



1955  
B85  
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИЯ  
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Б. М. Смирнов

ЧТО ТАКОЕ ШАРОВАЯ МОЛНИЯ



ВСЕСОЮЗНАЯ  
ШКОЛА ПО  
ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ  
им. В. М. ГАЛИЦКОГО

Москва 1992

539.  
B85.

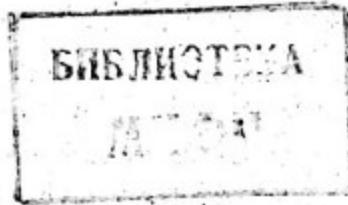
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ, ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Б.М.Смирнов

ЧТО ТАКОЕ ШАРОВАЯ МОЛНИЯ

Текст лекции

Утверждено  
редсоветом института



Москва 1992

160

539.1(06) + 551.594.223 (06)

УДК 537.5

Смирнов Б.М.: Что такое шаровая молния: Текст лекции.  
М.: МИФИ, 1992. - 44 с.

В работе представлен анализ наблюдательных данных, позволяющий сформулировать, что такое наблюдаемая шаровая молния. Кратко дается современный взгляд на проблему.

Лекция рассчитана на научных работников, инженеров и учащихся вузов.



Московский  
инженерно-физический  
институт, 1992 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Шаровая молния – одно из интереснейших явлений природы. Считается большой удачей, если человеку удается наблюдать шаровую молнию. История наблюдения шаровой молнии насчитывает тысячелетия, и поэтому, видимо, ее природа связана с естественными явлениями в атмосфере. Природа шаровой молнии определяется физическими и химическими процессами в атмосфере и на поверхностях находящихся в ней объектов, причем до настоящего времени нет единой точки зрения на природу данного явления. Поэтому шаровая молния считается для большинства людей экзотическим явлением с непонятным началом.

В последнее десятилетие изучение шаровой молнии стало одним из научных направлений. В ряде стран отдельными учеными или научными группами был организован сбор случаев наблюдения шаровой молнии, в некоторых странах возникли национальные центры по изучению шаровой молнии, создан международный комитет по шаровой молнии, проведены международные симпозиумы.

Все это способствовало повышению научного уровня исследований в данной области и позволило в большой степени избавиться от невежественной интерпретации явления в популярных изданиях, ложной сенсационной информации, присутствующей, например, при анализе неопознанных летающих объектов.

В настоящее время в ряде стран существует несколько банков, собирающих и анализирующих случаи наблюдения шаровой молнии. Суммарное число таких случаев составляет примерно 10 тысяч. Это позволяет с соответствующей точностью понять, что такое наблюдаемая шаровая молния. Имеется большое число случаев получения светящихся шаров в атмосфере в лабораторных условиях, в том числе и в исследованиях, где это ставилось целью, хотя воспроизводимость таких экспериментов обычно мала. Однако шаровая молния является многосторонним явлением, и сам факт воспроизведения светящихся образований в атмосфере немного дал для понимания физики данного явления. Наряду с этим имеются детальные исследова-

ния, относящиеся к анализу отдельных свойств шаровой молнии. Эти исследования устанавливают связь между имеющейся научной информацией и рассматриваемым явлением. На этом пути и намечается прогресс в понимании природы шаровой молнии. Можно утверждать, что существует схематическое представление о природе шаровой молнии, однако отсутствует единомыслие в общем понимании проблемы, и ряд принципиальных вопросов требует решения.

## I. УСЛОВИЯ И ХАРАКТЕР НАБЛЮДЕНИЯ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

### I.I. ШАРОВАЯ МОЛНИЯ КАК НАБЛЮДАЕМОЕ ЯВЛЕНИЕ

Для описания и анализа шаровой молнии необходимо дать определение этому явлению с тем, чтобы отделить его от других атмосферных явлений. Определим шаровую молнию как светящееся образование в атмосферном воздухе, которое может свободно перемещаться как на открытом воздухе, так и внутри помещений, и наблюдается в течение секунд и десятков секунд. Обычно это светящееся образование имеет сферическую форму.

Это определение в некоторой степени позволяет отделить шаровую молнию от огней святого Эльма – свечения вблизи отдельных объектов, которое наблюдается в грозовую погоду при высокой напряженности электрического поля. Огни святого Эльма прикреплены к объектам, ибо они представляют собой свечение коронного разряда в окрестности этих объектов. От НЛО шаровая молния, как атмосферное явление, отличается меньшими размерами и временем жизни, большей близостью к наблюдателю. Кроме того, примерно половина шаровых молний наблюдается внутри помещений, тогда как НЛО всегда бывает вне их.

Несмотря на возможность отделить шаровую молнию от других атмосферных явлений, некоторые сообщения о наблюдении шаровой молнии относятся к другим явлениям. Иногда яркая вспышка при ударе линейной молнии в наземный объект воспринимается как шаровая молния. Однако таких случаев относительно немного, и тщательный анализ позволяет освободиться от них.

Наряду с научной стороной дела, которую далее мы и будем рассматривать, необходимо иметь в виду сильное эмоциональное и психическое воздействие, которое может произвести шаровая молния

на наблюдателя. Приведем такой пример, который описан г-жой Эспер в письме в Ф.Араго [I] : "Я живу на втором этаже, откуда открывается вид на место Бокон. Дело было в июне 1849 года, помнится, 16 числа в пятницу, в 6 часов 30 минут вечера, в то самое время, когда холера наиболее свирепствовала в Париже.

Погода была удушливая, и небо казалось в ту минуту спокойным, но со всех сторон видно было сверкание зарницы. Проходя перед моим окном, которое очень низко, я была удивлена видом большого красного шара, совершенно подобного луне, окрашенной и увеличенной действием паров. Этот шар спускался медленно и перпендикулярно с неба на одно из деревьев места Бокон. Первая мысль была, что это воздушный шар Гrimма, но цвет шара и время дня вскоре убедили меня в ошибке, а пока ум мой искал разгадки этого явления, я увидела, что огонь обнаружился снизу шара, висевшего на высоте от 5 до 7 метров над деревом. Казалось, как будто горела легонько бумага, с небольшими искрами и вспышками, потом, когда отверстие увеличилось вдвое или втрое более руки, внезапный ужасный взрыв разорвал всю оболочку, а из середины этой адской машины вылетела дюжина лучей змеистой молнии, которые разлетелись по разным сторонам, из которых один ударил в дом № 4, и пробил в стене дыру, как будто пущечное ядро. Дыра эта существует и поныне. Наконец, остаток электрической материи стал гореть белым, ярким и блестящим пламенем и вертеться, как фейерверочное колесо.

Это явление продолжалось около одной минуты. Зрелище было так прекрасно, что мне и не пришла в голову мысль об опасности или страхе. Я могла только воскликнуть: "Ах, как это прекрасно!" .

Впрочем, взрыв был так силен, что опрокинул трех человек на улице и произвел, как Вы легко поверите, впечатление на весь квартал. Кухарка моя была почти задушена лучом молнии, пролетевшим перед ее окном. Привратница уронила из рук блюдо, сама не зная, от страха ли, или от потрясения лучом молнии, спустившимся по парадной лестнице на нижнюю площадку, на которой она тогда стояла. Еще один из лучей молнии попал в пансион госпожи Луазо на улице Нэви де Берн, где и ранил одну из учительниц. Жители дома № 4 со страха бросились во двор, но никто из них не был ранен.

Парик потрясся ужасным шумом этого страшного громового удара, но, может быть, я только одна видела случайно все произошедшее явление. Я за дорогую цену не продала бы случая, мне выпавшего, — быть свидетельницей столь восхитительного и чудесного зрелища!"

## I.2. ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И БАНКИ НАБЛЮДЕНИЙ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Исследования шаровой молнии имеют богатую историю, и практически в течение двух тысячелетий это явление обсуждается и анализируется в ученом мире [2]. Основу современных представлений о шаровой молнии составляет обзор и анализ наблюдательных данных. Сбор случаев наблюдения шаровой молнии проводится достаточно длительное время, более сотни лет (табл. I), поэтому можно дать четкое определение шаровой молнии, отделив ее от других атмосферных явлений.

К настоящему времени собран и обработан большой материал по наблюдениям шаровой молнии, на основе которого можно составить надежную информацию. В табл. I приведены существующие коллекции случаев наблюдения шаровой молнии. Существенно, что включенные в таблицу наборы данных по наблюдению шаровой молнии независимы. Каждый из них использует свой способ обработки наблюдательных данных и основан на сообщениях очевидцев из разных регионов земного шара. Поэтому данные, полученные из разных наборов наблюдений, взаимно дополняют друг друга и в целом позволяют дать надежную информацию о свойствах шаровой молнии. Этот материал дополняется существующими монографиями [27-29], обзорами [30-32] и популярными изданиями [33-36] по шаровой молнии.

— Таблица I  
Сбор данных по наблюдениям шаровой молнии

Авторы	Год	Страна	Кол-во обработанных случаев	Литература
Араго	1859	Франция	30	[1]
Бранд	1923	Германия	215	[3]
Хэмфрейс:	1936	США	280	[4]
Мак-Нелли	1966	США	513	[5]

Продолжение табл. I

Авторы	Год	Страна	Кол-во обра-ботанных случаев	Литера-тура
Рэйл	1966	США	112	[6]
Дмитриев	1969	СССР	45	[7]
Арабаджи	1976	Голландия	250	[8]
Григорьев, Дмитриев	1978, 1979	СССР	327	[9]
Чэрман	1979	Великобритания	76	[10]
Стаханов	1979, 1985	СССР	1022	[11, 12]
Кеул	1981	Австрия	80	[13, 14]
Григорьев, Григорьева*	1986	СССР	2082	[15-17]
Отсуки, Офуруто	1987	Япония	2060	[18-20]
Эгели	1987	Венгрия	300	[21-24]
Зой	1990	Китай	2000	[25]
Бычков	1991	СССР	1700	[26]

\* Далее для упрощения этот набор данных, к которому мы часто будем обращаться, будем представлять как данные Григорьева.

### I.3. ДОСТОВЕРНОСТЬ И ТОЧНОСТЬ СООБЩАЕМЫХ ДАННЫХ

Проведенные исследования позволяют однозначно ответить на вопрос, существует ли вообще шаровая молния как физическое явление. В свое время была выдвинута гипотеза о том, что шаровая молния является оптической иллюзией. Эта гипотеза существует и в настоящее время (см. например, [37]). Суть этой гипотезы состоит в том, что сильная вспышка линейной молнии в результате фотохимических процессов может оставлять след на сетчатке глаза наблюдателя, который сохраняется на ней в виде пятна в течение 2-10 с. Это пятно и воспринимается как шаровая молния.

Такое утверждение отвергается всеми авторами обзоров и монографий, посвященных шаровой молнии, где предварительно обработано большое число наблюдений. Делается это по двум причинам. Во-

первых, каждое из многочисленных наблюдений, используемых как довод существования шаровой молнии, включает в себя много деталей, которые не могли возникнуть в мозгу наблюдателя в качестве последствия вспышки шаровой молнии. Во-вторых, имеется ряд надежных фотографий шаровой молнии, и это объективно доказывает ее существование. Таким образом, на основе совокупности данных по наблюдению шаровой молнии и их анализу можно с полной уверенностью утверждать, что шаровая молния – это реальное явление.

Следующий вопрос, который следует рассмотреть, относится к степени достоверности сообщаемых данных о наблюдении шаровой молнии. Имеется целый ряд примеров, когда можно сравнить описание наблюданного факта очевидцем с публикацией этого случая в печати. Весьма показательный случай такого рода приводится в книге [34]. В газете "Комсомольская правда" от 5 июля 1965 г. была опубликована заметка "Огненный гость", в которой описано поведение шаровой молнии с испаречником примерно 30 см, наблюдавшейся незадолго перед этим в Армении. В статье, в частности, сказано:

"Покружившись по комнате, огненный шар проник через открытую дверь на кухню, а затем вылетел в окно. Шаровая молния ударилась во дворе о землю и взорвалась. Сила взрыва была так велика, что стоявший метрах в пятидесяти глинобитный домик рухнул. К счастью никто не пострадал".

По вопросу поведения этой шаровой молнии был послан запрос в управление гидрометслужбы Армянской ССР. В ответе было сообщено, что шаровая молния действительно наблюдалась. Описан характер движения шаровой молнии в квартире, который не имел никакого отношения к тексту "Комсомольской правды". В конце ответа сказано:

"Что же касается описанного в газете глинобитного дома, то эта полуразвалина никакого отношения к шаровой молнии не имеет".

Однако на этом дело не кончилось. Сообщение корреспондента "Комсомольской правды" легло в основу оценки энергии шаровой молнии [38], что составило порядка  $10^9$  ккал (энергия тонны взрывчатки!). К сожалению, эта оценка неоднократно учитывалась далее при анализе энергетики шаровой молнии (см. [22, 27, 28]).

Другой случай такого типа приводится во введении к книгам Стаханова [11, 12]. Речь идет о шаровой молнии, залетевшей

5 августа 1977 г. в Архангельский собор Московского Кремля.

Приведем газетное сообщение под названием "Молния - гость музея":

"До утреннего открытия музея в Архангельском соборе Московского Кремля оставалось полтора часа, когда разразилась сильнейшая гроза. Неожиданно над колокольней Ивана Великого появился ярко-желтый раскаленный шар и стал спускаться к Архангельскому собору. Дверь в него была открыта, смотритель музея Надежда Степановна Антонова готовилась к рабочему дню. Ее внимание привлекло непривычное шипение. Обернувшись, она увидела, как в проем двери медленно вплыл полуметровый шар, направился через весь собор к обильно урашенному золоченой резьбой иконостасу и остановился у царских врат. Вспышка, удар, и в воздухе запахло озоном. К счастью, воздушная гостья не принесла ущерба."

И.П.Стаханов дает более детальное описание поведения шаровой молнии, которое составлено на основе наблюдений трех очевидцев, а не одного, как в газете. При этом, согласно их свидетельствам, диаметр шара составлял примерно 5, а не 50 см, и о запахе ничего не говорилось.

Эти примеры говорят о том, что к газетным сообщениям следует относиться с большой осторожностью. Сообщения о шаровой молнии можно отнести к разряду сенсационных, что может вызвать спешность публикации и искажение передаваемой информации.

Гораздо труднее выяснить достоверность описаний отдельными наблюдателями шаровой молнии, ибо часто эти описания не с чем сравнить. Достоверность данных очевидцев шаровой молнии анализируется почти во всех книгах по шаровой молнии. Из опыта такого анализа можно указать на две причины, снижающие достоверность приводимых фактов. Во-первых, возникновение шаровой молнии происходит неожиданным образом, когда человек к этому не готов. Находясь в возбужденном состоянии, он может в дальнейшем ошибиться при описании наблюдавшего явления и сам поверить в это. Во-вторых, пытаясь осмыслить увиденное и вложить это в определенную схему, наблюдатель несколько искажает краски в воспроизведенной картине, а это может отразиться на достоверности отдельных ее деталей.

Наряду с этим существуют и объективные ошибки при воспроизведении наблюдавших фактов, которые обусловлены несовершенством человеческих возможностей при оценке параметров увиденной кар-

тины. Возможности человека в этом отношении могут быть установлены из статистической обработки массовых наблюдений других явлений. Удачный пример такого рода приводится в обзоре Чермана [10]:

"Драйк дал интересные исследования надежности описания свидетелями необычных событий. Эти события - два блестящих метеора, которые появлялись на ночном небе Западной Вирджинии в интервале примерно месяц. Так как время появления в обоих случаях было около 10 часов вечера, объекты наблюдались многими людьми. В каждом случае общие физические характеристики событий были хорошо известны: сильная вспышка освещала все небо как днем, за ней следовал громкий звуковой шум в течение нескольких минут. Астрономы из Национальной радиоастрономической лаборатории взяли интервью у стольких свидетелей, сколько было возможно (78 и 35 для обоих событий). Следует отметить, что точность сообщений быстро уменьшалась со временем в течение нескольких дней. Время было оценено удивительно хорошо: светящийся шар за 4 секунды пересек небо, и большинство оценок находилось между 3 и 5 секундами. Сообщаемый промежуток времени пока происходил звуковой шум от 1 до 5 минут) был правилен с точностью до фактора два. С другой стороны, представленный цвет объектов покрывал весь спектр. Оценки траектории светящегося шара также были неточны. Курьезным фактом для наблюдений обоих событий было то, что заметная часть свидетелей (12 %) обоих метеоритов сообщала, что звук был слышен в то же время, когда наблюдался объект - шипящий звук, подобный звуку при жарении грудинки. В этом случае такой звук был бы физически невозможен и мог иметь только физиологическую природу. Это свидетельствует о том, что звуковые восприятия шаровой молнии должны подвергаться сомнениям".

На основании этого можно сделать вывод, что достоверность отдельного сообщения падает по мере увеличения промежутка времени от наблюдения явления до его описания. Кроме того, достоверность геометрических и временных параметров явления гораздо выше, чем оптических и звуковых. Подводя итог проведенному анализу, отметим, что достоверность каждого отдельного описания наблюдавших свойств шаровой молнии ограничена. Поэтому заключения о параметрах этого явления можно делать на основании статистической обработки совокупности большого числа наблюдений.

Григорьевы [17] провели проверку точности на большой группе студентов и пришли к выводу, что размер шара определялся ими с точностью  $10 \pm 0,06$ , промежуток времени с точностью  $10 \pm 0,2$ , а яркость источника света с точностью  $10 \pm 0,2$ . Ясно, что эти цифры служат верхней границей точности для параметров шаровой молнии, сообщенных ее наблюдателями.

Следует иметь в виду, что достоверность некоторых сообщений мала, а они могут исказить информацию о наблюданной шаровой молнии. Единственный путь уменьшить влияние недостоверной информации — набрать большое число данных. Конечно, и в этом случае нам не избежать ошибки, но при большой статистике она должна быть масштаба ранее приведенных значений.

#### I.4. МЕСТО НАБЛЮДЕНИЯ И РАССТОЯНИЕ ДО НАБЛЮДАТЕЛЯ

Представляет интерес место наблюдения шаровой молнии. Примерно половина шаровых молний наблюдается в помещениях. Согласно данным Рэйла [6] эта величина составляет 48 %, Черман [10], анализируя 71 случай наблюдения, заявляет, что в 45 случаях шаровая молния наблюдалась на открытом воздухе, в 15 случаях — внутри помещений, и в 11 случаях проникала в помещения снаружи. В табл. 2 приводятся соответствующие данные Григорьева [15, 16]. Добавим, что согласно последним данным в 35 % случаев шаровая молния наблюдалась в городах, в 64 % — в сельской местности.

В ряде случаев шаровая молния наблюдалась с самолетов. Это свидетельствует о возможностях ее образования на больших высотах. Имеются случаи, когда ее наблюдали внутри самолета, не столь редки столкновения шаровой молнии с самолетом. В качестве примера приведем выдержки из заметки, опубликованной в газете "Правда" от 8 ноября 1981 г. и посвященной столкновению военного

Таблица 2  
Место наблюдения шаровой молнии [15, 16] (1984 случая)

Место	Доля, %
Внутри помещения	50,2
На улице	24,5
В поле	9,5
В лесу	4,4

Место	Доля, %
У берега реки, озера	4,0
В горах	2,3
В небе с земли	4,1
В облаках, с самолета	1,0

самолета с шаровой молнией, которое произошло на высоте 1300 метров. Вот как описывает корреспондент впечатления летчика Короткова при столкновении самолета с шаровой молнией:

"И тут боковым зрением увидел какой-то предмет. Поднял глаза: прямо перед ним за стеклом фонаря кабины висел огненный шар. Самолет словно уперся в него, и какое-то мгновение они летели рядом. И казалось, что огромный до пяти метров в диаметре, круг продолжал расти. В памяти осталась и такая деталь: шар был светло-красный, а сердцевина - величиной с футбольный мячик - темнее. Затем шар исчез. И тут же в хвостовой части раздался глухой взрыв, запахло дымом".

В результате столкновения самолет сильно пострадал ("Разворочена верхняя часть киля, трещина в обшивке"). Далее корреспондент пишет: "Я видел на аэродроме самолет Короткова. Он стоял еще отдельно от других машин, в ангаре. В носовой части на металле - следы, словно от точечной сварки. В этих местах прикасался огненный шар. "Такие метки характерны для шаровой молнии" - объяснил заместитель командира полка по инженерной службе и показал тетрадь, где собирали материалы о подобных явлениях".

Представляет интерес распределение наблюдаемых шаровых молний по наименьшим расстояниям от наблюдателя. Такая информация позволяет одновременно получить представление и о яркости шаровой молнии, так как от этого зависит, на каком расстоянии от наблюдателя она может быть зафиксирована. В табл. 3 представлена функция распределения шаровых молний по расстояниям от наблюдателя.

Таблица 3

Распределение шаровых молний по наименьшим  
расстояниям от наблюдателя

Диапазон расстояний, м	Количество наблюдений			Общее количество наблюдений	Доля, %
	Стаханов и др. [2]	Григорьев [16]	Эгели [21]		
0-1	335	505	25	865	26
1-5	556	476	119	1151	34
5-10	146	87	22	255	8
10-20	151	95	21	267	8
20-50	180	92	21	293	9
50-100	135	62	5	202	6
Более 100	151	137	31	319	9
Сумма	1654	1454	244	3352	100

Представим вероятность обнаружения  $W$  шаровой молнии в интервале расстояний между  $R_1$  и  $R_2$  в виде  $W(R_1)-W(R_2)$ . Если использовать зависимость  $W(R) = (R + R_0)^{-n}$ , то оптимальные значения параметров равны  $n = 0,59$ ;  $R_0 = 1,5$ . Отсюда следует, что половина шаровых молний наблюдается с расстояний менее 3 м, а 80 % - с расстояний менее 20 м.

### I.5. УСЛОВИЯ НАБЛЮДЕНИЯ

Определенную роль в понимании природы шаровой молнии играют условия, при которых она наблюдается, что позволяет получить представление о факторах, влияющих на образование шаровой молнии. Обычно имеется корреляция между грозовой погодой и наблюдением шаровой молнии. Если просуммировать данные Мак-Нелли (513 случаев), Рэйла (112 случаев), Стаканова - Бычкова - Кеула (1328 случаев) и Григорьева (1924 случая), то из общего количества наблюдений 79 % приходится на грозовую погоду (т.е. грозу и в течение часа до или после грозы). Эти результаты находятся в противоречии с данными по японской шаровой молнии [18-20] (2060 случаев), где 89 % наблюдений относятся к ясной погоде, 7,6 % шаровых молний наблюдается в дождь и только 2,5 % - в грозу. Вместе с тем имеется сильная корреляция для сезонного распределения шаровых и обычных молний, а также для их распределения по площади Японии. Отсуки и Офурутон утверждают, что возможное расхождение между указанными данными для Японии и "континента", возможно, связано с особенностями японской погоды. В летние месяцы в ясные дни влажность воздуха в Японии превышает 80 %.

Косвенным доказательством корреляции между возникновением шаровой молнии и грозовой погодой является распределение шаровых молний по месяцам (рис. I). Введем корреляционный коэффициент обычным способом:

$$k = \sum_i (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) / (\sum_i (X_i - \bar{X})^2 (\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2)^{1/2}},$$

где  $X_i$  относится к распределению обычных молний,  $Y_i$  - к распределению шаровых молний, индекс  $i$  отмечает параметр распределения,  $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$  - средние значения этих величин. В частности, для сезонного распределения  $X_i, Y_i$  представляют собой вероятности наблюдения обычной и шаровой молнии соответственно в данном месяце,  $\bar{X} = \bar{Y} = 1/12$ .

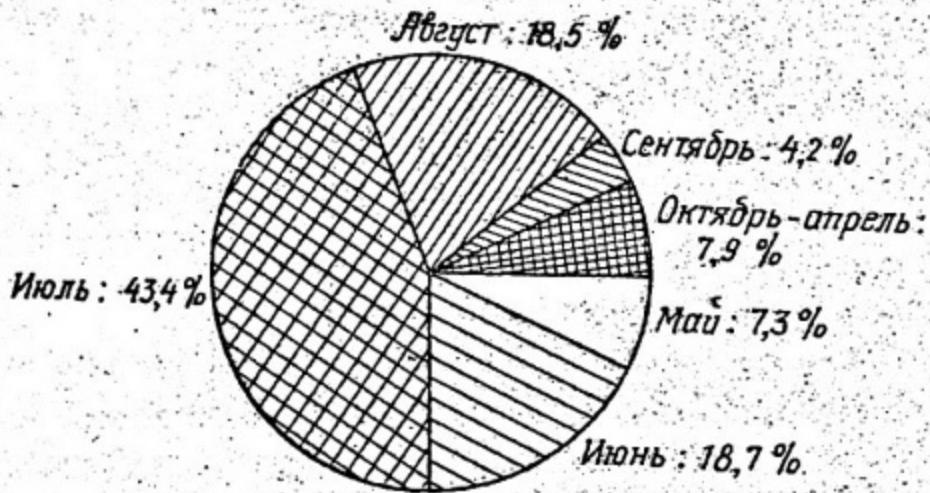


Рис. I. Сезонное распределение шаровой молнии в Австрии, Венгрии и СССР (3247 наблюдаемых случаев).

Если рассматриваемые явления оказываются следствиями одного и того же начала, их вероятности связаны между собой, т.е.  $X_i = AY_i + B$ , где  $A$  и  $B$  – некоторые числовые коэффициенты. Тогда корреляционный коэффициент равен единице. В другом пределе  $X_i$  и  $Y_i$  являются случайными величинами. Тогда

$$\sum_i (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) = \sum_i (X_i - \bar{X}) \cdot \sum_i (Y_i - \bar{Y}) = 0,$$

т.е. корреляционный коэффициент равен нулю. В табл. 4 представлены значения корреляционного коэффициента между вероятностью появления обычной и шаровой молнии. Как видно, данные наблюдений близки, и среднее значение корреляционного коэффициента равно  $k = 0,84 \pm 0,04$ .

Таблица 4  
Корреляционный коэффициент, относящийся к вероятности наблюдения обычной и шаровой молнии

Длительность наблюдения	Месяц	Сутки
Корреляционный коэффициент	0,83 [12] 0,79 [16] 0,86 [18, 19]	0,88 [16]

## I.6. ХАРАКТЕР ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПАДА

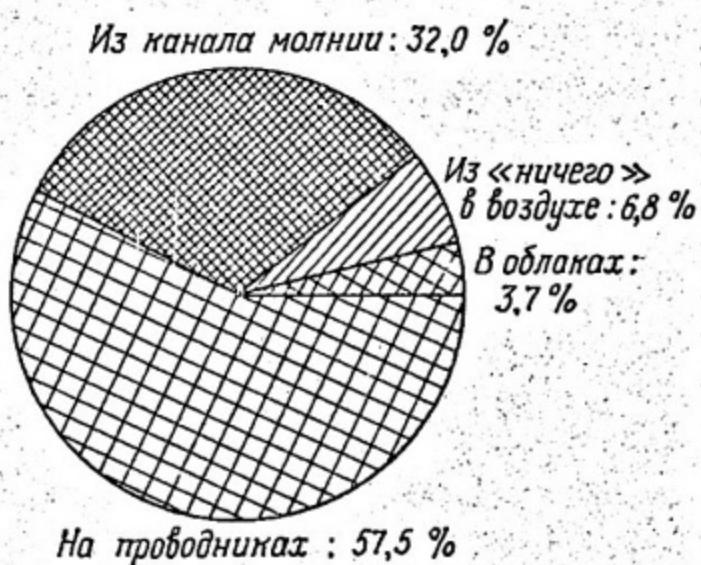


Рис.2. Характер образования шаровой молнии (353 наблюдаемых случаев)

Электрические явления в атмосфере способствуют образованию шаровой молнии. На рис.2 представлены случаи наблюдения шаровой молнии, когда фиксировалось ее рождение. Она возникает непосредственно в канале шаровой молнии или около него, может появляться из различных металлических объектов и приборов – электрических розеток, радиоприемников, батарей теплоснабжения и т.д., а также может загораться в воздухе из "ничего".

Шаровая молния может закончить свое существование спокойно и со взрывом. На рис.3 даются суммарные результаты для распределения по каналам распада шаровой молнии с учетом данных Стаканова – Бычкова – Кеула (1056 случаев), Григорьева (1131 случай), Мак-Нелли (421 случай), Рэйла (78 случаев), Чепмана (51 случай), Эгели (127 случаев). Как видно, чаще всего существование шаровой молнии заканчивается взрывом, несколько меньше вероятность того, что шаровая молния медленно погаснет. Однако нередки и случаи, когда шаровая молния распадается на части. Приведем два примера, взятых из книги Араго [I]:

"Недолгое время спустя по пришествии Филиппа V в Мадрид гром упал на дворец. Лица, собранные в то время в королевской капелле, видели как туда вторглись два огненных шара. Один из этих шаров разделился на несколько мелких, которые прежде чем исчезли, сделали несколько прыжков, подобно упругим мячам из резины".

"В 1809 г. гром пришел сквозь трубу в доме Давида Суттона в Ньюкастле-на-Тайне. После взрыва многие лица увидели на полу комнаты, в которой они находились, неподвижный огненный шар. Этот шар подвинулся потом на середину комнаты и разделился на несколько отдельных частей, которые все лопнули подобно звездам ракеты.

Медленное погасание 38,4 %

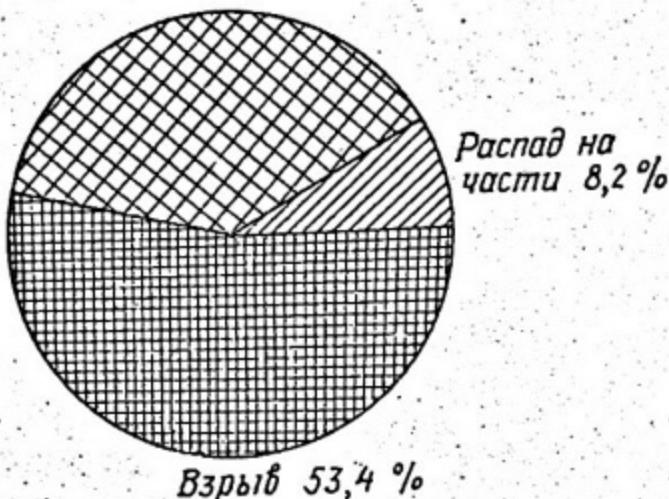


Рис.3. Распределение шаровых молний по каналам распада (2864 наблюдавшихся случаев)

Обычно взрыв шаровой молнии происходит без больших разрушений. Из 335 сообщений о взрыве шаровой молнии среди данных Стаханова [12] лишь в 34 случаях сообщалось о повреждениях. Чаще всего это расщепления деревьев или деревянных столбов (в 19 случаях). Иногда шаровая молния пробивает легкие стенки и перегородки. Сила взрыва от шаровой молнии относительно невелика, поэтому для людей, попадающих в зону взрыва шаровой молнии, это как правило, не кончается трагически. Приведем еще один пример из книги Араго [1], который содержит описание столоначальника французского министерства внутренних дел Жаменю:

"В июне 1852 года в первой половине двенадцатого часа вечера я шел по улице Монтолони, как вдруг грянул гром с силой, редко замечаемой в Париже. Сперва я мало обратил на это внимания и продолжал свой путь, но вдруг посреди улицы блеснула огромная молния, за которой почти мгновенно последовал удар, подобный артиллерийскому залпу. Мне показалось, что сгромная, сильно брошенная бомба с треском разорвалась на улице. Этот двигавшийся шар казался мне луной, упавшей с неба, и такое подобие простирилось не только на размеры, но и цвет метеора. Этот удар не замедлил моей походки, потому что я вспомнил, что как скоро увидишь молнию, то уже нечего бояться. Я только надвинул свою шляпу, которую ветер или сотрясение, произведенное электрическим взрывом, отбросило назад, и шел далее без всяких приключений."

чений до площади Каде. Когда пройдя площадь, я хотел ступить на тротуар, то увидел движущийся несколько наклонно новый огненный шар, похожий на первый, но имевший на верхней части род красного пламени, которое можно сравнить с зажигательной трубкой бомбы, только в несколько больших размерах. Этот шар, которому не предшествовала молния (по крайней мере мне так казалось), упал с ужасной быстротою и лопнул с таким треском, что я никогда не слыхал подобного. Я получил в правый бок такой толчок, что был отброшен к стене. Без сомнения треск показался мне столь сильным потому, что я находился в положении услышать его вполне, но всего замечательнее показался мне сферический вид молнии. Воспоминания мои в этом отношении чрезвычайно точны. Самый же случай не имел очень серьезных последствий и все ограничилось тем, что желудок мой не мог переваривать пищи в течение двух недель".

Взрыв шаровой молнии не всегда бывает безобидным и иногда приводит к человеческим жертвам. Среди более тысячи описаний шаровой молнии, собранных И.П.Стахановым, сообщается о пяти случаях смерти, хотя не всегда это было результатом прямого действия шаровой молнии. В книге Араго [I] имеется следующий пример такого рода:

"Впоследствии, когда мы будем искать объяснения шаровидной формы, принимаемой в известных случаях молнией, нам вероятно придется спросить, является ли когда-нибудь эта форма на море. Чтобы заранее ответить на этот вопрос, я скажу, что 13 июля 1798 года корабль ост-индской кампании "Гуд Хоуп", находясь под  $35^{\circ}40'$  южной широты и  $42^{\circ}$  восточной долготы, был поражен шаровидной молнией, произведшеею чрезвычайно сильный взрыв, убившего наповал одного матроса и тяжело ранившую другого".

Наиболее трагические последствия при взрыве шаровой молнии произошли в случае, описанном в "Литературной газете" от 21 декабря 1983 года:

"Двадцать три женщины и один мужчина работали в солнечной долине. Долину окружали горы. Внезапно в небе появилась туча. Туча была громоздкая, словно освещенная изнутри. Хлынул слепой дождь. Люди бросились к тутовому дереву - укрытию! Шаровая молния была уже здесь".

Заметка посвящена мужеству и благородству людей, пришедших на помощь пострадавшим. Однако в этой заметке не сказано, что представляла собой шаровая молния, которая взорвалась и разбр-

сала людей, спрятавшихся под деревом. Большинство из них потеряли сознание. Помощь была оперативной, но три человека умерли, так и не приходя в сознание.

### I.7. ВЕРОЯТНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЯ И ПОЯВЛЕНИЯ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Одна из любопытных проблем шаровой молнии относится к вероятности ее наблюдения. Шаровая молния является редким явлением, но средняя вероятность ее наблюдения может быть оценена. Согласно Рэйлу [6] среди 4400 опрошенных им сотрудников НАСА 180 наблюдали шаровую молнию. Стаханов [12] оценивает вероятность наблюдения шаровой молнии в течение жизни человека как  $P = 10^{-3}$ . Наиболее надежная информация по этому вопросу следует из данных Эгели [21, 23]. Он обратился к очевидцам шаровой молнии через венгерские газеты, которые охватывали 1,5 млн. подписчиков, и получил описания 520 шаровых молний, которые наблюдали примерно 1500 человек [21]. Если считать, что наблюдатели шаровой молнии в среднем прожили половину жизни и о своих наблюдениях сообщили все подписчики, то получаем, что верхний предел для вероятности наблюдения шаровой молнии в течение жизни человека равен  $P = 2 \cdot 10^{-3}$ .

Когда связь Эгели с подписчиками газет была надежно установлена, он получил за 1987 г. сообщение о 39 наблюдениях шаровых молний [23]. Отсюда получаем другую верхнюю оценку для вероятности наблюдения шаровой молнии в течение жизни человека  $P = 2 \cdot 10^{-3}$ . Суммируя все вышеуказанные данные, находим для искомой вероятности:

$$P = 10^{-2,2} \pm 0,5$$

Отсюда можно перейти к плотности частоты появления шаровых молний. Относя это распределение к поверхности Земли, получим для плотности частоты появления шаровой молнии:

$$W = P / [\tau \cdot p(0)]$$

где  $\tau$  – время жизни человека,  $p(R)$  – функция распределения шаровых молний по расстояниям от наблюдателя. Согласно данным табл. 3  $p(0) = 10^{-0,6} \pm 0,5 \text{ м}^{-2}$ , так что плотность частоты появления шаровой молнии равна  $W = 10^{1,3} \pm 1,0 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ .

Полученную величину удобно сравнить с плотностью частоты появления обычной молнии, которая равна [41]  $5,4 \pm 2,1 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ .

Взяв отношение этих величин, находим, что на обычную молнию приходится  $\pi = 4 \cdot 10^{+1,2}$  шаровых молний.

Заметим, что оценка Барри [28, 39, 40] для вероятности наблюдения шаровой молнии равна  $(10^{-9} - 10^{-8}) \text{ км}^{-2} \text{ мин}^{-1}$ . Отношение полученных величин дает, что вероятность наблюдения возникшей шаровой молнии человеком составляет  $10^{-4,1+1,3}$ . Как видно, шаровая молния не является редким явлением. Однако она наблюдается в основном с небольших расстояний. Поэтому, хотя вероятность появления шаровой молнии не мала, вероятность ее наблюдения является малой величиной.

## 2. СВОЙСТВА И ПАРАМЕТРЫ НАБЛЮДАЕМОЙ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

### 2.1. ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ

Среди других свойств шаровой молнии отметим, что характер движения ее обычно плавный и горизонтальный. Горизонтальное движение отмечалось в 53 % из 110 наблюдательных случаев Рэйла [6], в 68 % из 1006 случаев Стаканова [II, I<sub>2</sub>] и в 75 % из 1743 случаев коллекции Григорьева [16]. При этом, согласно Рэйлу [6], в 18 % случаев шаровая молния двинялась вертикально (вниз или вверх) и в 18 % имела сложную траекторию. Согласно данным Стаканова [II, I<sub>2</sub>], в 18 % (183) случаев наблюдалось движение вниз и в 5 % случаев (47) наблюдалось движение вверх. Из анализа данных Григорьева следует, что шаровая молния поднималась вверх к облакам в 0,4 % (7 наблюдаемых случаев), а в 5 % случаев (84) падала вниз из облаков. Несмотря на разный способ сработки результатов видно, что наиболее часто шаровая молния совершает плавное горизонтальное движение. При этом возможны и другие типы движения, в том числе и неподвижное состояние шаровой молнии.

Удивительной особенностью шаровой молнии является ее способность проникать в помещение через узкие отверстия и щели. Целый ряд таких примеров собран в книге Стаканова [I<sub>2</sub>]. Шаровая молния хорошо "чувствует" открытые двери, окна, может проникать через них, если понадобится, по ломанным траекториям, может сама "находить" такие отверстия. Продемонстрируем это на примере сообщения из книги Араго [I], которое интересно также и в других отношениях. Речь идет о случае, произошедшем во Франции 2 июня 1843 года:

"После довольно сильного удара грома, но не непосредственно за ним, портной, сидя у своего стола и оканчивая обед, увидел, что оклеенная бумагою рама, закрывавшая камин, упала, как бы опрокинутая умеренным порывом ветра, и огненный шар, величиною с голову ребенка, легонько вышел из камина и стал медленно двигаться по комнате на небольшой высоте от кирпичного пола. Вид огненного шара был, по словам портного, похож на средней величины котенка, свернувшегося клубком и движущегося без помощи лапок. Огненный шар казался скорее блестящим и светлым, чем горящим и раскаленным, и работник не чувствовал от него никакой теплоты. Шар приблизился к его ногам, как молодой котенок, желающий играть и тереться о ноги по обыкновению этих животных, но портной отодвинул ноги и несколькими уклончивыми движениями предосторожности, совершенными, по его словам, весьма легонько, избегнул прикосновения метеора. Кажется, последний оставался несколько секунд у ног сидящего работника, который внимательно рассматривал его, наклонясь вперед и вниз. Побродив в разные стороны, не оставляя середины комнаты, огненный шар поднялся вертикально до высоты головы работника, который для избежания прикосновения метеора к лицу и, в то же время, для следования за ним глазами, приподнялся, развалился на спинку стула, на котором сидел. Поднявшись на высоту примерно одного метра от пола, огненный шар вытянулся и косвенно направился к отверстию, пробитому в камине на высоте скола одного метра над верхней полкой.

Отверстие это было сделано для пропуска трубы печки, которая зимою служила для нагревания комнаты. Но, по выражению мастера-вого, молния не могла его видеть, потому что оно было заклеено бумагою. Огненный шар направился прямо на это отверстие, отклеил от него бумагу, не повредив ее, и поднялся в трубу. Тогда, по рассказу портного, поднявшись вдоль трубы, шар достигнул верха трубы, находящегося по крайней мере, в 20 метрах над поверхностью двора, где и лопнул со страшным треском, разрушив часть трубы и подбросив обломки на двор; крыши нескольких небольших построек были пробиты, но Бог миловал от какого-либо несчастья.

Комната портного находилась в третьем этаже и не достигала до половины высоты дома. В верхние этажи гром не проникнул, а движения светлого шара были постоянно медленны и без внезапных порывов. Блеск его не был ослепительным, и вообще шар не распрост-

ранял чувствительной теплоты. По-видимому, он не стремился следовать по телам проводящим или уступать воздушным токам".

Обычно шаровая молния движется по воздуху, но нередки и случаи, когда она катится по земле или полу. Вот пример, взятый также из книги Араго [1] :

« Доктор Штейнман в письме ко мне сообщает наблюдение клуба молнии, сделанное в Альтоне в 1826 году. Вот его слова:

"Кажется, в 1826 году удар грома разразился над домом одного из моих друзей в Альтоне, где я занимался медицинской практикой. Дом этот находился на высоте от 30 до 40 метров над уровнем Эльбы. Друг мой, доктор фон дер Смиссен, прохаживался по моей гостиной, когда раздался удар грома: в то же самое мгновение огненная масса появилась на полу комнаты и пробежала в виде овального шарика величиною с куриное яйцо близ стены вдоль доски, покрытой лаком. Шарик катился к двери со скоростью бега мыши; там, произведя новый взрыв, он перескочил через перила лестницы, ведущей в нижний этаж, и исчез точно так же, как и явился, не причинив никакого вреда". »

## 2.2. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ВРЕМЯ ЖИЗНИ

В соответствии со своим названием (как на русском, так и на других языках) шаровая молния должна иметь сферическую форму. Это подтверждается наблюдательными данными. Так, согласно данным Григорьева [16] и Стаханова - Быкова - Кеула [26], из 3123 случаев наблюдения шаровой молнии в 91+1 % наблюдений она была сферической формы.

Существенно, что в большинстве случаев шаровая молния сохраняет свою форму в процессе эволюции. Так, согласно данным Григорьева [16], только в 134 случаях из 2082 обработанных наблюдались изменения формы шаровой молнии. При этом в 25 случаях шар превращался в ленту, в 15 случаях лента превращалась в шар, в 4 случаях шар деформировался при подскакиваниях, в 12 случаях шаровая молния вытягивалась в сторону проводника. К этому следует добавить, что в 226 случаях (11 %) у шаровой молнии наблюдалась полупрозрачная оболочка, в 119 случаях (6 %) шаровая молния имела хвост, а в 143 случаях (7 %) сообщалось о внутренней структуре шаровой молнии, связанной с хаотическим движением внутри

нее светящихся точек или ярких нитей. Отсюда видно, что за простой формой шаровой молнии стоит сложная картина процессов внутри нее.

Таблица 5

Средний диаметр наблюдаемой шаровой молнии

Набор данных	Мак-Нелли [5]	Рэйл [6]	Черман [10]	Стаханов-Бычков - Келул [28]	Григорьев [16]	Эгели [21]
Число данных	446	98	64	1614	1796	204
$d$ , см	30	32	26	24	19	35

При анализе числовых значений для параметров наблюдаемой шаровой молнии следует отметить, что все данные получены визуальным наблюдением шаровой молнии в тот момент, когда наблюдатель находится в состоянии некоторого эмоционального потрясения. Это приводит к погрешностям в получаемой информации, которые не могут быть устранены большой статистикой. Это замечание следует учитывать при последующем анализе наблюдательных данных.

Табл. 5 содержит значения среднего диаметра шаровой молнии согласно разным наборам наблюдений. Среднее значение диаметра равно  $23 \pm 5$  см. Отметим, что ранее без учета новых наборов данных подобным способом было получено среднее значение диаметра [29, 31]  $28 \pm 4$  см. Как видно, увеличение количества наблюдательных случаев не приводит к уменьшению погрешности. К этому следует добавить, что функция распределения шаровых молний по диаметру имеет разную форму согласно разным коллекциям наблюдательных случаев. Опыт анализа наблюдательных данных дает, что получаемая из наблюдений количественная информация имеет ограниченную точность, которая медленно улучшается с увеличением числа анализируемых случаев.

Сложный вид имеет функция распределения шаровых молний по времени существования. Введем вероятность  $P(t)$  того, что к моменту времени  $t$  шаровая молния не распадается. Казалось бы естественным, что эта функция должна быть экспоненциальной. Однако, согласно анализу наблюдательных данных [16], эту зависимость удобно аппроксимировать, как комбинацию нескольких экспонент:

$$P(t) = \sum A_i \exp(-t/\tau_i).$$

Введем средние времена, характеризующие время жизни шаровой молнии. Среди них среднее время жизни шаровой молнии

$$\tau_1 = \int_0^{\infty} t |dP/dt| dt ,$$

время, характеризующее скорость распада в начальный момент времени

$$\tau_2 = -\frac{dP}{dt} \Big|_{t=0} ,$$

а также времена, через которые сохранится соответствующая часть шаровых молний

$$P(\tau_3) = 1/e , \quad P(\tau_4) = 1/2 .$$

Значения средних времен жизни шаровой молнии согласно разным наблюдательным данным представлены в табл.6. При этом заметим, что в табл.6 включены те данные коллекции Григорьева [16], когда наблюдались возникновение и распад шаровой молнии, или же наблюдался распад шаровой молнии в случае, когда она возникала вслед за линейной. В других наборах данных за время жизни шаровой молнии принималось время ее наблюдения.

Таблица 6  
Средние времена жизни шаровой молнии (с)

	Количество наблюдаемых случаев	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$
Нак-Нелли [5]	445	12	4	4,5	3
Рэйл [6]	95	14	14	14	10
Стаханов - Быков - Кеул [26]	1564	26	31	16	10
Григорьев [16]	437	40	5	9	4,5
Эгели [21]	152	38	9	18	7,5

Если бы закон распада шаровой молнии был экспоненциальным, то  $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3$  и  $\tau_4 = 0,69 \tau_3$  как в случае Рэйла [6]. В других наборах данных, где имеются долгоживущие и короткоживущие шаровые молнии, эти средние времена заметно различаются. Обычно в качестве времени жизни шаровой молнии используется величина  $\tau_4$ , которая с учетом данных табл.6, равна  $\tau_4 = 8 \cdot 10^{+0,3}$  с. Кроме того, используемой является величина  $\tau_2$ , характеризующая

скорость распада в начальный момент времени. Усреднением данных табл. 6 получаем  $\tau_2 = 9 \cdot 10^{+0,3}$  с. Как видно, значения данных параметров совпадают в пределах их точности. Поэтому далее будем использовать эти величины в качестве среднего времени жизни шаровой молнии.

### 2.3. ШАРОВАЯ МОЛНИЯ КАК ИСТОЧНИК СВЕТА

Излучение шаровой молнии является одним из главных ее свойств. Одна из характеристик излучения шаровой молнии относится к ее цвету. В табл. 7 собраны данные по цвету шаровой молнии согласно разным наблюдательным данным. В ней использована упрощенная схема распределения шаровых молний по цвету, предложенная Стахановым [II]. В скобках приводится вероятность рассматриваемого цвета, выраженная в процентах, а в последней колонке приводится вероятность данного цвета, полученная на основе суммы результатов. Сравнение данных различных банков свидетельствует о большой погрешности вероятности рассматриваемого цвета, причем в пределах статистической ошибки вероятности белого, красного с розовым, желтого и оранжевого цветов совпадают и составляют примерно 20 %.

Грубый анализ [6] показывает, что шаровая молния является источником света средней интенсивности. Существенный прогресс в этом отношении был достигнут Стахановым [I2], который собрал информацию о яркости шаровой молнии как источнике света. В силу несовершенства глаза как прибора для измерения яркости светового источника, а также из-за необычности условий, при которых фиксируется яркость шаровой молнии, можно считать, что яркость шаровой молнии в каждом случае определяется с точностью до множителя 2-3. Большая статистика наблюдений частично уменьшает эту погрешность, такая информация представляет большую ценность. Удачно выбрана шкала для определения яркости шаровой молнии — путем сравнения ее с яркостью электрической лампы. Схема Стаханова далее была использована в последующих коллекциях. Суммарные данные приведены на рис. 4.

Обработаем эти данные, считая, что функция распределения шаровых молний по яркости имеет вид:  $f(J) = \exp[-(J/J_0)]/J_0$ , где  $f(J)dJ$  — вероятность того, что яркость шаровой молнии находится в интервале от  $J$  до  $J+dJ$ . Отсюда имеем для вероятности того, что яркость шаровой молнии находится в интервале

Таблица 7

Сравнение данных по распределению наблюдаемых шаровых молний по цвету

Наблюдаемый цвет	Число наблюдений			Вероятность данного цвета, %
	Сумма Мак Нелли, Рэйл, Черман, Эгели	Стаханов - Бычков --	Григорьев Кеул.	
Белый	141(19)	473(30)	247(14)	21±7
Красный или розовый	116(16)	316(20)	297(16)	18±2
Оранжевый	115(16)	200(13)	633(35)	23±10
Желтый	140(19)	384(24)	307(17)	20±3
Зеленый	15(2,0)	22(1,4)	22(1,2)	1,5±0,3
Голубой, синий или фиолетовый	90(12)	148(9)	230(13)	11±2
Смесь цветов	119(16)	30(2)	67(4)	8±6
Сумма	736	1573	1803	100

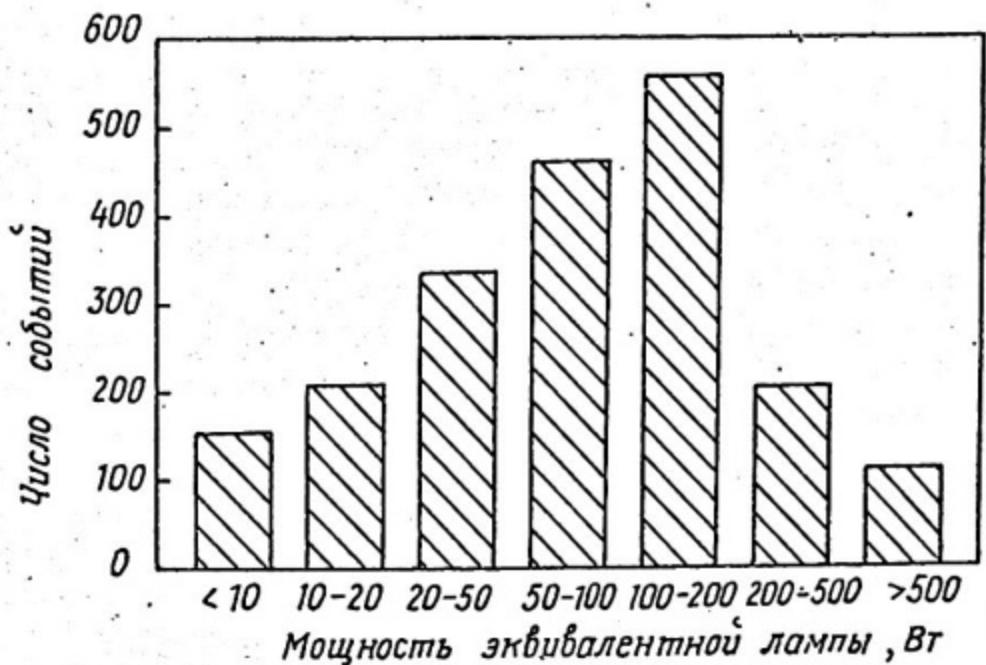


Рис.4. Яркость шаровой молнии в сравнении с яркостью электрической лампы соответствующей мощности (2025 наблюденных случаев)

от  $J_i$  до  $J_k$ :  $W(J_i, J_k) = \exp[-(J_i/J_0)] - \exp[-(J_k/J_0)]$ .

Построим функционал

$$x(\pi, J_0) = \sum_i (W(J_i, J_k) - W_{\text{набл}}(J_i, J_k))^2,$$

где вероятность  $W(J_i, J_k)$  дается приведенной формулой, а  $W_{\text{набл}}(J_i, J_k)$  соответствует наблюдательным данным. Оптимальное значение параметра  $J_0$  определим из условия минимума функционала, а погрешность соответствует изменению функционала вдвое. Получим для средней мощности эквивалентной электрической лампы  $\bar{J} = J_0 = 110 \pm 20$  Вт, или в светотехнических единицах  $\bar{J} = 1500 \pm 300$  лм. Указанная погрешность учитывает только статистический разброс данных. Реальная погрешность значительно больше, ибо метод получения каждого значения наблюдаемой яркости слишком грубый.

## 2.4. ЭНЕРГЕТИКА ШАРОВОЙ МОЛНИИ

В большинстве наблюдавших случаев шаровая молния распадается, не оставляя после себя следов. В некоторых случаях это приводит к действиям и разрушениям, по которым можно оценить затраченную для этого энергию. Такие случаи анализировались Барри [25], Стакановым [12] и Эгели [24]. Наблюдательные случаи, для которых оценивалась энергия шаровой молнии, можно условно разделить на две группы. К первой из них отнесем случаи, в которых соответствующее действие шаровой молнии могло происходить под действием внутренней энергии шаровой молнии. Во второй группе соберем случаи, когда используется энергия внешнего электрического источника. На основе этих оценок построена функция распределения шаровых молний по внутренней энергии, представленная на рис.5 (более подробный анализ построения функции распределения содержится в работах [29, 31, 42]). Этому распределению соответствует наиболее вероятная энергия шаровой молнии, которая составляет  $7 \cdot 10^{+0,2}$  кДж. Средняя внутренняя энергия шаровой молнии равна  $200 \cdot 10^{+0,2}$  кДж.

Отсюда имеем для средней мощности шаровых молний:

$$P = \bar{E} WS = 10^{4,1 \pm 1,2} \text{ кВт},$$

где  $W$  – вероятность возникновения шаровой молнии, приходящаяся на единицу площади в единицу времени,  $S = 5,1 \cdot 10^8 \text{ км}^2$  – пло-

щадь поверхности Земли. Отметим, что средняя мощность линейных молний порядка  $5 \cdot 10^7$  кВт [43-45]. Если считать шаровую молнию вторичным явлением обычной молнии, то на создание шаровых молний тратится  $10^{-3,6} \pm 1,2$  часть энергии линейных молний.

## 2.5. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЧЕЛОВЕКА

Среди других свойств отметим способность шаровой молнии быть источником тепла. Согласно данным Рэйла [6] об ощущении тепла сообщается в четырех случаях из его коллекции, тогда как в 100 случаях оно отрицается. В коллекции Стаханова [11, 12] об ощущении тепла сообщали 25 человек из 294, которые наблюдали шаровую молнию с расстояния менее 1 м, 8 человек из 131, находившихся от нее на расстоянии от 1 до 2 м, 20 - из 379, ближайшее расстояние от которых до шаровой молнии составляло 2-5 м и 9 из 676 человек, наблюдавших шаровую молнию с расстояния более 5 м. Согласно данным Григорьева [16] из 383 случаев, в которых наблюдатели шаровой молнии сообщали об ощущении тепла, 64 ответили утвердительно на этот вопрос. Из совокупности данных следует, что об ощущении тепла сообщает лишь несколько процентов наблюдателей, причем отсутствует резкая зависимость вероятности фиксации ими тепла для изотропного источника тепла.

Появление шаровой молнии может сопровождаться запахом. Здесь нет четкой статистики, но отмечались разные запахи: серы, озона, окислов азота. Часто появление шаровой молнии сопровождается несильным звуком - потрескиванием, шипением, свистом. Шаровая молния создает искажение в радиоприемнике. Дмитриев [7] отмечал, что среди 45 собранных им случаев наблюдения шаровой молнии в 6 случаях обнаружено ее влияние на радиосвязь.

Шаровая молния обладает электрическими свойствами. По этому вопросу нет четкой статистики. Ряд случаев описан Стахановым [12]. Действие шаровой молнии на человека, как правило, подобно действию на него электрического тока. Она может вызвать временное онемение или паралич части тела. Согласно Григорьеву [16] в 3 случаях его коллекции сообщается об ожогах от шаровой молнии, подобных действию ультрафиолетового излучения.

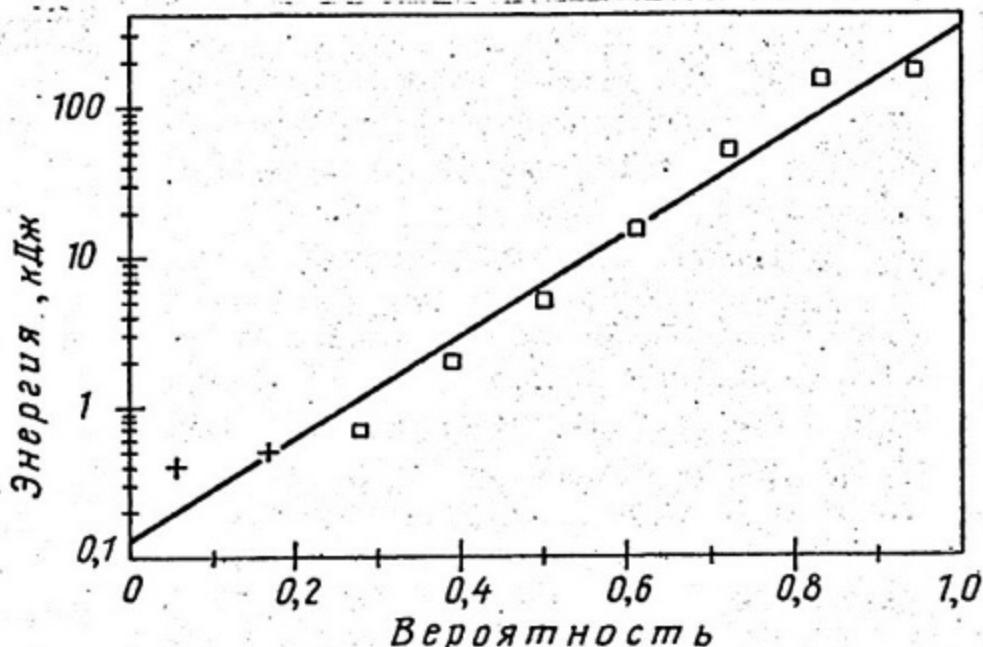


Рис.5. Вероятность того, что энергия шаровой молнии превышает данную величину. Использованы оценки Бэри [28] и Стаханова [12] для случаев энерговыделения, когда оно заведомо определялось внутренней энергией

Иногда шаровая молния приводит к смертельным случаям (см. раздел I.6). Анализ Григорьева [16] показывает, что к таким сообщениям следует относиться с осторожностью уже и потому, что эта информация исходит не от непосредственных наблюдателей событий. Да и опыт наших газетных сообщений на эту тему свидетельствует о малой достоверности таких публикаций. Во всяком случае, вероятность гибели людей под действием шаровой молнии весьма мала, за исключением случаев, когда она вызывает электрический взрыв с сильными разрушениями.

В небольшом числе случаев отмечено, что действие шаровой молнии в спокойном состоянии на находящихся рядом людей может привести к окогам и травмам. Один из таких случаев, произошедших 8 августа 1975 г. в Великобритании, описан в статье [46]. Участница этого эпизода находилась на кухне во время грозы, когда обнаружила около себя шаровую молнию диаметром, равным примерно 10 см, которая была окружена гало и имела цвет от ярко-голубого до фиолетового. Когда шаровая молния приблизилась, женщина почувствовала от нее жар и запах паленого. Кроме того, шаровая молния издавала треск. Сама женщина сообщает:

"Казалось, шар повис около меня ниже пояса; тогда я автоматически отмахнулась от него, и он тотчас исчез. Левая рука, которой я отмахнулась, покраснела и распухла. Появилась дыра в платье и нижнем белье там, где произошло касание шаровой молнии. Ноги покраснели и онемели".

Шаровая молния может оставлять после себя запах, свидетельствующий о химическом составе присутствующего в ней вещества. Это может быть запах серы, окислов азота, озона. Приведем два примера такого рода из книги Араго [I] :

"7 октября 1711 года большой огненный шар упал после грозы среди жителей Сэмпфорд-Коуртней (в Девоншире), стоявших на церковной паперти. В то же самое мгновение четыре подобных же шара, но только величиной с кулак, лопнули в самой церкви и наполнили ее огнем и серным дымом. Одна из вершин башни была сорвана тем же самым ударом".

"В тот же самый день (1772 года), когда во время грозы видели над Стипл-Эстоном колеблющийся огненный шар, о котором мы выше упоминали, священники Уэйнхусэ и Питкэрн, находившиеся в то время в церковном доме, внезапно на высоте их роста и на один фут расстояния от их лиц увидели огненный шар величиной с кулак. Этот шар был окружен черным дымом. При разрыве он произвел звук, подобный залпу из артиллерийских орудий. Вслед за тем по всему дому распространился сильно пахнувший серою пар. Питкэрн был опасно ранен. Его тело, одежда, башмаки, часы, представляли все признаки обыкновенного удара молнии. Светлое пламя различных цветов наполнило комнату и находилось в весьма сильном колебательном движении".

## 2.6. СРЕДНЯЯ НАБЛЮДАЕМАЯ ШАРОВАЯ МОЛНИЯ

На основе представленных результатов по наборам случаев наблюдения шаровой молнии и анализу данных внутри этих наборов удобно построить наблюдательную модель шаровой молнии, которая сбладает средними параметрами шаровых молний. Эта модель имеет собирательное значение и может служить основой при анализе природы шаровой молнии. Существенно, что эти параметры получены усреднением большого массива данных, что обеспечивает их высокую достоверность в пределах погрешности получения соответствующего параметра. Мы не анализировали величину погрешности, связанный

с примитивным способом определения наблюдательных параметров "на глаз". Ясно, что неточность такого метода получения результата в существенной степени сохраняется и при усреднении большого массива данных. Но и в пределах этих погрешностей проведенные сбор и обработка наблюдательных данных (табл. 8) имеют большую научную ценность.

Таблица 8

Средние параметры шаровой молнии

Параметр, единица измерения	Значение параметра
Вероятность сферической формы, %	$91 \pm 1$
Диаметр, см	$23 \pm 5$
Время жизни, с	$8 \cdot 10^{+0,3}$
Внутренняя энергия, кДж	$10^{0,8 \pm 0,2}$
Цвет	Белый, красный, оранжевый, желтый (примерно 20 % каждый)
Световой поток, лм	Голубой, синий, фиолетовый, зеленый ( $II \pm 2 \%$ )
Световая отдача, лм/Вт	$1500 \pm 300$
Корреляция с атмосферным электричеством	$0,6 \cdot 10^{+0,5}$
Сезонность	80±10 % шаровых молний в континентальных странах наблюдается в грозовую погоду
Распад	Свыше 80 % шаровых молний наблюдается в летние месяцы
Вероятность наблюдения шаровой молнии в течение жизни человека	В 50±10 % случаях существование шаровой молнии заканчивается взрывом
	$10^{-2,2 \pm 0,3}$

Удобство наблюдательной модели шаровой молнии в том, что она включает в себя только факты, которые проявлялись во многих случаях наблюдения шаровой молнии. Однако следует заметить, что при построении такой модели теряется существенная часть информации, которая вытекает из большого массива данных. Такая потеря неизбежна потому, что из функции распределения по данному параметру мы используем только ее среднюю характеристику. При такой замене могут быть упущены качественные показатели, которые со-

держатся в функции распределения. Например, при анализе времени жизни шаровой молнии отмечалось, что существуют два типа шаровых молний (согласно Стаханову [12]) или три типа шаровых молний (согласно Григорьеву [16]), которые существенно различаются своими временами жизни. Другой важный элемент, не учитываемый моделью средней шаровой молнии, относится к корреляции между отдельными параметрами.

Несмотря на указанные недостатки наблюдательная модель шаровой молнии представляет большую ценность. Она проста и с ее помощью нетрудно проверить различные гипотезы о том, что происходит внутри шаровой молнии.

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

#### 3.1. ШАРОВАЯ МОЛНИЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕ И В ЛАБОРАТОРИИ

Шаровая молния образуется не только в естественных условиях, но также на производстве и в жилище как результат действия энергетических и электрических устройств. Приведем в качестве примера сообщение [47] о наблюдении шаровой молнии на Куйбышевском моторном заводе при испытании сопел на гидравлическое подобие диэлектрической жидкостью. Шаровая молния возникала из коронного разряда, который возбуждался на кольцевой острой кромке заглушки при накоплении электростатического заряда. При резком отключении или снижении оборотов двигателя насоса, питающего систему испытания сопел, коронный разряд отрывался и плавно парил в воздухе в виде шара в течение 3–5 с. Далее он иногда исчезал, как бы растворяясь в воздухе, а чаще его исчезновение сопровождалось хлопком. Возникновение и исчезновение шаровой молнии не причиняло никакого вреда ни обслуживающему персоналу, ни оборудованию.

Понимание природы шаровой молнии, в принципе, позволяет воспроизвести это явление. А создание лабораторной модели шаровой молнии дает возможность более глубоко изучить ее. Поэтому в течение всей истории изучения шаровой молнии неоднократно предпринимались попытки воспроизвести шаровую молнию как целое в лабораторных условиях. Многие из них были удачными и позволяли создавать светящиеся образования в воздухе.

Хотя лабораторные моделирования шаровой молнии с целью воспроизвести это явление как целое и не позволили получить более глубокое представление о природе шаровой молнии, они дали полезный опыт. Многие из этих экспериментов подробно освещены в монографии Барри [26], а также в [29, 32]. При этом во всех ранних экспериментах в качестве источника энергии шаровой молнии использовался электрический газовый разряд, что объясняется удобством этого способа вложения энергии и подходящей энергетической существующих разрядных устройств. Большая часть случаев моделирования шаровой молнии таким способом опиралась на предположение о плазменной природе шаровой молнии. Поэтому задачей в большинстве исследований было создать разряд сферической формы при атмосферном давлении, который мог бы существовать и после выключения внешнего источника.

Эту задачу в той или иной степени удалось решить во многих исследованиях (см., например, [28, 29, 32]). Анализируя эксперименты по моделированию шаровой молнии как целого, необходимо отметить, что они характеризуют и общее отношение к проблеме. С одной стороны, таким способом иногда удается получить светящиеся образования, похожие на шаровую молнию. Это доказывает, что данное явление связано с естественными процессами в возбужденном воздухе. С другой стороны, низкая воспроизводимость экспериментов при получении светящихся образований и трудности управления экспериментом не позволили получить на их основе дополнительную информацию о шаровой молнии.

Опыт этих исследований показывает сложность явления шаровой молнии, так что даже отдельные успехи при ее моделировании как целого не дают продвижения в понимании природы этого явления. Поэтому в последнее десятилетие более распространенным стало моделирование отдельных сторон этого явления и анализ его отдельных свойств с использованием физических объектов и явлений, где повторяются эти свойства шаровой молнии.

### 3.2. ФРАКТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Шаровая молния – сложное многогранное явление, изучение которого требует отдельного описания и специальных моделей. Существует большое число моделей шаровой молнии с разной глубиной анализа. Часть из них описана в существующих обзорах и

монографиях [11, 27-36]. При этом разные модели, основанные на строгом научном анализе и существующей научной информации, оказываются полезными для понимания отдельных аспектов природы шаровой молнии, несмотря на кажущуюся противоречивость таких моделей. Тем не менее среди различных проблем природы шаровой молнии центральным представляется вопрос о структуре шаровой молнии. Далее кратко будет рассмотрена фрактальная модель шаровой молнии [53], которая опирается на концепции и информацию по процессам релаксации вещества при сильном возбуждении.

Рассмотрим характер релаксации слабоионизированной плазмы, образованной при сильном воздействии на поверхность. Такое воздействие может быть связано с действием импульсного электрического разряда, и, в частности, линейной молнии, лазерного излучения, электронного или ионного пучка и т.д. В результате такого воздействия вещество поверхности частично испаряется, и образованная слабоионизированная плазма после прекращения импульса разлетается в окружающую атмосферу. В процессе разлета плазма охлаждается, что ведет к конденсации вещества, причем ядрами конденсации являются ионы плазмы. Процесс конденсации и коагуляции (объединение жидких капель) происходит до тех пор, пока температура частиц не упадет до температуры их плавления. Образованные к этому моменту времени твердые частицы далее сохраняются и участвуют в последующих процессах как стабильные элементы.

Эти частицы далее объединяются в структуры микронных размеров, носящих название фрактальных агрегатов или фрактальных кластеров. Такие системы являются сильно разреженными, и их фрактальное свойство проявляется в том, что средняя плотность вещества в них падает с ростом их размеров. Вместе с тем падает и прочность системы, которая и ограничивает размер кластеров микронами. Образование таких систем достаточно полно изучено в восьмидесятые годы, имеется достаточное число экспериментальных исследований и компьютерных моделей (см. например, обзоры и монографии [48-51]).

Как видно, размеры фрактальных агрегатов ограничены. Поэтому на пути образования макроскопических фрактальных систем принципиальное значение имеет процесс объединения фрактальных агрегатов. Согласно исследованиям Лушникова, Негина, Пахсмова [52]

во внешнем электрическом поле умеренной напряженности фрактальные агрегаты объединяются, образуя фрактальные нити. Диаметр фрактальной нити составляет десятки микрон, длина - несколько сантиметров; одновременно образуются десятки и сотни фрактальных нитей.

Фрактальные нити, переплетаясь между собой, образуют так называемый фрактальный клубок [53], который и составляет основу шаровой молнии. Хотя фрактальная модель шаровой молнии [53, 54] не является общепринятой, она имеет ряд достоинств, которые делают ее более предпочтительной и проработанной по сравнению с другими вариантами. Во-первых, сам факт образования фрактальных клубков не вызывает сомнения, поскольку подтверждается как экспериментальными исследованиями, так и теоретическим анализом. Во-вторых, прослеживается факт образования фрактальных структур при мощном импульсном воздействии на поверхность, в частности, при ударе линейной молнии. В-третьих, ряд необычных свойств шаровой молнии объясняется наличием рассматриваемой структуры.

Вкратце остановимся на этих свойствах. Фрактальный клубок является дважды разреженным веществом. Частицы занимают малую часть объема внутри фрактальных нитей, а сами нити малую часть объема внутри клубка. Поэтому средний удельный вес вещества фрактального клубка на три-пять порядков ниже, чем для конденсированного состояния. Этим объясняется возможность шаровой молнии летать в воздухе, а также ее свойство проникать через узкие щели и малые отверстия под действием потоков воздуха. Последнее свойство связано с малым поверхностным натяжением вещества фрактального клубка.

Как система, состоящая из пересекающихся нитей, фрактальный клубок допускает фазовый переход .. клубок - глобула, изученный для полимерной нити с самопересечениями [55, 56]. Тогда при низких температурах фрактальный клубок имеет сферическую форму, при высоких температурах представляет собой бесформенную систему. Для средних параметров шаровой молнии температура фазового перехода ожидается [53]  $800 \pm 200$  К, причем погрешность отвечает только неопределенности в параметрах средней шаровой молнии, т.е. реально она гораздо выше. Поэтому можно ожидать как сферической формы шаровой молнии, так и других типов ее формы, а также перехода между ними. Такая картина реально и наблюдается.

Наиболее важными являются энергетические и излучательные процессы в шаровой молнии. Поскольку фрактальный клубок состоит из нанометровых частиц, то большая часть молекул вещества фрактального клубка находится на его внутренней поверхности. Это создает большую удельную поверхностную энергию фрактального клубка, которая намного меньше удельной химической энергии взрывчатых веществ. Поверхностная энергия фрактальной системы выделяется при увеличении размеров входящих в нее частиц.

Процесс уплотнения фрактальной структуры может проявиться в виде тепловой волны [57], которая распространяется вдоль фрактальной нити. В этом случае внутренняя энергия системы идет на плавление структуры, а выделение энергии происходит в результате объединения жидких частиц, являющихся элементами рассматриваемой структуры. На фронте тепловой волны температура достигает ~2000 К, что вызывает интенсивное свечение, пока данная область не сстынет. Тепловая волна одновременно распространяется по многим фрактальным нитям, т.е. существует много светящихся элементов. Отметим, что численные оценки, относящиеся к параметрам средней шаровой молнии, не противоречат наблюдаемым данным. Среди них: размер светящегося элемента порядка 1 мм, число одновременно светящихся элементов  $10^2 - 10^3$ .

### 3.3. АНАЛИЗ ПРИРОДЫ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Современный анализ природы шаровой молнии использует наблюдательные данные вместе с научной информацией о различных физических системах и процессах. Он сводится к построению всевозможных моделей, относящихся к отдельным аспектам шаровой молнии, и сравнение их с наблюдательными данными позволяет сделать определенные выводы о соответствующих свойствах шаровой молнии. Продемонстрируем это на примере анализа излучательных свойств шаровой молнии.

Сравним шаровую молнию как световой источник с нагретым шаром, радиус которого равен радиусу средней шаровой молнии и поверхность которого излучает как абсолютно черное тело. Выясним, чему должна быть равна температура поверхности шара, чтобы световой поток от него совпадал со световым потоком средней шаровой молнии. Получим  $T = 1360 \pm 30$  К. Далее определим температуру шара, имеющего тот же световой выход, что и средняя шаровая

молния. Получим  $T = 1800 \pm 200$  К. Наконец, для согласования используемых параметров средней шаровой молнии будем считать, что нагретый шар имеет тот же световой поток и тот же световой выход, что и средняя шаровая молния, но излучает лишь часть его полной поверхности. Получим, что излучающая часть поверхности шара равна  $10^{-1,7 \pm 0,8}$ .

Из проведенного простого анализа можно сделать два важных вывода. Во-первых, температура излучающих элементов шаровой молнии составляет примерно 2000 К. При этом мы должны учитывать, что в шаровой молнии имеются дополнительные каналы потери энергии по сравнению с абсолютно черным телом. Поэтому реальная температура излучающих элементов шаровой молнии не может быть ниже, чем получается из сравнения с черным телом. Во-вторых, шаровая молния содержит много очагов излучения, которые либо в сумме занимают малую часть ее объема, либо, если свечение создается со всех точек объема, то в видимой области спектра это оптически прозрачная система.

Это расхождение можно было бы объяснить неравновесными условиями в системе, которые относятся к излучающим возбужденным атомам или молекулам. В этом случае неравновесность создается за счет малого времени жизни возбужденного атома, и с такими ситуациями мы часто сталкиваемся в различных задачах атомной физики, физики плазмы и высокотемпературных процессов. Однако при атмосферном давлении основной канал разрушения возбужденных атомов молекул в воздухе определяется их столкновениями с молекулами воздуха, а не излучательными процессами. Так, согласно приведенным расчетам [29, 31, 32], вероятность испускания кванта резонансно возбужденным атомом щелочного металла, находящимся в атмосферном воздухе при температуре 2000 К, составляет порядка 0,01. Это означает, что с близкой к единице вероятностью возбужденный атом тушится в результате столкновения с молекулами воздуха, и тем самым возбужденные атомы находятся в термодинамическом равновесии с молекулами воздуха. Этот вывод, полученный для резонансно возбужденных атомов, тем более справедлив для возбужденных атомов или молекул, обладающих меньшим излучательным временем жизни. Поэтому плотность возбужденных атомов или молекул определяется только температурой рассматриваемой нагретой области и не зависит от способа создания воз-

булденных частиц. Тем самым полученная ранее температура излучения является температурой тех областей шаровой молнии, которые создают ее свечение.

Используя параметры средней шаровой молнии, можно оценить характерное нагревание воздуха вблизи нее, которое определяется ее размером, мощностью энерговыделения и теплоотводом, создаваемым за счет конвекции воздуха около шаровой молнии. Характерный перепад температур для средней шаровой молнии составляет несколько десятков градусов [29], что расходится с полученной температурой излучающих областей шаровой молнии (при мерно 2000 К), занимающих малую часть объема шаровой молнии. Соединяя эти выводы, можно утверждать, что шаровая молния имеет пятнистую структуру и содержит много горячих зон, занимающих в сумме малую часть ее объема. Излучение этих зон воспринимается глазом как излучение всего объема шаровой молнии. Отметим, что данные выводы основывались на наблюдательных параметрах шаровой молнии и не использовали дополнительных предположений о ее структуре и протекающих внутри нее процессах (хотя они и подтверждаются фрактальной моделью шаровой молнии).

Из такого рода анализа, относящегося к отдельным аспектам шаровой молнии, можно получить некоторые численные параметры для средней шаровой молнии, представленные в табл. 9. Отметим, что они основывались на совокупности различных моделей и подходов.

Таблица 9  
Дополнительные параметры средней шаровой молнии

Параметр	Значение
Удельный вес, $\text{г}/\text{см}^3$	$10^{-3,9 \pm 0,5}$
Вес каркаса шаровой молнии, г	$10^{-0,1 \pm 0,9}$
Температура воздуха на границе шаровой молнии, К	$60 \cdot 10^{\pm 0,6}$
Температура горячих (излучающих) областей, К	$1800 \pm 200$
Размер отдельной горячей зоны, мм	$10^{0,2 \pm 0,4}$
Число горячих зон	$10^{2,5 \pm 0,7}$
Поверхностное натяжение, $\text{Дж}/\text{м}^2$	$0,1 \cdot 10^{\pm 0,5}$
Размер частиц каркаса шаровой молнии, нм	$3 \cdot 10^{\pm 0,4}$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основу современного анализа природы шаровой молнии составляют предположение, что шаровая молния управляет известными физическими законами. Тогда, опираясь на логическую замкнутость окружающего нас мира, можно найти другие физические объекты или явления, где эти законы проявляются, и использовать их для моделирования шаровой молнии. Такой подход дает оптимальный путь решения данной проблемы.

Следует отметить, что на данной стадии исследования шаровой молнии можно сделать ряд уверенных утверждений относительно ее природы. К ним относится наличие у шаровой молнии жесткого каркаса, химический характер внутренней энергии шаровой молнии, пятнистая структура ее свечения, что означает, что излучение шаровой молнии создается небольшими горячими зонами, находящимися внутри нее, и т.д. Последующие исследования, использующие богатую информацию по наблюдениям шаровой молнии, позволят углубить эти представления и, тем самым, получить более четкую физическую картину шаровой молнии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Араго Ф. Гром и молния Пер. с фр. СПб., 1853.
2. Ter Haar D. //Physica Scripta, 1989. V.39. P.735.
3. Brand W. Der Kugelblitz. Hamburg, Henri Grand, 1923.
4. Humphreys M.J.// Proc.Amer.Phil.Soc. 1936. V.76. P.613;
5. McNally J.R. Preliminary report on ball lightning. Oak Ridge Nat.Lab. N 3938, May 1966.
6. Rayle W.D. Ball lightning characteristics. NASA Tech.Note. NASA-TN-D3138, 1966.
7. Дмитриев М.Т.//Природа. 1971. N6. С.50.
8. Arabadji W.J.//J.Geophys.Res., 1976. V.81. P.6455.
9. Григорьев А.И., Дмитриев М.Т.//Изв.вузов.Сер.Физика.Депон., 1978, N 1412,2280; 1979, N 29,296.
10. Charman W.N.//Phys. Reports, 1979. V.54. P.261.
11. Стаканов И.П. Физическая природа шаровой молнии. М.:Атомиздат, 1979.
12. Стаканов И.П. О физической природе шаровой молнии. М.:Энерготомиздат, 1985.
13. Keul A.G.//Naturwissenschaften, 1981. V.68, P.296.
14. Keul A.G., Schwarzenbacher K. / Science of Ball Lightning. Ed. by Y.H.Ohtsuki. Singapore.:World Scientific, 1989 . p.58.
15. Григорьев А.И., Григорьева И.Д. Труды З Всесоюзн. Симпоз. по атмосф.электр. Тарту.: Изд.Тарт.Гос.Универс., 1986. С.228.
16. Grigorjev A.I., Grigorjeva I.D., Shirjaeva S.O. / Science of Ball Lightning. Ed. by Y.H.Ohtsuki. Singapore.:World Scientific, 1989 . p.88.
17. Григорьев А.И., Григорьева И.Д.//ЖТФ, 1989. Т.59. С.79.
18. Ohtsuki Y.H., Ofuruton H.//Nuovo Cim., 1986, Ser.C., V.106. P.577.
19. Ohtsuki Y.H., Ofuruton H.//Proc. 9 Intern.Wroclaw Symp.on Elect-

- romagnetic Compatibility , Wroclaw, 1988;p.27.
- 20.Ohtsuki Y.H.,Ofuruton H./ Science of Ball Lightning.  
Ed. by Y.H.Ohtsuki.(World Scientific,Singapore,1989 ).p.31.
- 21.Egely Gy, Hungarian ball lightning observations. Central Research Institute for Physics. 10/D,Budapest,1987.
- 22.Egely Gy. Proc. 9 Intern.Wroclaw Symp.on Electromagnetic Compatibility , Wroclaw,1988;p.15.
- 23.Egely Gy. / Science of Ball Lightning. Ed. by Y.H.Ohtsuki.  
Singapore.:World Scientific,1989.p.19.
- 24.Egely Gy. / Science of Ball Lightning. Ed. by Y.H.Ohtsuki.  
Singapore.:World Scientific;1989.p.81.
- 25.Zou You-Suo. Proc.2 Int.Sympos.on Ball Lightning. Budapest,1990.
- 26.Амиров А.А., Бычков В.Л. Шаровая молния./Под ред.Б.М.Смирнова.  
М.:ИВТАН,1991.Т.2.
- 27.Сингер С.Природа шаровой молнии./Пер.с англ. М.:Мир,1973.
- 28.Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния./Пер.с англ. М.:  
Мир.1983.
- 29.Смирнов Б.М.Проблема шаровой молнии. М.:Наука.1988.
- 30.Singer S./Lightning, Ed. R.H.Golde . London.:Acad.Press,1977.  
P.409.
- 31.Smirnov B.M.//Phys.Rep.,1987.V.152.P.177.
- 32.Смирнов Б.М.// УФН,1990.Т.160.№4,С.1.
- 33.Леонов Р. Загадка шаровой молнии.М.:Наука.1965.
- 34.Имянитов И.М.,Тихий Д.Я. За грязью законов науки. М.:Атомиздат,  
1980.
- 35.Смирнов Б.М.Загадка шаровой молнии. М.:Знание,1987.№5.
- 36.Григорьев А.И. Огненные убийцы. Ярославль,Дебют,1991.
- 37.Argule E. // Nature,1971.V.230.P.179.
- 38.Balyberdin V.V.//Foreign Science Bul.,1966.V.2.No4.P.48;1967.  
V.3: №5.P.103.

39. Barry J.D.// J.Geophys.Res.,1980.V.85.P.4111.
40. Barry J.D., Singer S./Science of Ball Lightning. Ed. by Y.H.Ohtsuki. Singapore.:World Scientific,1989.p.1.
41. Prentice S.A./Lightning. Ed. by R.H.Golde. London.:Acad.Press, 1977).p.465.
42. Смирнов Б.М.//Природа ,1987, N2,C.15.
43. Israel H. Atmospheric Electricity.Jerusalem.:Keter Press Binding.1973.
44. Moore C.B., Vonnegut B./Lightning, Ed.R.H.Golde. London.: Acad.Press,1977.P.51.
45. Iribarne J.V., Cho H.R. Atmospheric Physics.Dordrecht.:Reidel, 1980.
46. Stenholz M.//Nature,1976.V.260.P.596.
47. Колдамасов А.И. Шаровая молния. / Под ред.Б.М.Смирнова. М.: ИВТАН,1990. Т.1.С.8.
48. Fractals in Physics./Ed. by L.Pietronero ,E.Tosatti.-Amsterdam.: North Holland,1986.
49. Vicsek T. Fractal Growth Phenomena.-Singapore.:World Scientific,1987.
50. Smirnov B.M.//Phys.Rep.,1990, V.188, P.1.
51. Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. М.:Наука,1991.
52. Lushnikov A.A., Negin A.E., Pukhomov A.V.//Chem.Phys.Lett., 1990, V.175, P.138.
53. Смирнов Б.М.// УФН,1991.Т.161.№8.С.113..
54. Смирнов Б.М.// УФН,1986.Т.149.С:177.
55. Flory P. Principles of Polymer Chemistry. Ithaka, N.Y.: Cornell Univ.Press,1971.
56. Гросберг А.Ю.,Хохлов А.Р. Статистическая физика молекул. М.: Наука,1989.
57. Смирнов Б.М.// УФН,1991.Т.161.№6.С.173.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
I. Условия и характер наблюдения шаровой молнии .....	4
I.1. Шаровая молния как наблюдаемое явление .....	4
I.2. История исследований и банки наблюдений шаровой молнии .....	6
I.3. Достоверность и точность сообщаемых данных .....	7
I.4. Место наблюдения и расстояние до наблюдателя ...	II
I.5. Условия наблюдения.....	I3
I.6. Характер возникновения и распада .. . . . .	I5
I.7. Вероятность наблюдения и появления шаровой молнии	I8
2. Свойства и параметры наблюдаемой шаровой молнии.....	I9
2.1. Характер движения .....	I9
2.2. Геометрические параметры и время жизни .....	21
2.3. Шаровая молния как источник света .....	24
2.4. Энергетика шаровой молнии .....	26
2.5. Воздействие на человека .....	27
2.6. Средняя наблюдаемая шаровая молния .....	29
3. Моделирование шаровой молнии .....	31
3.1. Шаровая молния на производстве и в лаборатории..	31
3.2. Фрактальная модель шаровой молнии .....	32
3.3. Анализ природы шаровой молнии .....	35
Заключение .....	38
Список литературы .....	39

Борис Михайлович Смирнов

ЧТО ТАКОЕ ШАРОВАЯ МОЛНИЯ

Редактор Н. В. Шумакова  
Техн. редактор С. С. Попова  
Корректор Е. Т. Шудло

Тем. план 1992 г., по письму

---

Подписано в печать 27.03.92 Формат 60x84 I/I6  
Печ.л. 2,75 Уч.-изд.л. 2,5 Тираж 200 экз. С-008-І  
Заказ 256

---

Московский инженерно-физический институт. Типография МИФИ,  
115409, Москва, Каширское шоссе, 31