

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

УФН 1990

ТОМ СТО ШЕСТИДЕСЯТЫЙ

Журнал издается с апреля 1918 г.

Апрель 1990 г.

Том 160, вып. 4

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

551.594.2

ФИЗИКА ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Б. М. Смирнов

(Институт высоких температур АН СССР)

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	1
2. Наблюдательные данные по шаровой молнии	2
2.1. Коллекции наблюдательных случаев. 2.2. Размер и время жизни. 2.3. Форма и структура. 2.4. Характер движения. 2.5. Условия наблюдения. 2.6. Вероятность наблюдения. 2.7. Появление и распад. 2.8. Излучательные свойства. 2.9. Другие свойства. 2.10. Достоверность и точность наблюдательных данных. 2.11. Наблюдательная модель шаровой молнии.	
3. Анализ наблюдательных данных	20
3.1. Взаимодействие с окружающим воздухом. 3.2. Шаровая молния как источник света. 3.3. Характер хранения энергии. 3.4. Структура и общие выводы.	
4. Моделирование шаровой молнии	27
4.1. Экспериментальное моделирование шаровой молнии как целого. 4.2. Аналогии шаровой молнии. 4.3. Излучательные модели, построенные на аналогах шаровой молнии. 4.4. Газодинамика шаровой молнии. 4.5. Электрические свойства шаровой молнии. 4.6. Нестационарность процессов в шаровой молнии. 4.7. Анализ природы шаровой молнии.	
5. Заключение	43
Примечания к тексту	43
Список литературы	44

1. Введение. Шаровая молния—интересное физическое явление. В его основе, казалось бы, лежат известные физические принципы. Однако, хотя несколько поколений ученых пытались понять природу этого явления, в настоящее время имеется только схематическое понимание физической природы шаровой молнии и отсутствует полная определенность и единомыслие в ответе на принципиальные вопросы о природе этого явления. В последние годы наблюдается резкое оживление в исследовании шаровой молнии — в ряде стран созданы научные центры по изучению шаровой молнии, проведен Международный симпозиум по шаровой молнии. Все это отражает заметный прогресс, достигнутый в последнее время в изучении шаровой молнии. Именно, в последние десятилетия накоплен богатый материал по наблюдениям шаровой молнии, на основе анализа наблюдательных данных созданы схематические модели для отдельных свойств шаровой молнии, которые имеют ана-

логии с существующими в природе и технике объектами и явлениями, а также объясняют отдельные элементы природы шаровой молнии.

Существующая информация по шаровой молнии и усиление внимания к этой проблеме гарантируют дальнейший прогресс в исследовании шаровой молнии. На этой стадии было бы полезным проанализировать имеющуюся информацию по шаровой молнии и выделить те заключения о ее природе, которые не вызывают сомнений. Этой цели посвящена данная статья. В ней в краткой форме представлена информация по наблюдениям шаровой молнии, из анализа этой информации сформулированы надежные выводы о ее природе. Кроме того, устанавливается связь между шаровой молнией и другими физическими объектами и явлениями, близкими по своей природе к ней, а также анализируются возможные варианты ряда процессов в шаровой молнии и пути их изучения. По мнению автора, такая позиция может быть полезной при дальнейшем исследовании шаровой молнии.

2. Наблюдательные данные по шаровой молнии.

2.1. Коллекции наблюдательных случаев. Исследования шаровой молнии имеют богатую историю и практически в течение двух тысячелетий это явление обсуждается и анализируется в ученом

Таблица I. Сбор данных по наблюдениям шаровой молнии

Авторы	Год	Страна	Число обработанных случаев	Литература
Арабó	1859	Франция	30	[2]
Бранд	1923	Германия	215	[3]
Хэмфрейс	1936	США	280	[4]
Мак-Нэлли	1966	США	513	[5]
Рэйл	1966	США	112	[6]
Дмитриев	1969	СССР	45	[7]
Арабаджи	1976	Голландия	250	[8]
Григорьев, Дмитриев	1978, 1979	СССР	327	[9]
Чэрман	1979	Англия	76	[10]
Стáханов	1979, 1985	СССР	1022	[11, 12]
Кеул	1981	Австрия	80	[13, 14]
Григорьев, Григорьева *)	1986	СССР	2082	[15—17]
Отсуки, Офурутон	1987	Япония	2060	[18—20]
Эгели	1987	Венгрия	300	[21—24]

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

мире [1]. Основу современных представлений о шаровой молнии составляет обзор и анализ наблюдательных данных. В настоящее время мы располагаем богатой информацией по наблюдательной 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. Согласно этому определению шаровая молния представляет собой светящееся образование в атмосфере, как правило, сферической формы, которое свободно движется в воздухе и существует как на открытом воздухе, так и в закрытых помещениях в течение секунд, а в редких случаях и минут.

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 наборы

данных по наблюдению шаровой молнии независимы. Каждый из них использует свой способ обработки наблюдательных данных, а также на сообщениях очевидцев из разных регионов земного шара. Поэтому данные, полученные из разных наборов наблюдений, взаимно дополняют друг друга и в целом позволяют дать надежную информацию о свойствах шаровой молнии.

Следует отметить большую статистику наблюдательных данных, которая позволяет освободиться от искаженной информации⁽¹⁾. Кроме того, представляет ценность и разработка методических подходов при анализе наблюдательных случаев. Большой вклад в это внес И.П.Стаханов [11, 12], который на основе собранной информации и созданных методов обработки перевел представления о наблюдаемой шаровой молнии на новый качественный уровень. В настоящее время методы И. П. Стаханова успешно развиваются А. И. Григорьевым с сотрудниками [15—17] на большей статистике. Далее мы остановимся на основных параметрах наблюдательной шаровой молнии.

2.2. РАЗМЕР И ВРЕМЯ ЖИЗНИ. При анализе числовых значений для параметров наблюдаемой шаровой молнии следует заметить, что

Таблица II. Средний диаметр наблюдаемой шаровой молнии

Набор данных	Мак-Нелли [5]	Рэйл [6]	Черман [10]	Стаханов [11, 12]	Кеул [13, 14]	Григорьев [16]	Эгели [21]
Число данных	446	98	64	1005	150	1796	204
\bar{d} , см	30	32	26	22	30	19	35

все данные получены визуальным наблюдением шаровой молнии в тот момент, когда наблюдатель находится в состоянии некоторого эмоционального потрясения. Это приводит к погрешностям в получаемой информации, которые не могут быть устранены большой статистикой. Это замечание следует учитывать при последующем анализе наблюдательных данных. Табл. II содержит 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 [19, 20] $\bar{d} = 28 \pm 4$ 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. Опыт анализа наблюдательных данных дает, что получаемая из наблюдений количественная информация имеет ограниченную точность, которая медленно улучшается с увеличением числа анализируемых случаев. Тем не менее при большой статистике можно ожидать одинаковый вид функции распределения шаровых молний по размерам. Согласно анализу Стаханова [12] для его набора наблюдательных данных функция распределения хорошо аппроксимируется зависимостью:

$$f(D) = \frac{D}{D_0^2} \exp\left(-\frac{D}{D_0}\right), \tag{1}$$

где D – диаметр шаровой молнии, $2D_0$ – ее средний диаметр; функция распределения нормирована условием

$$\int_0^{\infty} f(D) dD = 1.$$

Сложный вид имеет функция распределения шаровых молний по времени существования. Введем вероятность $P(t)$ того, что к моменту времени t шаровая молния не распадется. Казалось бы естественным, что эта функция должна быть экспоненциальной. Однако согласно наблюдательным данным эту зависимость удобно аппроксимировать как комбинацию нескольких экспонент

$$P(t) = \sum_i A_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right). \quad (2)$$

Значения параметров формулы (2) согласно разным наблюдательным данным представлены в табл. III. При этом заметим, что в табл. III

Таблица III. Значения параметров формулы (2)

Параметр	Число случаев	A_1	τ_1 , с	A_2	τ_2 , с	A_3	τ_3 , с
Мак-Нелли [5]	445	0,86	3,5	0,14	44	0	—
Рэйл [6]	95	0	—	1,00	14	0	—
Стáханов [11, 12]	982	0,57	11	0,43	54	0	—
Григорьев [16]	437	0,59	3,0	0,27	30	0,14	215

включены те данные коллекции Григорьева [16], когда наблюдались возникновение и распад шаровой молнии, или же наблюдался распад шаровой молнии в случае, когда она возникала вслед за линейной. В других наборах данных за время жизни шаровой молнии принималось время ее наблюдения.

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

$$\tau_1 = \int_0^{\infty} t \frac{dP}{dt} dt, \quad (3a)$$

время, характеризующее скорость распада в начальный момент времени

$$\tau_2 = -\left. \frac{dP}{dt} \right|_{t=0}, \quad (3б)$$

а также времена, через которые сохранится соответствующая часть шаровых молний

$$P(\tau_3) = \frac{1}{e}, \quad (3в)$$

$$P(\tau_4) = \frac{1}{2}. \quad (3г)$$

Значения этих средних времен, полученные на основе данных табл. III, представлены в табл. IV.

Если бы закон распада шаровой молнии был экспоненциальным, то $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3$ и $\tau_4 = 0,69\tau_3$, как в случае Рэйла [6]. В других наборах данных, где имеются долгоживущие и короткоживущие шаровые молнии, эти средние времена заметно различаются. Обычно в качестве времени жизни шаровой молнии используется величина τ_4 , которая с учетом данных табл. IV 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. IV получаем $\tau_2 = 9 \cdot 10^{\pm 0.3}$ с. Как видно, значения данных параметров совпадают в пределах их точ-

ности. Поэтому далее будем использовать эти величины в качестве среднего времени жизни шаровой молнии.

2.3. ФОРМА И СТРУКТУРА. В соответствии со своим названием (как на русском, так и на других языках) шаровая молния должна иметь сферическую форму. Это подтверждается наблюдательными данными. В табл. V приведена информация по форме шаровой молнии согласно данным Стаханова и Григорьева. Указана статистическая погрешность, относящаяся к сумме наблюдений. Как видно, шаровая молния имеет сферическую форму примерно в 90% наблюдений.

Таблица IV. Средние времена жизни шаровой молнии (с)

	Число случаев	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4
Мак-Нелли [5]	445	12	4	4,5	3
Рэйл [6]	95	14	14	14	10
Стаханов [11, 12]	982	30	17	22	14
Григорьев [16]	437	40	5	9	4,5
Эгели [21]	152	38	9	18	7,5

Таблица V. Распределение шаровых молний по форме

Форма	Число случаев		Сумма, %
	Стаханов [12], 878 случаев	Григорьев и др. [16], 2013 случаев	
Шар	788	1836	90,8±0,6
Эллипсоид	52	54	3,7±0,4
Лента	—	52	1,8±0,3
Бесформенная	14	29	1,5±0,2
Груша	20	7	0,9±0,2
Диск	1	16	0,6±0,1
Кольцо	2	9	0,4±0,1
Цилиндр	1	4	0,2±0,1
Веретено	—	5	0,2±0,1

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

2.4. ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ. Среди других свойств шаровой молнии отметим, что характер движения ее обычно плавный и горизонтальный. Горизонтальное движение отмечалось в 53% из 110 наблюдательных случаев Рэйла [6], в 68% из 1006 случаев Стаханова [11, 12] и в 75% из 1743 случаев коллекции Григорьева [16]. При этом, согласно Рэйлу [6], в 18% случаев шаровая молния двигалась вертикаль-

но (вниз или вверх) и в 18% имела сложную траекторию. Согласно данным Стаханова [11, 12] 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 типы движения, в том числе и неподвижное состояние шаровой молнии.

Таблица VI. Вероятность появления шаровой молнии в зависимости от погоды согласно [16] (1924 случая)

Погода	Гроза	В течение получаса		Дождь	Облачно	Ясно
		Перед грозой	После грозы			
Вероятность, %	61,6	6,6	8,8	7,2	6,0	9,8

Шаровая молния часто движется вдоль проводов. В коллекции Мак-Нелли [5] это наблюдается в 20% случаев, согласно данным Рэйла [6] – в 16% случаев, по данным Григорьева [16] – в 4% случаев.

Удивительной особенностью движения шаровой молнии является ее способность находить отверстия и проникать в них, проходить через щели. Согласно данным Григорьева [16] в 104 случаях из 2082 шаровая молния проходила через щель, размер которой был меньше ее диаметра. В 30 случаях из них она изменяла форму, в 12 случаях – сохраняла ее. Тем более шаровая молния легко обходит препятствия, встречающиеся у нее на пути. В коллекции Григорьева [16] это отмечается в 45 случаях из 1743, в которых дается описание движения шаровой молнии.

О влиянии ветра на движение шаровой молнии сообщалось в 52 случаях набора данных Григорьева [16]. Из них в 42 случаях шаровая молния увлеклась ветром, в 4 случаях двигалась против ветра.

Скорость движения шаровой молнии находится в интервале 0,1–10 м/с. Распределение шаровых молний по скоростям определялось Рэйлом [6], Стахановым [11, 12], Григорьевым [16]. Средняя скорость движения оценивается в несколько метров в секунду.

2.5. Условия наблюдения. Определенную роль в понимании природы шаровой молнии играют условия, при которых она наблюдается. Они позволяют получить представление о факторах, влияющих на образование шаровой молнии. Обычно имеется корреляция между грозовой погодой и наблюдением шаровой молнии. Так, согласно данным Мак Нелли [5] (513 случаев наблюдения), 73% шаровых молний наблюдаются в грозовую погоду. Согласно данным Рэйла [6] (112 случаев) эта величина равна 62%, согласно Стаханову [12] (1006 случаев)—70% и согласно Григорьеву [16] (1924 случая)—77%. По данным Барри [25] в 90% проанализированных им случаев шаровая молния наблюдалась во время грозы. Хотя «грозовая погода» понимается каждым из авторов по-своему, видна корреляция возникновения шаровой молнии с грозой. В табл. VI приводятся более подробные данные Григорьева [16] о связи появления шаровой молнии с погодой.

Косвенным доказательством корреляции между возникновением шаровой молнии и грозовой погодой является распределение шаровых молний по месяцам. Из табл. VII и рис. 1 следует, что на летние меся-

цы (июнь — август), когда в основном наблюдается гроза, приходится свыше 80% шаровых молний. Согласно данным Эгели [21—24] из 133 случаев наблюдения шаровой молнии в Венгрии 86 относятся к летним месяцам.

Таким образом, приведенная информация, относящаяся к СССР и США, а также к ряду стран Европы прямо и косвенно связана с грозовой погодой. Казалось бы, в этом вопросе полная ясность. Однако новые данные о японской шаровой молнии [18—20], использующие

Таблица VII. Сезонное распределение шаровых молний в СССР

Месяц		Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь—апрель	Сумма
Данные Стаханова [11, 12]	Число шаровых молний	48	158	355	225	35	63	884
	Доля, %	5,4	17,9	40,2	25,4	4,0	7,1	100
Данные Григорьева [16]	Число шаровых молний	117	296	823	296	69	112	1713
	Доля, %	6,8	17,3	48,0	17,3	4,0	6,5	100
Суммарные данные	Число шаровых молний	165	454	1178	521	104	175	2597
	Доля, %	6,4	17,5	45,4	20,0	4,0	6,7	100

большую статистику (2060 случаев), дают другой результат: 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

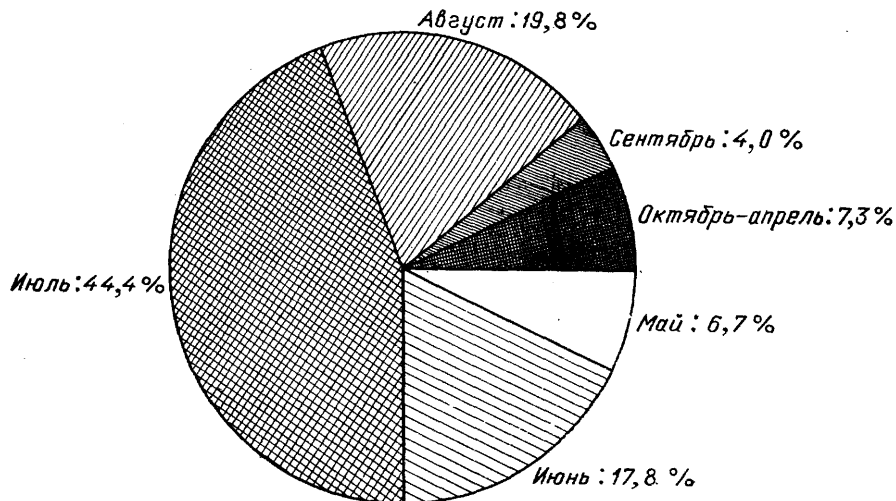


Рис. 1. Сезонное распределение шаровой молнии в СССР и Венгрии (2730 наблюдаемых случаев)

[18—20] утверждают, что возможное расхождение между указанными данными для Японии и «континента», возможно, связаны с особенностями японской погоды. В летние месяцы в ясные дни влажность воздуха в Японии превышает 80%. Во всяком случае, расхождение представленных данных требует специального анализа.

Несмотря на указанное расхождение, как в советских, так и в японских наблюдениях, имеется хорошая корреляция между сезонным рас-

пределением шаровых и обычных молний, а в японских наблюдениях такая корреляция существует и для местности наблюдения. Введем корреляционный коэффициент обычным способом [26]

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

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

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

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

т. е. корреляционный коэффициент равен нулю. В табл. VIII представлены значения корреляционного коэффициента между вероятностью

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

Характер распределения	Месяц наблюдения	Время наблюдения в течение суток
Корреляционный коэффициент	0,83 [12] 0,79 [16] 0,86 [18, 19]	— 0,88 [16] —

Таблица IX. Место наблюдения шаровой молнии [15, 16] (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

появления обычной и шаровой молнии. Как видно, данные разных наблюдений близки, и среднее значение корреляционного коэффициента равно

$$k = 0,84 \pm 0,04.$$

Представляет интерес место наблюдения шаровой молнии. Примерно половина шаровых молний наблюдается в помещениях. Согласно данным Рэйла [6] эта величина составляет 48%, Черман [10], анализируя 71 случай наблюдения, заявляет, что в 45 случаях шаровая молния наблюдалась на открытом воздухе, в 15 случаях – внутри помещений и в 11 случаях проникала в помещения снаружи. В табл. IX приводятся соответствующие данные Григорьева [15], а на рис. 2 – сум-

марные данные. Отметим, что в ряде случаев шаровая молния наблюдалась в самолетах, имеется ряд сообщений о столкновении шаровой молнии с самолетом. Это свидетельствует о возможностях образования шаровой молнии на больших высотах. Добавим к этому, что согласно данным Григорьева [15] в 35% случаев шаровая молния наблюдалась в городах, в 64% – в сельской местности.

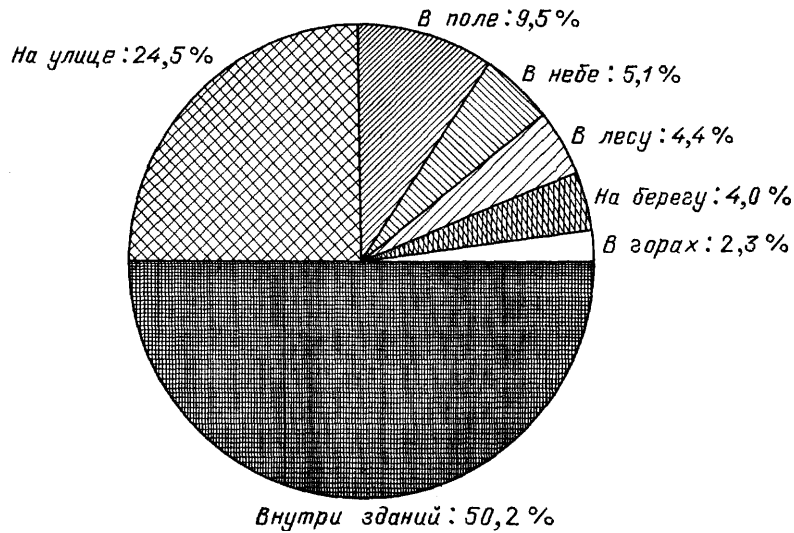


Рис. 2. Место наблюдения шаровой молнии [15] (1984 наблюдаемых случая)

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. X и на рис. 3 представлена функция распределения шаровых молний по расстояниям от наблюдателя. На больших расстояниях R вероятность обнаружения шаровой молнии в интервале dR дается слабой зависимостью от R : $dP \sim dR/R^\alpha, \alpha \approx 1,5$. На малых расстояниях эта вероятность не описывается простой зависимостью. Характерное оптимальное расстояние наблюдения составляет несколько метров.

Таблица X. Распределение шаровых молний по наименьшим расстояниям от наблюдателя

Диапазон расстояний, м	Число случаев				Доля, %
	Стáханов [11, 12]	Григорьев [16]	Эгели [21]	Сумма	
0—1	158	505	25	688	26
1—5	331	476	119	926	34
5—10	104	87	22	213	8
10—20	102	95	21	218	8
20—50	103	92	21	216	8
50—100	107	62	5	174	7
Больше 100	80	137	31	248	9
Сумма	985	1454	244	2683	100

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

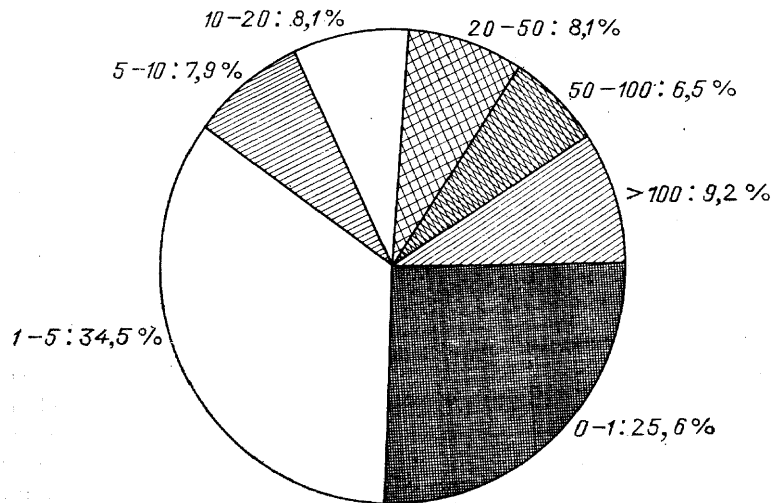


Рис. 3. Распределение шаровых молний по наименьшим расстояниям от наблюдателя (2683 наблюдаемых случая)

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

$$P = 10^{-2,2 \pm 0,5}. \quad (4)$$

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

$$W = \frac{P}{\tau} p(0), \quad (5)$$

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

$$W = 10^{1,3 \pm 1,0} \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}. \quad (6)$$

Заметим, что приведенное значение на несколько порядков выше оценки, предложенной Барри [25, 27, 28].

Полученную величину удобно сравнить с плотностью частоты появления обычной молнии, которая равна [29] $5,4 \pm 2,1 \text{ км}^{-2}\text{год}^{-1}$. Взяв отношение этих величин, находим, что на одну обычную молнию приходится следующее число шаровых молний

$$n = 4 \cdot 10^{\pm 1,2} \tag{7}$$

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, вероятность ее наблюдения является малой величиной.

2.7. Появление и распад. Электрические явления в атмосфере способствуют образованию шаровой молнии. Стаханов [11, 12] в своей коллекции наблюдательных данных проанализировал случаи, когда фиксировалось рождение шаровой молнии. Из 67 таких случаев в

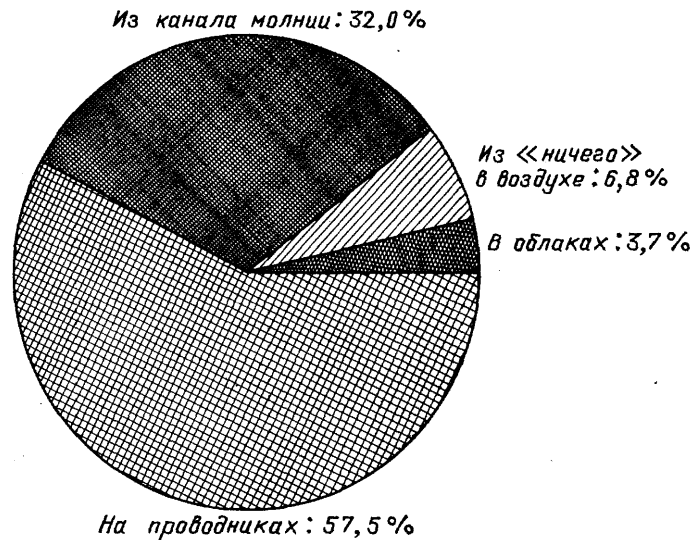


Рис. 4. Характер образования шаровой молнии (353 наблюдаемых случая)

31 случае она возникала непосредственно в канале шаровой молнии или около него, в 29 случаях появлялась из различных металлических объектов и приборов—электрических розеток, радиоприемников, батарей теплоснабжения и т. д. В 7 случаях она загоралась в воздухе из «ничего». В табл. XI представлены подобные данные Григорьева [16],

Таблица XI. Вероятность рождения шаровой молнии [16]

Характер рождения	Число случаев	Вероятность, %
На металлическом проводнике	154	54
В месте удара линейной молнии	32	11
В канале разряда линейной молнии	29	10
На металлическом проводнике при разряде молнии	21	7
На металлическом проводнике из искры	20	7
В воздухе из «ничего»	17	6
В облаках	13	5
Сумма	286	100

включающие в себя 286 случаев фиксации появления шаровой молнии, а на рис. 4 – суммарные данные.

Шаровая молния может закончить свое существование спокойно и со взрывом. Согласно данным Мак-Нелли [5] в 112 случаях имеет место спокойный распад шаровой молнии, в 309 случаях – взрыв. По данным Рэйла [6] в 54 случаях происходило тихое угасание, в 24 случаях наблюдался взрыв, согласно данным Чепмана в 25 случаях имело место тихое угасание, в 26 случаях – взрыв шаровой молнии, согласно данным Эгели [21–23] в 84 случаях развитие шаровой молнии заканчивалось взрывом, в 43 случаях она тихо гасла. В табл. XII приведены данные Стаханова [11, 12] и Григорьева [14] для наблюдаемых случаев, когда фиксировался конец шаровой молнии. Если просуммировать все данные, и распад шаровой молнии на части отнести к медленному распаду, то на взрыв приходится примерно половина всех случаев гибели шаровой молнии. На рис. 5 дается распределение по способу распада шаровой молнии для суммы наблюдаемых случаев.

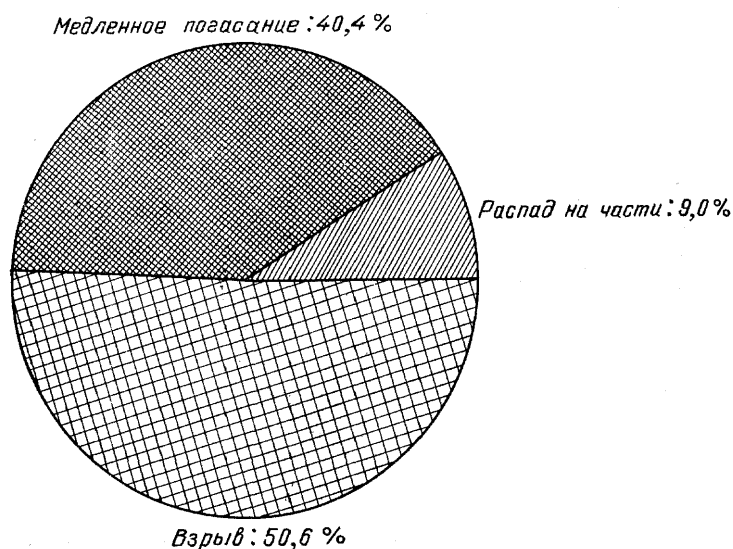


Рис. 5. Характер распада шаровой молнии (2418 наблюдаемых случаев)

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 для этого энергию. Такие случаи анализировались Барри [25], Стахановым

Таблица XII. Каналы распада шаровой молнии

Характер распада	Стаханов [12]		Григорьев [16]	
	Число случаев	Доля, %	Число случаев	Доля, %
Взрыв	335	55	493	43
Ушла в землю			157	14
Ушла в проводник			100	9
Тихое погасание	197	32	258	23
Распад на части	78	13	123	11
Сумма	610	100	1131	100

[12] и Эгели [24] и на основе этих оценок и работы [30] построена функция распределения шаровых молний по энергиям, представленная на рис. 6 общая схема построения функции распределения состоит в следующем [31–33]. Функция распределения задается в виде $dP = CdE/E$, где C – константа, dP – вероятность того, что энергия шаровой молнии находится в интервале энергий dE , причем энергия шаровой молнии E ограничена сверху и снизу ($E_{\min} < E < E_{\max}$). Из представленных данных имеем для наиболее вероятной энергии шаровой молнии значение $30 \text{ кДж} \cdot 10^{\pm 0,2}$.

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. В первом случае наиболее вероятная энергия шаровой молнии составляет $7 \text{ кДж} \cdot 10^{\pm 0,2}$. При этом пределы изменения энергии составляют $E_{\min} = 0,1 \text{ кДж} \cdot 10^{\pm 0,2}$, $E_{\max} = 400 \text{ кДж} \cdot 10^{\pm 0,2}$. В случае, когда энерговыделение под действием шаровой молнии определяется внешним электрическим источником, наиболее вероятное энерговыделение составляет $200 \text{ кДж} \cdot 10^{\pm 0,2}$, а пределы изменения энергии равны $E_{\min} = 10 \text{ кДж} \cdot 10^{\pm 0,2}$, $E_{\max} = 5 \text{ МДж} \cdot 10^{\pm 0,2}$.

На основе представленных данных проведем любопытную оценку – выясним, какая мощность рассеивается в шаровых молниях. Средняя внутренняя энергия шаровой молнии равна

$$\bar{E} = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E dP = E_{\max} \left(\ln \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \right)^{-1} = 200 \text{ кДж} \cdot 10^{\pm 0,2}. \quad (8)$$

Тогда на основе формул (6) и (8) получим для средней мощности шаровых молний:

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

где $S = 5,1 \cdot 10^8 \text{ км}^2$ – площадь поверхности Земли. Эту величину интересно сравнить со средней мощностью. Укажем, что средняя мощность обычных молний, порядка [34–36] $5 \cdot 10^7 \text{ кВт}$. Как видно, если считать шаровую молнию вторичным явлением обычной молнии, то на создание шаровых молний тратится $10^{-3,6 \pm 1,2}$ часть энергии обычных молний.

2.8. Излучательные свойства. Излучение шаровой молнии занимает центральное место в ее свойствах. Оно возникает в результате процессов, которые играют важную роль в существовании этого

Таблица XIII. Распределение наблюдаемых шаровых молний по цвету

Наблюдаемый цвет	Число наблюдений					Сумма наблюдений	Вероятность данного цвета, %
	Мак-Нелли [5]	Рэйл [6]	Черман [10]	Эгели [21]	Стáханов [12]		
Белый	44	27	15	55	244	385	23 (26)
Красный	48	7	5	56	180	296	18 (19)
Оранжевый	50	46	12	7	113	228	14 (12)
Желтый	40	37	20	43	246	386	23 (26)
Зеленый	3	10	2	—	12	27	2 (1)
Голубой, синий и фиолетовый	42	25	5	18	111	201	12 (12)
Смесь цветов	84	—	9	26	30	149	9 (3)
Общее число случаев	311	152	68	205	936	1672	100

явления, и поэтому понимание характера излучательных процессов привлекает свет и на природу шаровой молнии. Одна из характеристик излучения шаровой молнии относится к ее цвету. В табл. XIII собраны данные по цвету шаровой молнии согласно разным наблюдательным данным. В этой, и следующей, таблице использована упрощенная схема распределения шаровых молний по цвету, предложенная Стахановым [11]. В последней колонке приводится вероятность рассматриваемого цвета, полученная на основе суммы данных, а в скобках дается значение этой величины согласно данным Стаханова. Эти результаты совпадают в пределах статистической ошибки, за исключением случая, когда имеется смесь цветов. Видимо, последний случай истолковывается по-разному в разных наборах наблюдательных случаев.

Казалось бы в согласованной картине для распределения наблюдаемых шаровых молний по цвету возникли противоречия при увеличении статистики наблюдательных данных. В табл. XIV суммарные данные табл. XIII сравниваются с данными Григорьева [16] при использовании схемы Стаханова для распределения наблюдаемых шаровых молний по цвету. Приводится статистическая погрешность для относительной вероятности данного цвета. Как следует из табл. XIV, расхождение этих данных существенно выходит за границы статистической погрешности. Необходимо дополнительные исследования, чтобы понять причину возникших расхождений. На рис. 7 приводится распределение по цвету для суммы наблюдений шаровых молний.

Наблюдаемое разнообразие цветов шаровой молнии свидетельствует о сложности самого явления. Отсюда следует, что свечение шаровой молнии может создаваться разными веществами. Более определенное представление о шаровой молнии как источнике света вытекает из анализа ее яркости. Грубый анализ [6] показывает, что шаровая молния является источником света средней интенсивности. Существенный

прогресс в этом отношении был достигнут И. П. Стахановым [12], который собрал информацию о яркости шаровой молнии как источнике света. В силу несовершенства глаза как прибора для измерения яркости светового источника, а также из-за необычности условий, при которых фиксируется яркость шаровой молнии, можно оценивать, что яркость шаровой молнии в каждом случае определяется с точностью до множителя 2—3. Большая статистика наблюдений частично уменьшает эту погрешность. Несмотря на большую погрешность, такая информация представляет большую ценность. Удачно выбрана шкала для определения яркости шаровой молнии—путем сравнения ее с яркостью электрической лампы. Схема Стаханова далее была использована Григорьевым [16]. Указанные данные приведены в табл. XV.

Обработаем данные табл. XV, считая, что функция распределения шаровых молний по яркости имеет вид

$$f(J) = \frac{nJ^{n-1}}{J_0^n} \exp\left[-\left(\frac{J}{J_0}\right)^n\right], \quad (9)$$

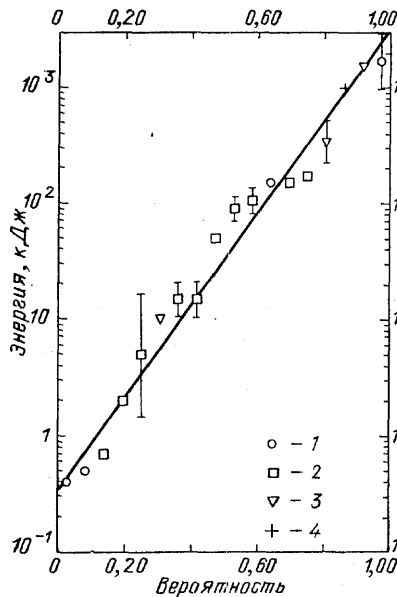


Рис. 6. Распределение шаровых молний по энергиям. 1—данные [25], 2—[12], 3—[23], 4—[30]

Таблица XIV. Сравнение данных по распределению наблюдаемых шаровых молний по цвету

Наблюдаемый цвет	Сумма данных табл. XIII		Григорьев [16]	
	Число наблюдений	Вероятность данного цвета, %	Число наблюдений	Вероятность данного цвета, %
Белый	385	23±1	247	14±1
Красный и розовый	296	18±1	297	16±1
Оранжевый	228	14±1	633	35±1
Желтый	386	23±1	307	17±1
Зеленый	27	1,6±0,3	22	1,2±0,3
Голубой, синий и фиолетовый	201	12±1	230	13±1
Смесь цветов	149	9±1	67	3,7±0,5
Сумма	1672	100	1803	100

где $f(J)$ —вероятность того, что яркость шаровой молнии равна J ; J_0, n — параметры и условие нормировки для вероятности

$$\int_0^{\infty} f(J) dJ = 1.$$

Отсюда имеем для вероятности $W(J_i, J_k)$ того, что яркость шаровой молнии находится в интервале от J_i до J_k :

$$W(J_i, J_k) = \exp\left[-\left(\frac{J_i}{J_0}\right)^n\right] - \exp\left[-\left(\frac{J_k}{J_0}\right)^n\right]. \quad (10)$$

Построим функционал

$$\varepsilon(n, J_0) = \sum_i (W(J_i, J_k) - W_{\text{набл}}(J_i, J_k))^2, \quad (11)$$

где вероятность $W(J_i, J_k)$ дается формулой (10), а $W_{\text{набл}}(J_i, J_k)$ соответствует наблюдательным данным и содержится в табл. XV. Значения этого

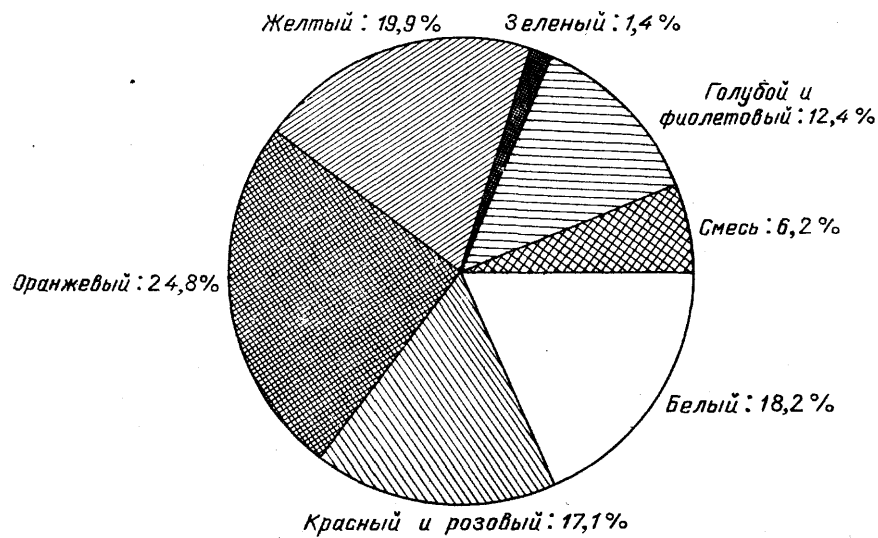


Рис. 7. Распределение шаровых молний по цвету (2730 наблюдаемых случаев)

Таблица XV. Сравнение яркости шаровой молнии с яркостью электрической лампы

Мощность эквивалентной электрической лампы, Вт	Данные Стаханова [12]		Данные Григорьева [16]	
	Число случаев	Доля от общего числа, %	Число случаев	Доля от общего числа, %
Менее 10	55	9,2	89	6,7
10—20	83	13,9	103	7,8
20—50	109	18,3	209	15,8
50—100	140	23,4	314	23,8
100—200	150	25,1	376	28,5
200—500	39	6,5		
Свыше 500	21	3,5	230	17,4
Сумма	597	100	1321	100

функционала для некоторых значений параметров, построенные по сумме данных Стаханова [12] и Григорьева [16], приведены на рис. 8.

Ясно, что наиболее подходящие значения параметров отвечают минимуму функционала (11). На основе этого мы можем выбрать из класса функций распределения (9) такую, которая лучше других описывает наблюдательные данные. Такая функция характеризуется параметрами

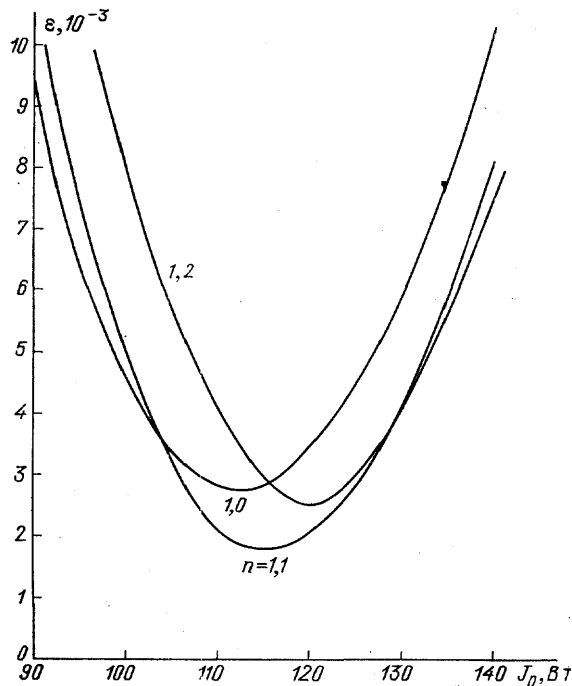


Рис. 8. Зависимость функционала $\varepsilon(J_0, n)$, определяемого формулой (11), от параметров функции распределения (9) шаровых молний по испускаемым световым потокам. Светомощности эквивалентной вольтовой лампы дан в единицах электрической лампы

(см. рис. 8) $n=1,1$, $J_0=116 \pm 12$ Вт. При этом результаты, полученные по используемому алгоритму на основе данных только Стаханова [12] или Григорьева [16] (см. табл. XV), совпадают с приведенными в пределах указанной погрешности. Отсюда получаем для средней яркости шаровой молнии в единицах мощности эквивалентной электрической лампы:

$$\bar{J} = \int_0^{\infty} J f(J) dJ = 110 \pm 10 \text{ Вт.}$$

Переходя к светотехническим единицам, получим

$$\bar{J} = 1500 \text{ лм } (\pm 10\%).$$

Указанная погрешность учитывает только статистический разброс данных. Реальная погрешность значительно больше, ибо метод получения каждого значения наблюдаемой яркости слишком грубый.

Отметим еще один факт. Григорьев [16] оценивает зависимость яркости шаровой молнии от диаметра зависимостью $J(D) \sim D^{2.4}$. В случае корреляции между диаметром и яркостью шаровой молнии такая зависимость разумна, ибо при $J(D) \sim D^2$ имеем поверхностный излучатель, а при $J(D) \sim D^3$ – объемный излучатель, а указанная зависимость описывает промежуточный случай. Однако, приняв эту зависимость, получим на основании формулы (1), что оптимальное значение параметра n в формуле (9) близко к 0,4. А тогда формула (9) плохо согласуется с данными табл. XV. Для преодоления этого противоречия необходимо принять, что яркость шаровой молнии не коррелирует с ее диаметром. Следствием этого утверждения является то, что шаровая молния не излучает с поверхности. Последующий анализ наблюдательных данных позволит проверить справедливость данного вывода.

2.9. Другие свойства. Среди других свойств отметим способность шаровой молнии быть источником тепла. Согласно данным Рэйла [6] об ощущении тепла сообщается в 4 случаях из его коллекции, тогда как в 100 случаях оно отрицается. В коллекции Стаханова [11, 12] об ощущении тепла сообщили 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 человек, ближайшее расстояние от которых до шаровой молнии составляло 2—5 м и 9 из 676 человек, наблюдавших шаровую молнию с расстояния более 5 м. Согласно данным Григорьева [16] из 383 случаев, в которых наблюдатели шаровой молнии сообщали об ощущении тепла, 64 ответили утвердительно на этот вопрос. Из совокупности данных следует, что об ощущении тепла сообщает лишь несколько процентов наблюдателей, причем отсутствует резкая зависимость вероятности фиксации ими тепла от расстояния до шаровой молнии, которую следовало бы ожидать для изотропного источника тепла.

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

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

Иногда шаровая молния приводит к смертельным случаям. Так, в коллекции Стаханова [11, 12] примерно из тысячи случаев наблюдения шаровой молнии отмечается 5 смертельных исходов. Анализ Григорьева [16] показывает, что к таким сообщениям следует относиться с осторожностью уже и потому, что эта информация исходит не от непосредственных наблюдателей событий. Да и опыт наших газетных сообщений на эту тему свидетельствует о малой достоверности таких пуб-

ликаций. Во всяком случае, вероятность гибели людей под действием шаровой молнии весьма мала, за исключением случаев, когда происходит электрический взрыв с сильными разрушениями.

2.10. Достоверность и точность наблюдательных данных. Специального исследования заслуживает обсуждение достоверности и надежности наблюдательных данных. Достоверность отдельного наблюдения невелика, и поэтому несколько десятков лет назад было распространено мнение, что шаровая молния является оптической иллюзией (см., например, [37—39]). Согласно этому предположению сильная вспышка обычной молнии за счет ряда фотохимических процессов оставляет след на сетчатке глаза наблюдателя, который сохраняется на ней как пятно в течение 2—10 с. Это пятно воспринимается как шаровая молния. Однако, по мере накопления наблюдательных данных эта гипотеза теряет своих сторонников. Каждое наблюдение несет в себе набор деталей, который трудно представить как фантазию наблюдателя. Поэтому практически все авторы обзоров и книг по шаровой молнии, а также коллекционеры наблюдаемых случаев считают шаровую молнию реальным явлением.

При этом, однако, достоверность каждого отдельного случая может быть подвергнута сомнению. Во-первых, наблюдение шаровой молнии происходит неожиданным образом. Наблюдатель не готов к этому. К этому следует добавить его возбужденное состояние, что может привести к ошибкам при описании обнаруженного явления. Во-вторых, наблюдатель пытается вложить увиденное в некоторую схему, что искажает пропорции в увиденной картине и может отразиться на достоверности ее деталей. В-третьих, немалую ошибку в параметры явления вносит способ их определения. В-четвертых, эта информация часто проходит через прессу, где из-за поспешности и сенсационности сообщения она может существенно исказиться.

В качестве курьезного примера такого рода приведем следующее [40]. В газете «Комсомольская правда» от 5 июля 1965 г. была опубликована заметка «Огненный гость», в которой описано поведение шаровой молнии с поперечником примерно 30 см, наблюдавшейся незадолго перед этим в Армении. В статье, в частности, сказано:

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

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

«Что же касается описанного глинобитного дома, то эта полуразвалина никакого отношения к шаровой молнии не имеет».

К сожалению, на этом дело не кончилось. Сообщение корреспондента «Комсомольской правды» легло в основу оценки энергии шаровой молнии [41], что составило порядка 10^9 ккал (энергия тонны взрывчатки!). Эта оценка учитывалась во многих публикациях по энергетике шаровой молнии, в том числе в книгах [25, 42]. Поскольку наблюдений, по которым можно оценить энергию шаровой молнии (см. рис. 6), не очень много, то такая публикация является неприятной дезинформацией.

Точность отдельных параметров шаровой молнии может быть проверена. Черман [10] сообщает о наблюдении метеоритов в США, когда после их наблюдения был проведен опрос свидетелей. Время наблюдения

метеоритов на небе было сообщено с точностью примерно 30%, другие сообщенные параметры (цвет, звук) менее надежны.

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

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

Таблица XVI. Средние параметры шаровой молнии

Параметр, единица измерения	Значение параметра
1. Вероятность сферической формы, %	90 ± 1
2. Диаметр, см	23 ± 5
3. Время жизни, с	$8 \cdot 10^{\pm 0,3}$
4. Энергия, кДж	$10^{1,3 \pm 0,2}$
5. Цвет	Белый, красный, оранжевый, желтый ($80 \pm 2\%$) Голубой, синий, фиолетовый, зеленый ($13 \pm 1\%$)
6. Световой поток, лм	$1500 (\pm 10\%)$
7. Световая отдача, лм/Вт	$0,6 \cdot 10^{\pm 0,5}$
8. Корреляция с атмосферным электричеством	$70 \pm 10\%$ 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	$10^{-2,2 \pm 0,3}$

2.11. Наблюдательная модель шаровой молнии. На основе представленных результатов по наборам случаев наблюдения шаровой молнии и анализу наблюдательных данных внутри этих наборов 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. В табл. XVI приведены параметры такой шаровой молнии. Существенно, что эти параметры получены усреднением большого массива данных, что обеспечивает их высокую достоверность в пределах погрешности получения соответствующего параметра. Мы не обсуждали погрешности, связанные 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 (см. табл. XVI) имеют огромную 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 исполь-

зую 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 [12]) или три типа шаровых молний (согласно Григорьеву [16]), которые существенно различаются своими временами жизни. Другой важный элемент, не учитываемый моделью средней шаровой молнии, относится к корреляции между отдельными параметрами. Эти корреляции устанавливаются при использовании большого массива данных (см. [11, 12, 15—17]) и отражают некоторые внутренние связи между процессами в шаровой молнии.

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

3. Анализ наблюдательных данных.

3.1. Взаимодействие с окружающим воздухом. Анализ наблюдательных данных по шаровой молнии позволяет составить представление об этом явлении. Этот анализ использует известные физические законы и на основе наблюдательных данных позволяет получить новую информацию о шаровой молнии, относящуюся к ее природе.

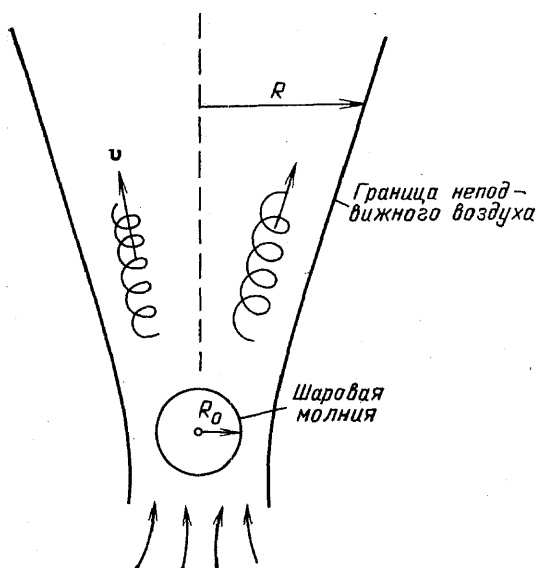


Рис. 9. Характер движения нагретого воздуха в окрестности шаровой молнии

Такой подход в разной степени проводился во всех научных книгах и обзорах [10—12, 25, 32, 33, 42, 43], а также в популярных книгах [40, 44, 45] по шаровой молнии. При проведении анализа используются определенные предположения, от выполнения которых зависит достоверность выводов. В данную главу включен такой анализ природы шаровой молнии, который опирается на надежный фундамент и позволяет сделать достоверные утверждения о природе шаровой молнии. Они станут основой последующих представлений об этом явлении.

При проведении анализа будем исходить из того, что шаровая молния — некоторое материальное образование в воздухе, в котором происходят определенные процессы, приводящие к выделению энергии и излучению. Эти процессы определяют и наблюдаемые свойства данного светящегося образования. Рассмотрим сначала взаимодействие шаровой молнии с окружающим воздухом. При этом будем считать, что шаровая молния как материальное образование сохраняется в процессе этого взаимодействия и что выделяемая шаровой молнией энергия в виде тепла уходит в воздух. Эти предположения согласуются с наблюдательными данными, и далее проанализируем характер движения окружающего воздуха. Общая картина этого движения представлена на рис. 9. Нагреваясь вблизи шаровой молнии, воздух поднимается вверх, и на его место втя-

гивается холодный воздух. Вдали от шаровой молнии над ней движение воздуха подобно движению дыма, выходящего из трубы. Учитывая это, сделаем оценки параметров движущегося воздуха вдали от шаровой молнии на основании теории Я. Б. Зельдовича [46].

Будем исходить из уравнения Навье—Стокса для движущегося воздуха, которое имеет вид

$$(\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v} = \nu\Delta\mathbf{v} + g\frac{\Delta T}{T}, \quad (12)$$

где \mathbf{v} – скорость движения воздуха, g – ускорение свободного падения, ΔT – разность температур для воздуха в данной точке пространства и для начального ненагретого воздуха, ν – кинематическая вязкость воздуха, которая в рассматриваемой области температур T хорошо аппроксимируется зависимостью $\nu = \nu_0 (T/300)^{1.76}$, где $\nu_0 = 0,159 \text{ см}^2/\text{с}$ [47]. Отметим, что рассматриваемый режим отвечает небольшому нагреванию воздуха $\Delta T \ll T$. Кроме того, число Рейнольдса для данных условий движения воздуха $Re = vR/\nu$ велико⁽²⁾ (R – радиус сечения движущейся струи воздуха).

Как видно, первый член в правой части уравнения мал по сравнению с левой частью. Действительно,

$$\nu\Delta v \sim \frac{\nu v}{R^2} \frac{1}{Re} \ll \frac{v^2}{R}.$$

На основании этого получаем следующую оценку для характерной скорости воздуха там, где радиус сечения движущегося воздуха равен

$$v \sim \left(gR \frac{\Delta T(R)}{T} \right)^{1/2}. \quad (13)$$

Отсюда находим для мощности, которая переносится нагретым воздухом:

$$Q \sim c_p \rho \Delta T \cdot v R^2 \propto c_p \rho g^{1/2} R^{5/2} \Delta T^{3/2} \cdot T^{-1/2}, \quad (14)$$

где c_p – удельная теплоемкость воздуха, ρ – его массовая плотность. Поскольку переносимая воздухом мощность не зависит от сечения, имеем $R^{5/2} \Delta T^{3/2}(R) = \text{const}$, т. е.

$$\Delta T(R) \sim R^{-5/3}. \quad (15)$$

Шаровая молния как геометрическое тело создает сопротивление потоку движущегося воздуха, и поэтому на шаровую молнию со стороны обтекающего ее воздуха действует сила, направленная вверх. Таким образом, тепловые процессы, связанные с передачей тепла от шаровой молнии к окружающему воздуху, вызывают возникновение подъемной силы, действующей на шаровую молнию. Эта сила равна:

$$F \sim \rho v^2 R^2 \propto g \rho R^3 \frac{\Delta T}{T}. \quad (16)$$

Вводя численный коэффициент a , перепишем это соотношение в виде:

$$F = a g \rho R_0 \frac{\Delta T(R_0)}{T} \pi R_0^2, \quad (17)$$

где R_0 – радиус шаровой молнии. В модельных экспериментах, выполненных в работе [48], был найден числовой коэффициент в формуле (16), который равен $a = 11 \pm 5$.

На основе полученных соотношений определим некоторые параметры шаровой молнии. Во-первых, на основании формулы (14) с учетом

числового параметра имеем, что нагревание воздуха вблизи средней шаровой молнии равно

$$T=60 \text{ К} \cdot 10^{\pm 0,6}. \quad (18)$$

Как видно, эта величина того же порядка, что и для электрического утюга, который является хорошей моделью, описывающей теплообмен шаровой молнии с окружающим воздухом. Во-вторых, определим характерную плотность материала шаровой молнии из условия, что она может летать в воздухе. Приравнявая подъемную силу (17), действующую на среднюю шаровую молнию, ее весу, находим, что отношение веса шаровой молнии к весу воздуха, находящегося при нормальных условиях в ее объеме, равно

$$Z=1 \cdot 10^{\pm 0,8}, \quad (19)$$

т. е. средний удельный вес материала шаровой молнии порядка удельного веса воздуха⁽³⁾.

Таким образом, из анализа взаимодействия шаровой молнии с окружающим воздухом получено два вывода. Во-первых, температура в пограничной области по сравнению с температурой воздуха вдали от шаровой молнии повышается на величину порядка 100 К. Во-вторых, удельный вес материала шаровой молнии порядка удельного веса воздуха. При этом не было использовано никаких предположений о структуре шаровой молнии, но наряду с наблюдательными параметрами шаровой молнии учитывалось, что ее свойства сохраняются в процессе ее существования.

3.2. ШАРОВАЯ МОЛНИЯ КАК ИСТОЧНИК СВЕТА. Свечение шаровой молнии является одним из основных ее свойств, так что анализ излучательных свойств шаровой молнии может дать полезную информацию о ней. Для этого сравним шаровую молнию с другими источниками

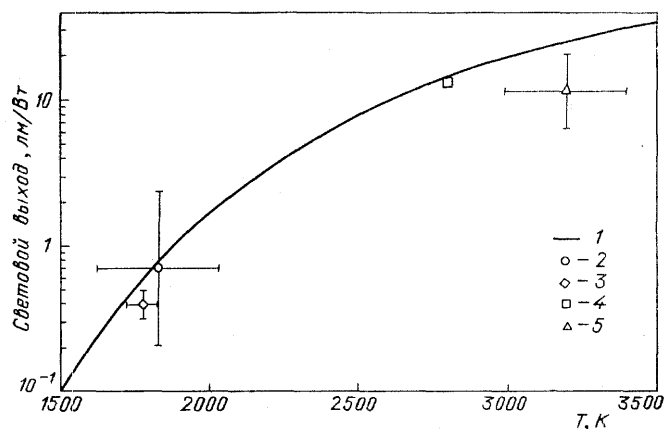


Рис. 10. Световые выходы для ряда источников света. 1—абсолютно черное тело, 2—шаровая молния, 3 — пламя свечи, 4 — электрическая лампа, 5 — пиротехнический состав

света, взяв за основу световые параметры средней шаровой молнии (см. табл. XVI), у которой световой поток равен 1500 ± 200 лм и световой выход составляет $0,6 \cdot 10^{\pm 0,5}$ лм/Вт. На рис. 10 приведены световые выходы шаровой молнии и других источников света.

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 рав-

на 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 является оптически тонкой системой. Это означает, что либо она содержит много очагов излучения, которые в сумме занимают малую часть ее объема, либо, если свечение создается со всех точек объема, то в оптической области спектра это оптически прозрачная система.

Согласно проведенным оценкам температура излучающих частиц или излучающих областей шаровой молнии порядка 2000 К, тогда как температура воздуха на границе с шаровой молнией согласно данным предыдущего параграфа существенно ниже. 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 проведенным расчетам [32, 33, 49], 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 меньшим 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.

В результате проведенного анализа мы приходим к следующим выводам. Во-первых, температура на границе шаровой молнии (формула (18)) относительно невелика. Во-вторых, температура излучающих областей шаровой молнии составляет примерно 2000 К. В-третьих, эти горячие области занимают лишь малую часть объема шаровой молнии. Соединяя эти выводы, можно утверждать, что шаровая молния имеет пятнистую структуру и содержит много горячих зон, занимающих в сумме малую часть 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.

3.3. ХАРАКТЕР ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ. Ответ на этот вопрос зависит от предположения, обладает ли шаровая молния автономным источником энергии или поддерживается за счет внешнего источника энергии посредством электрических или электромагнитных полей. Этот вопрос дискутируется давно, и накопленный опыт свидетельствует о том, что возможен и тот, и другой случай. Ограничимся сначала шаровыми молниями, которые наблюдаются внутри помещений, куда не проникают внешние поля. Например, согласно данным Григорьева [15, 16], из 1984 проанализированных случаев наблюдения шаровой молнии половина из них фиксировалась внутри зданий (см. табл. IX). В этом случае шаровая молния поддерживается за счет внутреннего источника энергии.

Учитывая внутренний характер хранения энергии в шаровой молнии и анализируя протекающие в ней процессы [32, 33, 50, 51], приходим к выводу, что при наблюдающихся временах жизни шаровой молнии возможен только химический способ хранения энергии. Этот анализ производится следующим образом. Допустим, внутренняя энергия хранится в плазме или возбужденных частицах. Мы располагаем конкретной информацией, чтобы рассмотреть возможные каналы протекания реакции и выяснить, каким образом в каждом конкретном случае внутренняя энергия перейдет в тепло. Введем плотность внутренней энергии ε и время жизни системы τ , т. е. время, за которое система распадается, и внутренняя энергия переходит в тепло. Для большинства случаев $\tau \sim 1/\varepsilon$ и, в частности, для всех конкретных плазменных моделей шаровой молнии величина $\varepsilon \tau$ лежит в интервале [32, 50, 51] $5 \cdot 10^{-13} \text{—} 1 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} \cdot \text{с}/\text{см}^3$. Для наблюдаемой шаровой молнии (см. табл. I) эта величина равна $10^{1,2 \pm 0,6} \text{ Дж} \cdot \text{с}/\text{см}^3$. Такое сильное расхождение данных величин свидетельствует о том, что в плазме невозможно хранить энергию, соответствующую наблюдаемой шаровой молнии, в течение ее времени жизни. Это заставляет отказаться от плазменной и подобных ей гипотез шаровой молнии. Данное утверждение нетрудно понять с других позиций. Время жизни шаровой молнии—огромная величина по сравнению с характерными газокинетическими величинами. Например, характерное время столкновения молекул в атмосферном воздухе $\sim 10^{-10}$ с. Столь долгий срок релаксации подходит только для сильно запрещенных процессов, к которым относятся только химические процессы. Процессы с участием заряженных частиц, возбужденных атомов и молекул протекают гораздо эффективнее и поэтому невозможно хранить энергию в таком виде относительно долгое время.

Химическая энергия обладает еще одним преимуществом по сравнению с другими видами энергии. Это ее высокая емкость. Например, энергию средней шаровой молнии можно обеспечить примерно 10 спичками. Возьмем шар с радиусом средней шаровой молнии и зарядим его до предела, т. е. когда напряженность электрического поля будет равна пробойной $E=30 \text{ кВ}/\text{см}$. В этом случае заряд шара равен $10^{-5,2 \pm 0,1} \text{ Кл}$, а его энергия составит $10^{1,1 \pm 0,2} \text{ Дж}$, что на три порядка ниже энергии средней шаровой молнии.

Сравнивая химическую и электрическую виды энергии, следует отметить, что химическая энергия обладает большей емкостью, тогда как электрическая характеризуется существенно меньшими временами ее перехода в другие виды энергии. Считая, что шаровая молния обладает внутренним источником энергии, мы приходим к однозначному выводу, что этот источник поддерживается за счет химической энергии. При этом внутри шаровой молнии находится некоторое количество химически активного вещества. В табл. XVII приводится вес этого вещества для шаровой молнии с наиболее вероятной энергией ($7 \text{ кДж} \cdot 10^{\pm 0,2}$), а также удельный вес химически активного вещества.

Как видно, удельный вес химически активного вещества ниже полного удельного веса шаровой молнии (формула (19)), хотя различие между этими величинами не выходит за пределы точности их определения.

Остановимся на последнем случае, когда энерговыделение в пористой системе происходит за счет потери внутренней поверхности, т. е. уплотнения вещества и потери пористости. При нахождении этой величины считалось, что молекулы двуокиси кремния представляют собой сферы и взаимодействие между ними носит короткодействующий характер. Тогда если $\Delta H = 133 \pm 7$ ккал/моль [52] энтальпия, соответствующая переходу из твердого в газообразное состояние в расчете на одну молекулу, то при потере внутренней поверхности на каждую молекулу, которая сначала находилась на внутренней поверхности, приходится энерговыделение $\Delta H / 2$. Отсюда находим энерговыделение при уплотнении аэрогеля равное $3,5 \pm 0,2$ Дж/м², что для аэрогеля с типичной площадью внутренней поверхности ($S = 960$ м²/г) соответствует величине 3 кДж/г.

Таблица XVII. Химически активное вещество в средней шаровой молнии

Активное вещество	Удельное энерговыделение, кДж/г	Вес, г	Удельный вес, г/л *)
Пиротехнический состав	6	1	0,2
Уголь	30	0,2	0,04
Стеарин	40	0,2	0,03
Озон	3	2	0,4
Аэрогель SiO ₂	3	2	0,4

*) Точность $10^{\pm 1,0}$

Во многих наблюдаемых случаях действие шаровой молнии связано с выделением электрической энергии от внешнего источника [21, 22]. Действительно, в ряде случаев наблюдается разрушение электрических и телефонных сетей, различных электрических приборов и даже зданий в сельской местности. При больших разрушениях электрический заряд, протекающий по цепи, оценивается в 1 Кл. Поскольку этот заряд на несколько порядков выше того, который в принципе может нести шаровая молния, приходим к заключению, что в этих случаях электрическая энергия берется от внешнего источника (тучи или пылевого облака), а шаровая молния является проводящим телом, которое создает начальную ионизацию в воздухе и переносит энергию внешнего источника.

Отметим другой круг наблюдательных случаев, находящихся в противоречии с химическим источником энергии шаровой молнии. Сюда относятся случаи с быстрым вложением энергии, как проплавление дырок и металлических предметов, расщепление деревьев и бревен и т. д. Например, расщепление бревен представляется как результат быстрого испарения воды внутри, что создает высокое давление и разрывает их [12, 25]. Такое возможно только в случае быстрого вложения энергии, в частности, при прохождении по бревну электрического тока. Трудно представить это как результат действия химической энергии.

Указанные противоречия отражают сложность шаровой молнии как реального атмосферного явления. Видимо, на открытом воздухе шаровая молния может вызывать электрический пробой под действием внешнего источника энергии и таким способом можно объяснить, что выделяемая при ее взрыве энергия имеет электрический характер. В тех случаях, когда шаровая молния находится внутри помещений, она поддерживается за счет внутреннего химического источника энергии. Очевидно, это следует отнести и к шаровой молнии на открытом воздухе, когда она находится в свободном состоянии.

Таким образом, в отношении энергетики шаровой молнии приходим к следующему заключению, В большинстве случаев шаровая молния поддерживается за счет внутреннего химического источника. Шаровая молния активно взаимодействует с электрическими и электромагнитными полями и может стать причиной электрического пробоя в воздухе, в результате которого выделяется энергия, значительно превышающая содержащуюся в шаровой молнии. При этом у нас нет оснований утверждать, что шаровая молния, существующая внутри помещений, и шаровая молния, вызывающая электрический пробой воздуха, имеют разную природу.

3.4. Структура и общие выводы. Один из главных вопросов природы шаровой молнии связан с ее строением. При анализе этой проблемы следует учитывать, что в большинстве наблюдаемых случаев (см. табл. V) шаровая молния имеет сферическую форму и что в процессе эволюции шаровая молния сохраняет свой размер и форму. Согласно [16] лишь примерно в 4% наблюдений происходили изменения формы шаровой молнии или распад ее на части. Отсюда следует, что материал шаровой молнии, с одной стороны, оказывается жестко связанным и, с другой стороны, в среднем имеет малый удельный вес.

Эти условия вместе с ранее представленными наблюдательными параметрами предъявляют существенные требования к состоянию вещества шаровой молнии. Отсюда, в частности, следует, что вещество шаровой молнии не может находиться ни в состоянии газа, ни в состоянии пыли. Оценки показывают, что такие образования с размером и граничной температурой, соответствующих средней шаровой молнии, теряют свою форму и перемешиваются с окружающим воздухом за времена порядка 0,1 с [53].

Еще раз отметим, что основу нашего рассмотрения составляет предположение, что процессы внутри шаровой молнии управляются известными физическими законами. Это дает нам право отказаться от представлений, которые не имеют аналогов в окружающем нас мире. Таково отношение, например, к гипотезе [54—56], согласно которой вещество шаровой молнии находится в состоянии неидеальной плазмы. Недостаток информации не позволяет опровергнуть эту гипотезу так же, как и как-то проанализировать ее. Однако неизвестны случаи длительного существования неидеальной плазмы при высокой температуре без внешнего источника энергии и опыт развития этой проблемы показывает, что трудно ожидать этого. Поэтому данная гипотеза, несмотря на ее привлекательность, является неконкурентноспособной по сравнению с рассматриваемыми далее представлениями, которые опираются на определенные аналоги, существующие в природе или технике.

Таким образом, шаровая молния имеет жесткий каркас. Поскольку средний удельный вес этого каркаса мал, он является весьма рыхлым. Такое представление о структуре шаровой молнии, видимо, высказывалось ранее. Например, в работе Зайцева [57] в 1972 г. утверждалось: «Возникновение шаровой молнии начинается с образования объемных сетчатых структур». Однако в работе Александрова и др. [58] в 1982 г. эта концепция была сформулирована достаточно обоснованно. Авторы опирались на свои исследования взрыва металлических проволочек под действием проходящего через них электрического тока [5]. 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 к шаровой молнии, авторы [58] назвали ее структурой структурой нитевидного аэрозоля и на основе этого

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

Такое представление о структуре шаровой молнии было развито далее в работах [32, 49, 60]. Ранние экспериментальные исследования [61] показали, что объекты, образуемые при взрыве металлической проволоки в рассматриваемых режимах возбуждения и релаксации, имеют фрактальную структуру. Они носят название фрактального агрегата или фрактального кластера. Такая структура была распространена и на каркас шаровой молнии [49], так что каркас шаровой молнии имеет структуру фрактального кластера. Указанное уточнение дает дополнительную информацию, например, позволяет оценить размер элементов структуры каркаса шаровой молнии, который составляет несколько нанометров. Однако на этой стадии для нас важен сам вывод, что шаровая молния имеет жесткий каркас, и этот вывод не только согласуется с наблюдательными данными, но и имеет аналоги в окружающем нас мире.

Из проведенного анализа вытекают общие положения, которые должны составлять основу моделей шаровой молнии и дают общее представление о природе этого явления. Эти положения сводятся к следующему. Шаровая молния имеет жесткий каркас с удельным весом порядка удельного веса воздуха. Внутри каркаса протекают химические процессы, в результате которых запасенная в шаровой молнии химическая энергия превращается в тепло и энергию излучения. Это превращение осуществляется во многих зонах небольшого объема, температура которых составляет примерно 2000 К. Суммарный объем этих очагов химической реакции мал по сравнению с объемом шаровой молнии. Среднее нагревание воздуха на границе с шаровой молнией составляет десятки градусов.

4. Моделирование шаровой молнии.

4.1. Экспериментальное моделирование шаровой молнии как целого. Понимание природы, шаровой молнии, в принципе, позволяет воспроизвести это явление. А создание лабораторной модели шаровой молнии дает возможность более глубоко изучить ее. Поэтому в течение истории изучения шаровой молнии неоднократно предпринимались попытки воспроизвести шаровую молнию как целое в лабораторных условиях. Среди многих таких попыток были и удачные, когда образовывались светящиеся образования в воздухе. Но в конечном итоге даже эти успешные попытки не позволили получить более глубокое представление о 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.

Таким образом, лабораторные моделирования шаровой молнии с целью воспроизвести это явление как целое были отдельными эпизодами в плане его исследования. Они дают полезный опыт. Многие из таких попыток подробно освещены в монографии Барри [25]. Далее мы остановимся на некоторых из них, чтобы представить общие тенденции моделирования шаровой молнии и взглянуть на них с современных позиций.

Во всех ранних экспериментах в качестве источника энергии шаровой молнии использовался электрический газовый разряд, что объясняется удобством этого способа вложения энергии и подходящей энергетикой существующих разрядных устройств. Большая часть случаев моделирования шаровой молнии таким способом опиралась на предполо-

жение 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.

Одно из основных условий—разрядная область, которая представляет собой светящуюся плазму сферической формы, не должна касаться стенок сосуда, в котором зажигается разряд. Эту задачу удалось решить в 1942 г. Бабату [62] (см. [25]). Он использовал СВЧ разряд с частотой от 1 до 100 МГц и мощностью вплоть до 100 кВт. В области давлений порядка 10 торр в баллоне возникал огненный шар, не касающийся стенок. Работы Бабата много лет спустя были “продолжены и расширены многими исследователями. Трудности создания высокочастотного разряда при атмосферном давлении были преодолены П. Л. Капицей [63, 64]. В конечном итоге ему удалось создать СВЧ разряд в гелии при давлении в несколько атмосфер. Светящаяся область разряда не соприкасалась со стенками и имела форму шара. Добавление в атмосферу органических присадок резко усиливало интенсивность свечения.

Работы П. Л. Капицы являются наиболее последовательными в плане моделирования шаровой молнии, исходя из плазменного представления о ее природе. Утверждая, что плазма, моделирующая шаровую молнию, должна быстро распасться, Капица пришел к выводу, что энергия в плазму должна подводиться извне. Его эксперименты демонстрируют такую возможность. Тем самым идея Капицы и его эксперименты являются логически замкнутыми. Другое дело, что реальность возникновения такой шаровой молнии маловероятна, как показали дальнейшие исследования [65—67].

Несколько иной способ создания светящегося шара в СВЧ-разряде при атмосферном давлении осуществлен в работе Пауэла и Финкельштейна [68]. Воздух при атмосферном давлении поджигался с помощью дуги, а далее использовался СВЧ разряд частотой 75 МГц и мощностью генератора 30 кВт. Разряд зажигался в открытой стеклянной трубке, причем, передвигая электроды, можно было изменять размер занимаемой им области. После выключения разряда светящаяся область принимала форму шара и распадалась за доли секунды. В работе подробно исследован спектр излучения плазмы. Хотя время жизни наблюдавшихся светящихся образований существенно меньше времени жизни шаровой молнии, оно значительно превышает типичное время распада плазмы при атмосферных давлениях. Эту аномалию авторы объясняют присутствием большого количества метастабильных молекул.

Описанные эксперименты доказывают возможность создания газоразрядной плазмы в виде светящегося образования, напоминающего шаровую молнию, хотя и не аналогичного, ей полностью. При постановке своих экспериментов Андрианов и Сеницын [69] исходили из предположения, что шаровая молния возникает как вторичный эффект линейной молнии из материала, испарившегося после ее действия. Для моделирования такого явления авторы использовали так называемый эрозионный разряд — импульсный разряд, который создает плазму из испаряющегося материала. Запасенная энергия в условиях эксперимента составляла 5 кДж, разность потенциалов—12 кВ. Разряд направлялся на диэлектрический материал, максимальный разрядный ток составлял 12 кА.

Область разряда вначале отделялась от нормальной атмосферы тонкой мембраной, которая разрывалась при включении разряда, так что эрозионная плазма выбрасывалась в атмосферу. Движущаяся светящаяся область принимала сферическую или тороидальную форму, причем видимое излучение плазмы наблюдалось в течение примерно 0,01 с, а вообще свечение плазмы фиксировалось не дольше 0,4 с, что существенно меньше наблюдаемого времени жизни шаровой молнии.

Другое направление получения светящихся образований в воздухе использует короткое замыкание батарей с большим запасом энергии (~1МДж) и выдувание образующейся при этом электрической дуги из зоны ее образования. Начало этим исследованиям положили случаи короткого замыкания в электрической системе американских подводных лодок. Силберг [70, 71] оценивает энергию, затраченную на образование таких «огненных шаров», как 0,4—4 МДж. Их диаметр составляет 10—15 см, их время жизни 1 с. В последующих экспериментах электрическая схема оборудования подводной лодки была модифицирована, и в результате короткого замыкания иногда возникали «огненные шары». Однако эти эксперименты по своему содержанию носят предварительный характер и, видимо, характеризуются низкой воспроизводимостью.

В течение нескольких лет такие эксперименты в Лос-Аламосской Национальной Лаборатории проводил Тук. Судя по тому, что их результаты были зафиксированы только внутренним отчетом лаборатории, автор не достиг того, на что он рассчитывал. Согласно докладу Голки [72] к 1971 г. после 2,5 лет экспериментов Тук имел 30000 фотографий, и на 4 из них была воспроизведена шаровая молния. Голка провел подобные эксперименты, используя короткое замыкание в электрической системе движущегося локомотива и получал при этом светящиеся образования. Дьюкьюс [73, 74] модифицировал электрическую систему подводной лодки, используя в качестве электродов медную пленку и электрические емкости с запасом энергии 0,5 МДж. Он получал светящиеся шары диаметром 10 см со временем жизни 1,3 с. Еще раз заметим относительно данной серии экспериментов, что по характеру проведения они носят предварительный характер и, видимо, имеют низкую воспроизводимость. В то же время в результате короткого замыкания электрических цепей с большим запасом энергии возможно получение светящихся образований.

Среди экспериментов, моделирующих химическую природу шаровой молнии, наиболее интересным и последовательным является выполненный Барри в 1966 г. [25, 75—77]. В плексиглазовом ящике размером 50×50×100 см³ находился при атмосферном давлении воздух с примесью пропана, который поджигался искрой. Расстояние между электродами — 0,5 см, напряжение — 10 кВ, длительность разряда — 10⁻³ с, выделяемая энергия — 250 Дж. При концентрации пропана 1,4—1,8% вслед за искровым разрядом в камере образовывался желто-зеленый шар диаметром в несколько сантиметров. Он совершал быстрые беспорядочные движения по камере и через 1—2 с гас. Это явление по своим свойствам напоминает шаровую молнию и, во всяком случае, может трактоваться как ее аналог.

Дополнительные исследования показали, что в эксперименте образуются более сложные органические соединения. Барри приводит и другую информацию, подтверждающую такую возможность. Более сложные соединения, в том числе и углеводороды, конденсируются при комнатной температуре. В условиях эксперимента они образуют аэрозоли и концентрируются в небольшой области пространства. Начальная искра создает необходимое количество сложных соединений, а небольшая область концентраций пропана, при которых удается получить светящиеся шары, свидетельствует о конкуренции разных химических процессов в рассматриваемой системе.

Эксперименты Барри были продолжены японскими физиками [19, 78], которые основывались на той же схеме возбуждения химической смеси, но расширили круг используемых соединений и применили современную диагностику, в том числе видеосъемку процесса. Эксперименты проводились в стеклянном сосуде с размерами 73×37×43 см, в качестве электродов была использована медная проволока, причем электрическая энергия, вкладываемая в искровой разряд, не превышала 350 Дж. Экспе-

рименты были выполнены в метано-воздушной и этано-воздушной смеси при комнатной температуре и атмосферном давлении. Кроме того, к воздуху и воздушно-этановой смеси добавлялись волокна хлопка.

Наилучшие условия для образования светящихся шаров были получены вблизи порога воспламенения. На первой стадии процесса цвет светящегося шара был зеленым, далее он изменялся. Диаметр шаров не превышал 6 см, время жизни составляло примерно 0,3 с в воздушно-метановой смеси с концентрацией метана 2%. В воздухе с добавлением хлопка это время жизни увеличивалось до 0,6 с, а в воздушно-этановой смеси с добавлением хлопка оно увеличивалось до 2 с. Авторы отмечают низкую воспроизводимость результатов. Таким образом, в воздухе с различными химическими добавками возможно существование светящихся образований, которые возникают под действием электрической искры и поддерживаются за счет химической энергии. Однако процессы, ведущие к появлению светящихся образований, требуют выяснения, а сами эксперименты по получению светящихся образований в воздухе имеют невысокую воспроизводимость.

Среди экспериментов по воспроизведению шаровой молнии как целого особого внимания заслуживает работа Корумов [79]. По сути дела она является повторением экспериментов Теслы с использованием современной техники. Поскольку работа Теслы не была опубликована полностью, детали проведенного им эксперимента остаются неясными, а сами результаты имеют большую неопределенность. Поэтому выполненная авторами работа не сводится к простому воспроизведению экспериментов Теслы, выполненных 90 лет назад, и требовала творческого решения ряда промежуточных проблем. Был использован радиочастотный генератор Теслы, работающий на частоте 67 кГц. Он включает в себя спиральный волновод, индуктивно связанный с искровым прерывателем, и обеспечивает максимальное напряжение радиосигнала 2,4 МВ на частоте 67 кГц. Мощность, вкладываемая в систему, 70 кВт, мощность сигнала на электродах составляет 3,2 кВт, что обеспечивает пробой воздуха на длине 7,5 м. Фотографирование и видеосъемки использовались в данной работе для фиксации результатов.

В этой работе наряду со свечением от радиочастотного разряда иногда наблюдались сферические светящиеся образования миллиметровых размеров, которые вырастают до диаметра в несколько сантиметров и имеют время жизни от половины до нескольких секунд.

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. Далее мы рассмотрим аналоги шаровой молнии по ее отдельным свойствам.

4.2. Аналогии шаровой молнии. Предыдущий анализ (п. 3.4) показывает, что шаровая молния должна иметь жесткий каркас. Это утверждение [49] сделано из анализа процесса релаксации металлического

пара. На первой стадии этого процесса образуются твердые частицы нанометровых размеров, которые далее объединяются в рыхлый кластер. Этот кластер обладает фрактальными свойствами [77]. Одно из таких свойств можно сформулировать следующим образом. Если вокруг одной из частиц кластера провести сферу радиуса r , который значительно превышает радиус отдельной частицы, но меньше радиуса кластера, то масса части кластера внутри сферы m зависит от ее радиуса согласно закону [80,81]

$$m = m_0 \left(\frac{R}{r_0} \right)^D; \quad (20)$$

здесь m_0 , r_0 —масса и радиус отдельной частицы, из которых составлен кластер, D —фрактальная размерность кластера. Величина D зависит от условий формирования кластера и в случае образования его из релаксирующего пара лежит в пределах 1,8—2,1 (см., например, [49]).

По мере увеличения размера кластера средняя плотность материала в нем падает и при определенных размерах он может разорваться на части. Анализ механизмов нестабильности такого кластера [82] показывает, что реально его размер может превышать размер входящих в него частиц на три-четыре порядка. Если соединить много таких кластеров, то получим пористое тело, которое на малых размерах обладает фрактальными свойствами, а на больших размерах является однородным. Наиболее интересным для нас представителем таких пористых систем является аэрогель (см., например, [60, 83, 84]).

Аэрогели состоят из жестко связанных твердых частиц размером порядка нанометра. К настоящему времени получено несколько более десятка разновидностей аэрогелей. Все это—окислы разных элементов; видимо, только для них между твердыми частицами осуществляется сильная химическая связь. Все основные исследования проведены с аэрогелем двуокиси кремния, к нему относятся и все применения аэрогеля. Следует отметить, что из-за сложной технологии получения аэрогель является дорогим продуктом, что ограничивает его применение. Наименьшая плотность материала в получаемых образцах аэрогеля составляет 15 г/л [85]. Он обладает высокой термостойкостью—термическое разрушение аэрогеля наступает при температурах выше 1400 К [85]. Как видно, аэрогель является аналогом шаровой молнии в соответствии с ее структурой и может быть использован при моделировании процессов в шаровой молнии.

Здесь уместно сделать следующие замечания. Во-первых, плотность существующих аэрогелей на порядок превышает плотность каркаса шаровой молнии, определяемую формулой (19). Это связано с технологией получения аэрогелей, которая использует сверхкритические параметры растворителя геля, т. е. высокие температуру и давление. Если этот процесс удастся провести при нормальных давлениях, можно получить более разреженный продукт, хотя и менее стабильный. Во-вторых, каркас шаровой молнии образуется в атмосфере, находящейся в неравновесных условиях, и время формирования каркаса не может быть большим, во всяком случае, не может превышать время жизни шаровой молнии. Анализ показывает [32, 60], что время формирования каркаса резко зависит от размера частиц в нем. Поэтому размер частиц в каркасе шаровой молнии ограничен сверху и составляет порядка нанометра. Как видно, по этому параметру аэрогель хорошо моделирует каркас шаровой молнии.

Таким образом, аэрогель является удобной моделью каркаса шаровой молнии. Внутри каркаса происходят химические процессы, приводящие к разогреванию отдельных зон внутри шаровой молнии до температуры около 2000 К. Эти зоны создают свечение шаровой молнии. Отме-

тим, что одна из возможностей такого процесса связана с уплотнением аэрогеля, т. е. с объединением частиц, составляющих его каркас, в более крупные. Тогда удельная площадь внутренней поверхности уменьшается, так что выделяется связанная с этим энергия, что может поддерживать высокую температуру внутри аэрогеля.

На рис. 11 приведены времена уплотнения аэрогеля двуокиси кремния, полученные из данных работы Мюльдера и ван Лиеропа [85] на основании уравнения

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{S}{\tau(T)}, \quad (21)$$

где S — удельная площадь внутренней поверхности, $\tau(T)$ — время процесса. Однако энергия активации для скорости протекания процесса, найденная из аппроксимационной кривой рис. 11, оказывается слишком

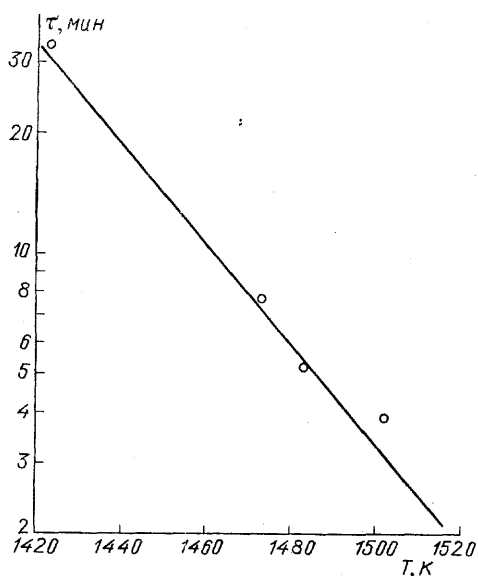


Рис. 11. Время уплотнения аэрогеля двуокиси кремния как функция температуры. Значки — обработка данных Мюльдера [85], сплошная линия аппроксимирует эти результаты

высокой, что вносит сомнения при аппроксимации полученных данных в область других температур. Во всяком случае видно, что рассматриваемый процесс эффективно протекает при высоких температурах, так что он может рассматриваться как один из возможных процессов тепловыделения в реальной шаровой молнии.

Протекание теплового процесса внутри каркаса шаровой молнии влияет на характер этого процесса. Каркас шаровой молнии гасит конвективные движения внутри себя, так что перенос энергии от горячих зон осуществляется за счет теплопроводности и излучения, причем чем плотнее каркас, тем большую роль в переносе тепла играет излучение. (Обсуждается область низких плотностей каркаса, когда тепловой поток переносится не по самому каркасу, а молекулами воздуха, находящимися внутри него.) В табл. XVIII приводятся результаты

расчета [86] для процесса горения угля внутри аэрогеля. Этот процесс моделирует процессы переноса и излучения внутри шаровой молнии.

Данные табл. XVIII относятся к аэрогелю двуокиси кремния плотности $0,05 \text{ г/см}^3$, находящемуся в атмосферном воздухе, и помещенному внутрь аэрогеля образцу активированного угля сферической формы и радиуса R . Под действием внешнего источника (лазерное излучение) температура угля доводится до величины T_1 , при которой происходит тепловой взрыв угля и его горение в воздухе, находящемся внутри аэрогеля. На нагревание образца до температуры T_1 тратится энергия ϵ . Далее происходит разогревание образца до температуры T_2 , при которой он горит в диффузионном режиме, т. е. скорость горения ограничивается скоростью подвода к нему кислорода. По мере выгорания образца и уменьшения его радиуса повышается температура горения, ибо при этом возрастает градиент плотности кислорода у поверхности образца, а следовательно, и скорость подвода кислорода. Полное время горения образ-

ца $\tau^{(4)}$ сравнимо или больше времени жизни шаровой молнии, основная часть выделяемой энергии идет на излучение (η – часть энергии, переносимая за счет теплопроводности, $1-\eta$ – за счет излучения). Модельный расчет, приведенный в табл. XVIII, дает представление о сочетании процессов переноса внутри шаровой молнии и может составить основу для моделирования этих процессов.

Используя аэрогель в качестве модели для каркаса шаровой молнии, определим коэффициент поверхностного натяжения для средней шаровой молнии. При этом будем считать, что аэрогель построен из шариков радиуса r_0 , число которых в единице объема равно n . Вводя плотность материала образца $\rho_0 = 2$ г/см³ и среднюю плотность аэрогеля $\bar{\rho}$, имеем следующее соотношение для определения

$$\bar{\rho} = n \cdot \frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho_0. \tag{22}$$

Если рассеять аэрогель некоторой плоскостью, то на единицу площади этой плоскости будет приходиться площадь $n^{2/3} \pi r_0^2$, которая занята материалом аэрогеля. Вводя энергию ϵ_0 , приходящуюся на единицу площади внутренней поверхности ($\epsilon_0 = 3$ Дж/г согласно примечанию к табл. XVII), получим для коэффициента поверхностного натяжения

$$\alpha = \epsilon_0 n^{2/3} \pi r_0^2 = \epsilon_0 \left(\frac{4\pi \bar{\rho}}{3\rho_0} \right)^{2/3}. \tag{23}$$

На основании формулы (23) получаем отсюда значение коэффициента поверхностного натяжения для средней шаровой молнии $\alpha = 0,06$ Дж/м² · 10^{±0,5}.

Таким образом, использование аэрогеля в качестве аналога шаровой молнии позволяет проанализировать некоторые свойства ее и намечает пути для экспериментального моделирования процессов, протекающих в каркасе шаровой молнии.

4.3. ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ МОДЕЛИ, ПОСТРОЕННЫЕ НА АНАЛОГАХ ШАРОВОЙ МОЛНИИ. Продолжая общую логику данного обзора, при моделировании процессов в шаровой молнии мы ориентируемся на ее аналоги в природе и технике. Одно из основных свойств шаровой молнии связано с ее излучением, причем шаровая молния является химическим источником света. В этом отношении имеются два аналога шаровой молнии. Первый из них относится к технике и представляет собой горение пиротехнических составов [87—

Таблица XVIII. Параметры процесса, моделирующего перенос энергии и излучение в шаровой молнии

R, мм	0,2	0,4	0,8
T ₂ , К	1410	1220	1060
T ₁ , К	990	940	890
τ, С	8	28	105
η	0,14	0,10	0,07
ε, Дж	0,01	0,09	0,6

89]. Второй – это пламя сгорания органических компонент, и, в частности, пламя свечи и спички [90, 91]. Пиротехнический состав включает в себя одновременно горючее и окислитель, а также светящую и связывающую компоненты. Процесс горения этого состава создает высокую температуру 3000—3500 К в зоне сгорания и вызывает эффективное свечение пламени в выбранной оптической области спектра. Другим аналогом химического процесса и процесса свечения в шаровой молнии является горение органического вещества в атмосферном воздухе. Кислород воздуха используется как окислитель, температура пламени несколько ниже 2000 К. Оба типа матери-

лов могут быть использованы при моделировании процессов в шаровой молнии в качестве химически активного вещества в ней.

Перейдем к анализу представленных двух моделей, используя свойства рассматриваемых пламен. В обоих случаях одновременно имеем много очагов пламени. При этом в силу характера теплоотвода и ивлучения эффективность свечения пламени зависит от его размеров. Если размер горячей зоны мал, то химическая энергия уходит в тепло, а коэффициент преобразования ее в излучательную энергию мал. Поскольку нам задан световой выход шаровой молнии, то по нему можно оценить и размер горячей зоны. В рамках первой модели, когда излучение создается резонансно возбужденными атомами, такие оценки выполнены в [33, 60]. Размер горячей зоны оказывается порядка нескольких миллиметров. Эта оценка подходит и для второй модели.

Если собрать все «горючее» из светящейся зоны в одну каплю, ее размер составит микроны. Поэтому, считая, что горючее в светящейся зоне поступило из конденсированной фазы, приходим к выводу, что горючее не является элементом каркаса шаровой молнии, размер элементов которого составляет нанометры. Горючее находится в порах каркаса шаровой молнии и характеризуется размером пор, составляющим микроны.

Это открывает путь для моделирования шаровой молнии. В процессе получения аэрогеля в растворе вместе с ним находится определенное количество горючего, которое после его получения остается в порах. Для второй модели горючее может быть введено в готовый аэрогель в виде газовой или жидкой фазы. При этом в случае использования пиротехнического состава (удельный энергосапас 6 кДж/г) его плотность в аэрогеле в соответствии со средними характеристиками шаровой молнии (см. табл. XVI) составляет $5 \cdot 10^{-4 \pm 0,5}$ г/см³, т. е. меньше удельного веса воздуха. Во второй модели плотность горючего в несколько раз меньше.

Таким образом, на основе аналогов шаровой молнии можно создать ее лабораторную модель, которая позволит изучить характер процессов создания и распространения пламени внутри пористого вещества. Исследование такой модели позволит ответить на принципиальные вопросы по шаровой молнии, в том числе выбрать подходящую компоненту в качестве химически активного вещества.

Проанализируем две представленные модели шаровой молнии, позволяющие описать характер ее свечения. В первой модели [19, 20, 23, 32, 33, 35, 39, 60, 92] горячая зона образуется в результате микровзрыва отдельных элементов химически активного вещества, которое одновременно включает в себя и окислитель, и горючее. Этот процесс распространяется в виде волн химической реакции вдоль отдельных направлений с характерной скоростью порядка м/с. Имеется подходящий кандидат в качестве химической компоненты—озон, который одновременно является и горючим, и окислителем, а также активно образуется при электрических процессах в атмосфере. Другим подходящим процессом такого рода является процесс уплотнения каркаса шаровой молнии, связанный с объединением частиц, составляющих каркас, в более крупные частицы. Этот процесс сопровождается энерговыделением в силу сокращения внутренней поверхности каркаса. Принципиальная проблема данной модели связана со временем ветвления волн химической реакции. Эти волны одновременно распространяются по многим «нитям» активного вещества, и, если исходить из времени жизни шаровой молнии, то время затухания отдельной волны или время ее ветвления должно составлять порядка 1 с. Такую оценку трудно получить для данного модельного описания.

Вторая модель [93] отличается от первой характером существования горячих зон: одновременно имеется много стационарных очагов пла-

мени. Вряд ли горючее в горячей зоне является твердым – каркас не выдержит высокой температуры. Более вероятно, что горячие зоны подобны пламени свечи—горючее попадает туда в виде пара и микрочастиц. Следует отметить, что параметры пламени свечи — температура и световой выход—совпадают с соответствующими параметрами шаровой молнии (см. рис. 10). Поэтому интересно привести параметры такой модели шаровой молнии, горячие зоны которой являются пламенами свечи. Средней шаровой молнии соответствует $10^{1,6\pm 0,5}$ таких очагов, отношение суммарной поверхности пламен к площади поверхности шаровой молнии составляет $10^{-1,2\pm 0,8(5)}$, начальное содержание горючего стеарина равно $0,5\cdot 10^{+0,2}$ г, для его сгорания необходимо $1,5\cdot 10^{+0,2}$ г кислорода, который содержится в $6\cdot 10^{+0,2}$ г воздуха. Первоначально внутри шаровой молнии находится $7\cdot 10^{+0,2}$ г воздуха. Эти оценки опирались на одинаковые энергетические характеристики средней шаровой молнии и ее модели.

Как видно из приведенных оценок, количество окислителя, первоначально находящегося внутри шаровой молнии, по порядку величины совпадает с количеством, необходимым для использования горючего. Возможно, некоторый дефицит окислителя способствует устойчивости наблюдаемой картины — возникновению многих очагов пламени. Отметим, что данная модель требует понимания еще одной проблемы — механизма воспламенения. Основу модели составляют стационарные очаги пламени, в котором происходит смешивание испаренного горючего с окислителем и его сгорание. Необходима начальная фаза этого процесса — поджог пламени.

Таким образом, представленные модели шаровой молнии, к которым мы логически приходим, используя имеющийся научный багаж, позволяют выбрать направление действия. Вместе с тем они ставят определенные проблемы, которые требуют решения. Рассмотренные модели, основу которых составляют существующие аналогии шаровой молнии, противоречат одна другой, и последующие исследования позволят отказаться от одной из них.

4.4. Газодинамика шаровой молнии. Для понимания природы шаровой молнии наряду с использованием наблюдательных данных необходим подробный анализ отдельных ее свойств, основанный на аналогах шаровой молнии и количественных проработках ее моделей, относящихся к соответствующим ее свойствам. Существенный прогресс в понимании газодинамики шаровой молнии был достигнут благодаря циклу работ Гайдукова [94—97]. Проведенные им исследования позволяют понять характер движения шаровой молнии в воздухе, объяснить поведение шаровой молнии при обтекании ею препятствий, прохождении через щели и отверстия, захват шаровой молнии воздушной струей.

При анализе газодинамики шаровой молнии полагается, что она представляет собой автономный объект, и при взаимодействии с ней потоков воздуха молекулы воздуха не прилипают к ней. Для анализа движения шаровой молнии в потоках воздуха, а также в случае прохождения шаровой молнии через широкие отверстия можно моделировать ее недеформируемым шаром (или предметом другой формы) [94, 95]. Эта модель позволяет объяснить многие наблюдаемые явления, такие, как захват шаровой молнии вихревыми потоками (например, при движении самолета), захват ее нагретой дымовой или воздушной струей, движущейся от источника тепла и т. д. [94—96].

Более сложным является движение шаровой молнии при прохождении через щели и отверстия размерами, меньшими размера шаровой молнии. В этом случае подходящей моделью для шаровой молнии является несжимаемая идеальная жидкость [97].

Подходя к малому отверстию вместе с потоком воздуха, шаровая молния «выпускает» в него цилиндрическую струю и, таким образом, перетекает с одной стороны преграды на другую. Далее под действием внутренних сил, создающих поверхностное натяжение, вещество шаровой молнии вновь принимает форму шара.

Результаты цикла работ Гайдукова [94—97] по газодинамике шаровой молнии в воздушных потоках интересны не только с точки зрения объяснения наблюдаемых фактов. Они формулируют и модель внутреннего строения шаровой молнии. Шаровая молния составлена из элементов — фрактальных кластеров, взаимодействующих между собой. Это взаимодействие и обеспечивает поверхностное натяжение, определяющее сферическую структуру шаровой молнии. С другой стороны, это взаимодействие относительно слабое, так что под действием потоков шаровая молния может изменять свою форму.

На основании полученных Гайдуковым результатов и наблюдательных фактов можно сделать оценки для величины поверхностного натяжения в шаровой молнии. Действительно, пусть вещество шаровой молнии протекает через отверстие, радиус которого b меньше радиуса шаровой молнии R_0 . Тогда на шаровую молнию действует сила [96]

$$F \sim \frac{12\pi\rho\gamma^2}{R_0^2}, \quad (24)$$

где ρ — массовая плотность вещества шаровой молнии, γ — объем шаровой молнии, перетекающий через отверстие в единицу времени. Вводя τ — полное время протекания, имеем $\gamma = (4\pi/3)R_0^3/\tau$. Около отверстия создается напряжение $\sigma_F = F/(\pi b^2)$, которое должно превышать поверхностное натяжение шаровой молнии. Эта величина равна:

$$\sigma_F \sim 200 \frac{\rho R_0^4}{b^2 \tau^2}. \quad (25)$$

Физика процесса прохождения шаровой молнии через отверстие состоит в следующем [96]. Пусть шаровая молния подходит к отверстию, причем давление воздуха различно с разных сторон отверстия. Эта разность давлений вызывает движение воздуха к отверстию и заставляет вещество шаровой молнии перетекать с одной стороны отверстия на другую. Напряжение (25), возникающее на поверхности шаровой молнии под действием рассматриваемого эффекта, должно превышать напряжение, создаваемое поверхностным натяжением, т. е. $\alpha < \sigma_F R_0$. Только в этом случае газодинамические силы «вырвут» струю из вещества шаровой молнии и таким способом перенесут вещество шаровой молнии с одной стороны отверстия на другую. Тем самым, имеем верхнюю оценку для величины поверхностного натяжения в веществе шаровой молнии

$$\alpha \leq \frac{200 \rho R_0^5}{b^2 \tau^2}. \quad (26)$$

Выбрав разумные значения параметров $b \sim 5$ см, $\tau \sim 1$ с, получим отсюда $\alpha \leq 0,1 \cdot 10^{21,6}$ Дж/м². Это значение порядка поверхностного натяжения воды (0,07 Дж/м²), хотя точность данной оценки невелика. (При оценке точности мы учли неопределенность плотности вещества шаровой молнии ρ и времени протекания τ .)

4.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ШАРОВОЙ МОЛНИИ. Представленные выше модели позволят проанализировать лишь одну сторону рассматриваемого явления — характер создания горячих светящихся зон внутри шаровой молнии. Хотя эта проблема в настоящее время является главной проблемой шаровой молнии, она не исчерпывает всей сложности этого явления. Далее мы бегло остановимся на другом круге

проблем, который связан с электрическими свойствами шаровой молнии, имеющими принципиальное значение для образования и существования шаровой молнии.

Электрические свойства шаровой молнии интересны в следующих отношениях. Во-первых, формирование шаровой молнии происходит под действием электрических процессов в атмосфере, которые создают неравновесные условия, позволяющие сформироваться каркасу шаровой молнии. Во-вторых, электрический заряд создает устойчивость каркасу шаровой молнии и фиксируется в наблюдательных данных. В табл. XIX приведены электрические параметры средней шаровой молнии [3], полученные из условия, что сила притяжения шаровой молнии к металлическим объектам того же масштаба, что и вес ее каркаса. В-третьих, шаровая молния активно взаимодействует с внешними электрическими полями в атмосфере и может быть причиной пробоя, вызывающего разрушения.

Таблица XIX. Электрические параметры средней шаровой молнии

Параметр	Значение	Точность
1. Заряд, Кл	$8 \cdot 10^{-7}$	$10^{\pm 0,5}$
2. Плотность заряда, $e/\text{см}^3$	$4 \cdot 10^8$	$10^{\pm 0,3}$
3. Поверхностное натяжение, Дж/м ²	0,2	$10^{\pm 0,8}$
4. Отношение заряда к массе, Кл/г	$5 \cdot 10^{-8}$	$10^{\pm 0,5}$
5. Напряженность электрического поля вблизи поверхности, кВ/м	400	$10^{\pm 0,6}$
6. Электрический потенциал, кВ	50	$10^{\pm 0,6}$
7. Электрическая энергия, Дж	0,04	$10^{\pm 0,8}$
8. Электрическое давление на поверхность, Па	1	$10^{\pm 0,6}$

Данные табл. XIX показывают, что шаровая молния образуется при неравновесных условиях в атмосфере. Действительно, средняя плотность заряда в спокойной атмосфере $10^2-10^3 \text{ см}^{-3}$ значительно меньше заряда, фиксируемого на каркасе шаровой молнии. Отсюда следует, что каркас шаровой молнии формируется в области электрического разряда с высоким электрическим потенциалом [32, 92]. В последнее десятилетие были проведены интенсивные исследования образования фрактальных кластеров из твердых частиц в растворах и газе. С точки зрения образования шаровой молнии интересно изучить этот процесс в сильных электрических полях.

Основой табл. XIX и рассматриваемой версии является наличие у шаровой молнии электрического заряда. Этот факт подтверждается наблюдательными данными, в частности, движением шаровой молнии вдоль проводников. С точки зрения устойчивости шаровой молнии присутствие электрического заряда также существенно — он создает поверхностное натяжение и тем самым обеспечивает стабильность каркаса шаровой молнии [58], не позволяя ее каркасу «схлопнуться».

Другая версия относительно электрических свойств каркаса шаровой молнии была выдвинута Александровым и др. [98]. Авторы предположили, что вблизи каркаса шаровой молнии создается коронный разряд под действием сильного электрического поля, в котором она находится. Возникающие при этом электрические токи создают силу, действующую на шаровую молнию. В результате этого шаровая молния может плавать, висеть в воздухе и т. д. Свою версию Александров и др. [98] подтвердили изящным экспериментом. Шарик радиусом 1 см, изготовленный из проволоки диаметром 0,15 мм, помещается в сильное электрическое поле (расстояние между электродами 30 см, разность

потенциалов 50—160 кВ). Вес шарика составлял 0,1 г. Под действием электрического поля вблизи нитей шарика возникал слабый коронный разряд, обеспечивающий устойчивое положение шарика в воздухе. Это положение могло меняться в результате перемещения окружающих предметов, людей и т. д. Основное утверждение авторов как результат проведенных экспериментов — устойчивое движение шарика в воздухе в стороне от поверхностей обеспечивается коронным разрядом.

Следует отметить, что используемый в описанных экспериментах шарик не моделирует каркас шаровой молнии. Он содержит несколько витков проволоки, тогда как каркас шаровой молнии включает в себя большое число элементов структуры. Поэтому условия создания и протекания коронного разряда в этих системах могут сильно различаться. Коронный разряд вблизи отдельной проволоки обеспечивается существенно легче, чем около разветвленной системы. Тем самым несмотря на привлекательность данного эксперимента, к его результатам следует относиться весьма осторожно.

Однако сама версия о существовании коронного разряда вблизи каркаса шаровой молнии требует серьезного рассмотрения. При этом следует иметь в виду, что коронный разряд, создаваемый вблизи заряженного каркаса шаровой молнии, вызывает его разрядку, что может привести к «схлопыванию» каркаса и его разрушению. Имеется другой механизм разрядки каркаса в отсутствие внешнего поля. Если в горячие зоны шаровой молнии попадает легко ионизируемая присадка (например, калий), то в этих зонах образуется плазма с относительно высокой плотностью [92]. Тогда она является источником ионов, приводящих к разрядке каркаса шаровой молнии.

Рассматриваемые концепции электрически заряженного каркаса шаровой молнии и коронного разряда вблизи ее каркаса взаимно исключают друг друга. Казалось бы, на основе наблюдательных данных и из требования устойчивости шаровой молнии предпочтение следует отдать первой из них. Тем не менее, данный вопрос требует серьезного анализа. Интересно, что эти противоположные версии были выдвинуты одними и теми же учеными [58, 98], что является отражением сложности изучаемого явления.

При анализе электрических свойств шаровой молнии важной является проблема возникновения электрического пробоя в атмосфере, вызываемого шаровой молнией. Согласно наблюдательным данным шаровая молния приводит к воздействиям и разрушениям, которые могут быть объяснены как результат действия внешнего электрического источника. В этих случаях шаровая молния как источник ионизации изменяет электрические свойства воздуха, находящегося в электрическом поле атмосферы, что вызывает его пробой. Описание физической картины протекающих при этом явлений требует дополнительного анализа качественных элементов этой картины. Видимо, подобная ситуация ранее сложилась в проблеме огня святого Эльма, где недавние исследования [99, 100] изменили представление об этом явлении. Можно ожидать такого же прогресса и в развитии данной проблемы, относящейся к влиянию шаровой молнии на электрический пробой в атмосфере.

4.6. Нестационарность процессов в шаровой молнии. Опыт изучения шаровой молнии заключается в том, что это явление сложное, его следует разбить на отдельные стороны и подробно изучить их независимо. При этом за основу следует взять наблюдательные данные и моделировать основные свойства шаровой молнии с помощью ее аналогов—физических систем и явлений с теми же процессами или свойствами, которые отвечают шаровой молнии. На этом пути и была введена наблюдательная модель шаровой молнии, которая позволяет

освободиться от многих гипотез и дает возможность правильно выбрать основные проблемы, относящиеся к природе шаровой молнии. И опять наш опыт показывает, что явление шаровой молнии весьма сложное и поэтому введенная наблюдательная модель шаровой молнии лишь в грубой форме отражает это явление. Действительно, вводя среднюю шаровую молнию со средними наблюдательными параметрами (см. табл. XVI), мы, тем самым, полагаем, что эти параметры сохраняются в течение времени, сравнимого со временем жизни шаровой молнии. Заключение стационарности этого явления невозможно сделать на основе наблюдений. Последующий анализ убеждает нас в том, что шаровая молния не является стационарным явлением.

Для этого рассмотрим модель, основу которой составляют ранее установленные факты. 1) Внутри шаровой молнии имеется ряд очагов тепловыделения, которые для простоты будем считать сферическими с радиусом r_0 и температурой T_0 . Этими горячими зонами создается излучение. 2) Благодаря твердому каркасу перенос тепла внутри шаровой молнии осуществляется за счет теплопроводности. Для простоты будем считать, что отвечающий этому коэффициент теплопроводности совпадает с теплопроводностью воздуха (каркас сильно разрежен). Для коэффициента теплопроводности воздуха [47] в области температур 300—2000 К используем аппроксимацию $\kappa(T) = \kappa(T_0) (T/T_0)^{0.8}$, где $T_0 = 300$ К, $\kappa(T_0) = 0,27$ мВт/см·К, и погрешность этой аппроксимаций менее 10%.

Исходя из рассматриваемой стационарной модели, проведем внутри шаровой молнии изотермы через точки с одинаковой температурой T . Пусть $S(T)$ —полная площадь соответствующей поверхности. Полный поток тепла через нее равен

$$\mathcal{P} = -\kappa(T) S(r, T) \frac{dT}{dr}, \quad (27)$$

где r —средний радиус кривизны поверхности. При этом $S(R_0 T_0) = 4\pi R_0^2$, где R_0 —радиус шаровой молнии, T_0 —температура его поверхности, $S(r_0, T_1) = n \cdot 4\pi r_0^2$, где r_0 —радиус очага тепловыделения, T_1 —температура горячей зоны, n —число очагов. Поскольку тепловыделение происходит только в горячих зонах, вне их $P = \text{const}$, т. е. соотношение (27) является уравнением. Решим его, задавая

$$S(T) \propto T^{-\gamma}, \quad S(r) \propto r^\alpha. \quad (28)$$

Получим связь между указанными параметрами

$$\gamma = \frac{1,8\alpha}{\alpha-1}, \quad \alpha = \frac{\gamma}{\gamma-1,8}. \quad (29)$$

Из монотонности зависимостей $S(T)$ и $r(T)$ находим диапазон изменения параметров:

$$1, < \alpha < 2, \quad 3,6 < \gamma. \quad (30)$$

На основании полученных соотношений определим энергетические параметры шаровой молнии. Мощность тепла, переносимого внутри шаровой молнии равна:

$$\mathcal{P} = \frac{S(T) \kappa(T) T}{r(T)} \frac{\alpha-1}{1,8} = \mathcal{P}_0 (\alpha-1),$$

причем для средней шаровой молнии $P_0 = 10^{1,0 \pm 0,3}$ Вт. Считая, что горячие зоны излучают как черное тело, получим для мощности испускаемого излучения:

$$\mathcal{P} = \sigma T_1^4 S(T_1) = 4\pi R_0^2 \sigma T_0^4 \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^\delta = \mathcal{P}_0 \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^\delta,$$

где

$$\delta = 4 - \gamma = \frac{2,2\alpha - 4}{\alpha - 1}$$

и для средней шаровой молнии

$$\mathcal{P} = 250 \cdot 10^{\pm 0,6} \text{ Вт.}$$

Далее, величина энергии, которую необходимо вложить в шаровую молнию для достижения рассматриваемого стационарного состояния, равна:

$$E = \int_{r_0}^{R_0} S dr \int_{T_0}^{T(r)} c_p \rho(T') dT',$$

где c_p — теплоемкость единицы массы воздуха, $\rho(T') = \rho_0(T_0)T_0/T'$ — его плотность. Основной вклад в интеграл вносят области с температурой, близкой к температуре поверхности шаровой молнии. Имеем

$$E = \frac{4\pi R_0^3 c_p \rho(T_0) T_0 (\alpha - 1)}{1,8 (\alpha + 1)^2} = \frac{9E_0 (\alpha - 1)}{(\alpha + 1)^2} < E_0,$$

причем для средней шаровой молнии $E_0 = 400 \cdot 10^{\pm 0,4}$ Дж.

Проанализируем полученные результаты. Из них следует, что энергия, необходимая для достижения стационарного состояния, мала по сравнению с характерной энергией шаровой молнии, и энергопотери шаровой молнии связаны с излучением горячих зон. Однако сама мощность, перерабатываемая в этом процессе, по крайней мере, на порядок меньше мощности средней шаровой молнии.

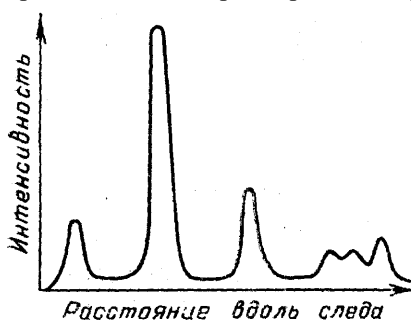


Рис. 12. Фотометрия шаровой молнии вдоль ее следа [101]

Это расхождение можно объяснить некорректностью определения энергии шаровой молнии, ибо в большинстве используемых наблюдаемых случаев энерговыделение, видимо, происходило под действием внешнего источника электрической энергии. Однако, если подсчитать световой поток от шаровой молнии, то при условиях рассматриваемой модели, он окажется на порядок ниже, чем согласно наблюдательным данным. Таким образом, между рассматриваемой моделью и наблюдательными данными имеется явное противоречие.

Противоречия между стационарной моделью энергопереноса и наблюдательными данными приводят к выводу о нестационарности процессов внутри шаровой молнии. Этот вывод находит подтверждение в отдельных наблюдательных фактах. На рис. 12 [101] приводится зависимость количества света, попавшего на отдельные участки фотопленки при фотографировании шаровой молнии фотоаппаратом с открытым затвором. Если считать, что шаровая молния двигалась с постоянной скоростью, этот рисунок может быть интерпретирован как зависимость интенсивности шаровой молнии от времени. Нестационарность процессов в шаровой молнии, естественно, сильно усложняет анализ этого явления.

Противоречия между стационарной моделью энергопереноса и наблюдательными данными приводят к выводу о нестационарности процессов внутри шаровой молнии. Этот вывод находит подтверждение в отдельных наблюдательных фактах. На рис. 12 [101] приводится зависимость количества света, попавшего на отдельные участки фотопленки при фотографировании шаровой молнии фотоаппаратом с открытым затвором. Если считать, что шаровая молния двигалась с постоянной скоростью, этот рисунок может быть интерпретирован как зависимость интенсивности шаровой молнии от времени. Нестационарность процессов в шаровой молнии, естественно, сильно усложняет анализ этого явления.

4.7. Анализ природы шаровой молнии. Подведем итоги проведенному анализу, который позволяет выбрать пути дальнейшего изучения шаровой молнии. Основу этого анализа составляла наблюдательная модель шаровой молнии, которая обладает параметрами, усредненными по многим наблюдениям (см. табл. XVI). В результате прове-

денного анализа можно дополнить среднюю шаровую молнию новыми параметрами, собранными в табл. XX. Тем самым, в результате выполненного анализа мы имеем возможность расширить наши представления о шаровой молнии.

Остановимся на одном из параметров табл. XX—поверхностном натяжении шаровой молнии. Она была найдена тремя способами. Во-первых, при моделировании каркаса шаровой молнии аэрогелем двуокиси кремния ($\alpha=0,06$ Дж/м²), во-вторых, учитывалась возможность шаровой молнии менять свою форму при прохождении через щели и отверстия ($\alpha \leq 0,1$ Дж/м²) и, в-третьих, под действием электрических сил (0,2 Дж/м²), тех же, которые вызывают притяжение шаровой молнии к металлическим предметам. Существенно, что значения трех оценок совпали в пределах их точности, что свидетельствует о надежности полученного результата. Интересно, что поверхностное натяжение шаровой молнии оказалось близким к поверхностному натяжению воды (0,07 Дж/м²).

Таблица XX. Дополнительные параметры средней шаровой молнии

Параметр	Значение
1. Отношение веса каркаса шаровой молнии к весу воздуха в нем	$1 \cdot 10^{\pm 0,8}$
2. Вес химически активного вещества, г	$10^{0,1 \pm 0,6}$
3. Температура воздуха на границе шаровой молнии, К	$60 \cdot 10^{\pm 0,6}$
4. Температура горячих (излучающих) областей, К	1800 ± 200
5. Размер отдельной горячей зоны, см	$10^{0,2 \pm 0,4}$
6. Число горячих зон	$10^{2,5 \pm 0,7}$
7. Оптическая ширина шаровой молнии	$10^{-1,7 \pm 0,8}$
8. Поверхностное натяжение, Дж/м ²	$0,1 \cdot 10^{\pm 0,5}$
9. Размер частиц каркаса шаровой молнии, нм	$3 \cdot 10^{\pm 0,4}$
10. Модуль Юнга каркаса, Па	$5 \cdot 10^{\pm 3}$

Следующий параметр—размер частиц, из которых составлен каркас шаровой молнии, может быть найден из условия, что характерное время формирования каркаса в результате ассоциации макроскопических частиц не превышает времени жизни шаровой молнии (см. [32, 33]). Отметим, что диаметр частиц в аэрогеле двуокиси кремния равен примерно 3 нм.

Упругие свойства шаровой молнии характеризуются модулем Юнга, значение которого получено аппроксимацией данных для аэрогеля двуокиси кремния [102] в область малых плотностей. При этом большая погрешность приведенного в табл. XX значения обусловлена как неопределенностью в плотности каркаса шаровой молнии, так и погрешностью при аппроксимации данных в область низких плотностей. Значение модуля Юнга может служить и характеристикой прочности каркаса шаровой молнии. Прочность каркаса шаровой молнии тем ниже, чем ниже его плотность. Оценки показывают, что каркас шаровой молнии может быть разрушен под действием протекающих в нем энергетических процессов, если его плотность примерно на порядок ниже плотности атмосферного воздуха.

Энергетические процессы внутри шаровой молнии вызывают повышение давления внутри каркаса. Согласно приведенным оценкам перепад давления воздуха внутри и вне каркаса шаровой молнии относительно мал. Однако, поскольку энерговыделение осуществляется независимо во многих точках (зонах) каркаса и носит нерегулярный характер, то этот процесс сопровождается генерацией звуковых колебаний. Спектр этих колебаний сосредоточен в области, воспринимаемой ухом

человека. При этом оценки показывают, что шаровая молния — слабый акустический источник, и громкость звука от средней шаровой молнии на расстоянии 3 м от нее оценивается в 58 ± 3 дБ.

Логика вышеприведенного анализа состояла в том, что с одной стороны, имеются аналоги шаровой молнии, характеризующиеся соответствующими параметрами, и, с другой стороны, параметры шаровой молнии восстанавливаются из наблюдательных данных. Двигаясь от реальных объектов в сторону параметров шаровой молнии, мы делаем определенные заключения о ее внутреннем строении и других свойствах. Такой способ полезен в двух отношениях. Во-первых, он обеспечивает надежность, поскольку в обоих предельных случаях мы опираемся на реальные системы, и для понимания явления необходимо связать эти случаи. Во-вторых, такой способ дает ключ для моделирования отдельных свойств шаровой молнии, причем основу моделирования составляют доступные реальные объекты. Тем самым, такой подход перспективен, ибо в конечном итоге позволяет ответить на разные вопросы.

Тем не менее, пока не выполнено успешное моделирование, сохраняется сомнение в реальности выводов, полученных таким путем. В первую очередь это относится к каркасу шаровой молнии, причем из опыта исследования фрактальных агрегатов следует, что такая система должна существовать, однако, остается неясным, какова прочность каркаса, и за какое время он будет уплотняться. При определенных значениях этих параметров существование рассматриваемой конструкции как каркаса шаровой молнии станет нереальным.

К счастью, мы имеем ряд примеров, подтверждающих возможность достаточно длительного существования ажурной металлической конструкции лабораторных размеров с удельным весом порядка удельного веса воздуха. Приведем один из примеров такого рода, относящийся к нанесению металлических покрытий на болометры и приемники теплового излучения. Поверхность таких приборов, состоящая из фрактальных кластеров металлов, эффективно поглощает тепловое излучение. В одном из исследований такого рода [103] создавалась поверхность, состоящая из кластеров кобальта. Малые макрочастицы кобальта образовывались в атмосфере аргона при испарении металла традиционным способом [104] при использовании нагретой вольфрамовой спирали в условиях конвекционного переноса пара. Давление аргона находилось в интервале 0,25—10 торр. Частицы металла, подобные саже, собирались на медной сетке, покрытой углеродом, и исследовались с помощью электронного микроскопа. Средняя толщина металлического осадка составляла 10—200 мкм, причем объем частиц кобальта в этом слое оценивается в 10^{-4} — 10^{-2} , т. е. осадок имел пористую структуру и основной его объем занимали поры. Средний радиус частиц составлял несколько нм. Как видно, на нижнем пределе удельный вес пленки оказывается порядка удельного веса воздуха. Поскольку толщина пленки значительно превышает размер пор, такая технология позволяет получить пленку большей толщины, т. е. в конечном итоге объемный объект лабораторных размеров.

В качестве другого примера такого рода представим работу [105], где путем сжигания SiH_4 в воздухе получали объекты миллиметровых размеров, состоящие из фрактальных кластеров двуокиси кремния. Минимальная плотность таких объектов составляла 7 г/л, они практически не разрушались, что позволяло производить с ними разные эксперименты.

Однако, чем ниже плотность рассматриваемой конструкции, тем скорее происходит ее уплотнение, т. е. тем меньше время жизни каркаса. Отсюда и из совокупности наблюдательных данных создается представление, что шаровая молния может образоваться вслед за резким воздействием на поверхность конденсированного тела: ударом молнии, коротким замыканием и т. д. По прошествии некоторого времени образовав-

шаяся при этом система «стареет» и неспособна привести к образованию ажурной конструкции — каркаса шаровой молнии.

Таким образом, вслед за принципиальными вопросами природы шаровой молнии поднимаются специальные дополнительные вопросы. Некоторые из них также имеют принципиальное значение, поскольку от ответа на них зависит реальность рассматриваемой (общей или конкретной) схемы процессов, определяющих данное явление. Эти вопросы требуют внимательного анализа.

5. Заключение. Целью данной статьи было сформулировать современные проблемы физики шаровой молнии и вытекающие отсюда направления, в которых следует проводить исследования. Основу этого анализа составляет предположение, что шаровая молния управляется известными физическими законами. Тогда, опираясь на логическую замкнутость окружающего нас мира, можно найти другие физические объекты или явления, где эти законы проявляются, и использовать их для моделирования шаровой молнии. Таким образом, можно найти оптимальный путь решения данной проблемы.

Трудности в понимании данного явления связаны с недостатком информации о физических процессах для условий, относящихся к шаровой молнии. Только в последнее время появилась информация о фрактальных кластерах, поддерживающая концепцию жесткого каркаса шаровой молнии. Требуется исследование пламен внутри пористых систем, изучение электрических явлений в атмосфере, содержащей дисперсную фазу или: горящие объекты, и т.д. Получаемая при этом информация будет способствовать пониманию и моделированию процессов в шаровой молнии. Целью самих исследований является комплексное изучение процессов в атмосфере, позволяющее понять физику шаровой молнии, а не получение долгоживущих светящихся образований в атмосфере, моделирующих шаровую молнию. История развития рассматриваемой проблемы показала, что невозможно достичь ее решения одним шагом или одной красивой идеей⁽⁶⁾, а ее понимание последует только из детального изучения отдельных сторон этого явления. И поскольку в последнее десятилетие на этом пути достигнуты определенные успехи, можно ожидать дальнейшего прогресса, тем более, что в последнее время много ученых подключилось к этой проблеме.

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

ПРИМЕЧАНИЯ К ТЕКСТУ

¹ В этом отношении интересно сравнить положение в изучении шаровой молнии и НЛО (неопознанных летающих объектов). В настоящее время за рубежом существует 48 официально зарегистрированных обществ, которые на общественных началах занимаются изучением НЛО. Это—свидетельство реальности данного явления. Однако отсутствие описания этого явления, основанного на большой статистике, дает почву для распространения искаженной информации о нем. Изучение шаровой молнии давно прошло этот этап, создав способы, позволяющие защититься от сенсационной, но ложной информации.

² Действительно, если для скорости движения воздуха воспользоваться формулой (13) и в качестве R использовать радиус средней шаровой молнии, получим следующую оценку для числа Рейнольдса $Re \sim 10^5 (\Delta T / T)^{1/2}$. В соответствии с формулой (15) оно растет ($Re \sim R^{2/3}$) по мере удаления от шаровой молнии.

³ Отметим, что это согласуется с оценкой Стаханова [12] Для удельного веса материала шаровой молнии, которая за свое существование успела много раз отско-
чить от стола.

⁴ Отметим, что за это время при рассматриваемых температурах аэрогель не
разрушается.

⁵ Для средней шаровой молнии этот параметр равен $10^{-1,7\pm 0,8}$ (см. раздел 3.2).

⁶ Как пример такого подхода можно привести статью Г. Лихошерстных «138
подходов к загадке природы шаровой молнии» [106], которая подводит итоги дискус-
сии среди определенного круга читателей журнала, что такое шаровая молния. Каждая
версия о природе шаровой молнии не анализируется другими участниками дискуссии,
а заменяется новыми. Ясно, что такой подход туиковый: в результате получаем
набор некоторых идей (иногда весьма привлекательных), которыми трудно воспользо-
ваться, поскольку работа над каждой из них заканчивается на ее выдвижении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Ter Haar D.*//Phys. Scripta. **1989**. V. 39. P. 735.
2. *Arago Ф.* Гром и молния/Пер, с франц.—СПб., 1853.
3. *Brand W.* Der Kugelblitz.—Hamburg: Henri Grand, 1923.
4. *Humphreys M. J.*//Proc. Am. Phil. Soc. **1936**. V. 76. P. 613.
5. *McNally J. R.* Preliminary report on ball lightning.—Oak Ridge: Nat. Lab. No. 3938, May 1966.
6. *Rayle W. D.* Ball lightning characteristics—NASA Tech. Note NASA-TN-D3138. 1966.
7. *Дмитриев М. Т.*//Природа. **1971**. № 6. С. 50. -
8. *Arabadiji W. J.*//J. Geophys. Res. **1976**. V. 81. P. 6455.
9. *Григорьев А. И., Дмитриев М. Т.* //Изв. Вузов СССР. Сер. «Физика». Депон. **1978**. № 1412, 2280; **1979**. № 29, 296.
10. *Charman W. N.*//Phys. Rep. **1979**. V. 54. P. 261.
- [11] *Стаханов И. П.* Физическая природа шаровой молнии.—М.: Атомиздат, 1979.
12. *Стаханов И. П.* О физической природе шаровой молнии.—М.: Энергоатомиздат, 1985.
13. *Keul A. G.*//Naturwissenschaften. **1981**. Bd 68. S. 296.
14. *Keul A. G., Schwarzenbacher K.*//Science of Ball Lightning/Ed. Y. H. Ohtsuki.—Singapore a. o.: World Scientific, 1989.—P. 58.
15. *Григорьев А. И., Григорьева И. Д.*//Труды 3-го Всесоюзного симпозиума по ат-
мосферному электричеству.—Тарту: Тарт. гос. ун-т, 1986.—С. 22.
16. *Grigorjev A. L., Grigorjeva I. D., Shirjaeva S. O.*//[14].—P. 88.
17. *Григорьев А. И., Григорьева И. Д.*//ЖТФ. **1989**. Т. 59. С. 79.
18. *Ohtsuki Y. H., Ofuruton H.*//Nuovo Cimento. Ser. C. **1986**. V. 106. P. 577.
19. *Ohtsuki Y. H., Ofuruton H.*//Proc. of the 9th Intern. Wroclaw Symposium on Elec-
tromagnetic Compatibility.—Wroclaw, 1988.—P. 27.
20. *Ohtsuki Y. H., Ofuruton H.* / [14].—P. 31.
- [21] *Egely Gy.* Hungarian ball lightning observations.—Budapest: Central Research. Institute for Physics. 10/D, 1987.
22. *Egely Gy.*//[19]—P. 15.
23. *Egely Gy.*//[14]—P. 19.
24. *Egely Gy.*//*ibidem*.—P. 81.
25. *Барри Дж.* Шаровая молния и четочная молния/Пер, с англ.—М.: Мир, 1983.
26. *Прохоров А. В.*//БСЭ—3-е изд.—Т. 13. С. 210.
27. *Barry J. D.*//J. Geophys. Res. 1980. V. 85. P. 4111.
28. *Barry J. D., Singer S.*//[14].—P. 1.
29. *Prentice S. A.*//Lightning/Ed. R. H. Golde.—London: Academic Press. 1977. P. 465.
30. *Дмитриев М. Т., Бахтин Б. И., Мартынов В. Н.*//ЖТФ. **1981**. Т. 51. С. 2567.
- [31] *Смирнов Б. М.*//Природа. **1987**. № 2. С. 15.
32. *Smirnov B. M.*//Phys. Rep. **1987**. V. 152. P. 177.
33. *Смирнов Б. М.* Проблема шаровой молнии.—М.: Наука, 1988.
34. *Israel H.* Atmospheric Electricity.—Jerusalem: Keter Press Binding, 1973.
35. *Moore C. B., Vonnegut B.*//[29].—P. 51.
36. *Iribarne J. V., Cho H. R.* Atmospheric Physics.—Dordrecht, Holland: Reidel, 1980.
37. *Argute E.*//Nature. **1971**. V. 230. P. 179.
38. *Berger K.*//Naturwissenschaften. **1973**. Bd 60. S. 485.
39. *Mortley W. S.*//New Scientist. **1973**. V. 57. P. 42.
40. *Имянитов И. М., Тухий Д. Я.* За гранью законов науки.—М.: Атомиздат, 1980.
- [41] *Balyberdin V. V.*//Foreign Sci. Bul. 1966. V. 2, No. 4. P. 48; 1967. V. 3, No. 5. P. 103.
42. *Сингер С.* Природа шаровой молнии/Пер, с англ.—М.: Мир, 1973.
43. *Singer S.*//[29].—P. 409.
44. *Леонов Р.* Загадка шаровой молнии.—М.: Наука, 1965.
45. *Смирнов Б. М.* Загадка шаровой молнии.—М.: Знание, 1987.—(Новое в жизни, науке и технике. Сер. «Физика». № 5).

46. Зельдович Я. Б.//ЖЭТФ. 1937. Т. 7. С. 1463.
47. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей.—М.: Наука, 1972.
48. Крайнее В. П., Лебедев Г. П., Назарян А. О., Смирнов Б. М.//ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 1791.
49. Смирнов Б. М.//УФН. 1986. Т. 149. С. 177.
50. Смирнов Б. М.//УФН. 1975. Т. 116. С. 732.
- [51] Смирнов Б. М.//Химия плазмы. 1976. Вып. 4. С. 191.
52. Карпетьянц М. Х., Карпетьянц М. Л. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ.—М.: Химия, 1968.
53. Крайнев В. П., Смирнов Б. М., Шматов И. П.//ДАН СССР. 1985. Т. 283. С. 361.
54. Биберман Л. М., Норман Г. Э.//ТВТ. 1969. Т. 7. С. 822.
55. Dijkhuis G. C.//[19].—P. 21.
56. Стаханов И. Я.//ЖТФ. 1987. Т. 54. С. 1538.
57. Зайцев А. В.//ЖТФ. 1972. Т. 42. С. 213.
58. Александров В. Я.; Голубев Е. М., Подмошенский И. В.//ЖТФ. 1982. Т. 52. С. 1987.
59. Александров В. Я.; Бородин И. П., Киченко Е. В., Подмошенский И. В.//Ibidem. С. 818
60. Смирнов Б. М.//УФН. 1987. Т. 152. С. 133.
- [61] Forrest S. R., Witten T. A.//J. Phys. Ser. A. 1979. V. 12. P. L109.
62. Babat G. I.//J. Inst. Electr. Eng. 1947. Part III. V. 94. P. 17.
63. Капица П. Л.//ДАН СССР. 1958. Т. 101. С. 245.
64. Капица П. Л.//ЖЭТФ. 1969. Т. 57. С. 1801.
65. Kozarev E. L., Zatzepin V. G., Mitrofanov A. V.//J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 7524.
66. Косарев Е. Л., Зацепин В. Г., Митрофанов А. В.//ЖТФ. 1971. Т. 41. С. 315.
67. Косарев Е. Л., Серезжин Ю. Г.//ЖТФ. 1974. Т. 44. С. 364.
68. Powell I. R., Finkelstein D.//Amer. Scientist. 1970. V. 58. P. 2318.
69. Андрианов А. М., Синицын В. И.//ЖТФ. 1977. Т. 47. С. 2318.
70. Silberg P. A.//App1. Phys. 1978. V. 49. P. 1111.
- [71] Silberg P. A.//Problem of Atmospheric and Space Electricity/Ed. S. C. Corotini.—Amsterdam: Elsevier, 1965.
72. Golka R. K.//[19]—P. 59.
73. Dijkhuis G. C.//Ned. Tijdsch. Natk. •Ser. B. 1985. V. 51. P. 125.
74. Dijkhuis G. C.//[19].—P. 21.
75. Barry J. D.//J. Atmosph. and Terr. Phys. 1968. V. 3. P. 313.
76. Barry J. D., Boney W. E., I. E. Brandelik J. E.//Appl. Phys. Lett. 1971. V. 18. P. 15.
77. Барри Дж.//Природа. 1968. № 12. С. 62.
78. Ofuruton H., Ohtsuki Y. H.//[14].—P. 220.
79. Corum K. L., Corum J. F. (in press).
80. Mandelbrott B. B. Fractal Geometry of Nature.— San Francisco: Freeman, 1982.
- [81] Weitz D., Oliueria M.//Phys. Rev. Lett. 1984. V. 54. P. 1433.
82. Kantor Y., Witten T. A.//J. de Phys. 1984. T. 45. P. L675.
83. Aerogels/Ed. J. Fricke.— Berlin a. o.: Springer-Verlag, 1985.
84. Фрике Й. Аэрогели.//В мире науки. 1988. № 8. С. 50.— (Пер. с англ.: Sci. Amer. 1988. V. 288, No. 5.)
85. Mulder C. A. M., van Lierop J. G. // [83].— P. 58.
86. Smirnov B. M. Phys. Stat. Ser. B. 1990.
87. Шидловский А. А. Основы пиротехники.—М.: Машиностроение, 1973.
88. McLain I. H. Pyrotechnics.—Philadelphia: Franklin Ins-I. Press, 1980.
89. Shimizu T., Fireworks: the Art, Science, and Technique.—Tokyo: Maruzen Co., 1981.
90. Фарадей М. История свечи.—М.: Наука, 1980.
- [91] Ксандопуло Г. И. Химия пламени.—М.: Химия, 1980.
92. Smirnov B. M.//[14]. P. 192.
93. Smirnov B. M.//Ibidem.— P. 220.
94. Гайдуков Н. И.//ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 1797.
95. Гайдуков Н. И.//ЖТФ. 1987. Т. 57. С. 1899.
96. Гайдуков Н. И.//ЖТФ. 1989. Т. 59. С. 88.
97. Гайдуков Н. И.//ДАН СССР. 1988. Т. 301. С. 1076.
98. Александров В. Я., Подмошенский И. В.//Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. С. 639.
99. Войцеховский Б. Б.//ДАН СССР. 1982. Т. 262. С. 84.
100. Григорьев А. И., Синкевич О. А.//ЖТФ. 1984. Т. 54. С. 1276.
- [101] Дмитриев М. Т., Дерюгин В. М., Калинин Г. А.//ЖТФ, 1972. Т. 42. С. 2187.
102. Gronauer M., Kadur A., Fricke J.//[83]—P. 167.
103. Niklasson G. A. et al.//Phys. Rev. Lett. 1988. V. 60. P. 1735.
104. Granquist C. G.; Buhrman R. A.//J. Appl. Phys. 1976. V. 47. P. 2200.
105. Hurd A. J., Shaefer D. A., Martin I. E.//Phys. Rev. Ser. A. 1987. V. 35. P. 236.
106. Лихошерстных Г. //Техника—молодежи. 1983. № 3. С. 138.