

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

551.594.2

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ШАРОВОЙ МОЛНИИ*Б.М. Смирнов*

(Институт высоких температур РАН, Москва)

СОДЕРЖАНИЕ

| | | |
|----|---|----|
| 1. | Введение | 43 |
| 2. | Сбор и анализ наблюдений шаровой молнии | 45 |
| | 2.1. Шаровая молния как наблюдаемое явление и банки наблюдений шаровой молнии. | |
| | 2.2. Достоверность и точность сообщаемых данных. 2.3. Выходные данные банков и оценка их точности. 2.4. Распределение шаровых молний по значениям параметров. | |
| 3. | Особенности наблюдения шаровой молнии | 52 |
| | 3.1. Условия наблюдения шаровой молнии. 3.2. Место наблюдения и расстояние до наблюдателя. 3.3. Характер возникновения и распада шаровой молнии. 3.4. Воздействие шаровой молнии на человека. 3.5. вероятность наблюдения и появления шаровой молнии. | |
| 4. | Свойства и параметры наблюдаемой шаровой молнии | 58 |
| | 4.1. Характер движения. 4.2. Геометрические параметры и время жизни. 4.3. Шаровая молния как источник света. 4.4. Энергетика шаровой молнии. 4.5. Другие свойства шаровой молнии. 4.6. Средняя наблюдаемая шаровая молния. | |
| 5. | Моделирование шаровой молнии | 69 |
| | 5.1. Шаровая молния на производстве и в лаборатории. 5.2. Фрактальная модель шаровой молнии. 5.3. Модели шаровой молнии и анализ ее природы. | |
| 6. | Заключение | 79 |
| | Примечание | 79 |
| | Список литературы | 79 |

1. Введение

Шаровая молния — одно из интереснейших явлений природы. Считается большой удачей, если человеку удастся наблюдать шаровую молнию. История наблюдений шаровой молнии насчитывает тысячелетия [1, 2]. Отсюда можно заключить, что ее природа, видимо, связана с естественными явлениями в атмосфере.

Исследования шаровой молнии включают в себя два элемента: сбор и анализ наблюдений шаровой молнии, а также изучение процессов, составляющих ее природу. На обоих направлениях за последнее десятилетие достигнуто существенное продвижение вперед. Кроме того, произошли организационные изменения, которые ускоряют дальнейший прогресс в этих исследованиях. С 1988 г. проводятся международные симпозиумы по шаровой молнии [3, 4], в 1990 г. организован международный комитет по шаровой молнии [4]. Это привело к тесному взаимодействию ученых с разными взглядами на явление, что способствует выработке единых позиций на изучение шаровой молнии, а также единого понимания ее природы, в той степени, в которой единство возможно в науке. Такая тенденция наблюдается в настоящее время и, по моему мнению, в ближайшие несколько лет приведет к тому, что с

точки зрения научных исследований шаровая молния станет таким же явлением, как линейная молния, огни святого Эльма, полярные сияния и другие атмосферные явления.

В этом отношении следует отметить, что проблема шаровой молнии в России традиционно пользовалась большей популярностью, чем в других странах. Поэтому советские ученые всегда занимали ведущие позиции в этих исследованиях. К примеру, всесоюзные семинары по шаровой молнии по уровню и числу участников были сопоставимы с международными симпозиумами. Однако теперь эта ситуация меняется. Общий распад науки и культуры в стране в первую очередь отразился на состоянии таких фундаментальных направлений, которыми занимаются отдельные ученые, а не их коллективы. В соответствии с этим в 1991 г. прошел последний — 5-й Всесоюзный семинар по шаровой молнии и опубликован последний — второй выпуск трудов советских ученых по шаровой молнии [5]. Советский центр по шаровой молнии закрывается с 1992 г. Сейчас трудно оценить масштабы бедствия, но даже при благоприятном исходе событий может быть сохранена лишь малая часть того, что мы имели в 80-х годах.

Два года назад автор написал обзор по шаровой молнии [6], целью которого было проанализировать существующую информацию по шаровой молнии и зафиксировать те элементы в этой проблеме, надежность которых не вызывает сомнений. Поскольку в исследовании шаровой молнии намечилось заметное оживление, это полезно для понимания общих позиций, с которых оно должно проводиться. Хотя данный обзор по своей структуре близок к предыдущему, он преследует другую цель — подвести итоги этим исследованиям на той стадии, когда советские исследования прекращаются.

Опираясь на накопленный опыт, сформулируем кратко современное состояние проблемы шаровой молнии и вклад в него советских исследований, которые выделяются от других в силу разной динамики их последующего развития. Разделив проблему шаровой молнии на две части — наблюдения и природу, отметим, что в настоящее время в ряде стран существует несколько банков, собирающих и анализирующих случаи наблюдения шаровой молнии. Суммарное число таких событий составляет примерно 10 тысяч. Среди них число доступных случаев, информация о которых выходит за пределы этих банков, несколько более 4 тысяч. В 1990 г. при советском центре по шаровой молнии был создан новый банк наблюдательных данных, включающий около 2000 наблюдений шаровой молнии [7]. Этот банк носит название банка Стаханова—Бычкова—Кеула, поскольку его основу составляют данные Стаханова [8, 9], дополненные наблюдательными случаями, которые собраны Бычковым и Кеулом [10, 11]. Достоинством банка является то, что он использует методологию, развитую И.П. Стахановым, и представлен в виде форматов и программ IBM-компьютера, т.е. использует современные возможности обработки информации. Это переводит анализ наблюдательных данных на новый уровень, и поэтому наблюдения шаровой молнии занимают основную часть обзора. Анализ этих данных позволяет с соответствующей точностью понять, что такое наблюдаемая шаровая молния.

За последние два года изменилось отношение к анализу природы шаровой молнии. Я бы сказал, оно стало спокойнее. Этому в большой степени способствовали экспериментальные исследования, проводимые с целью моделирования шаровой молнии или привлекаемые для ее анализа. Имеется большое число случаев получения светящихся образований в атмосфере в лабораторных условиях, в том числе и в исследованиях, где это ставилось целью, хотя воспроизводимость таких экспериментов обычно мала. Например, в сборниках

докладов на 3-м и 4-м Всесоюзных семинарах по шаровой молнии [5, 12] содержится 20 работ, где светящиеся образования — аналоги шаровой молнии — исследовались экспериментально или возникали случайно в физических экспериментах. Весь опыт получения искусственных шаровых молний или их аналогов свидетельствует о том, что они образуются при электрическом или лазерном воздействии на поверхность. Сама шаровая молния как физический объект представляет собой структуру, которая создается из испаренного вещества. Поэтому если под шаровой молнией понимать светящееся образование в воздухе, которое существует без внешнего подвода энергии, то все эксперименты с шаровой молнией ложатся в такую схему. Хотя последующая детализация природы шаровой молнии допускает разные варианты, тем более, что шаровая молния — многогранное явление, сочетающее в себе ряд удивительных свойств, такое понимание шаровой молнии позволяет четко сформулировать направления экспериментальных исследований этого явления.

В предлагаемом обзоре дается современный взгляд на проблему шаровой молнии. Представлен анализ наблюдательных данных, позволяющий сформулировать, что такое наблюдаемая шаровая молния. Кратко описан анализ природы шаровой молнии.

2. Сбор и анализ наблюдений шаровой молнии.

2.1. Шаровая молния как наблюдаемое явление и банки наблюдений шаровой молнии. 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 (рис. 1). От



Рис. 1. Огни святого Эльма в лабораторном исполнении [13]. Согласно анализу авторов это коронный разряд во внешнем электрическом поле и влажной атмосфере (см. также [14, 15]). В зону сильного поля во влажной атмосфере вносится сухой лист (а), рука (б)

НЛО шаровая молния, как атмосферное явление, отличается меньшими размерами и временем жизни, большей близостью к наблюдателю. В силу этих свойств 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. Например, 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.

Исследования шаровой молнии имеют богатую историю, и практически в течение двух тысячелетий это явление обсуждается и анализируется в ученом мире [1, 2]. Основу современных представлений о шаровой молнии составляет обзор и анализ наблюдательных данных. В настоящее время мы располагаем богатой информацией по наблюдаемой шаровой молнии, что можно объяснить двумя факторами. Во-первых, сбор случаев наблюдения шаровой молнии проводится достаточно длительное время, более сотни лет (табл. I); во-вторых, можно дать четкое определение шаровой молнии, отделив ее от других атмосферных явлений.

Таблица I. Сбор данных по наблюдениям шаровой молнии

| Авторы | Годы | Страна | Число обработанных случаев | Литература |
|-------------------------------------|------------|-----------|----------------------------|------------|
| Араго | 1859 | Франция | 30 | [17] |
| Бранд | 1923 | Германия | 215 | [18] |
| Хэмфрейс | 1936 | США | 280 | [19] |
| Мак-Нэлли | 1966 | США | 513 | [20] |
| Рэйл | 1966 | США | 112 | [21] |
| Дмитриев | 1969 | СССР | 45 | [22] |
| Арабаджи | 1976 | Голландия | 250 | [23] |
| Григорьев, Дмитриев | 1978, 1979 | СССР | 327 | [24] |
| Чармэн | 1979 | Англия | 76 | [25] |
| Стаханов | 1979, 1985 | СССР | 1022 | [8, 9] |
| Кеул | 1981 | Австрия | 150 | [10, 11] |
| Григорьев, Григорьева ^{*)} | 1986 | СССН | 2082 | [26 — 28] |
| Отсуки, Офурутон | 1987 | Япония | 2060 | [29 — 31] |
| Эгели | 1987 | Венгрия | 300 | [32 — 35] |
| Зой | 1990 | Китай | 200 | — |
| Бычков | 1991 | СССР | 1840 | [7] |

^{*)} Далее для упрощения этот набор данных, к которому мы часто будем обращаться, представляется как данные Григорьева

К настоящему времени собран и обработан большой материал по наблюдениям шаровой молнии, на основе которого можно составить надежную информацию по количественным параметрам шаровой молнии. В табл. I приведены существующие коллекции случаев наблюдения шаровой молнии. Существенно, что включенные в табл. I банки данных по наблюдению шаровой молнии независимы. Каждый из них использует свой способ обработки наблюдательных данных, а также основан на сообщениях очевидцев из разных регионов земного шара. Поэтому данные, полученные из разных наборов на-

блюдений, взаимно дополняют друг друга и в целом позволяют дать надежную информацию о свойствах шаровой молнии. Этот материал дополняется существующими обзорами, монографиями и популярными изданиями по шаровой молнии [36 — 45].

2.2. 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 существовала длительное время (см., например, [2, 46]). Суть этой гипотезы состоит в том, что сильная вспышка линейной молнии в результате фотохимических процессов может оставить 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 в пользу существования шаровой молнии и в процессе ее наблюдения, 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.

Анализируя достоверность сообщаемых данных, следует отметить, что они часто искажаются в газетных публикациях. Имеется ряд примеров, когда сообщение в газете существенно отличалось от сообщения наблюдателей (см., например, [38, 43]), что объясняется некомпетентностью или недобросовестностью корреспондентов.

Гораздо труднее выяснить достоверность описаний отдельных наблюдателей 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 наблюдаемого явления и сам поверить в это. Во-вторых, пытаясь осмыслить увиденное и вложить это в определенную схему, наблюдатель несколько искажает краски в воспроизводимой картине, а это может отразиться на достоверности отдельных ее деталей. Однако в каждом из банков те описания шаровых молний, которые кажутся недостоверными, отбрасываются. Конечно, это вносит некоторый произвол и выходные параметры банка могут зависеть от позиции его хозяина, но с другой стороны, таким способом убирается недостоверная информация.

Наряду с вышесказанным существуют и объективные ошибки при воспроизведении наблюдаемых фактов, которые обусловлены несовершенством человеческих возможностей при оценке параметров увиденной картины. Возможности человека в этом отношении могут быть установлены из статистической обработки массовых наблюдений других явлений. Удачный пример такого рода приводится в обзоре Чармэна [25], где описан анализ сообщений по наблюдению метеоритов в США. Эти объекты одновременно наблюдались

многими людьми. В каждом случае общие физические характеристики событий были хорошо известны, и по опросу свидетелей была установлена точность, с которой они могли определить параметры метеоритов. Этот опыт полезен при анализе наблюдений шаровой молнии. Согласно этому опыту 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.

Точность сообщаемых данных ограничивается возможностями человеческого глаза как измерительного прибора. Григорьевы [28] провели оценку этой 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 молнии, сообщенных ее наблюдателями.

Следует иметь в виду, что достоверность некоторых сообщений мала, а они могут исказить информацию о наблюдаемой шаровой молнии. Единственный путь — уменьшить влияние недостоверной информации — набрать большое число данных, хотя и в этом случае остается ошибка, которую можно оценить косвенными методами (например, по корреляции между различными банками; см. п. 2.3).

2.3. Выходные данные банков и оценка их точности. Достоверность и точность сообщаемых данных по отдельным шаровым молниям определяет характер представления наблюдательных данных. Общее отношение к представлению числовых параметров шаровой молнии было выработано Мак-Нэлли [20] и Стахановым [8, 9]. Обобщая их опыт, можно предложить оптимальный характер представления числовых данных. Во-первых, каждый параметр по совокупности наблюдений шаровой молнии удобно представить в виде гистограмм, разделив шкалу параметров на некоторые интервалы. Во-вторых, для этой цели удобно использовать логарифмическую шкалу с примерно одинаковыми интервалами в логарифмическом масштабе. Опыт показывает, что наиболее удобная шкала содержит интервалы (в безразмерных единицах) < 1 , $1 - 2$, $2 - 5$, $5 - 10$, $10 - 20$, $20 - 50$, $50 - 100$, > 100 . Верхняя и нижняя границы могут быть смещены.

При таком способе представления данных учитывается, что точность сообщаемых данных ограничена множителем порядка 2. Кроме того, поскольку интервалы величин близки, это позволяет выделить наиболее существенные интервалы распределения искомой величины. И, наконец, идентичная форма представления позволяет сравнивать данные разных банков.

В настоящее время мы располагаем большой статистикой наблюдений шаровой молнии, так что суммарное число данных составляет несколько тысяч для большинства параметров. Представляет интерес вопрос о точности этих данных. Опыт показывает, что функции распределения шаровых молний по значениям данного параметра зависят не только от региона, к которому относятся корреспонденты, но также и от характера формирования банка и, в частности, способа отбора достоверных данных. Поскольку в этом есть некоторый произвол, важно иметь критерий сравнения соответствующих распределений для разных банков. Такой критерий позволяет ответить и на вопрос, с какой точностью реально справедливо распределение для данного параметра шаровой молнии при существующей информации.

Таким критерием, на мой взгляд, является корреляционный коэффициент между распределениями разных банков, который строится обычным способом (см., например, [47]):

$$k = \frac{\sum_i (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\left[\sum_i (X_i - \bar{X})^2 \sum_i (Y_i - \bar{Y})^2 \right]^{1/2}}; \quad (1)$$

здесь X_i — число наблюдений в первом банке, для которых рассматриваемый параметр находится в i -м интервале, Y_i — та же величина для второго банка, \bar{X} , \bar{Y} — средние значения этих величин, т.е. полные числа наблюдений, деленные на числа интервалов.

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. Таким образом, корреляционный коэффициент равен 1 для одинаковых распределений и равен 0, если эти распределения носят случайный характер.

В табл. II приводится корреляционный коэффициент для распределения по параметрам в банках Григорьева [27] и Стаханова—Бычкова—Кеула [7]. Такое сравнение интересно в двух отношениях. Во-первых, эти банки построены по близким схемам на основе методики Стаханова [8,9]. Во-вторых, они включают в себя основную массу собранных и обработанных наблюдений (оба банка дают примерно 80% всех опубликованных данных).

Таблица II. Корреляционный коэффициент между распределениями наблюдательных данных банка Григорьева [27] и Стаханова—Бычкова—Кеула [7]

| Параметр | Число событий | | Корреляционный параметр |
|-------------------------------------|------------------------------|----------------|-------------------------|
| | Стаханов— Бычков—Кеул [7] | Григорьев [27] | |
| Месяц наблюдения | 1796 | 1614 | 0,98 |
| Время суток | 1436 | 668 | 0,45 |
| Связь с грозой | 868 | 1186 | 0,98 |
| Ближайшее расстояние от наблюдателя | 1454 | 1617 | 0,89 |
| Диаметр | 1796 | 1614 | 0,99 |
| Время жизни | 437 | 1604 | 0,31 |
| Цвет | 1803 | 1573 | 0,42 |
| Яркость | 1321 | 802 | 0,70 |

Значения корреляционного коэффициента дают возможность судить о

точности распределений для соответствующего параметра. Чтобы оценить эту связь, сделаем следующую операцию. Возьмем суммарное распределение шаровых молний по яркости (см. ниже рис. 13) и преобразуем числа заполнений X_i соответствующих интервалов по следующей схеме $X_i \rightarrow X_{i-1}$, $X_1 = 0$, $X_7 \rightarrow X_6 + X_7$, где i — номер интервала. Далее возьмем корреляционный коэффициент между начальным и конечным распределениями. Получим $k = 0,39$. Если изменить числа заполнения по схеме $X_i \rightarrow X_{i+1}$, $X_7 = 0$, $X_1 \rightarrow X_1 + X_2$, то получим корреляционный коэффициент между начальным и конечным распределениями $k = 0,43$. Таким образом, корреляционный коэффициент 0,4 соответствует случаю, когда ошибка в каждом наблюдении яркости шаровой молнии равна 2. Если изменить значения яркости в $\sqrt{2}$, то корреляционный коэффициент между начальным и конечным распределениями равен примерно 0,8.

Если распределения заданы в аналитическом виде, можно получить соответствующее выражение для корреляционного коэффициента. Пусть $P(X)dX$ — вероятность того, что параметр X находится в интервале от X до $X + dX$. Пусть $P_1(X)$ отвечает первому распределению, $P_2(X)$ — второму. Тогда корреляционный коэффициент между этими распределениями равен:

$$k = \int_0^{\infty} \frac{dP_1(X)}{dX} \frac{dP_2(X)}{dX} dX \left[\int_0^{\infty} \left(\frac{dP_1(X)}{dX} \right)^2 dX \int_0^{\infty} \left(\frac{dP_2(X)}{dX} \right)^2 dX \right]^{-1/2}. \quad (2)$$

Например, если распределение шаровых молний по диаметрам d в соответствии с анализом Стаханова [9] задать в виде $P(X) = X \exp(-X/d)/d^2$, то $k = (Z + Z^{-1})^3$, где $Z = (d_1/d_2)^{1/2}$. В частности, если d_2 отличается от d_1 в 1,5 раза, то $k = 0,82$, если $d_2/d_1 = 2$, то $k = 0,51$.

2.4. Распределение шаровых молний по значениям параметров. Отдельную проблему представляет вид функции распределения шаровой молнии по заданному параметру. Вид функции распределения не может быть выбран на основе наблюдательных данных. Действительно, наблюдательные данные представляются в виде гистограмм, и число интервалов переменной в этих гистограммах ограничено. Во всяком случае, оно меньше 10, причем увеличение числа интервалов является превышением точности и может привести к искажению информации. Поэтому при аппроксимации данных в виде непрерывной функции рассматриваемого параметра можно выбрать разные типы таких функций.

Дайкхайд [48], проанализировав эту проблему, пришел к выводу, что наиболее приемлемой является лог-нормальная функция распределения. Основанием для его вывода послужило и то, что такое распределение оказывается наиболее подходящим для тока и связанных с ним параметров линейной молнии при разрядах облако—земля [49]. Лог-нормальное распределение имеет вид

$$f(X) = (2\pi\sigma)^{-1/2} \exp[-(\lg X - \lg \bar{X})^2 / 2\sigma^2], \quad (3)$$

где \bar{X} — среднее значение данной величины, σ — стандартное отклонение.

Далее будем использовать лог-нормальное распределение со следующей оговоркой. Из смысла функции распределения следует, что она имеет максимум внутри интервала ее существования, а на краях этого интервала ($X = 0$, $X = \infty$) мала или обращается в нуль. Поэтому ее можно использовать в случаях, когда она удовлетворяет этим условиям, в частности, для распределения по диаметру, интенсивности свечения, энергиям шаровой молнии. В других случаях, когда функция распределения имеет максимум при малых X , лог-нормальное распределение неприемлемо. Это имеет место для распределения шаровых молний по времени жизни и по наименьшему расстоянию от наблюдателя.

Отметим, что лог-нормальное распределение требует следующего усреднения:

$$\lg \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_i N_i \lg X_i; \quad (4)$$

N_i — число наблюдений, когда рассматриваемая величина равна X_i , т.е. находится в i -м интервале, N — полное число наблюдаемых событий ($N = \sum_i N_i$). Это соотношение можно переписать в виде:

$$\bar{X} = \left(\prod_i X_i^{N_i} \right)^{1/N}, \quad (5)$$

т.е. в качестве \bar{X} выбирается геометрически средняя величина. Стандартное отклонение равно:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_i N_i (\lg X_i - \lg \bar{X})^2. \quad (6)$$

В данном распределении среднее значение величины $X_{\text{ср}}$ превышает его наиболее вероятное значение \bar{X} и равно

$$X_{\text{ср}} = \int X f(X) dX = \bar{X} \exp(\sigma^2 \ln^2 10 / 2) = \bar{X} \exp(2,65\sigma^2). \quad (7)$$

Лог-нормальное распределение является наиболее удобным видом функции распределения при анализе большинства наблюдательных параметров шаровой молнии. На рис. 2 приводятся результаты Дайкхайса по аппроксимации на основе лог-нормальной функции наблюдательных данных из банка Стаханова—Бычкова—Кеула.

Мерой точности для описания наблюдаемого распределения на основе лог-нормальной зависимости является корреляционный коэффициент

$$k = \frac{\sum_i X_i Y_i}{\left(\sum_i X_i^2 \sum_i Y_i^2 \right)^{1/2}};$$

здесь $X_i = \int f(X) dX - n^{-1}$, $Y_i = N_i N^{-1} - n^{-1}$, где интеграл берется по данному интервалу, n — число интервалов, N_i — число наблюдений, для которых величина X находится в i -м интервале, N — полное число наблюдений.

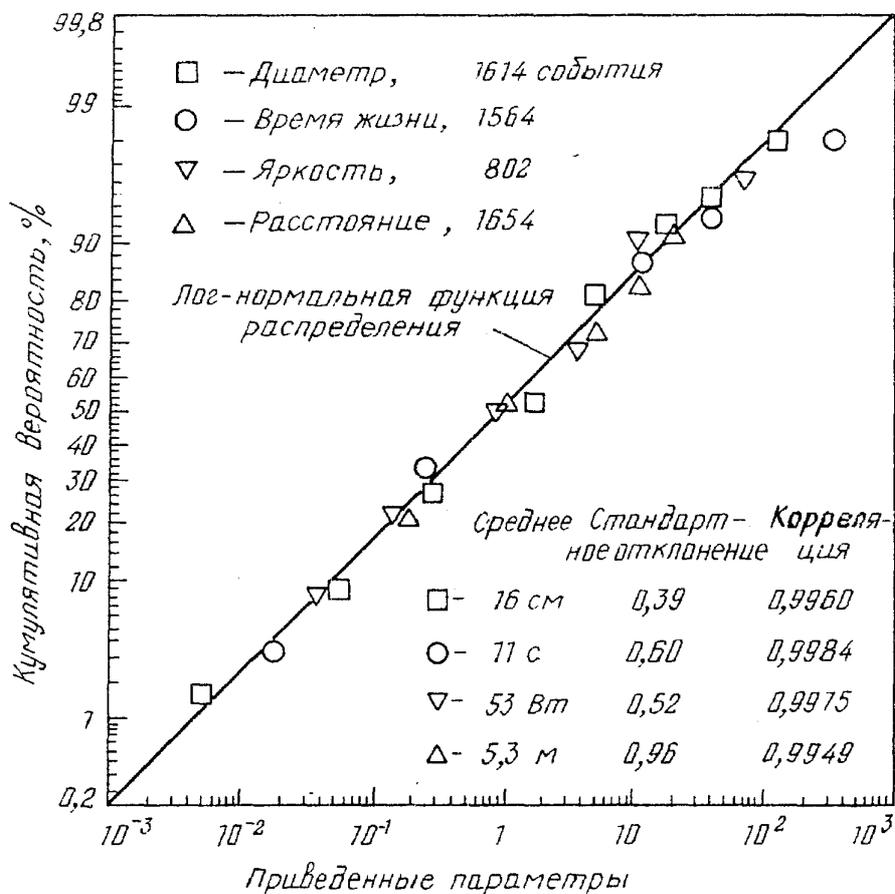


Рис. 2. Аппроксимация наблюдательных данных Стаханова—Бычкова—Кеула лог-нормальной функцией распределения. Приводятся данные Дайкхайса для кумулятивного (т.е. суммарного по всем предыдущим интервалам) распределения

3. Особенности наблюдения шаровой молнии

3.1. Условия наблюдения шаровой молнии. Важную роль в понимании природы шаровой молнии играют условия, при которых она наблюдается, а также особенности ее поведения при наблюдении. Они позволяют получить представление о факторах, влияющих на образование шаровой молнии и ее эволюцию в процессе существования. Принято считать, что образование и существование шаровой молнии управляется электрическими процессами в атмосфере. Обычно имеется корреляция между грозовой погодой и наблюдением шаровой молнии. Если просуммировать данные Мак-Нэлли (513 случаев), Рэйла (112 случаев), Стаханова—Бычкова—Кеула (1328 случаев) и Григорьева (1924 случая), то из общего числа 3877 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 [29 — 31], использующими также большую статистику (2060 случаев): 89% наблюдений относится 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 расхождение между приведенными данными для Японии и "континента", возможно, связано с особенностями японской погоды. В летние месяцы в ясные дни влажность воздуха в Японии превышает 80%.

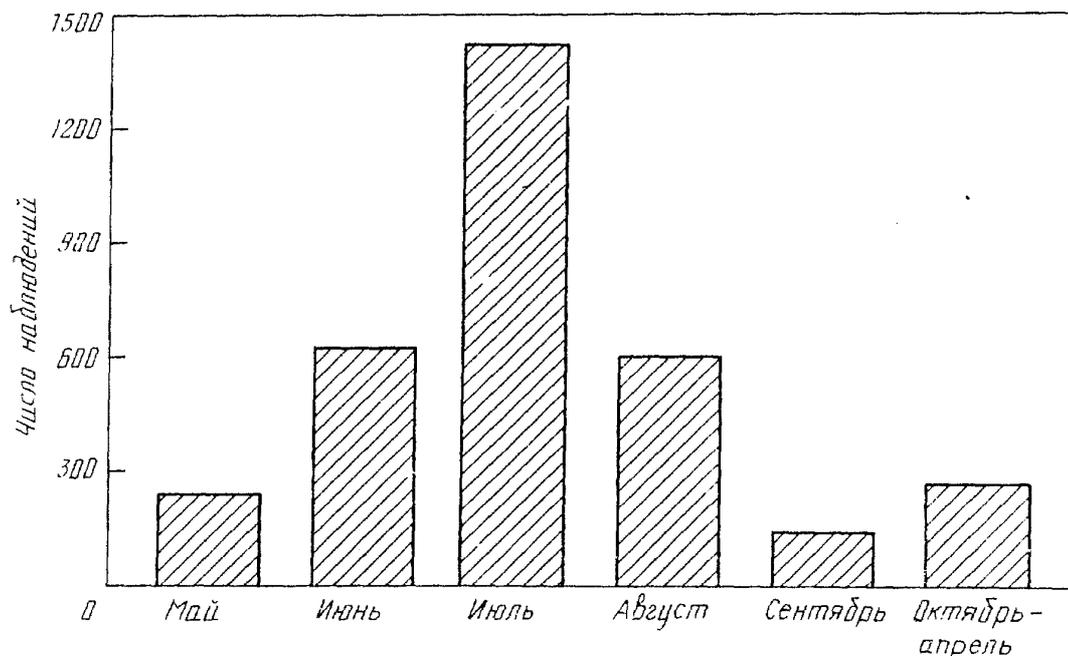


Рис. 3. Сезонное распределение шаровой молнии в Австрии, Венгрии и СССР (3286 наблюдаемых случаев). Использовано 1713 случаев из банка Григорьева [27], 133 случая Эгели [32, 34] и 1440 случаев Стаханова—Бычкова—Кеула [7]

Косвенным доказательством связи между возникновением шаровой молнии и грозовой погодой является распределение шаровых молний по месяцам (рис. 3). Введем корреляционный коэффициент обычным способом согласно формуле (1):

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

где X_i относится к распределению обычных молний, Y_i — к распределению шаровых молний, индекс i отмечает месяц (или группу зимних и примыкающих к ним месяцев); \bar{X} , $\bar{Y} = 1/n$ — средние значения этих величин, n — число выбранных интервалов (в данном случае $n = 6$). В табл. III представлены значения корреляционного коэффициента для вероятности появления обычной и шаровой молнии. Как видно, данные, полученные при использовании разных банков, близки, и среднее значение корреляционного коэффициента равно $k = 0,84 \pm 0,04$. Отсюда можно сделать вывод, что линейная и шаровая молнии в большинстве случаев являются следствием одного начала. На рис. 4 представлено суммарное распределение шаровых молний по времени дня, когда они наблюдались. Оно также коррелирует с соответствующим распределением линейных молний.

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

| Характер распределения | Обычная молния | Шаровая молния |
|----------------------------|--|---------------------|
| Корреляционный коэффициент | 0,83 [9] 0,79 [27] 0,86 [29, 30] | — 0,88 [27] — |

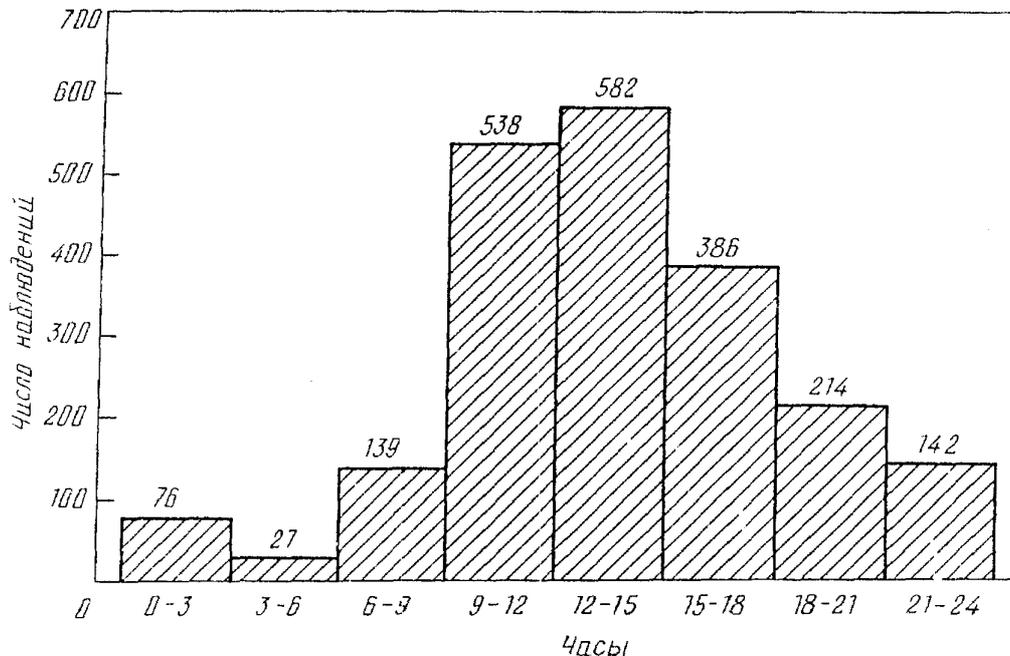


Рис. 4. Распределение шаровых молний по времени наблюдения в течение суток (2104 наблюдений). Использовано 1436 случаев из банка Григорьева [27] и 668 случаев Стаханова—Бычкова—Кеула [7]

3.2. Место наблюдения и расстояние до наблюдателя. Представляет интерес место и характер наблюдения шаровой молнии. Примерно половина шаровых молний наблюдается в помещениях. Согласно данным Рэйла [21] эта величина составляет 48%, Чармэн [25], 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. IV приводятся соответствующие данные Григорьева [26, 27]. Добавим к этому, что согласно данным Григорьева [27] в 35% случаев шаровая молния наблюдалась в городах, в 64% — в сельской местности.

Таблица IV. Место наблюдения шаровой молнии [26, 27] (1984 случая)

| Место | Доля, % | Место | Доля, % |
|------------------|---------|-----------------------|---------|
| Внутри помещения | 50,2 | У берега реки, озера | 4,0 |
| На улице | 24,5 | В горах | 2,3 |
| В поле | 9,5 | В небе с земли | 4,1 |
| В лесу | 4,4 | В облаках, с самолета | 1,0 |

Отметим, что в ряде случаев шаровая молния наблюдалась с самолетов. Это свидетельствует о возможностях ее образования на больших высотах.

Имеется несколько случаев [42 — 45], когда ее наблюдали внутри самолета, не столь редки случаи столкновения шаровой молнии с самолетом.

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. V и на рис. 5 представлена функция распределения шаровых молний по ближайшим расстояниям от наблюдателя.

Таблица V. Распределение шаровых молний по наименьшим расстояниям от наблюдателя

| Диапазон расстояний, м | Число случаев | | | | Доля, % |
|------------------------|--------------------|----------------|------------|-------|---------|
| | Стаханов и др. [2] | Григорьев [16] | Эгели [21] | Сумма | |
| 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 |

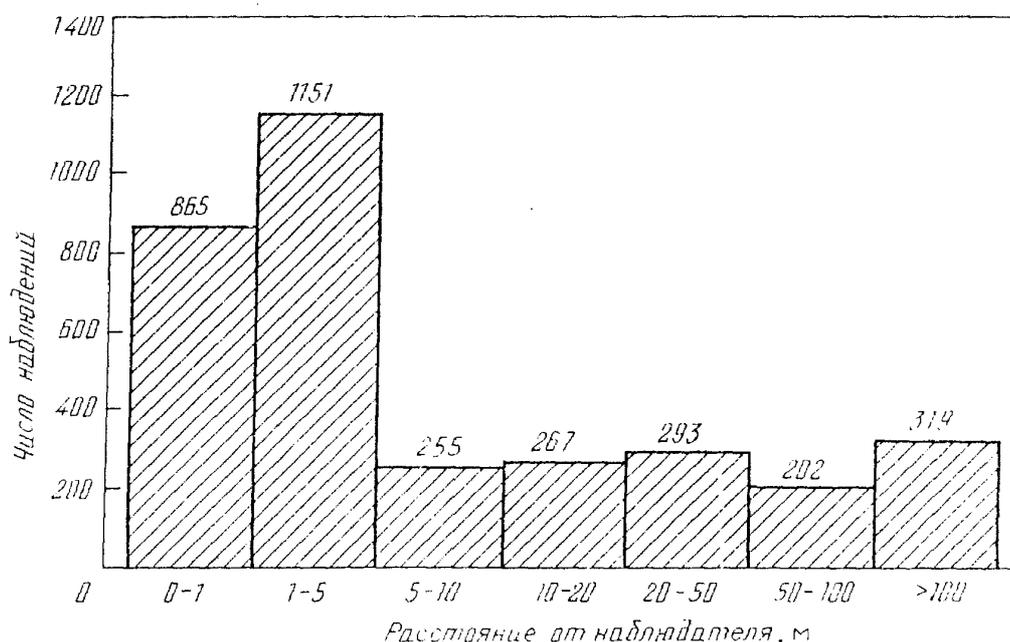


Рис. 5. Суммарное распределение по ближайшему расстоянию шаровой молнии от наблюдателя (3352 случая). Использовано 1454 случая из банка Григорьева [27], 244 случая Эгели [32, 34] и 1654 случаев Стаханова—Бычкова—Кеула [7]

Представим вероятность обнаружения 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.

3.3. Характер возникновения и распада шаровой молнии. Электрические явления в атмосфере способствуют образованию шаровой молнии. На рис. 6 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".

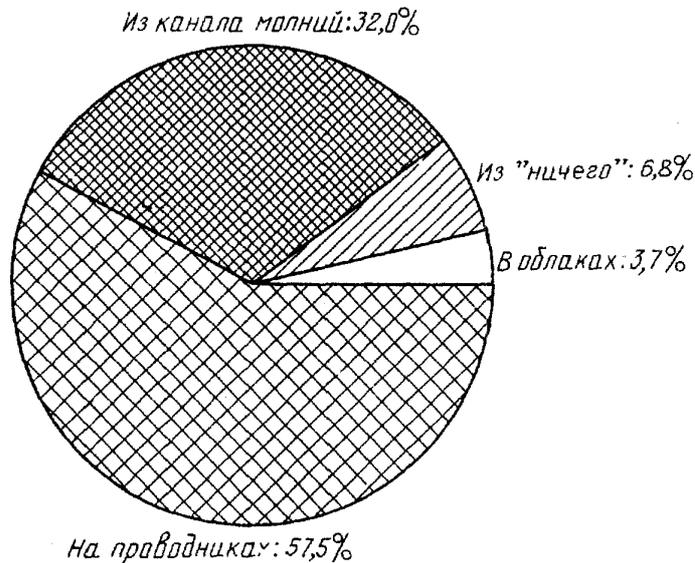


Рис. 6. Характер образования шаровой молнии (353 наблюдаемых случая). Использовано 67 случаев из банка Стаханова [9] и 286 случаев из банка Григорьева [27]

Шаровая молния может закончить свое существование спокойно и со взрывом. На рис. 7 даются суммарные результаты для распределения по каналам распада шаровой молнии с учетом данных разных банков. 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.

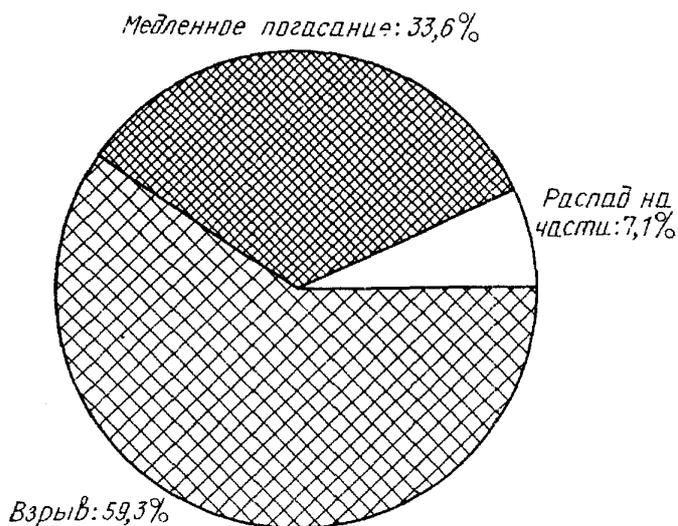


Рис. 7. Распределение шаровых молний по каналам распада (2864 наблюдаемых случая). Учтены 421 случай Мак-Нэлли [20], 78 случаев Рэйла [21], 51 случай Чармэна [25], 1131 случай Григорьева [27], 127 случаев Эгели [32, 34] и 1056 случаев Стаханова—Бычкова—Кеула [7]

Обычно взрыв шаровой молнии происходит без больших разрушений. Из 335 сообщений о взрыве шаровой молнии среди данных Стаханова [9] 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 отно-

сительно невелика, поэтому для людей, попадающих в зону взрыва шаровой молнии, это, как правило, не кончается трагически.

3.4. Воздействие шаровой молнии на человека. Встреча с шаровой молнией обычно происходит без особых последствий для наблюдателя, особенно если это имеет место внутри помещений. Однако такие встречи не всегда бывают безобидными и иногда приводят к человеческим жертвам. Среди более тысячи описаний наблюдений шаровой молнии, собранных И.П. Стахановым, сообщается о пяти случаях смерти, хотя не всегда это было результатом прямого воздействия шаровой молнии. Анализ Григорьева [27] показывает, что к таким сообщениям следует относиться с осторожностью уже и потому, что часто эта информация исходит не от непосредственных наблюдателей событий. Во всяком случае согласно накопленному опыту вероятность гибели людей под действием шаровой молнии весьма мала, за исключением случаев, когда происходит электрический взрыв с сильными разрушениями.

Взрывы, инициированные шаровой молнией, могут привести к сильным разрушениям. В каждом банке наблюдательных данных имеется немало случаев разрушения домов и повреждений внутри них под действием шаровой молнии. Имеются фотографии таких случаев (см. [50]). Обычно это происходит в сельской местности, где защита от линейной молнии не так эффективна, как в городах. Из всего этого можно сделать вывод, что в рассмотренных случаях имеет место электрический ток в атмосфере, который вызван шаровой молнией. Поэтому опасность шаровой молнии для человека состоит в том, что она в грозовую погоду может вызвать электрический пробой в атмосфере. Возникающий электрический ток использует энергию атмосферного электрического поля, которая намного превосходит внутреннюю энергию шаровой молнии. Поэтому воздействие возникающего при этом электрического тока на человека и проводники значительно сильнее, чем воздействие самой шаровой молнии.

Следует отметить, что во всех случаях встречи с шаровой молнией, когда она оставляет следы на теле человека или вызывает смерть человека, действие шаровой молнии на человека подобно поражению электрическим током. В небольшом числе случаев отмечено, что действие шаровой молнии в спокойном состоянии на находящихся рядом людей может привести к ожогам и травмам. Один из таких случаев, происшедших в 1975 г. в Англии, описан в статье [51]. Соприкосновение с шаровой молнией оставило свои следы на участнице этого эпизода. Левая рука, которой женщина отмахнулась от шаровой молнии, покраснела и распухла. Ноги покраснели и онемели. Такое действие может вызвать прохождение электрического тока по телу. К этой информации следует добавить, что согласно Григорьеву [27] в 3 случаях его коллекции сообщается об ожогах от шаровой молнии, подобных действию ультрафиолетового излучения.

3.5. 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 [21] среди 4400 опрошенных им сотрудников НАСА 180 наблюдали шаровую молнию. Стаханов [9] оценивает вероятность наблюдения шаровой молнии в течение жизни человека как $P = 10^{-3}$. Наиболее надежная информация по этому

вопросу следует из данных Эгели [32, 34]. 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 [32]. 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, который 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 [34]. Отсюда получаем еще одну верхнюю оценку для вероятности наблюдения шаровой молнии в течение жизни человека $P = 2 \cdot 10^{-3}$. Суммируя все вышеуказанные данные, находим для искомой вероятности

$$P = 10^{-2,2 \pm 0,5}. \quad (8)$$

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

$$W = P/\tau p(0), \quad (9)$$

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

$$W = 10^{1,3 \pm 1,0} \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}. \quad (10)$$

Полученную величину удобно сравнить с плотностью частоты появления обычной молнии, которая равна [52] $5,4 \pm 2,1 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Взяв отношение этих величин, находим, что на обычную молнию приходится следующее число шаровых молний:

$$n = 4 \cdot 10^{\pm 1,2}. \quad (11a)$$

Заметим, что оценка Барри [37, 53, 54] для вероятности наблюдения шаровой молнии, приходящейся на единицу времени и площади, равна $10^{-9} - 10^{-8} \text{ км}^{-2} \text{ мин}^{-1}$. Отношение полученных величин дает, что вероятность наблюдения возникшей шаровой молнии человеком составляет

$$w = 10^{-4,1 \pm 1,3}. \quad (11b)$$

Как видно отсюда, шаровая молния не является редким явлением. Однако она наблюдается в основном с небольших расстояний. Поэтому, хотя вероятность появления шаровой молнии не мала, только небольшая часть шаровых молний фиксируется человеком, т.е. вероятность ее наблюдения является малой величиной.

4. Свойства и параметры наблюдаемой шаровой молнии

4.1. Характер движения. Среди двух свойств шаровой молнии отметим, что характер движения ее обычно плавный и горизонтальный. Горизонтальное движение отмечалось в 53 % из 110 наблюдательных случаев Рэйла [21], в 68% из 1006 случаев Стаханова [8, 9] и в 75% из 1743 случаев коллекции Григорьева [127]. При этом, согласно Рэйлу [6], в 18 % случаев шаровая

молния двигалась вертикально (вниз или вверх) и в 18% имела сложную траекторию. Согласно данным Стаханова [8, 9] 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 обработки результатов видно, что наиболее часто шаровая молния совершает плавное горизонтальное движение. При этом возможны и другие типа 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 Стаханова [9]. Шаровая молния хорошо "чувствует" открытые двери, окна, может проникать через них, если понадобится, по ломаным траекториям, может сама "находить" такие отверстия. Такие случаи зафиксированы в разных банках наблюдательных данных.

Обычно шаровая молния движется по воздуху, но нередки и случаи, когда она катится по земле или полу. Мне приходилось наблюдать катящиеся по земле светящиеся шары диаметром в несколько сантиметров, которые образовывались при замыкании электрических проводов трамвайной линии.

Иногда шаровая молния, падающая на землю, упруго отскакивает от нее подобно мячу. Например, Тимошук [55] описывает наблюдавшуюся им шаровую молнию диаметром примерно 10 см, которая двигалась по толстой наклонной ветке, ускоряя свое движение и подскакивая на неровностях. Упав на мостовую, она несколько раз плавно отскочила от нее подобно воздушному шару, причем высота подскока составляла последовательно 20, 12 и 5 см. Далее она распалась на части. Другой пример такого рода представлен на рис. 8 [9], когда шаровая молния образовалась при коротком замыкании стержня паяльника и совершила много отскоков от стола.

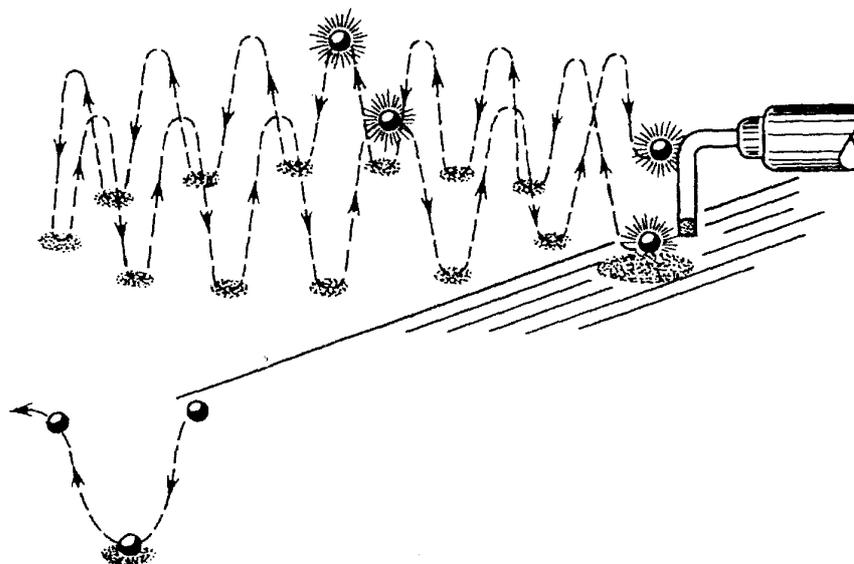


Рис. 8. Траектория светящегося образования, возникающего в результате короткого замыкания паяльника

4.2. 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 суммарным данным Стаханова—Бычкова—Кеула [7] и Григорьева [27] из 3123 случаев наблюдения шаровой молнии в $91 \pm 1\%$ наблюдений она имеет сферическую форму.

Существенно, что в большинстве случаев шаровая молния сохраняет свою форму в процессе эволюции. Так, согласно данным Григорьева [27], 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 на 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.

При анализе числовых значений для параметров наблюдаемой шаровой молнии следует заметить, 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. В табл. VI содержатся значения среднего диаметра шаровой молнии согласно разным наборам наблюдений. Среднее значение диаметра $\bar{d} = 23 \pm 5$ см. Отметим, что ранее без учета новых наборов данных подобным способом было получено среднее значение диаметра [38, 40] $\bar{d} = 28 \pm 4$ 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. На рис. 9 представлено распределение шаровых молний по диаметру, полученное путем использования суммарных данных. Если это распределение аппроксимировать лог-нормальной функцией (3), предложенной для него Дайкхайсом, то параметры этого распределения следующие: $\bar{X} = 18$ см, $\sigma = 0,4$, а среднее значение диаметра оказывается равным 27 см, что в пределах точности результат совпадает с предыдущими значениями.

Таблица VI. Средний диаметр наблюдаемой шаровой молнии

| Набор данных | Мак-Нэлли [20] | Рэйл [21] | Чармэн [10] | Стаханов— Бычков— Кеул [7] | Григорьев [27] | Эгели [32, 34] |
|--------------|-------------------|--------------|----------------|----------------------------------|-------------------|-------------------|
| Число данных | 446 | 98 | 64 | 1614 | 1796 | 204 |
| d , см | 30 | 32 | 26 | 24 | 19 | 35 |

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 [27] эту зависимость удобно аппроксимировать как комбинацию нескольких экспонент

$$P(t) = \sum_i A_i \exp(-t/\tau_i). \quad (12)$$

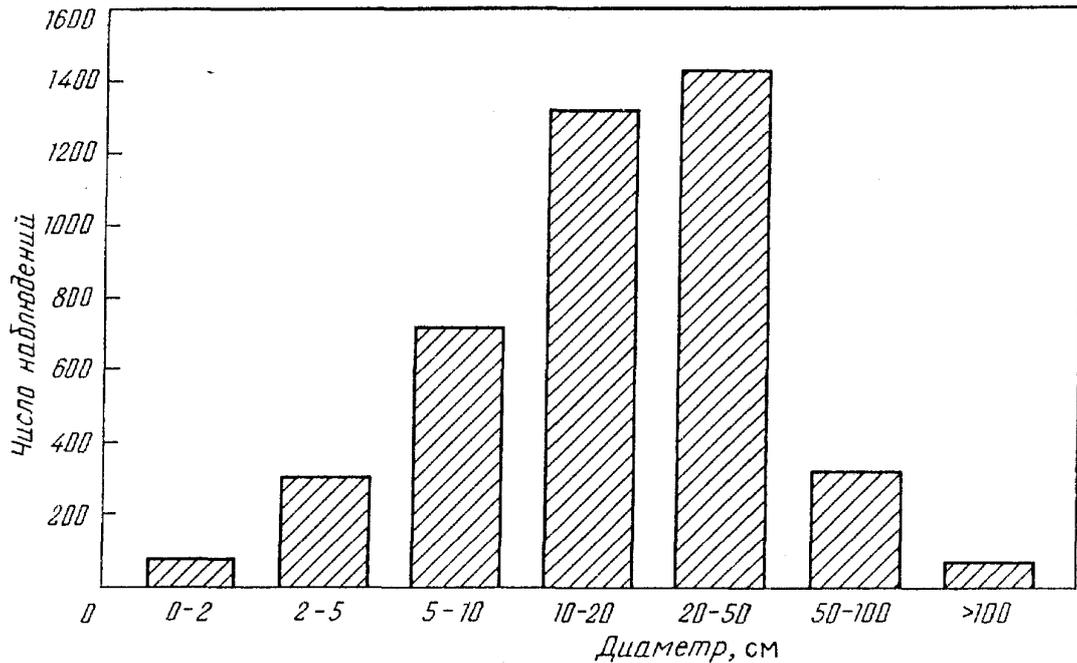


Рис. 9. Суммарное распределение шаровых молний по диаметру (4219 наблюдений). Использовано 446 случаев Мак-Нэлли [20], 98 случаев Рэйла [21], 64 случая Чармэна [25], 1796 случаев Григорьева [27], 204 случая Эгели [32, 34] и 1611 случай Стаханова—Бычкова—Кеула [7]

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

$$\tau_1 = \int_0^{\infty} t |dP/dt| dt, \quad (13a)$$

время, характеризующее скорость распада в начальный момент времени,

$$\tau_2 = - \left. \frac{dP}{dt} \right|_{t=0}, \quad (13б)$$

а также времена, через которые сохранится соответствующая часть шаровых молний:

$$P(\tau_3) = 1/e, \quad (13в)$$

$$P(\tau_4) = 1/2. \quad (13г)$$

Значения средних времен жизни шаровой молнии согласно разным наблюдательным данным представлены в табл. VII. При этом заметим, что Григорьев [27] использовал только те данные своего банка, когда время жизни четко фиксировалось, т.е. наблюдалось 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 VII. Средние времена жизни шаровой молнии, с

| | Число случаев | τ_1 | τ_2 | τ_3 | τ_4 |
|--------------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|
| Мак-Нэлли [20] | 445 | 12 | 4 | 4,5 | 3 |
| Рэйл [21] | 95 | 14 | 14 | 14 | 10 |
| Стаханов—Бычков—Кеул [7] | 1564 | 26 | 31 | 16 | 10 |
| Григорьев [27] | 437 | 40 | 5 | 9 | 4,5 |
| Эгели [32] | 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 [21]. 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 τ_4 , которая с учетом данных табл. VII равна $\tau_4 = 8 \cdot 10^{\pm 0,3}$ с. Кроме того, используемой является величина τ_2 , характеризующая скорость распада в начальный момент времени. Усреднением данных табл. VII получаем $\tau_2 = 9 \cdot 10^{\pm 0,3}$ с. Как видно, значения данных параметров совпадают в пределах их точности. Поэтому далее будем использовать эти величины в качестве среднего времени жизни шаровой молнии. На рис. 10 представлено распределение шаровых молний по временам жизни, построенное на основе суммарных данных.

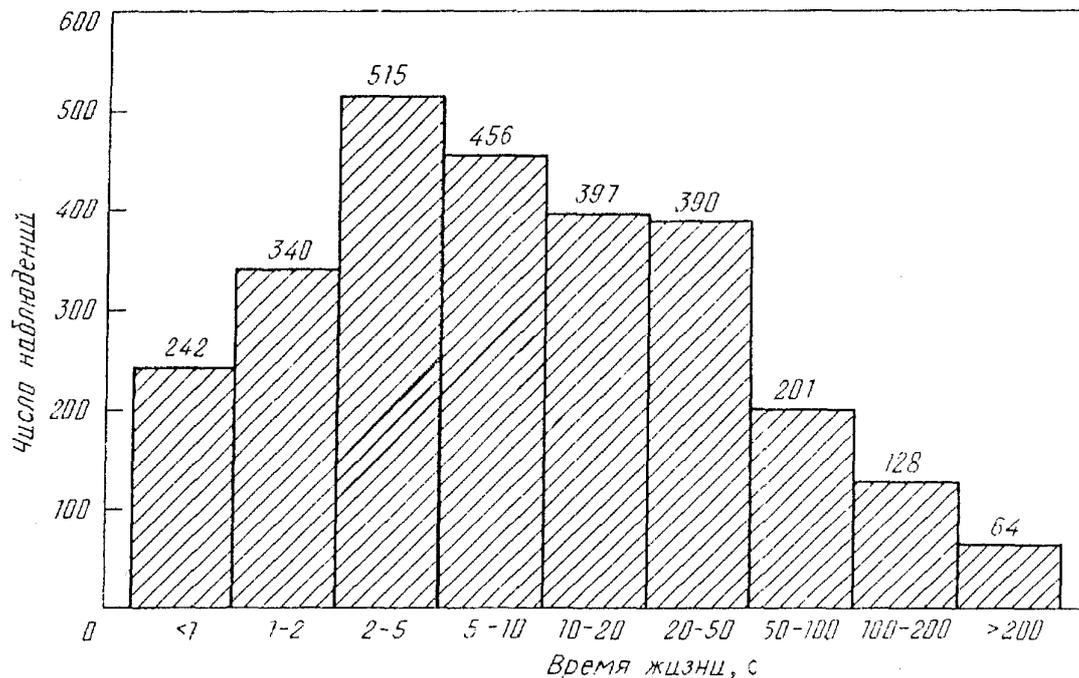


Рис. 10. Суммарное распределение шаровых молний по времени жизни (2733 наблюдений). Использовано 445 случая Мак-Нэлли [20], 95 случаев Рэйла [21], 437 случаев Григорьева [27], 152 случая Эгели [32, 34] и 1604 случая из банка Стаханова—Бычкова—Кеула [7]

Интересно, что время жизни шаровой молнии коррелирует с диаметром — чем больше диаметр шаровой молнии, тем больше время жизни. Эта закономерность впервые была установлена Стахановым [8, 9], который заметил, что среди больших шаровых молний гораздо больше долгоживущих (табл. VIII). Обработаем данные Стаханова с учетом использованного им вы-

ражения для вероятности $P(t)$ того, что шаровая молния выживет к моменту времени t . Зададим это выражение в виде (12)

$$P(t) = A \exp(-t/t_1) + (1 - A)\exp(-t/t_2), \quad (14)$$

где в соответствии с данными Стаханова $t_1 = 11$ с, $t_2 = 54$ с. Будем считать, что параметр A зависит от диаметра шаровой молнии d и зададим его зависимость от d в виде

$$A = \exp(-d/d_1),$$

где d_1 — параметр. Обработка данных табл. VIII дает $d_1 = 34$ см. На рис. 11 приводится среднее время жизни шаровой молнии τ_1 как функция диаметра согласно приведенным выше данным Стаханова, а также по данным Григорьева [56] и Амирова—Бычкова [7].

Таблица VIII. Связь вероятности выживания шаровой молнии с ее диаметром d

| Область d , см | Число событий | Вероятность выживания $P(t)$ | | |
|------------------|---------------|------------------------------|------------|------------|
| | | $t = 0$ | $t = 20$ с | $t = 50$ с |
| 0 — 10 | 246 | 1 | 0,22 | 0,08 |
| 10 — 30 | 548 | 1 | 0,36 | 0,16 |
| > 30 | 211 | 1 | 0,58 | 0,32 |

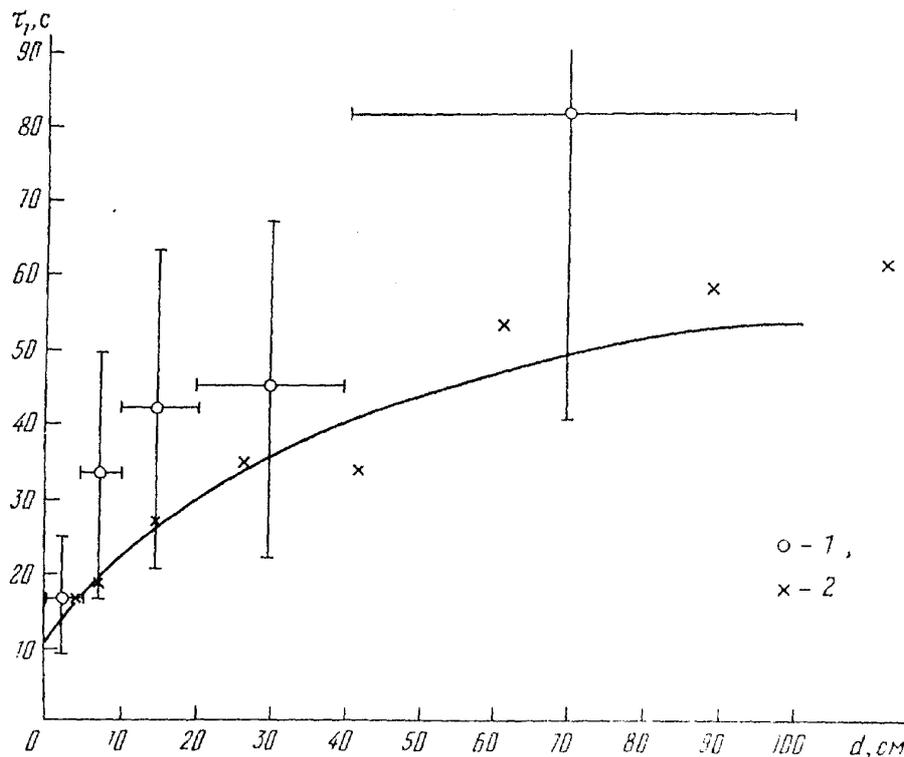


Рис. 11. Связь среднего времени жизни τ_1 шаровой молнии с диаметром. Сплошная кривая построена на формулам (14), (15) с использованием данных Стаханова (9); 1 — данные Григорьева и др. [55], 2 — данные банка Стаханова—Бычкова—Кеула [7]

4.3. 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. IX собраны данные по цвету шаровой молнии согласно разным наблюдательным данным. В ней

использована упрощенная схема распределения шаровых молний по цвету, предложенная Стахановым [8, 9]. 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%. На рис. 12 приведены суммарные данные для распределения шаровых молний по цвету.

Таблица IX. Сравнение распределения наблюдаемых шаровых молний по цвету

| Наблюдаемый цвет | Число наблюдений | | | Вероятность данного цвета, % |
|-------------------------------|---|--------------------------|----------------|------------------------------|
| | Сумма Мак-Нэлли, Рэйл, Чармэн, Эгели [20, 21, 25, 32] | Стаханов—Бычков—Кеул [7] | Григорьев [27] | |
| 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) | $1,5 \pm 0,3$ |
| 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 |

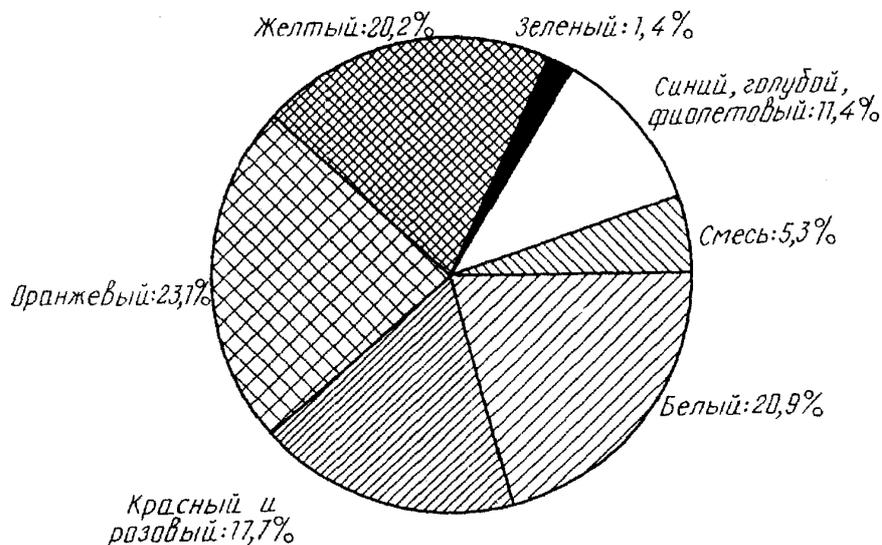


Рис. 12. Распределение шаровых молний по цветам (4112 случаев). Использовано 311 случаев Мак-Нэлли [20], 152 случая Рэйла [21], 68 случаев Чармэна [25], 1803 случая Григорьева [27], 205 случаев Эгели [32, 34] и 1573 случаев Стаханова—Бычкова—Кеула [7]

Следует отметить, что наряду с цветной шаровой молнией, которая является источником света, имеются сообщения о серой или черной шаровой молнии, которая представляет собой структуру, наблюдаемую в отраженном свете. Пример искусственного образования такого рода представлен в работе [68].

Грубый анализ [21] показывает, что шаровая молния является источником света средней интенсивности. Существенный прогресс в этом отношении был достигнут Стахановым [9], который собрал информацию о яркости ша-

ровой 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 оценить, что яркость шаровой молнии в каждом случае определяется с точностью до множителя 2 — 3. Большая статистика наблюдений частично уменьшает эту погрешность. В схеме Стаханова удачно выбрана шкала для определения яркости шаровой молнии — путем сравнения ее с яркостью электрической лампы. Поэтому эта схема была использована в последующих банках данных. Суммарные данные по яркости шаровой молнии приведены на рис. 13.

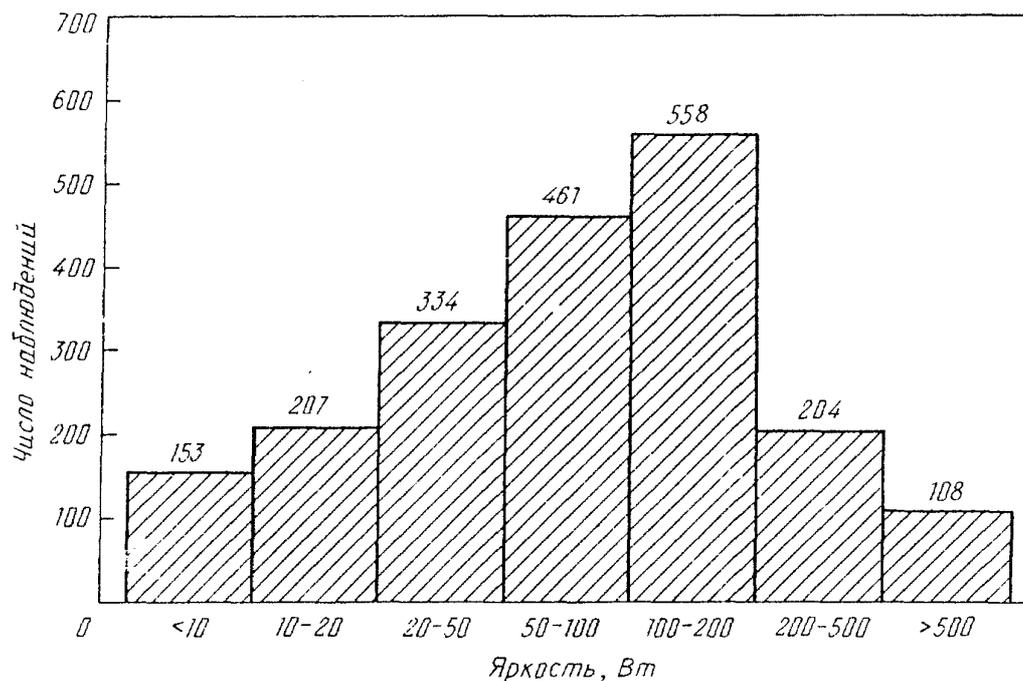


Рис. 13. Яркость шаровой молнии в сравнении с яркостью электрической лампы соответствующей мощности (2123 наблюдаемых случая). Использовано 1321 случаев из банка Стаханова [9] и 802 случая из банка Григорьева [27]

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

$$\chi(n, J_0) = \sum_i (W(J_i, J_k) - W_{\text{набл}}(J_i, J_k))^2, \quad (15)$$

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.

Если обработать эти данные, аппроксимируя их лог-нормальной зависимостью (3), получим для наиболее вероятной яркости, выраженной в единицах мощности эквивалентной электрической лампы $\bar{J} = 70 \text{ Вт}$, для средней яркости $J_0 = 130 \text{ Вт}$ и для величины стандартного отклонения $\sigma = 0,5$. Как видно, погрешность, связанная с методом обработки, значительно меньше ошибки, которая отвечает способу получения результата путем визуального наблюдения.

4.4. Энергетика шаровой молнии. В большинстве наблюдаемых случаев шаровая молния распадается, не оставляя после себя следов. В некоторых случаях это приводит к действиям и разрушениям, по которым можно оценить затраченную на это энергию. Такие случаи анализировались Барри [25], Стахановым [12] и Эгели [34]. 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

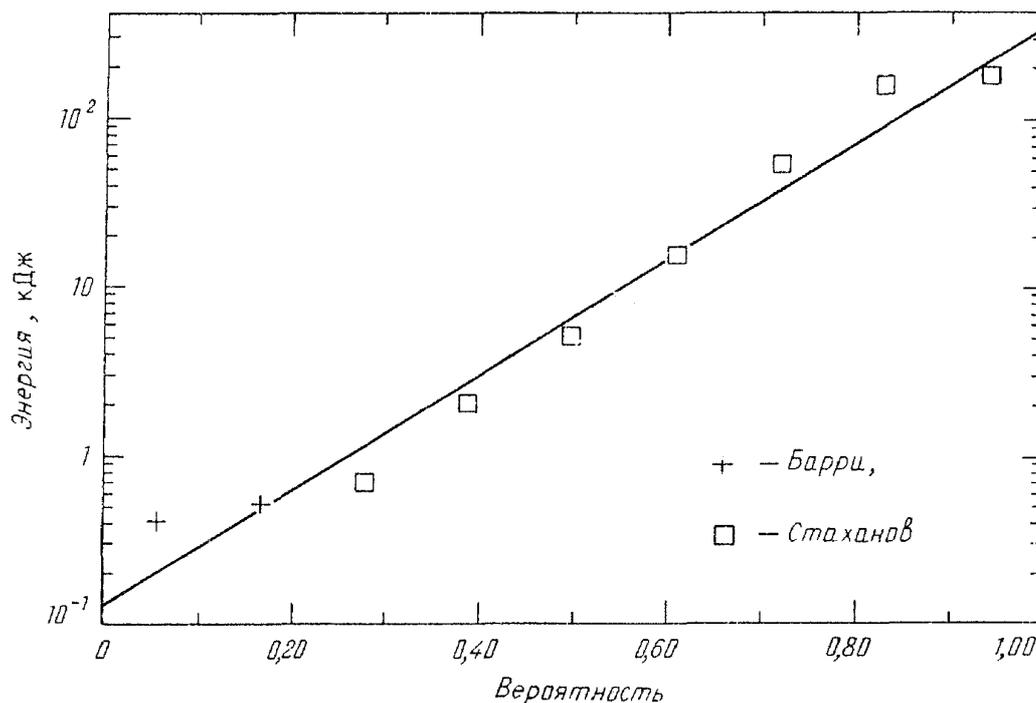


Рис. 14. Вероятность того, что энергия шаровой молнии превышает данную величину. Используются оценки Барри [37] и Стаханова [9] для случаев энергоснабжения, когда оно заведомо определялось внутренней энергией

на рис. 14 (более подробный анализ построения функции распределения содержится в работах [138, 40, 58]). Этому распределению соответствует наиболее вероятная энергия шаровой молнии, она составляет $7 \text{ кДж} \cdot 10^{\pm 0,2}$. Средняя внутренняя энергия шаровой молнии равна $200 \text{ кДж} \cdot 10^{\pm 0,2}$. Обработка данных рис. 15 путем аппроксимации их лог-нормальным распределением (3) дает следующие значения для параметров этого распределения: наиболее вероятная внутренняя энергия равна 6 кДж, средняя внутренняя энергия составляет 60 кДж и стандартное отклонение $\sigma = 0,93$.

Полученные результаты дают для средней мощности шаровых молний:

$$P = \bar{E}WS = 10^{4,1 \pm 1,2} \text{ кВт}, \quad (16)$$

где W — вероятность возникновения шаровой молнии, приходящаяся на единицу площади в единицу времени, $S = 5,1 \cdot 10^8 \text{ км}^2$ — площадь поверхности Земли. Отметим, что средняя мощность линейных молний порядка [59 — 61] $5 \cdot 10^7 \text{ кВт}$. Как видно, если считать шаровую молнию вторичным явлением обычной молнии, то на создание шаровых молний тратится $10^{-3,6 \pm 1,2}$ часть энергии линейных молний.

Отметим, что внутренняя энергия шаровой молнии относительно мала и не может привести к серьезным разрушениям. Ее наиболее вероятная внутренняя энергия соответствует химической энергии нескольких спичек или эквивалентна нескольким граммам взрывчатого вещества.

4.5. Другие свойства шаровой молнии. Среди других свойств отметим способность шаровой молнии быть источником тепла. Согласно данным Рэйла [21] об ощущении тепла сообщается в 4 случаях из его коллекции, тогда как в 100 случаях оно отрицается. В коллекции Стаханова [8, 9] 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 [27] 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 от расстояния до шаровой молнии.

Появление шаровой молнии может сопровождаться несильным звуком — потрескиванием, шипением, свистом. Шаровая молния создает искажение в радиоприемнике. Дмитриев [22] 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. Однако часто наблюдается притяжение шаровой молнии к металлическим предметам, часто она движется в направлении проводящих объектов или проводов. Согласно Мак-Нэлли [20] это явление наблюдается в 20% случаев, согласно Рэйли [21] — в 16% случаев. Иногда отмечается электризация и притяжение диэлектрических предметов — сухих листьев, травы, листов бумаги и т.д. Отметим, что все эти явления можно объяснить тем, что шаровая молния несет небольшой электрический заряд.

Другой характер имеют случаи, когда в результате действия шаровой молнии возникает электрический ток, приводящий к разрушению, в том числе к перегоранию электрических проводов. Эгели [32, 34] проанализировал ряд таких случаев и оценил, что заряд, прошедший в этих случаях по проводам, составлял единицы и десятки кулон. Поскольку такой заряд не может нести сама шаровая молния, снова приходим к выводу, что шаровая молния вызывает электрический пробой атмосферы, что и приводит к разрушениям.

Проанализируем гипотетические электрические свойства шаровой молнии. Максимальный заряд, который в принципе может нести шаровая молния,

соответствует пробойной напряженности электрического поля у ее поверхности, составляющей 25,5 кВ/см [62]. Если это поле создается электрическим зарядом, находящимся на поверхности шара диаметра 23 см, то этот заряд равен $4 \cdot 10^{-6}$ Кл. Этот заряд относительно мал и не представляет опасности для человека. Например, представим себе, что человек замкнул через себя электророзетку, находящуюся под напряжением 220 В. Считая сопротивление человека равным 30 кОм, найдем, что указанный выше заряд пройдет через него за время порядка $5 \cdot 10^{-4}$ с (ток равен 7 мА). Наш опыт свидетельствует, что это не опасно.

Рассматриваемый электрический заряд отвечает электрической энергии порядка 1 Дж, что значительно меньше внутренней энергии шаровой молнии. Все это приводит к выводу, что электрические свойства шаровой молнии не существенны в энергетическом воздействии шаровой молнии на окружающие объекты. Тем более, что использованы завышенные значения электрических параметров.

Шаровая молния может оставлять после себя запах, свидетельствующий о химическом составе присутствующего в ней вещества. Это может быть запах серы, окислов азота, озона.

Имеется единственный случай, когда удалось определить химический состав следа шаровой молнии [62, 63]. Автор этого эксперимента М.Т. Дмитриев — специалист в области химии атмосферы, находился летом 1965 г. на р. Онега в экспедиции. Им были подготовлены пробирки для взятия проб воздуха. Волею случая в это время появилась шаровая молния. Она двигалась мимо ученого, оставляя за собой след в виде голубоватой дымки. М.Т. Дмитриев использовал свою аппаратуру для анализа следа шаровой молнии. Химический анализ воздуха показал повышенное содержание в нем только двух компонент — озона и двуокиси азота. Их максимальное содержание составило $1,3 \text{ г/м}^3$ для озона и $1,6 \text{ г/м}^3$ для двуокиси азота. Это в 50 — 100 раз больше, чем в обычном воздухе.

4.6. Средняя наблюдаемая шаровая молния. На основе представленных результатов по банкам наблюдения шаровой молнии и анализу наблюдательных данных внутри этих банков удобно построить наблюдательную модель шаровой молнии, которая обладает средними параметрами шаровых молний, полученных из наблюдений. 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 анализировали величину погрешности, связанной 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. X) имеют большую научную ценность.

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

содержатся в функции распределения. Например, при анализе времени жизни шаровой молнии отмечалось, что существуют два типа шаровых молний (согласно Стаханову [9]) или три типа шаровых молний (согласно Григорьеву [27]), которые существенно различаются своими временами жизни. Другой важный элемент, не учитываемый моделью средней шаровой молнии, относится к корреляции между отдельными параметрами.

Таблица X. Средние параметра шаровой молнии

| Параметр, единица измерения | Значение параметра |
|--|---|
| 1. Вероятность сферической формы, % | 91 ± 1 |
| 2. Диаметр, см | 23 ± 5 |
| 3. Время жизни, с | $8 \cdot 10^{\pm 03}$ |
| 4. Внутренняя энергия, кДж | $10^{06 \pm 02}$ |
| 5. Цвет | Белый, красный, оранжевый, желтый (примерно 20% каждый) Голубой, синий, фиолетовый, зеленый ($11 \pm 2\%$) |
| 6. Световой поток, лм | 1500 ± 300 |
| 7. Световая отдача, лм/Вт | $0,6 \cdot 10^{\pm 05}$ |
| 8. Корреляция с атмосферным электричеством | $80 \pm 10\%$ шаровых молний в континентальных странах наблюдается в грозовую погоду |
| 9. Сезонность | Свыше 80% шаровых молний наблюдается в летние месяцы |
| 10. Распад | В $50 \pm 10\%$ случаях существование шаровой молнии заканчивается взрывом |
| 11. Вероятность наблюдения шаровой молнии в течение жизни человека | $10^{-22 \pm 03}$ |

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.

5. Моделирование шаровой молнии

5.1. 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 [64] 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 течение 3 — 5 секунд; при этом наблюдатель видел его как шар. По истечении указанного времени 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 даст

возможность более глубоко изучить ее. Потому в течение истории изучения шаровой молнии неоднократно предпринимались попытки воспроизвести шаровую молнию как целое в лабораторных условиях. Среди многих попыток были и такие, когда удавалось получить светящиеся образования в воздухе. Но в конечном итоге даже эти успешные попытки не позволяли углубить наши представления о природе шаровой молнии. Они не явились этапом, дающим возможность ставить более детальные эксперименты и получать ответы на новые вопросы о природе этого явления. И причина такой неудачи в сложности явления, которая не позволяет простым способом установить связь между наблюдательными фактами и экспериментальным моделированием шаровой молнии как целого.

Вместе с тем, лабораторные моделирования шаровой молнии с целью воспроизвести это явление как целое дали полезный опыт. Они доказали возможность получения в атмосферном воздухе светящихся образований, которые являются аналогами шаровой молнии, с помощью разных электротехнических установок. Ранние исследования такого рода освещены в монографиях и обзорах (например, [6, 36 — 38]).

Во всех ранних экспериментах в качестве источника энергии шаровой молнии использовался электрический газорый разряд, что объясняется удобством этого способа вложения энергии и подходящей энергетикой 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 при некоторых постановках задачи мог бы существовать и после выключения внешнего источника.

Кратко остановимся на основных методах лабораторного воспроизведения шаровой молнии как целого. Исследования по экспериментальному моделированию шаровой молнии можно разделить на три группы. К первой из них относятся работы [65 — 69], где использовался электрический источник энергии с запасом энергии порядка 1 МДж. При коротком замыкании батарей зажигается электрическая дуга, которая под действием магнитного поля электрического тока или другим способом выбрасывается из зоны между электродами. Начало этих исследований связано со случайными короткими замыканиями в электрической системе американских подводных лодок. В силу большой стоимости и низкой воспроизводимости этих экспериментов они не были доведены до конца — их результаты можно считать предварительными.

Другое направление исследований связано с зажиганием искры в химически активной смеси. Эти эксперименты были проведены Барри [37, 70 — 72] в атмосферном воздухе с примесью пропана и продолжены японскими учеными [30, 73], которые расширили круг используемых химических добавок и применили современную диагностику, в том числе и видеотехнику. Характерная электрическая энергия в этих экспериментах составляет примерно 300 Дж, объем рабочей камеры составляет 100 — 250 л. Иногда искра инициировала образование светящегося шара диаметров в несколько сантиметров со временем жизни порядка 1 с. Также отмечалась низкая воспроизводимость этого процесса.

Третье направление начиналось раньше других. В конце прошлого века

Тесла разработал мощную электроразрядную технику, которая наряду с решением других задач позволила ему в 1900 г. получить шаровую молнию в лабораторных условиях. Далее его судьба сложилась трагически, работа по воспроизведению шаровой молнии не была опубликована полностью. Поэтому полученные им результаты имели большую неопределенность, и без знания деталей трудно было оценить степень его достижения. Недавно эти эксперименты были возобновлены братьями Корум [74, 75], которые использовали технику Тесла в современном варианте. Основным элементом радиочастотного генератора Тесла являлся спиральный волновод, индуктивно связанный с искровым преобразователем, работающим на частоте 67 кГц. Мощность сигнала на электродах (примерно 3 кВт) обеспечивала пробой воздуха на длине 7,5 м.

Радиочастотный разряд позволяет организовать пробой воздуха при относительно малых энергозатратах. При некоторых условиях (геометрии, материале электродов) это приводит к возникновению светящихся образований в воздухе. Корумы наблюдали светящиеся шарики миллиметровых размеров, которые возникали на канале стримера и прорастали до сантиметровых размеров, имея время жизни порядка секунд. Видимо, прорастание этих структур происходило по мере добавления материала, переносимого по стримерному каналу.

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.

В последние годы появилось большое число экспериментальных исследований, в результате которых получались светящиеся образования в воздухе, причем эти образования могут рассматриваться как лабораторные аналоги шаровой молнии. Ранее указывалось, что только в сборниках [5, 12] опубликовано два десятка работ такого рода, выполненных советскими учеными. При этом, поскольку предыдущий опыт показал, что получение светящегося образования в воздухе, с одной стороны, не является сенсацией, и, с другой стороны, не решает проблему шаровой молнии, отношение к таким работам стало другим. Они с самого начала не ставились с целью воспроизвести шаровую молнию, а были связаны с исследованием определенных процессов в газоразрядной или лазерной плазме. Такой подход повысил профессиональный уровень исследований, давая информацию о деталях процесса, которые необходимы при анализе явления. Далее будут использованы результаты некоторых работ этой серии

5.2. Фрактальная модель шаровой молнии. Шаровая молния — сложное многогранное явление: изучение его разных сторон требует

отдельного описания и специальных моделей. Существует большое число моделей шаровой молнии с разной глубиной анализа. Часть из них отражена в существующих обзорах и монографиях [6, 8, 36 — 40]. 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 [76], которая позволяет ответить на этот вопрос и находится в согласии с информацией по процессам релаксации вещества при сильном возбуждении.

Рассмотрим характер релаксации слабоионизованной 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 слабоионизованная 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 ней падает и прочность системы, которая и ограничивает размер кластеров микронами [77]. Образование таких систем достаточно полно изучено в восьмидесятые годы, имеется достаточное число экспериментальных исследований и компьютерных моделей (см., например, обзоры и монографии [76, 78 — 81]).

Центральным элементом фрактальной концепции является наличие у шаровой молнии жесткого каркаса. В свое время И.П. Стаханов ставил вопрос, является ли шаровая молния физическим телом или же явлением, т.е. совокупностью процессов в атмосферном воздухе. Фрактальная концепция считает шаровую молнию структурой, т.е. физическим телом. Нетривиальной является сама идея о наличии у шаровой молнии жесткого каркаса. Трудно сказать, кто первый предложил эту гипотезу, но возможно она имеет длинную историю. Например, в работе Зайцева [82] в 1972 г. утверждалось: "Возникновение шаровой молнии начинается с образования объемных сетчатых структур". Однако только в работе Александрова и др. [83] в 1982 г. эта концепция была сформулирована достаточно обосновано. Авторы опирались на свои исследования взрыва металлических проволочек под действием проходящего через них электрического тока [84]. Они обнаружили, что при определенных условиях релаксации металла в вакуумной камере образуются паутинообразные конструкции, которые прикрепляются к стенкам камеры и могут существовать в таком состоянии 1 — 2 суток. Измерения авторов для поперечного размера "паутинок" дало оценку 0,01 мкм. Перенося эти свойства на шаровую молнию, авторы [83] назвали ее структурой структурой нитевидного аэрозоля и на ос-

нове этого проанализировали некоторые свойства шаровой молнии, в частности обосновав устойчивость конструкции шаровой молнии действием электрического заряда, который она несет.

Фрактальная концепция шаровой молнии развивается вместе с развитием самой науки. Эта концепция не могла возникнуть в семидесятых годах, поскольку тогда не существовало представлений о фрактальных агрегатах. На первой стадии своего существования фрактальная концепция полагала, что каркас шаровой молнии по своей структуре напоминает аэрогель [85 — 87], поскольку в то время это был единственный макроскопический объект, элементами которого являются фрактальные агрегаты. Аэрогель производится в растворах. Он состоит из манометровых частиц, представляя собой сильно разреженное пористое вещество, минимальный средний удельный вес которого может лишь ненамного превышать удельный вес воздуха.

Однако оказалось, что в растворе и газе процесс слипания фрактальных агрегатов развивается по-разному и приводит к образованию разных макроскопических структур, хотя элементами обеих структур являются фрактальные агрегаты. Это стало ясно после изящных экспериментов Лушникова, Пахомова, Негина [88], которые показали, что если релаксирующая плазма с образованными там фрактальными агрегатами находится во внешнем электрическом поле умеренной напряженности, фрактальные агрегаты объединяются во фрактальные нити. Диаметр отдельной фрактальной нити составляет десятки микрон, длина несколько сантиметров; в условиях эксперимента [88], основу которого составляло лазерное испарение металлической мишени, одновременно образовывались десятки и сотни отдельных фрактальных нитей.

Фрактальная нить представляет собой новый физический объект (см. [89]), имеющий как научный, так и технологический интерес. С точки зрения шаровой молнии этот объект интересен как элемент ее структуры. Находящиеся в пространстве фрактальные нити переплетаются между собой, образуют фрактальный клубок [90, 91], который и составляет каркас шаровой молнии. Нетрудно видеть, что основные условия образования фрактальной нити и фрактального клубка — испарение материала мишени в виде слабоионизованного пара и присутствие внешнего электрического поля — выполняется во всех экспериментах по получению лабораторных аналогов шаровой молнии. Это и обосновывает фрактальную концепцию шаровой молнии в изложенном варианте. К тому же как фрактальные клубки могут быть объяснены паутинсюобразные структуры, которые иногда наблюдались на периферии тлеющего разряда в экспериментах Лушникова, Негина, Пахомова, когда разряд зажигался между электродами? Это лишний раз подтверждает справедливость рассматриваемой концепции.

Фрактальная концепция шаровой молнии обладает рядом 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. С одной стороны, 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. Тем самым фрактальный клубок — система фрактальных нитей — является своеобразным физическим объектом. По плотности он соответствует газу, но как связанное состояние вещества может проявлять свойства жидкости и твердого тела. Сочетание таких свойств проявляется в поведении шаровой молнии. Этим объясняется возможность шаровой молнии летать в воздухе, а также ее свойство проникать через узкие щели и малые отверстия под действием потоков воздуха, что связано с малыми значениями коэффициента поверхностного натяжения вещества фрактального клубка.

Как система, состоящая из пересекающихся нитей, фрактальный клубок допускает фазовый переход клубок—глобула, изученный для полимерной нити с самопересечениями [92 — 94]. 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 [91] в 700 ± 200 К, причем погрешность отвечает только неопределенности в параметрах средней шаровой молнии, т.е. реально гораздо выше. Поэтому отсюда можно ожидать в реальных ситуациях как сферической формы шаровой молнии, так и других типов ее формы, а также переход между ними. Такая картина реально и наблюдается.

Наиболее важными являются энергетические и излучательные процессы в шаровой молнии. Поскольку фрактальный клубок состоит из манометровых частиц, то существенная часть молекул вещества фрактального клубка находится на его внутренней поверхности. Это создает большую удельную поверхностную энергию фрактального клубка, которая не 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 [95], которая распространяется вдоль фрактальной нити. В этом случае внутренняя энергия системы идет на плавление структуры, а выделение энергии имеет место 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 остынет. Тепловая волна одновременно распространяется по многим фрактальным нитям, т.е. одновременно существует много одновременно светящихся элементов. Отметим, что численные оценки, относящиеся к параметрам средней шаровой молнии, не противоречат наблюдаемым данным. Среди них: размер светящегося элемента порядка 1 нм, число одновременно светящихся элементов 10^2 — 10^3 .

При рассматриваемом механизме энерговыделения и свечения шаровая молния может давать любой цвет в зависимости от примесей, находящихся в ее структуре. Она может быть черной или серой, если внутри нее не происходят процессы энерговыделения. Тогда шаровая молния подобна паутине.

Отметим еще одну особенность рассматриваемой системы. Поскольку отдельные области внутри нее имеют температуру в районе 2000 К, в них происходят ионизационные процессы. В результате этого шаровая молния становится источником плазмы, и на пути ее движения образуется проводящий канал. Степень ионизации внутри шаровой молнии и на ее следе очень мала, но она на несколько порядков превышает степень ионизации атмосферного воздуха. Поэтому шаровая молния может инициировать электрической пробой

в атмосфере в условиях грозовой погоды, когда в атмосфере присутствуют высокие электрические поля.

Фрактальная структура шаровой молнии может реализовываться в разных вариантах. На данном этапе мне представляется наиболее вероятным, что каркас шаровой молнии состоит из окислов, подобно керамикам, кроме того, что в этих соединениях реализуются наиболее высокие химические связи, это утверждение поддерживается экспериментами с образованием фрактальных нитей и состоящих из них клубков, а также тем, что существующие аэрогели состоят только из окислов. Однако возможны и другие варианты состава фрактальных структур. Среди них — углеродные и органические структуры, а также полимерные структуры. Характер процессов в последнем случае проанализирован В.Л. Бычковым [96].

Подводя итог анализу фрактальной модели шаровой молнии, отметим, что она объясняет основные свойства шаровой молнии: форму, вес, свечение, связь с электрическими явлениями в атмосфере. Существенным достоинством модели является то, что на ее основе можно объяснить существование долгоживущих плазменных и неплазменных светящихся образований, получаемых в лабораторных условиях. Фрактальная модель дает возможность проанализировать эволюцию системы в этих экспериментах, и такой анализ следует провести на дальнейшей стадии изучения шаровой молнии.

5.3. Модели шаровой молнии и анализ ее природы. Было бы неправильно думать, что одна, пусть очень красивая, модель способна описать разнообразные свойства шаровой молнии. Шаровая молния — многогранное явление, и для анализа отдельных сторон этого явления нужны специфические модели. Поэтому многие модели шаровой молнии, претендующие на описание отдельных ее свойств, сохраняют свои достоинства независимо от общего взгляда на физику шаровой молнии. Далее в качестве примера мы рассмотрим характер движения шаровой молнии в атмосфере.

При рассмотрении этих свойств, оставив в стороне вопрос о структуре шаровой молнии, достаточно считать, что шаровая молния — некий связанный объект с малым удельным весом. Такая общая модель позволяет проанализировать характер взаимодействия шаровой молнии с окружающим воздухом с использованием наблюдательных данных. Это позволяет оценить некоторые параметры шаровой молнии.

Проанализируем сначала теплообмен шаровой молнии с окружающим воздухом. Энергия, выделяемая внутри шаровой молнии, частично передается окружающему воздуху и уносится им в виде конвективных потоков. Вдали от шаровой молнии характер движения и распределения температуры воздуха такие же, как при выходе из трубы вдали от нее. Поэтому для анализа теплообмена между шаровой молнией и окружающим воздухом можно воспользоваться классическими результатами [97], относящимися к характеру движения нагретого воздуха при его выходе из трубы. Струи воздуха, движущиеся вокруг шаровой молнии, создают подъемную силу, которая равна силе сопротивления [98], действующей на шаровую молнию со стороны движущегося воздуха. Чем больше энерговыделение внутри шаровой молнии, тем сильнее нагревается воздух на границе с ней и тем выше его скорости, а тем самым подъемная сила, действующая на шаровую молнию.

Такая задача была смоделирована в работе [99], где комок проволоки, подвешенный на кварцевой нити, нагревался лазером. Его температура определялась по мощности инфракрасного излучения, а действующая на него

подъемная сила — по натяжению кварцевой нити. Результаты этого эксперимента позволили установить связь между параметрами воздуха, обтекающего шаровую молнию [99]. В частности, если считать, что мощность энерговыделения внутри средней шаровой молнии составляет 3 кВт, получим, что нагревание воздуха вблизи средней шаровой молнии (по сравнению с находящимся вдали от нее воздухом) составляет

$$\Delta T = 60 \text{ К} \cdot 10^{\pm 0,6}, \quad (17)$$

а подъемная сила равна ее весу (т.е. средняя шаровая молния плавает) при отношении среднего удельного веса воздуха шаровой молнии к удельному весу воздуха, равном $1 \cdot 10^{\pm 0,8}$. Как видно, эти результаты получены без использования определенных предположений о структуре шаровой молнии и показывают, что средняя температура шаровой молнии относительно невелика.

Эта же модель шаровой молнии как связанного состояния ее вещества может быть использована при анализе разных газодинамических задач, в том числе движения шаровой молнии в струях воздуха, прохождения ее через щели и отверстия, взаимодействия с летящим объектом и т.д. Следует отметить, что такие задачи не решались в физике, поскольку параметры взаимодействия внутри шаровой молнии сильно отличаются от того, что мы имеем в известных случаях жидкостей и твердых тел. Поэтому такие задачи там не возникают. А они оказываются достаточно сложными в математическом плане, так как требуют самосогласованного решения — движение воздуха изменяет форму шаровой молнии, а это, в свою очередь, влияет на характер движения воздуха.

Этот круг задач был решен Н.И. Гайдуковым [100 — 107]. При этом отметим, что ценность указанных работ не ограничивается получением математических решений для данных условий. Кроме того, сравнение с наблюдательными данными позволяет оценить параметры шаровой молнии — поверхностное натяжение и характер взаимодействия с движущимся воздухом на поверхности. Важным выводом при сравнении с наблюдательными данными является отсутствие вязкого пограничного слоя на поверхности шаровой молнии [107]. Это является еще одним подтверждением в пользу фрактальной структуры.

Проиллюстрируем возможности рассматриваемой теории одним из результатов — шаровая молния "затягивается" винтом вертолета или самолета из бесконечности и занимает устойчивое положение на некотором расстоянии от винта. Этим можно объяснить некоторые сообщения летчиков, по которым НЛО или шаровая молния преследовали их летательный аппарат.

Существенно, что анализ газодинамики шаровой молнии позволяет понять и механизмы отдельных процессов. Например, прохождение через узкое отверстие происходит следующим образом. Под действием потока воздуха шаровая молния подходит к отверстию на расстояние порядка его диаметра и замедляет свое движение. Далее на поверхности шаровой молнии возникает выступ, который превращается в цилиндрическую струю. Через эту струю шаровая молния перетекает по другую сторону отверстия, не касаясь его контура. Тем самым шаровая молния перетекает по центру отверстия, а по его краям движется воздух. Такой механизм возможен только при низком поверхностном натяжении вещества шаровой молнии. Анализ наблюдательных данных позволяет провести соответствующие оценки [91].

Отметим, что теоретический анализ газодинамики шаровой молнии вме-

сте с лабораторным моделированием шаровой молнии может дать более глубокое представление о ее свойствах — строении и взаимодействии с воздухом на поверхности. Такими могут стать эксперименты, проведенные в работе [108], где изучалось прохождение аналогов шаровой молнии через отверстия, щели, трубки. Как аналог шаровой молнии в этой работе использовалось светящееся образование, полученное из эррозионной плазмы и имеющее сложную структуру [109, 110]. Оно состоит из ядра диаметром 1 — 2 мм, где сосредоточена основная энергия образования, светящейся зоны диаметром 6 — 8 мм и "шубы" — несветящейся зоны диаметром 30 — 40 мм. Показано, что исследуемое образование проходит, не разрушаясь, через отверстия диаметром 1, 2 и 3 мм, а при наличии двух отверстий, расположенных друг от друга на расстоянии порядка их диаметра, проходит только через одно из них. После прохождения через диэлектрические трубки оно не изменяет своих размеров, если длина трубки не превышает определенной величины, а далее уменьшается с ростом длины трубки.

Проведенные эксперименты [108] показали, что исследуемый лабораторный аналог шаровой молнии сохраняет свою целостность при прохождении через отверстия, щели, при огибании мишеней. Продолжение таких экспериментов вместе с использованием теоретических исследований газодинамики шаровой молнии обещает привести к новым результатам, позволяющим глубже понять природу шаровой молнии.

Таким образом, 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 равна температура поверхности шара, чтобы световой поток от него совпадал со световым потоком 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 в сумме занимают малую часть ее объема, либо, если свечение создается со всех точек объема, в оптической области спектра это оптически прозрачная система.

Таким образом, температура излучения шаровой молнии значительно превышает температуру воздуха на границе шаровой молнии (см формулу

(17)). 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 имеем дело в различных задачах атомной физики, физики плазмы и высокотемпературных процессов. Однако при атмосферном давлении основной канал разрушения возбужденных атомов или молекул в воздухе определяется их столкновениями с молекулами воздуха, а не излучательными процессами. Так, согласно приведенным расчетам [38, 40, 41], 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 других возбужденных атомов или молекул, которые обладают большим излучательным временем жизни. Поэтому плотность возбужденных атомов или молекул определяется только температурой рассматриваемой нагретой области и не зависит от способа создания возбужденных частиц. Тем самым полученная ранее температура излучения является температурой тех областей шаровой молнии, которые создают ее свечение.

Характерное нагревание воздуха вблизи средней шаровой молнии составляет несколько десятков градусов (см. формулу (17)), что расходится с полученной температурой излучающих областей шаровой молнии (примерно 2000 К), которые занимают лишь малую часть объема шаровой молнии. Это противоречие можно преодолеть, считая, что шаровая молния имеет пятнистую структуру и содержит много горячих зон, занимающих в сумме 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 поддерживаются фрактальной моделью шаровой молнии).

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

Таблица XI. Дополнительные параметры средней шаровой молнии

| Параметр | Значение |
|---|------------------------|
| 1. Удельный вес, г/см ³ | $10^{-39 \pm 05}$ |
| 2. Вес каркаса шаровой молнии, г | $10^{-01 \pm 09}$ |
| 3. Температура воздуха на границе шаровой молнии, К | $60 \cdot 10^{\pm 06}$ |
| 4. Температура горячих (излучающих) областей, К | 1800 ± 200 |
| 5. Размер отдельной горячей зоны, мм | $10^{02 \pm 04}$ |
| 6. Число горячих зон | $10^{25 \pm 07}$ |
| 7. Поверхностное натяжение, Дж/м ² | $10^{-15 \pm 05}$ |
| 8. Размер частиц каркаса шаровой молнии, нм | $3 \cdot 10^{\pm 04}$ |

6. Заключение

Сравнение данного обзора с предыдущим [6] показывает, что за прошедшие два с половиной года в исследовании шаровой молнии достигнут существенный прогресс. В анализе наблюдательных данных сформировались четкие методы определения выходных параметров банков наблюдательных данных и оценки их точности. Наметились тенденции объединения различных банков наблюдательных данных. Все это способствовало улучшению качества выходных параметров для наблюдательной шаровой молнии, хотя общая картина наблюдательной шаровой молнии принципиально не изменилась.

Что касается природы шаровой молнии, то теперь эта проблема не стоит так остро, как ранее. Совокупность проведенных исследований, главным образом экспериментальных, приводит к выводу, что шаровая молния — это структура, которая возникает в результате эволюции газоразрядной или лазерной слабоионизованной плазмы, образуемой при испарении материала под действием высоких потоков энергии. Такая позиция меняет отношение и к самим исследованиям, которые теперь в основном относятся не ко всей проблеме в целом, а к отдельным ее аспектам и сказанными с этим процессами.

Вместе с тем меняется и порядок первоочередных задач в данной проблеме. Если раньше главным вопросом природы шаровой молнии была ее структура, то теперь более злободневным является вопрос, каким образом шаровая молния инициирует электрический пробой в грозовой атмосфере, какие процессы при этом протекают. На этот и другие актуальные вопросы проблемы шаровой молнии мы получим ответ в ближайшие годы. Приходится только сожалеть, что советские ученые не смогут принять в этом такое участие, как было ранее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Ter Haar D.*//Phys. Scripta. 1989. V. 39. P. 735.
2. *Ter Haar D.*//Proc. of the Nonlinear Physics Workshop. — Singapore, World Scientific, 1992.
3. *Гладышев Г.П., Смирнов Б.М.*//УФН. 1989. Т. 157. С. 364.
4. *Дайкхайс Г.С.*//УФН. 1991. Т. 161, № 1. С. 187.
5. Шаровая молния/Под ред. Б.М. Смирнова. — М.: ИВТАН, 1991. — Т. 2.
6. *Смирнов Б.М.*//УФН. 1990. Т. 160, № 4. С. 1.
7. *Миров А.Х., Бычков В.Л.*// [5]. — С. 19.
8. *Стаханов И.П.* Физическая природа шаровой молнии. — М.: Атомиздат, 1979.
9. *Стаханов И.П.* О физической природе шаровой молнии. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
10. *Keul A.G.*//Naturwissenschaften. 1981. Bd. 68. S. 296.
- [11] *Keul A.G., Schwarzenbacher K.*//Science of Ball Lightning/Ed. Y.H. Ohtsuki. — Singapore: World Scientific, 1989. — P. 58.
12. Шаровая молния//Под ред. Б.М. Смирнова. — М.: ИВТАН, 1990. — Т. 1.
13. *Войцеховский Б.В., Войцеховский М.Б.*//ДАН СССР. 1987. Т. 295. С. 580.
14. *Войцеховский Б.В.*// Ibidem. 1982. Т. 262. С. 84.
15. *Григорьев А.И., Синкевич О.А.*//ЖТФ. 1984. Т. 54. С. 1276.
16. *Платов Ю.В., Рубцов В.В.* НЛО и современная наука. — М.: Наука, 1991.
17. *Араго Ф.* Гром и молния: Пер. с фр. — СПб., 1853.
18. *Brand W.* Der Kugelblitz. — Hamburg: Henri Grand Verlag, 1923.
19. *Humphreys M.J.*// Proc. Am. Phil. Soc. 1936. V. 76. P. 613.
20. *McNally J.R.* Preliminary report on ball lightning. — Oak Ridge Nat. Lab. No. 3938, May 1966.
- [21] *Rayie W.D.* Rail lightning characteristics. — NASA Tech. Note. NASA-TN-D3138. — 1966.
22. *Дмитриев М.Т.*//Природа. 1971. № 6. С. 50.
23. *Arabadji W.J.*//J. Geophys. Res. 1976. V. 81. P. 6455.
24. *Григорьев А.М., Дмитриев М.Т.*// Изв. вузов Сер. "Физика". Депон. 1978. № 1412, 2280; 1979. № 29, 296.
25. *Charman W.N.*//Phys. Rep. 1979, V 54 P. 261.
26. *Григорьев А.И., Григорьева И.Д.*// Труды 3-го Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству — Тарту: Тарт. гос. ун-т, 1986. — С. 228.
27. *Grigor'ev A.I., Grigor'eva I.D., Shirjaeva S.O.*/[11]. — P. 88

28. Григорьев А.М., Григорьева И.Д.//ЖТФ. 1989. Т. 59. С. 79.
29. Ohtsuki Y.H., Ofuruton H.//Nuovo Cimento. 1986. V. C106. P. 577.
30. Ohtsuki Y.H., Ofuruton H.// Proc. of the 9th Intern. Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility. — Wroclaw, 1988. — P. 27.
- [31] Ohtsuki Y.H., Ofuruton H./[11]. P. 31.
32. Egely Gy. Hungarian ball lightning observations. Central Research Institute for Physics. 10/D, Budapest, 1987.
33. Egely Gy.//[30]. P. 15.
34. Egely Gy.//[11]. P. 19.
35. Egely Gy.//Ibidem. P. 81.
36. Сингер С. Природа шаровой молнии: Пер. с англ. — М.: Мир, 1973.
37. Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния: Пер. с англ. — М.: Мир, 1983.
38. Смирнов Б.М. Проблема шаровой молнии. — М.: Наука, 1988.
39. Singer S.// Lightning/Ed. R.H. Golde. — London: Academic Press, 1977. — P. 409.
40. Smirnov B.M.// Phys. Rep. 1987. V. 152. P. 177.
- [41] Смирнов Б.М.//УФН. 1990. Т. 160, № 4. С. 1.
42. Леонов Р. Загадка шаровой молнии. — М.: Наука, 1965.
43. Имянитов И.М., Тихий Д.Я. За гранью законов науки. — М.: Атомиздат, 1980.
44. Смирнов Б.М. Загадка шаровой молнии. — М.: Знание, 1987. — (Сер. "Физика". № 5).
45. Григорьев А.И. Огненные убийцы. — Ярославль: Дебют, 1991.
46. Argute E.// Nature. 1971. V. 230. P. 179.
47. Прохоров А.В. БСЭ. Т. 13. С. 210.
48. Dijkhuis G.C.// [5]. — С. 28.
49. Golde R.H./[39].
50. Слободнюк М.Ф., Бальбердин В.В.//[5]. — С. 6.
- [51] Stenholf M.// Nature. 1976. V. 260. P. 596.
52. Prentice S.A.//[39]. — P. 465.
53. Barry J.D.// J. Geophys. Res. 1980. V. 85. P. 4111.
54. Barry J.D., Singer S.//[11]. — P. 1.
55. Тимошук А.С.//[12]. — С. 9.
56. Григорьев А.М., Григорьева И.Д., Носков Е.Н., Ширяева С.О.// Ibidem. С. 6.
57. Манькин Э.А., Шахпаронов И.М.// [5]. — С. 68.
58. Смирнов Б.М.// Природа. 1987. № 2. С. 15.
59. Israel H. Atmospheric Electricity. — Jerusalem: Keter Press Binding, 1973.
60. Moore C.B., Vonnegut B.//[39]. — P. 51.
- [61] Iribarne J.V., Cho H.R. Atmospheric Physics. — Dordrecht: D Reidel, 1980.
62. Raether H. Electron Avalanches and Breakdown in Gases. — London: Butterworth, 1964.
63. Дмитриев М.Т.//Природа. 1967. № 6. С. 98; ЖТФ. 1969. Т. 39. С. 387.
64. Колдамасов А.И.//[12]. — С. 8.
65. Silberg P.A.//Appl. Phys. 1978. V. 49. P. 1111.
66. Silberg P.A.// Problem of Atmospheric and Space Electricity/Ed. S.C. Corotini. — Amsterdam: Elsevier, 1965.
67. Golka R.K.//[30]. — P. 59.
68. Dijkhuis G.C.//Necl. Tijdsch. v. Natk., Ser. B. 1985. V. 51. P. 125.
69. Dijkhuis G.C.//[30]. — P. 166.
70. Barry J.D.// J. Atmosph. and Terr. Phys. 1968. V. 3. P. 313.
- [71] Barry J.D., Boney W.E., Brandelik J.E.//Appl. Phys. Lett. 1971. V. 18. P. 15.
72. Барри Дж.// Природа. 1968. № 12. С. 62.
73. Ofuruton H., Ohtsuki Y.H.//[11]. P. 220.
74. Корум К.Л., Корум Д.Ф.//УФН. 1990. Т. 160, № 4. С. 47.
75. Corum K.L., Corum J.F.// Intern. Committee on Ball Lightning Ser. 1992. № 1.
76. Смирнов Б.М.//УФН. 1986. Т. 149. С. 177.
77. Kantor Y., Witten T.A.// J. de Phys. 1984. Т. 45. P. L675.
78. Jullien R., Botet R. Aggregation and Fractal Aggregates. — Singapore: World Scientific, 1987.
79. Vicsek T. Fractal Growth Phenomena. — Singapore: World Scientific, 1989.
80. Smirnov B.M.// Phys. Rep. 1990. V. 188. P. 1.
- [81] Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров, — М.: Наука 1991
82. Зайцев А.В.// ЖТФ. 1972. Т. 42, С. 213.
83. Александров В.Я., Голубев Е.М., Подмошенский И.В.//ЖТФ. 1982. Т. 52. С. 1987.
84. Александров В.Я., Бородин И.П., Киченко Е.В., Подмошенский И.В.//Ibidem. С. 818.
85. Aerogels/Ed. J. Fricke. — Berlin a.o.: Springer-Verlag, 1985.
86. Фрике Й. Аэрогели//В мире науки. 1988. № 8. С. 50 (оригинал.7/8a. American 1988. V. 288,

- № 5).
87. Смирнов Б.М.//УФН. 1987. Т. 152. С. 133.
 88. Lushnikov A.A., Negin A.E., Pakhomov A.V.// Chem. Phys. Lett. 1990. V. 175. P. 138.
 89. Лушников А.А., Негин А.Е., Пахомов А.В., Смирнов Б.М.//УФН. 1990. Т. 161, № 2. С. 115.
 90. Smirnov B.M.//Trends in Physics/Ed. J. Kaczer. — Prague: Prometheus, 1991. — Pt. P. 112.
 - [91] Смирнов Б.М.//УФН. 1991. Т. 161, № 8. С. 141.
 92. Flory P. Principles of Polymer Chemistry. — Ithaca, N.Y.: Cornell Univ. Press, 1971.
 93. De Gennes P.G. Scaling Concepts in Polymer Physics. — Ithaca, N.Y.: Cornell Univ. Press, 1977; перевод: де Жен П.Ж. Идеи скейлинга в физике полимеров. — М.: Мир, 1982).
 94. Гросберг А.Ю., Хохлов А.Р. Статистическая физика молекул. — М.: Наука, 1989.
 95. Смирнов Б.М.//УФН. 1991. Т. 161, №6. С. 171.
 96. Бычков В.Л.//[5]. — С. 120
 97. Зельдович Я.Б.//ЖЭТФ. 1937. Т. 7. С. 1463.
 98. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. — М.: Наука, 1988. — С. 254.
 99. Крайнов В.П., Лебедев Г.П., Назарян А.О., Смирнов Б.М.//ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 1791.
 100. Гайдуков Н.И.//ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 1797.
 - [101] Гайдуков Н.И.// ЖТФ. 1987. Т. 57. С. 1899.
 102. Гайдуков Н.И.// ЖТФ. 1989. Т. 59. С. 88.
 103. Гайдуков Н.И.// ДАН СССР. 1988. Т. 301. С. 1076.
 104. Гайдуков Н.И.// [12]. — С. 53.
 105. Гайдуков Н.И.// [5]. — С. 94, 98.
 106. Гайдуков Н.И.// ЖТФ. 1991. Т. 61, № 11.
 107. Гайдуков Н.И.// ЖТФ. 1992. Т. 62, № 2. С. 27.
 108. Авраменко Р.Ф., Бахтин Б.И., Николаева В.И., Поскачева Л.Н., Широков Н.Н.//[5]. — С. 53.
 109. Авраменко Р.Ф., Бахтин Б.И., Николаева В.И., Поскачева Л.Н., Широков Н.Н.// [12]. — С. 17.
 110. Авраменко Р.Ф., Бахтин Б.И., Николаева В.И., Поскачева Л.Н., Широков Н.Н.// ЖТФ 1990. Т. 60, № 12. С. 73.

Статья поступила 24.03.92 г.