рис. 7. Шаровая молния диаметром 75 мм.*

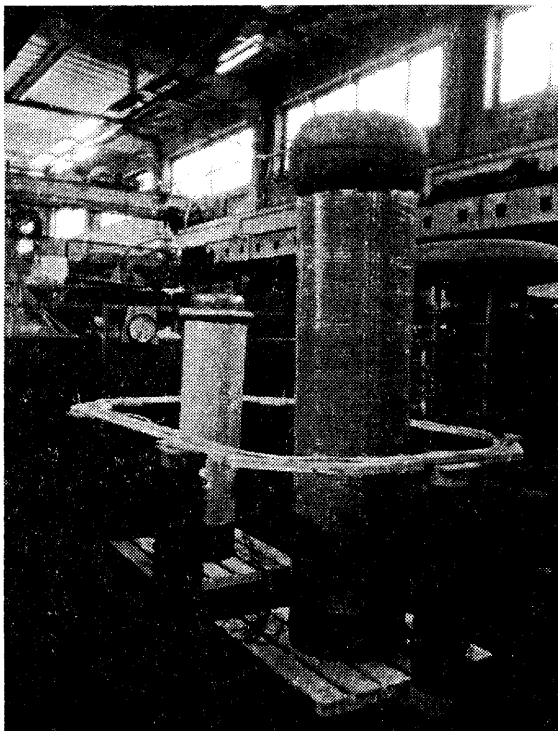
## 5. ТРЕХКОНТУРНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР ТЕСЛЫ

Параметры трансформатора: число витков обмоток, индуктивности и емкости контуров соответствуют опубликованным в научной печати [Корум и Корум, 1990]. Его внешний вид приведен на Рис. 8. Фотография шаровой молнии, полученной на трансформаторе Теслы, показана Рис. 9.

## 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Напряженность поля инициирующего электрического разряда, при котором появление шаровой молнии имеет максимальную вероятность, лежит в диапазоне 2 – 3 МВ/м, что соответствует нашим теоретическим оценкам, а также результатам Корумов.

Измерения радиочастотного излучения проводились вертикальным широкополосным диполем, расположенным на удалении 4 м. от зоны существования шаровых молний, как для установки ГИН, так и для трансформатора Теслы.



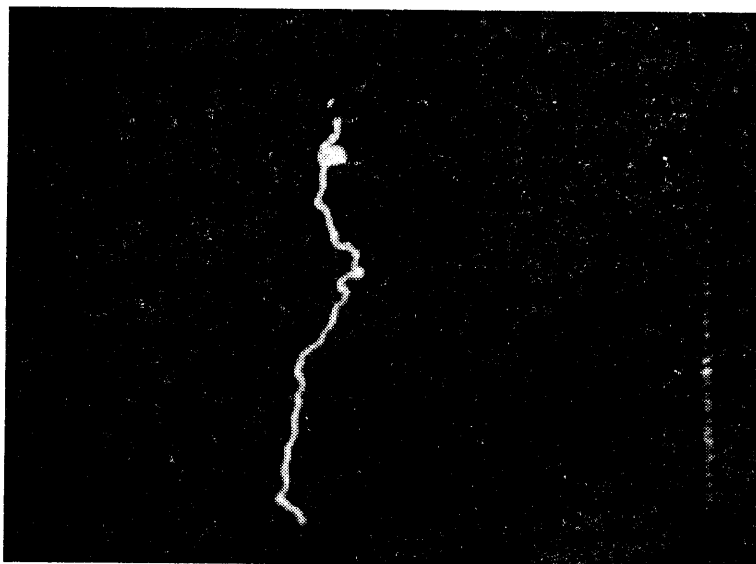
*Рис.8. Внешний вид трехконтурного трансформатора Теслы*

Напряженность измеряемого электрического поля в экспериментах лежала в диапазоне единиц – десятков КВ/м. Волновые формы излучения для ГИН приведены на Рисунках 10 и 11. Рисунок 10 получен после одного импульса ГИН. Шаровая молния не возбуждена, поскольку одного импульса не достаточно для возникновения неравновесной плазмы в нужном объеме.

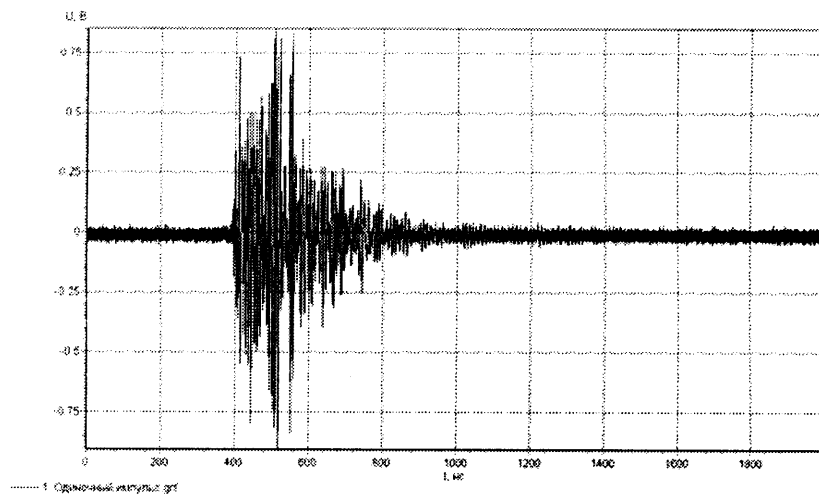
Из Рисунка 11 видно, что после окончания иницирующих импульсов (400 – 800 нс) возникает автогенерация шаровой молнии. За 90 импульсов ГИН необходимые параметры неравновесной плазмы получены и шаровая молния возбуждена.

На Рисунках 12 и 13 приведены характерные спектры для шаровых молний, вырабатываемых ГИН и трансформатором Теслы.

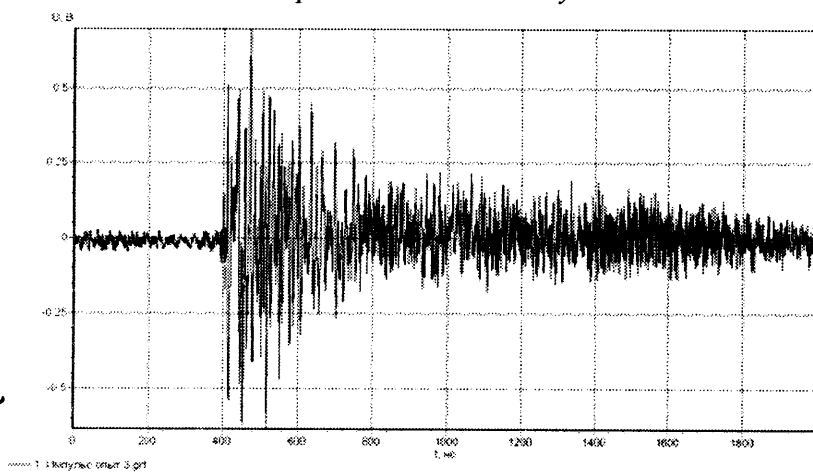
Спектры излучения на обеих установках имеют похожий характер и соответствуют последовательности (иногда нескольким) импульсов длительностью 2-10 нс с частотой следования 10-60 МГц.



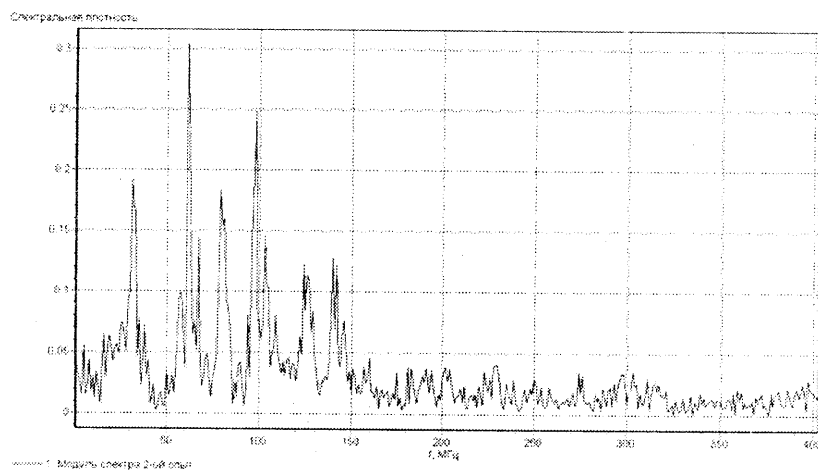
*Рис. 9. Шаровая молния диаметром 90 мм.*



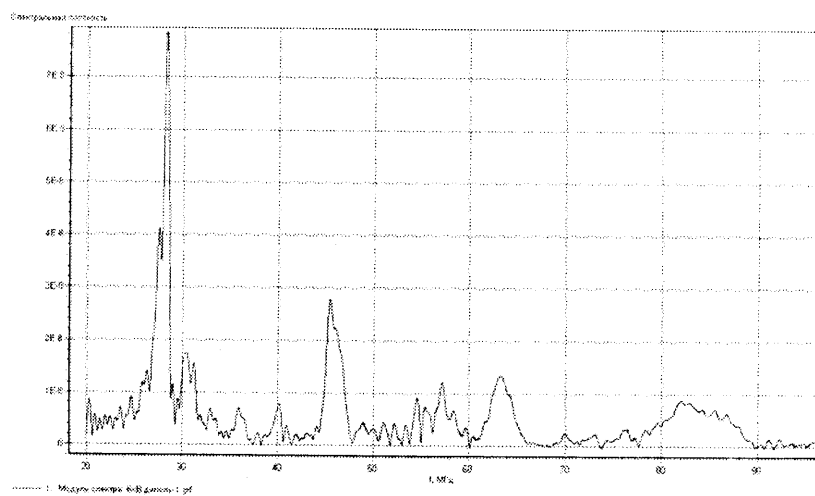
**Рис. 10.** Напряженность электрического поля после одного импульса ГИН. Шаровая молния не возбуждена.



**Рис. 11.** Усредненная напряженность электрического поля за 90 импульсов. Шаровая молния возбуждена.



**Рис. 12.** Характерный спектр радиоизлучения шаровой молнии, полученной на ГИН.



**Рис. 13.** Характерный спектр радиоизлучения шаровой молнии, полученной на трансформаторе Теслы.

## 7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изложенная теория не накладывает никаких принципиальных ограничений на размер шаровой молнии и на длительность ее существования. Очень важным фактором длительного существования молнии являются условия обдува ее воздухом. Без притока воздуха шаровая молния окружает себя окислами азота и гаснет, поскольку температура их равна окружающей температуре, и всплывания продуктов окисления не происходит, как это наблюдается при обычном горении.

Размер молнии, наряду с величиной магнитной индукции, определяет время прохождения плазменной волны от центра до внешней оболочки, а значит и частоту повторения коротких сверхширокополосных импульсов. По нашим представлениям, частота повторения может меняться в очень широких пределах. Для наиболее распространенных размеров шаровой молнии [Стаханов, 1996] она оценивается нами в десятки – сотни мегагерц.

Оценим энергию шаровой молнии, предполагая, что в начальный момент цикла работы плазменного автогенератора вся она сосредоточена в магнитном поле, а также предположим, что магнитное поле имеет величину  $B = 22$  Тл. Выше этого значения ларморовский радиус электрона с энергией 1 эВ становится меньше половины длины свободного пробега в воздухе и условия существования волны Холла [Копейкин, 2005] не будут выполняться.

Пусть шаровая молния будет сферической с объемом

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (3)$$

Энергия магнитного поля составит:

$$W = V \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (4)$$



Для энергии  $W = 8.3 \cdot 10^9$  Дж, оцененной в работе [Дмитриев и др., 1981] диаметр шаровой молнии должен быть около четырех метров, в то время как очевидцы оценили его в полтора метра. Вероятнее всего, шаровая молния воздействовала на среду не мгновенно, а излучаемые ею радиоволны нагревали спекшуюся почву некоторый промежуток времени.

Примечательно, что в результате лабораторных экспериментов авторы пришли к выводу: из всех опробованных способов нагрева самый близкий результат по схожести с оставшейся после шаровой молнии оплавленной почвой получился после нагрева ее мощной радиоволной.

Существуют и другие достаточно надежные данные о выделении шаровой молнией большой энергии. Часть этих данных базируется на испарении воды из металлических резервуаров. Обычно при рассмотрении подобных случаев считается, что вся энергия была первоначально запасена в самой шаровой молнии, а высвободилась она мгновенно (взрывоподобно). Но сами очевидцы говорят, что энергия к испаряемой воде подводилась плавно, и взрыва никто не наблюдал.

К шаровой молнии непрерывно поступает энергия, а сама она может долго воздействовать на резервуар с водой, особенно, если собственные частоты электромагнитных колебаний резервуара попадут в резонанс с радиоизлучением молнии. Пример – СВЧ-печка. Можно испарить любое количество воды источником любой мощности, если на это хватит времени. Отметим, что сам принцип работы автогенератора шаровой молнии напоминает принцип действия магнетрона, используемого в СВЧ-печке.

Целый ряд очевидцев сообщают о больших размерах шаровых молний, достигающих в диаметре нескольких метров. Даже высказывается мнение, что многие наблюдаемые НЛО – это и есть такие молнии.

Особенно интересен факт остановки двигателей всех автомобилей в Левелленде, шт. Техас, в ноябре 1957 г., когда в воздухе долгое время кружились такие молнии [Stenhoff, 1999].

Плазменный автогенератор высоковольтных импульсов шаровой молнии возникает тогда, когда плазменная волна компенсирует излученную ею энергию за счет реакции окисления азота. Размер шаровой молнии определяется геометрией и мощностью инициирующего импульса.

Молнии большого размера излучают более низкочастотные радиоволны, чем обычные. Это связано с относительно большим временем прохождения плазменной волны внутри нее. Остановку бензиновых двигателей автомобилей можно объяснить влиянием низкочастотного радиоизлучения на их систему зажигания.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты измерений, проведенных на двух различных установках, подтверждают гипотезу о том, что шаровая молния – это автогенератор высоковольтных импульсов радиочастотного диапазона.

Излагаемая гипотеза объединяет два основных направления в исследованиях шаровой молнии: химическое, которого придерживался Н. Тесла, развивал И.П. Стаханов и развивает Б.М. Смирнов, и плазменное, сторонником которого был П.Л. Капица [Стаханов, 1996].

Предлагаемая автором теория говорит, что обе стороны правы: природа шаровой молнии имеет и тот, и другой характер. Энергию она получает из реакции окисления азота воздуха кислородом воздуха. Естественно, эта реакция может происходить только в особых условиях – в противном случае на Земле не осталось бы кислорода, который составляет 21% объема атмосферы (78% - азот). Она может происходить только тогда, когда реагенты находятся под высоковольтными импульсами сначала линейной молнии, которая инициирует процесс, затем шаровой. Сама шаровая молния – это холодная неравновесная плазма.

Высказанная гипотеза описывает все главные особенности явления, наблюдаемые очевидцами.

1. Шаровая молния может двигаться как по ветру, так и против ветра, поскольку воздух является ее «топливом». При малых потоках она потребляет воздух и движется против ветра, при больших потоках – сносится и следует за ветром.
2. Шаровая молния может либо тихо погаснуть, окружив себя окислами азота, либо взорваться, когда проводящий предмет приведет к короткому замыканию плазменного автогенератора.
3. Шаровая молния может пройти через стекло. Протекающие в ней токи имеют свое направление (поляризацию). Если направление тока параллельно стеклу, то при прохождении через него токи молнии слабо влияют на само стекло, не пересекая и не нагревая его. Если

направление токов перпендикулярно стеклу, то происходит его нагрев. Возможны два варианта нагрева. В первом случае, когда возникает отверстие – это действие внутренней части тока. Если образуется кружок – это действие внешней части кольцевого тока, текущего по поверхности молнии. Электродинамическим аналогом здесь может служить излучающая и неизлучающая щель в волноводе.

4. Шаровая молния является источником мощного радиоизлучения. По этой причине могут выходить из строя бытовые электроприборы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Дмитриев М.Т.* О механизме устойчивости шаровой молнии // ЖТФ. Т. 39. Вып. 2. С. 387-394. 1969.
- *Дмитриев М.Т., Бахтин Б.И., Мартынов В.И.* Термический фактор шаровой молнии // ЖТФ. Т. 51. № 12. С. 2564-2572. 1981.
- *В.В. Копейкин.* Волны Холла в плазме. Препр. ИЗМИРАН. № 1(1158). 10 с. 2005.
- *В.В. Копейкин.* Плазменный автогенератор высоковольтных импульсов / Перспективные материалы, февраль. Спец. вып. (8). С. 113-118. 2010.
- *К.Л. Корум, Дж. Ф. Корум.* Эксперименты по созданию шаровой молнии при помощи высокочастотного разряда и электрохимические фрактальные кластеры. УФН. Т. 160. № 4. С. 47-58. 1990.
- *Стаханов И.П.* О физической природе шаровой молнии. М.: Научный мир. 230 с. 1996.
- *Stenhoff M.* Ball lightning. An unsolved problem in atmospheric physics. New York: Kluwer/Plenum. 196 p. 1999.

## Письмо от братьев Корум.

----- Исходное сообщение -----

Тема: Re: Fireball

Дата: Mon, 13 Jan 2014 13:31:03 -0500

От: James F. Corum <jcorum@ieee.org>

Кому: Владимир Копейкин <kopeikin@izmiran.ru>

Копия: Kenneth Corum <wnpz@adelphia.net>

On 1/10/2014 12:01 AM, Владимир Копейкин wrote:

Dear James!

I send you my article about a fireball. If you this subject still interests, report, please about it to me.

Sincerely yours

V. Kopeikin

Dear Sir,

Thank you for sharing your excellent publication with us.

We deeply appreciate your research. ("Radio Spectrum Measurements of Artificial Ball Lightning and Testing the Hypothesis on Its Plasmochemical Nature," by V.V. Kopeikin, Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 54, No. 1, 2014.)

Congratulations on your splendid results!

Hard work always pays off.

Sincerely,  
James and Kenneth Corum

PS: I have attached an old photo of laboratory fireballs taken at the time that we did the research for the Uspekhi paper.

Some of our other Tesla research may be found at  
<http://nedyn.com/Tesla.html>

Item #8 serves as a general summary of Tesla coil operation as a slow-wave helical resonator.