

A stylized lightning bolt graphic in white and red, curving across the top and right side of the cover. The lightning bolt has a red outer edge and a white inner edge, with a dotted white trail following its path. The background is dark blue with white dotted patterns and a bright sun-like circle at the bottom left.

И. П. Стаханов

**О физической  
природе  
ШАРОВОЙ  
МОЛНИИ**

И. П. Стаханов

# О физической природе ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Второе издание,  
переработанное и дополненное



МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1985

ББК 22.33  
С 78  
УДК 551.594.223

Рецензент В. Д. Шафранов

**Стаханов И. П.**

**С 78** О физической природе шаровой молнии. —  
2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат,  
1985. — 208 с., ил.

35 к. 50 000 экз.

Во втором издании книги, значительно переработанном по сравнению с первым, которое вышло в 1979 г. на основании данных массовых опросов населения, проведенных в СССР и США, делается попытка объяснить причину возникновения шаровой молнии.

Для широкого круга читателей.

**С** 1704060000-237  
051(01)-85 15-85

**ББК 22.33**

**С 78**

**ИГОРЬ ПАВЛОВИЧ СТАХАНОВ**

**О физической природе шаровой молнии**

Редактор О. П. Дунаева  
Художественный редактор А. Т. Кирьянов  
Обложка художника В. Я. Батищева  
Технический редактор Н. Н. Хотулева  
Корректор Н. А. Смирнова  
ИБ № 973

Сдано в набор 26.12.84. Подписано в печать 05.06.85. Т-13616. Формат 84×108<sup>1/32</sup>. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 10,92. Усл. кр.-отт. 11,34. Уч.-изд. л. 12,02. Тираж 60 000 экз. Заказ 124. Цена 35 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

© Атомиздат, 1979

© Энергоатомиздат, 1985, с изменениями

## **Предисловие**

За последнее столетие ученым, занимающимся фундаментальной наукой о природе — физикой, все меньше и меньше требуется такое качество, как наблюдательность. В прошлом очень важное для исследователя природы, сейчас оно утратило былое значение не только для теоретиков, но даже и для экспериментаторов, до зубов вооруженных экспериментальной и вычислительной техникой. Все реже и реже мы встречаемся с неожиданными, заранее не запланированными результатами опыта. Зато не просыхает кончик пера теоретика, на котором рождаются новые открытия. Разгуливая в окружающем нас мире, как в собственной квартире, мы уже не ждем каких-либо неожиданностей. И вдруг оказывается, что буквально на пороге своего дома, как в прямом, так и в переносном смысле, мы можем столкнуться с физическим явлением, требующим для своего раскрытия, во всяком случае на первых порах, не математических выкладок или крупных ассигнований на создание экспериментальных установок, а простой наблюдательности, точнее, кропотливого сбора данных и анализа наблюдений. Можно понять, как шокирует это обстоятельство современного физика, воспитанного в классических традициях нашего века.

Итак, единственным источником сведений о шаровой молнии все еще остается наблюдение. Это кажется почти невероятным в наши дни, когда теоретический анализ позволяет проникать в глубины атома и элементарных частиц, в отдаленнейшие уголки Вселенной и даже в события, совершавшиеся в первые секунды ее существования. И тем не менее это так. Мы значительно лучше знаем, или по крайней мере думаем, что знаем, о том, что происходит во время вспышек сверхновых, при образовании нейтронных звезд и в черных дырах, чем о том, что творится буквально в нескольких шагах от нас во время грозы.

Точки зрения на природу шаровой молнии, содержащиеся в более чем ста гипотезах, появившихся за последние 100—150 лет, поражают воображение столь сильным разнообразием взглядов, с которыми могут сравниться разве что натурфилософские учения прошлых веков. Но в отличие от этих последних в данном случае речь идет всего лишь об одном частном явлении, так что причину поразительного несогласия мнений нужно искать только в недостаточности фактического материала, на котором основываются эти мнения. Естественно, что при таком обилии взаимоисключающих гипотез трудно ожидать какого-либо прогресса и в эксперименте.

Между тем анкетные опросы, проведенные за последние десятилетия в США и Советском Союзе, значительно расширили объем данных о наблюдениях шаровой молнии. Однако само по себе увеличение фактического материала далеко не всегда ведет к созданию картины явления. В некоторых случаях с привлечением новых фактов хаос только нарастает и никакой четкой картины не вырисовывается. Это верный признак того, что наблюдения представляют собой или плод досужей фантазии или причинно не связанный набор фактов, т. е. за ними либо нет никакого реального содержания, либо наблюдатель и исследователь очень далеки от истинного понимания явления. К счастью, в случае шаровой молнии дело обстоит иначе. Тщательный анализ наблюдений позволяет выделить и сформулировать вполне определенные черты этого физического явления, которые хотя и представляются удивительными и необычными, но не противоречат фундаментальным законам физики.

Работа по сбору и анализу наблюдений представляет собой довольно неблагоприятную задачу, так как она, требуя больших усилий и затрат времени, приводит к выводам, которые в зависимости от точки зрения можно считать либо неубедительными, либо тривиальными. И все же эту работу было необходимо проделать, так как в настоящий момент для решения рассматриваемого вопроса она нужнее, чем создание новых гипотез, которые повисают в воздухе из-за отсутствия фактов.

Автор не ставил перед собой задачи дать подробный статистический анализ результатов наблюдений. Такой анализ, требующий, в частности, обработки на электронно-вычислительной машине, сейчас проводится, и можно надеяться, что в ближайшем будущем результаты его

будут опубликованы. Цель настоящей книги—набросать в основных чертах общую физическую картину явления, которая вырисовывается из анализа наблюдений, подкрепив ее, конечно, необходимой аргументацией. Эта книга является вторым, переработанным изданием книги «Физическая природа шаровой молнии», выпущенной в 1979 г. Атомиздатом. Наиболее важные изменения состоят во введении параграфа об электрических явлениях, сопровождающих шаровую молнию, и переработке большей части параграфов, входящих в гл. 2. В отдельном параграфе рассматриваются случаи наблюдения шаровой молнии в установках, созданных человеком. Введена дополнительная гл. 5, где рассматриваются вопросы моделирования шаровой молнии в лабораторном эксперименте. Несколько переработана также и гл. 4, касающаяся кластерной гипотезы; некоторые детали расчетов в гл. 3 и 4 опущены и заменены ссылками на источники.

В заключение я хотел бы выразить благодарность В. Л. Гинзбургу и участникам его семинара, а также В. Д. Шаfranову за внимание, которое они уделяли этой работе. Я благодарен А. А. Рухадзе, Б. Я. Зельдовичу и В. И. Когану, которые нашли время прочитать книгу и сделать полезные замечания в рецензиях на первое ее издание. Мне хотелось поблагодарить М. М. Фикса и Л. П. Павлова за помощь и полезные замечания, а также С. И. Назаркина, К. И. Алутиса и А. Б. Боровского, согласившихся потратить свое время на фотографирование последствий, оставшихся после шаровой молнии.

Работа по сбору и обработке информации о шаровой молнии, которая была использована в настоящей монографии, началась со статьи, написанной мной совместно с С. Л. Лопатниковым и опубликованной в 1975 г. журналом «Наука и жизнь». Без участия тысяч читателей этого журнала, без их любознательности и наблюдательности эта работа не могла быть проделана. Поэтому я хотел бы выразить искреннюю благодарность редакции журнала «Наука и жизнь» и особенно читателям этого журнала, приславшим описание шаровой молнии и нашедшим время ответить на вопросы анкет, независимо от того, упомянуты их имена на страницах этой книги или нет.

Наконец, я благодарен также моей жене Инессе Георгиевне за большую помощь в работе над этой книгой.

*Автор*



*Что такое  
шаровая  
молния?*

1

### 1.1. Загадки шаровой молнии

С давних времен люди замечали, что во время грозы в воздухе или около предметов появляются светящиеся шаровидные образования. Эти образования и были названы шаровыми молниями. Важнейшей особенностью шаровой молнии является ее автономность — она не «привязана» к проводникам или каким-либо другим телам и может свободно перемещаться в пространстве, сохраняя форму, цвет и размеры. Сходные образования, хотя и значительно реже, наблюдали иногда и без грозы. Размеры и особенно время жизни шаровых молний варьируют в широких пределах, отчасти из-за неизбежных ошибок наблюдения. Движения их очень разнообразны и кажутся весьма необычными для тел соответствующего размера. Они могут парить в воздухе, двигаться горизонтально, огибая предметы, но иногда притягиваются к предметам и могут «прилипнуть» к ним или двигаться вдоль них (например, вдоль электрических проводов).

Одно из самых таинственных и коварных свойств шаровой молнии состоит в том, что она часто оказывается в закрытых помещениях, проникая туда через узкие отверстия, меньшие ее диаметра. Наконец, нужно отметить, что шаровая молния обладает энергией. На это указывает как ее свечение, так и взрыв, которым довольно часто завершается это явление. В других случаях она может распаться или погаснуть без взрыва, что происходит, на первый взгляд, без каких-либо внешних причин, спонтанно и совершенно неожиданно для наблюдателя.

Шаровая молния очень мало напоминает хорошо известные в повседневной жизни явления, в том числе и обычную (линейную) молнию. Она излучает свет, как нагретое тело, но в то же время почти совершенно не излучает тепло. Ее движение почти не связано с силой

тяготения, которая обычно определяет перемещение окружающих нас тел. В то же время если она представляет собой нагретый излучающий газ, почему же она не поднимается в окружающем ее холодном воздухе?

Шаровая молния сильно отличается от обычных газов и в другом отношении: она не занимает весь предоставленный ей объем и не смешивается с воздухом. Большинство наблюдателей говорят о четкой (хотя и не всегда гладкой) границе, отделяющей шаровую молнию от окружающей атмосферы, которая сохраняется в течение всего времени жизни молнии, доходящего иногда до 1 мин и более. Движение шаровой молнии также не приводит к размыванию этой границы и к размещиванию вещества молнии в воздухе несмотря на то, что за время жизни она может проходить большое расстояние. Ее поведение, таким образом, существенно отличается от хорошо известного нам поведения нагретых газов, дыма или газообразных продуктов сгорания.

Далее, возникает вопрос, в какой форме запасена энергия шаровой молнии? Из неоднократно проведенных расчетов скорости остывания следует, что воздух соответствующего объема, нагретый до высокой температуры, охлаждается за время, значительно меньшее времени жизни шаровой молнии [1]. Кроме того, шаровая молния, как правило, сохраняет приблизительно постоянную яркость в течение всего времени жизни, что не имело бы места при охлаждении нагретого вещества.

Если шаровая молния состоит из заряженных частиц, то в отсутствие притока энергии извне эти частицы должны рекомбинировать и быстро передать выделившееся при этом тепло окружающей атмосфере (время рекомбинации  $10^{-10}$ — $10^{-11}$  с, а с учетом времени отвода энергии из объема — не больше  $10^{-3}$  с). Так, после прекращения тока канал линейной молнии охлаждается и исчезает за время порядка нескольких миллисекунд.

Напомним, что отдельный разряд, или, как говорят, удар молнии, состоит из нескольких импульсов, разделенных короткими интервалами времени, когда ток в канале молнии исчезает или, во всяком случае, резко уменьшается. Число таких импульсов обычно равно трем-четырем. Каждый импульс начинается с процесса, называемого лидером. Первый лидер, образующий канал, называют ступенчатым. В промежутках между импульсами проводимость и свечение канала резко падают, что,



однако, нельзя определить визуально из-за кратковременности процесса. Началу второго и последующих импульсов также предшествует процесс, называемый стреловидным лидером, который восстанавливает проводимость канала молнии. Минимальное время, протекшее между импульсами, составляет 3 мс, а максимальное — 100 мс [1]. Из этих цифр видно, что за время порядка нескольких миллисекунд степень ионизации, температура и проводимость канала успевают резко (на несколько порядков) уменьшиться, а за время 100 мс всякие следы канала молнии исчезают настолько, что следующий разряд происходит в другом месте. Таким образом, нельзя ожидать простого образования шаровой молнии из небольшого участка канала линейной молнии. Во всяком случае нужно указать причину, по которой некоторый участок канала сохраняет в течение длительного времени приобретенную им внутреннюю энергию.

Выше шаровая молния описывалась как физическое тело, однако нельзя заранее исключить того, что в действительности она может представлять собой процесс. Иными словами, мы предполагали, что имеем дело с некоторым объемом вещества с определенным запасом энергии. В действительности же может оказаться, что шаровая молния обменивается веществом с окружающим пространством и не только отдает, но и получает энергию извне. Шаровая молния может представлять собой, например, светящийся конец темного разряда или волноводного канала, т. е. область, в которой диссипирует подводимая извне энергия.

Эта точка зрения снимает некоторые описанные выше проблемы, создавая, однако, взамен новые. Действительно, отпадает, в частности, вопрос о том, почему шаровая молния не остывает или не рекомбинирует, однако вместо этого возникает не менее сложный вопрос — как подводится энергия, необходимая для поддержания ионизации и свечения вещества в объеме шаровой молнии? Оценки показывают, что для этого требуется весьма высокая плотность потока энергии. Неясно также, почему эта энергия поглощается не на всем пути, а лишь в определенной области с четкими сферическими границами, к тому же перемещающимися в пространстве. Шаровая молния ведет себя, как автономное тело, и нельзя заметить каких-либо связанных с ней волноводных или токовых каналов.

## 1.2. Источники сведений о шаровой молнии

Основным и по существу пока единственным источником информации о шаровой молнии являются показания очевидцев. Нет необходимости говорить о том, насколько ненадежен этот источник. В течение последних столетий было зарегистрировано и описано около тысячи случаев появления шаровой молнии. Однако достоверность значительной части этих сообщений оказывается очень низкой.

№ 1. 5 августа 1977 г. между 8 и 9 часами утра над Кремлем разразилась сильная гроза и один из разрядов молнии попал на территорию Кремля. Дежурный А. Е. Никулин, сидевший в деревянной будке близ Успенского собора, услышал со стороны Большого Кремлевского Дворца удар грома необычайной силы. Он успел привстать со стула, наклониться, чтобы выглянуть из будки, и отпрянул назад — он увидел светло-желтую полосу, которая пронеслась со стороны шпиля Большого Кремлевского Дворца в нескольких метрах от входа в будку сверху вниз под углом к земле и скрылась за забором, огораживающим участок площади около Успенского собора, где велись реставрационные работы. Все это продолжалось 2—3 с. Явление было беззвучным, во всяком случае ничего похожего на гром слышно не было. Это заставляет думать, что речь идет не о канале линейной молнии, а о шаровой молнии, возникшей при предшествующем близком разряде, гром которого привлек внимание дежурного. Молния возникла, видимо, около шпиля Большого Кремлевского Дворца и полетела вниз под углом приблизительно  $30^\circ$  к горизонту со скоростью около десяти или, может быть, несколько десятков метров в секунду, вследствие чего и возникло впечатление светящейся полосы.

В находящемся в 100 м от Успенского Архангельском соборе, вход в который обращен в сторону Большого Кремлевского Дворца, также слышали удар грома. Вслед за этим в собор влетела шаровая молния небольших размеров (около 5 см в диаметре). Ее видели три человека: зрители Н. С. Антонова и С. А. Савкин, а также дежурный А. П. Новиков, который только что вышел из собора (все это происходило до начала рабочего дня, и туристов, обычно наводящих территорию Кремля, еще не было). Новиков заметил только, что мимо него промелькнул какой-то светящийся предмет, направляющийся ко входу в собор. Следует заметить, что вход в собор закрывается двумя парами дверей, в одной из которых была открыта правая, а в другой — левая половинки дверей. Вследствие этого шаровая молния не могла проникнуть в здание, двигаясь по прямой, она должна была обогнуть закрытые створки, описав S-образную траекторию.

Смотрители находились внутри собора у выхода. Шаровая молния прошла между ними на высоте около 80 см от пола, и именно в этот момент они и увидели ее. Это был светящийся шар правильной формы, направляющийся от входа по прямой к иконостасу. Он прошел всего в 10—20 см от одного из зрителей, постепенно поднимаясь вверх, ударился в царские врата примерно на высоте 2 м от пола и исчез со взрывом. Грохот от взрыва был слышен даже в других помещениях собора за стеной. Однако он был все же слабее грома от предшествующего разряда линейной молнии. На месте взрыва на алтаре появилось обугленное пятно диаметром 3—4 см, с которого сошла позолота.

Скорость движения этой шаровой молнии была большой (однако заметно меньше скорости молнии, пролетевшей мимо Успенского собора): за 3—4 с (так оценивают свидетели события время наблюдения) она прошла расстояние около 20 м. Ее траектория была прослежена очевидцами от входа до места взрыва (на этом участке она была прямолинейной). В соборе у алтаря находилась еще уборщица. Она стояла спиной к шаровой молнии и не видела ее, однако слышала взрыв и в первый момент подумала, что упала одна из люстр собора. Оба зрителя, видевшие движение шаровой молнии в соборе, одинаково описывают размер, форму и траекторию молнии, однако их мнения несколько расходятся при описании цвета. Один из них видел желтый шар, а по мнению другого, она была «красная, как раскаленный уголь». Хотя молния прошла очень близко от одного из очевидцев, тепла он не ощутил. Интересно то, что шаровая молния поднималась: это означает, что она двигалась не по инерции от начального импульса, полученного в момент ее появления.

Таким образом, разряд линейной молнии\*, поразившей, по-видимому, шпиль Большого Кремлевского Дворца (отметим, что во время этой грозы на нем видели «огни святого Эльма» — огненную спираль вокруг шпиля), породил две шаровые молнии, которые разлетелись под углом около 40°, так что одна из них пролетела мимо Успенского собора, а вторая пошла в сторону входа в Архангельский собор. Я описал так подробно этот случай не только для того, чтобы сразу познакомить читателя с тем, что представляет собой шаровая молния. У этой истории имеется одно поучительное продолжение. Примерно через две недели после события (т. е. по «горячим следам») одна из центральных газет поместила описание этого случая под заманчивым заголовком: «Молния... гостя музея». В ней говорилось, что во время грозы над колокольней Ивана Ве-

---

\* Неизвестно, был ли этот разряд действительно исключительным по силе. «Небывалую» силу грома вполне можно объяснить близким расстоянием до канала линейной молнии.

ликого (она находится с противоположной стороны от Архангельского собора по отношению к Большому Кремлевскому Дворцу) появился «ярко-желтый раскаленный шар», который начал спускаться к Архангельскому собору. Шар диаметром 50 см медленно вплыл в двери церкви и направился к иконостасу. «Вспышка, удар, и в воздухе запахло озоном. К счастью, воздушная гостья не принесла ущерба».

Но по рассказам очевидцев молния, попавшая в Архангельский собор, имела диаметр не 50, а 5 см, не медленно спускалась и плыла по воздуху, а летела с большой скоростью. Возникла она, вероятно, в противоположной стороне и соответственно пришла к собору по совершенно другой траектории. В таком по меньшей мере сильно измененном виде событие могло войти, так сказать, в современную летопись. Это — поучительный пример того, сколь критически нужно относиться к описаниям шаровой молнии, когда они основаны не на проверенных прямых показаниях очевидцев, а на косвенных источниках.

Главная трудность, возникающая при использовании старых описаний, состоит в том, что большей частью остается неясным, что же, собственно, наблюдалось. И в настоящее время нет никакой возможности уточнить это. Терминология, характер сравнений и само представление об окружающем мире в течение жизни поколения претерпевают столь значительные изменения, что понять описание незнакомого явления, составленное 100—200 лет назад, очень трудно. В частности, за неимением лучшего шаровые молнии часто сравнивали с огнем, хотя они в действительности очень мало напоминают пламя. В XVIII и даже в XIX в. их нередко путали с метеоритами, так что существовал даже термин «электрический метеор» или «медленный болид». Тем более трудно отличить шаровую молнию от коронирования проводников, которое иногда возникает во время грозы. Неудивительно, что немецкий ученый Бранд, составивший в 1923 г. наиболее полный для того времени обзор сведений о шаровой молнии, отобрал из имевшихся в его распоряжении 600 сообщений всего 200, отбросив остальные как сомнительные или недостоверные. Отобранные случаи относились к периоду после 1820 г. Один из исследователей шаровой молнии не без основания заметил, что существует много явлений, еще не понятых человеком, но мало найдется таких, когда наблюдение только затрудняет объяснение.

В 1980 г. в США вышла монография американского исследователя Барри, в которой содержится наиболее

полный обзор наблюдений шаровой молнии по литературным источникам [2]. Библиография содержит почти 2000 ссылок, начиная с XVII в., когда начали выходить научные журналы. В общей сложности согласно Барри в научной литературе описано около 1000 наблюдений шаровой молнии. В книге не приводятся каких-либо детальных статистических данных об этом массиве наблюдений (гистограмм, функций распределения или корреляционных таблиц по различным наблюдаемым свойствам).

Преимущества анкетного опроса современников по сравнению с анализом исторического материала особенно явно выступают при статистической обработке. Описания, составленные не по стандартной форме, как правило, не содержат многих сведений, что приводит к резкому сокращению объема данных, которые можно использовать. Предположим, что всего в 1/3 описаний нет сведений о диаметре шаровой молнии и такая же доля наблюдений не содержит длительности наблюдения. Тогда (при условии, что эти данные отсутствуют по чистой случайности) при сопоставлении времени жизни и размеров можно использовать уже менее половины (4/9) наблюдений. При сопоставлении же трех свойств в аналогичных условиях остается менее 1/3 (8/27) всего исходного массива наблюдений и нет уже никакой возможности получить интересующие нас сведения.

Недостоверность материала, на основе которого приходится строить представления о шаровой молнии, равно как и большое количество неудач в теоретическом объяснении этого явления, а также невозпроизводимость его в лаборатории породили стойкий скептицизм по отношению ко всей проблеме в целом, который, конечно, можно понять, но едва ли — оправдать. В свое время на рубеже XVIII и XIX столетий Французская академия наук отказывалась верить сообщениям о метеоритах и рассматривать какие-либо попытки объяснения этого явления. Основания были совершенно аналогичными: во-первых, сообщения поступали из очень ненадежного источника — от невежественных и суеверных крестьян и, конечно, были полны вымысла и противоречий; во-вторых, они не согласовывались с научными представлениями о строении атмосферы, согласно которым камню просто неоткуда было взяться в воздухе, из которого состоит атмосфера. «Что было бы, если бы мы отрицали

все то, чего не в состоянии объяснить?» — сказал французский физик Араго как раз по поводу споров о шаровой молнии.

Между тем вероятность увидеть шаровую молнию в течение жизни по современным данным не слишком мала — около 0,01—0,001. Даже если это значение завышено на порядок, в нашей стране живут десятки тысяч человек, видевших шаровую молнию. При таком большом числе свидетелей все случайные ошибки, связанные с индивидуальными особенностями наблюдателей, могут быть исключены. Таким образом, обширная и статистически надежная информация о шаровой молнии имеется в каждом поколении, но она сосредоточена не в монографиях и научных журналах, а рассеяна в памяти тысяч свидетелей, затерявшихся среди остального населения.

Извлечь эту информацию можно только одним способом — методом статистического опроса. Преимущество таких методов перед простым сопоставлением письменных свидетельств очевидно: можно получить значительно более многочисленные и однородные по характеру статистические совокупности данных, поскольку люди одного и того же поколения употребляют сходные сравнения и понятия. К тому же речь идет о получении информации «из первых рук», от непосредственных очевидцев явления, а не из пересказов, искаженных иногда до неузнаваемости. Не может не сказаться также и значительное повышение культурного уровня населения за последние десятилетия. Появляется возможность задать всем одни и те же вопросы и до некоторой степени унифицировать ответы, например предложив очевидцам выбрать один из нескольких заранее заготовленных вариантов ответа, а также проконтролировать ответ повторными анкетами. Все это позволяет получить более определенное и подробное описание события.

Подобные методы получения сведений начали практиковаться уже в прошлом веке. Так, еще Араго собрал сообщения примерно о 30 случаях появления шаровой молнии, наблюдавшихся его современниками [3]. В 30-х годах американский метеоролог Хамфрейс собрал данные о 280 случаях наблюдения шаровой молнии, на основе которых он пришел к выводу, что шаровая молния является оптической иллюзией или одной из форм кистевого разряда [4, 5]. Однако наиболее широкие и система-

тические опросы с применением специально разработанных анкет были проведены в США и Советском Союзе только в последние 20—30 лет.

В конце 50-х годов в Ок-Ридже (США) в лаборатории, занимающейся ядерными и термоядерными исследованиями, был проведен опрос персонала лаборатории для выявления тех, кто видел шаровую молнию. Из 1962 опрошенных положительный ответ дали 110 человек, т. е. более 5 %. Затем сотрудникам компании «Юнион Карбид Ньюклеар», находящейся также в Ок-Ридже, была разослана анкета, содержащая 14 вопросов о шаровой молнии без регламентации ответов. Это означало, что, например, в ответ на вопрос о размере шаровой молнии можно было указать любой размер или диапазон размеров. Кроме того, анкета содержала вопросы о длительности существования молнии, ее форме, цвете, движении и др. Оказалось, что из 15 923 человек, получивших анкету, шаровую молнию наблюдали 513, т. е. около 3 % общего числа опрошенных. Подробный отчет о результатах опроса был опубликован через несколько лет [6].

Позднее, в начале 60-х годов, был проведен опрос среди сотрудников одного из исследовательских центров NASA. Он также состоял из двух этапов. Сначала (в 1963 г.) был произведен широкий опрос с помощью анкеты, содержащей всего несколько вопросов, для того чтобы выявить тех, кто видел шаровую молнию. Из 1764 сотрудников исследовательского центра в Льюисе, получивших анкету, шаровую молнию видели 180 — около 10 % опрошенных. Для второго опроса была составлена анкета из 56 вопросов, относящихся как к свойствам шаровой молнии и условиям, в которых она появилась, так и к характеристикам наблюдателя. В данном случае ответы на вопросы были строго регламентированы, так как в большинстве случаев были указаны варианты возможных ответов. Эта анкета была разослана очевидцам явления, выявленным в первом опросе. В результате было получено и обработано 112 анкет. Была проведена также статистическая обработка на ЭВМ в целях установления корреляции между свойствами шаровой молнии [7].

В Советском Союзе опросы проводили путем обращения к широкой общественности через газеты и журналы. В декабре 1975 г. в журнале «Наука и жизнь» была на-

печатана статья автора настоящей книги и С. Л. Лопатникова о шаровой молнии, к которой были приложены анкета из 13 вопросов и обращение к читателям, видевшим шаровую молнию, с просьбой прислать в редакцию ответы на вопросы [8]. В последующие годы эта анкета с небольшими изменениями несколько раз перепечатывалась в том же журнале [9—10]. Обращение нашло широкий отклик среди читателей и к 1981 г. было получено свыше 2000 писем. Несколько сотен из них были забракованы вследствие неясности и неполноты изложения. Некоторые письма содержали в основном рассуждения о природе этого явления. Кроме того, около 200 писем включали только описание события без ответов на вопросы анкеты. Хотя в ряде случаев такие описания представляли несомненный интерес, их ценность снижалась из-за недостаточной полноты и единообразия информации. В конечном счете было отобрано 1500 сообщений, часть из которых была снабжена более или менее краткими комментариями и описаниями. Важное преимущество анкетных опросов в отличие от использования литературных данных состоит в возможности проконтролировать и уточнить полученные сведения путем повторных анкет. На основе изучения ответов были составлены два варианта второй, более подробной анкеты, содержавшей несколько десятков вопросов, которая была разослана в 1978—1982 гг. очевидцам, ответившим на вопросы первой анкеты.

Наряду с ответами на вопросы мы просили присылать подробное описание события и обстоятельств, при которых оно произошло, поскольку ряд сторон явления, в том числе таких, как траектория шаровой молнии, способ ее появления и исчезновения, представляются значительно лучше и полнее в виде связанного рассказа. В результате мы получили около 600 детальных описаний, составленных через несколько лет после первого сообщения. Вследствие того что некоторые вопросы второй анкеты совпадали с вопросами первой, появилась возможность проконтролировать, насколько хорошо очевидцы помнят события, которые они описывают. Результаты этого контроля будут кратко описаны ниже.

В настоящее время полученные данные обрабатываются на ЭВМ, и по окончании обработки результаты будут опубликованы. В этой книге, как и в первом ее издании, мы ограничимся анализом, основанным главным



образом на результатах, полученных из первой анкеты в течение 1976 г. (около 1000 описаний). Предварительные оценки показывают, что такие сравнительно устойчивые сведения, как распределение по размеру, времени жизни, пройденному расстоянию, рассчитанные по этим данным, совпадают с теми, которые получены из полного массива наблюдений. Однако некоторые сведения, например о форме, силе света и другие, будут взяты из повторных, более подробных анкет.

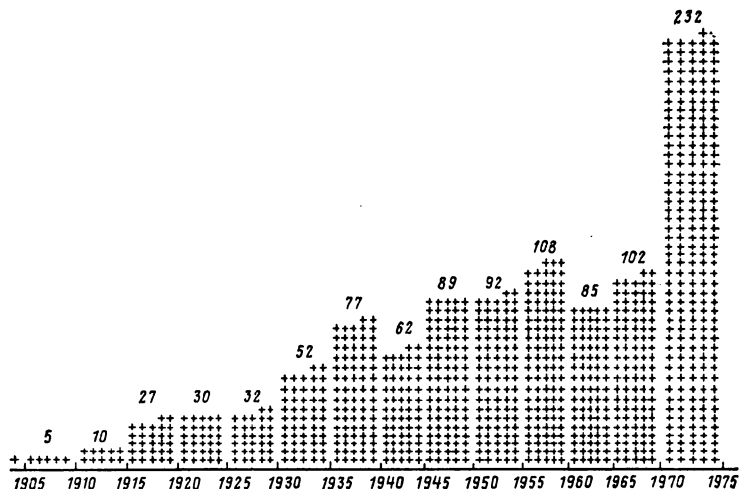


Рис. 1.1. Распределение по пятилетним периодам 1003 сообщений о наблюдениях шаровой молнии, полученных в 1976 г.

На рис. 1.1 приведены данные о числе наблюдений шаровой молнии в течение каждого пятилетия, начиная с 1901 г. по 1975 г. включительно. Число крестиков в каждой колонке гистограммы равно числу событий, зарегистрированных в течение данного пятилетия. (Напомним еще раз, что эти данные основаны на сообщениях, полученных только в течение 1976 г.) Наибольшее число сообщений — 232, естественно, относится к 1971—1975 гг. В течение предыдущих семи пятилетий их число остается почти постоянным (точнее, очень медленно убывает), оставаясь на уровне 80—100 событий на каждые пять лет. Заметное уменьшение относится лишь к периоду войны 1941—1945 гг. Начиная с 1935 г. число событий начинает быстро сокращаться. В итоге 72 % общего числа рас-

смаатриваемой группы сообщений относится к послевоенному времени и около 85 % — к периоду после 1935 г.

Не так давно в качестве веского аргумента против реальности существования шаровой молнии выдвигали тот факт, что ее наблюдали почти исключительно люди без должной профессиональной подготовки. Утверждали, что ни один профессиональный метеоролог или физик не видел шаровой молнии. Среди наших корреспондентов было много научных работников (в том числе физиков и химиков), инженеров, врачей, учителей, метеорологов, летчиков и студентов. Свыше 65 % анкет было получено от интеллигенции и учащейся молодежи.

Фотографии следов шаровой молнии можно найти в монографии Дж. Барри [2], в настоящее время переведенной на русский язык. В дополнение можно упомянуть об еще одной фотографии следа шаровой молнии, полученной А. Е. Ермолаевым и опубликованной в 1982 г. в журнале «Наука и жизнь» [11]. Наиболее убедительная фотография следа шаровой молнии, по-видимому, получена на станции слежения за метеоритами в США и впервые опубликована Томпкинсом и Роднеем [2, 12].

### **1.3. Существует ли шаровая молния?**

Приведенное выше определение шаровой молнии, конечно, очень поверхностно. Однако любое более глубокое определение по необходимости будет включать в себя некоторую заранее принятую точку зрения на ее природу и поэтому может оказаться ошибочным. Например, определять шаровую молнию как сгусток вещества, образующийся при разряде обычной молнии, или как особого рода тихий разряд (например, кистевой разряд, как это делал Теплер [3]) — значит с самого начала предполагать относительно шаровой молнии нечто такое, что еще необходимо доказать. Однако чисто феноменологическое определение, вроде того, которое было приведено в начале главы, может оказаться слишком широким и включать в себя несколько совершенно разнородных явлений. В самом деле, светящиеся образования, появляющиеся во время грозы около предметов, могут быть коронным разрядом. Светящиеся образования в воздухе могут быть метеоритами и даже летящей в темноте птицей, на перья которой налипли светящиеся гнилушки [5]. Конечно, появление метеоритов не связа-

но с грозой, но и шаровые молнии иногда наблюдают в ясную погоду. Наконец, при попадании линейной молнии в металлические конструкции могут образовываться капли расплавленного металла, принимающие при падении форму шара.

Таким образом, приходится выбирать между определениями, которые, возможно, не охватывают ни одного реально существующего явления, и определениями, которые могут объединять несколько совершенно различных по своей природе явлений, имеющих чисто внешнее сходство. Ситуация довольно обычная при изучении нового. В обоих случаях мы можем задать один и тот же вопрос (правда, вкладывая в него разный смысл): «Существует ли шаровая молния?».\*

Этот вопрос приобретает еще один, можно сказать, драматический оттенок, если учесть, что согласно одному из высказанных в литературе мнений шаровая молния является всего-навсего пятном на сетчатке глаза. Это пятно возникает при поражении сетчатки вследствие разряда обычной молнии и при определенных условиях может оказаться светлым. Более того, концентрируя внимание то на одном, то на другом предмете, мы получаем впечатление, что светящееся пятно перемещается в пространстве. Материальные последствия появления шаровой молнии, например следы, оставленные ею на предметах, списываются при этом на счет обычной молнии. Итак, с этой точки зрения шаровая молния — просто иллюзия, и мы стоим перед вопросом, существует ли шаровая молния как реальное явление? Приведенная выше гипотеза была изложена недавно в журнале «Нейчур» [13]. Однако она отнюдь не нова. Более того, подобные сомнения высказывались неоднократно на протяжении XIX в., и, пожалуй, это было даже преобладающим мнением в то время. Среди ее сторонников встречались и крупные ученые, например Томсон (лорд Кельвин) [3].

В наиболее законченной и полной форме эта точка зрения развита в уже упоминавшейся работе Хамфрейса [5]. Хорошо известно, что яркая вспышка света может породить устойчивое поражение сетчатки глаза, которое

---

\* Т. е. существует ли в действительности явление, соответствующее данному определению, или, наоборот, существует ли общая причина для различных групп чувственных данных, которые в силу внешнего сходства или традиции представляются чем-то единым.

будет видно как темное или (чаще) светлое пятно (инерция изображения). Темное пятно называют отрицательным, а светлое — положительным послеобразом. В сущности с этим явлением (в отличие от шаровой молнии) знакомы почти все. Особенно легко заметить инерцию изображения, если, посмотрев на яркий светящийся предмет, затем закрыть глаза. Однако в некоторых, значительно более редких случаях устойчивый послеобраз может возникнуть и при открытых глазах.

Время, в течение которого сохраняется послеобраз, — от 2 до 10 с — совпадает с временем жизни шаровой молнии. Сферическую форму молнии можно объяснить тем, что послеобраз индуцируется сферическим образованием, возникающим в нижней части канала линейной молнии, которое исчезает с прекращением разряда. Естественно, что в большинстве случаев неожиданная яркая вспышка (например, от разряда линейной молнии) сфокусируется не в центре сетчатки, а несколько в стороне от наиболее чувствительного места (если только наблюдатель случайно не смотрел именно в то место, в которое ударила молния). В дальнейшем глаз пытается сфокусировать возникшее изображение (послеобраз) в центр сетчатки и поворачивается так, чтобы рассмотреть действительно существующий предмет. Однако это не удается, так как пораженное пятно сетчатки поворачивается вместе с глазом, создавая иллюзию движения послеобраза на фоне окружающих предметов.

Исчезает послеобраз быстро; звук хлопка, который обычно сопровождает исчезновение шаровой молнии, дорисовывает наше воображение. Вообще, как утверждает Хамфрейс, движение шаровой молнии рисуется нам таким, какое мы можем ожидать от упругого шара: она опускается вниз и, ударяясь об пол или поверхность земли, подскакивает, как мяч, иногда несколько раз. Взрыв шаровой молнии объясняется вторичным переживанием грома от разряда линейной молнии, породившего эту зрительную галлюцинацию, или (если в результате взрыва остаются заметные последствия) новым ударом линейной молнии, которая случайно поражает как раз то место, где, как нам кажется, находится шаровая молния.

Уже из приведенного описания видно, насколько искусственно предложенное объяснение. Тем не менее следует остановиться на этом подробнее, поскольку ошибочное мнение о шаровой молнии как об оптической иллю-

зии проявило завидную для заблуждения живучесть и способность передаваться из поколения в поколение.

Прежде всего отметим, что шаровая молния далеко не всегда появляется после определенного разряда линейной молнии. Согласно нашим данным в 75 % случаев наблюдатель не может указать определенно, предшествовал ли удар линейной молнии появлению шаровой молнии. По-видимому, она может появиться в результате отдаленного разряда линейной молнии, который не фиксируется наблюдателем, например при разряде между облаками, а затем спуститься вниз к земле. Во многих случаях (приблизительно в 20—30 %) ее вообще не связывают с грозой. Согласно нашим данным [9] это происходит приблизительно в 25 % случаев, примерно такую же цифру — 30 % — дает опрос в Великобритании [12]. Однако даже в тех случаях, когда шаровая молния появляется вслед за определенным ударом линейной молнии, наблюдатель далеко не всегда видит вспышку, иногда он слышит только гром. Так было, например, со всеми четырьмя очевидцами, видевшими шаровую молнию в Кремле (см. № 1). Сторонники теории инерции изображения должны, таким образом, допустить, что послеобраз может возникать не только от вспышки молнии, но и от звука грома. Иногда вспышку молнии отделяет от появления шаровой молнии несколько секунд, которые требуются, чтобы шаровая молния попала в поле зрения наблюдателя или чтобы он обратил на нее внимание. Приведем несколько примеров из полученной корреспонденции.

№ 2. Вот что пишет С. Г. Кайдан из Калининграда. В 1958 г. в июне или июле она пролетала на пассажирском самолете ИЛ-14 над Магаданской областью. Погода была грозовой, но просматривались горы. Вдруг за иллюминатором самолета справа по борту появился белый с розовым оттенком светящийся шар размером с футбольный мяч. Он прошел вдоль борта самолета. После приземления самолета на фюзеляже было обнаружено несколько отверстий диаметром с наперсток. Шаровую молнию видели также члены экипажа и несколько пассажиров самолета.

№ 3. Б. Н. Иванов из Ленинградской области в июле 1956 г. работал в кузнице (помещение площадью 90 м<sup>2</sup>). В 14 ч началась гроза. В окно рабочие увидели блеск молнии над крышей кузницы. Через 3—4 с после этого через отверстие в черепичной крыше в кузницу проник белый с голубоватым оттенком шар диаметром 3 см. Шар освещал голубоватым светом окружающие предметы, ко-

торые стали отбрасывать в сгустившихся сумерках легкие тени (небывалое событие для послеобраза). Он спустился к земле со скоростью 1 м/с и остановился на высоте 80 см от земляного пола кузницы. После этого шар медленно поплыл над полом. Облетев сверху груды металла на полу и пройдя на расстоянии 30 см от автора письма (обогнув его сбоку), шар постоял некоторое время на месте и направился в обратную сторону; пролетел над наковальней к задней стене кузницы, в которой имелось отверстие. Порыв ветра, открывший и вновь захлопнувший дверь кузницы, вытолкнул шар через дыру в стене наружу. Все это заняло 1 мин 40 с (проверено по часам). Кроме автора письма шаровую молнию наблюдали еще несколько человек, работавших в кузнице.

Заметим, что шаровая молния появилась не сразу, а через 3—4 с после разряда линейной молнии. Кроме того, автор письма привел слишком много подробностей события, так что вряд ли можно считать виденное им галлюцинацией. Подобные наблюдения не единичны.

№ 4. Вот что пишет инженер-механик Я. В. Березовский. Наблюдение было сделано в Германии весной 1945 г., где он находился во время службы в армии. В 24 ч он лег отдыхать в комнате на втором этаже с открытым окном, поставив свой карабин у изголовья вблизи окна прикладом на пол. Проснулся от сильного треска около самой головы («... показалось, что выстрелил карабин»). Открыв глаза, он увидел движущийся, вытянутый по направлению движения светящийся белый «клубок», который плавно скользил вдоль стен параллельно полу. Обогнув печку и пройдя вдоль стен по периметру комнаты, клубок вылетел в окно (приводится план комнаты и траектория полета). Утром при осмотре карабина выяснилось, что верхняя головка шомпола оплавлена, но никакого напыла или подтека металла не было. Металл просто исчез (испарился), оставив на шомполе лунку диаметром 5 мм и глубиной 3 мм. На стенах никаких следов теплового воздействия не обнаружено. Не ощутил он тепла и на своем лице, хотя находился всего в полуметре от карабина.

В этом случае надо допустить, что очень яркий послеобраз может возникнуть во сне при закрытых глазах. Добавим еще, что, как видно из описания, никакого близкого удара линейной молнии в данном случае не было: в противном случае головка шомпола пострадала бы значительно, а сам автор письма был бы оглушен громом. Кроме того, должен был бы проследиваться дальнейший след разряда (ведь ружье не было заземлено). В шомпол ударила не линейная, а шаровая молния, влетевшая в окно и вылетевшая через него же после того,

как она облетела комнату по периметру (довольно обычная для шаровой молнии траектория).

Как видно из приведенных примеров (и это подтверждается большим числом случаев), последствия, оставляемые шаровой молнией, обычно гораздо менее значительны, чем те, что наблюдаются после удара линейной молнии. Даже взрыв шаровой молнии, как правило, не ведет к заметным повреждениям окружающих предметов. Вследствие этого «свалить» результаты воздействия шаровой молнии на разряд линейной молнии, как это пытаются сделать сторонники теории послеобраза, едва ли возможно. Различить их не представляет особого труда. Приведем еще несколько примеров.

№ 5. В. А. Лагутина, врач из Волгограда, в августе 1960 г. во время дождя с грозой убирала посуду после обеда. Она вышла на несколько минут в коридор, а затем открыла снова дверь комнаты. В этот момент она увидела, что в полутора метрах от нее и в одном метре от пола висит огненный шар, очень медленно опускающийся. Через несколько секунд шар взорвался с таким грохотом, что из соседней комнаты выскочили люди. На крашеном полу возникло обгорелое пятно диаметром 5—7 см и глубиной около 0,5 см, вокруг которого находилось много маленьких темных пятен. Появилось ощущение острой боли в ноге; на ней образовался ожог — несколько пятен размером от чечевичного зерна до булавочной головки, очень болезненные. Через несколько дней они прошли.

№ 6. В 1967 г. врач В. В. Варсонофьев, находясь в пос. Мирный (около Казани), дежурил в комнате площадью  $3 \times 3$  м<sup>2</sup>. Он сидел на табурете за барьером высотой 1 м. Около 15—16 ч началась гроза с сильным ветром. После сильного удара грома в открытую дверь влетела бело-голубая парообразная масса диаметром 30—40 см, которая начала быстро двигаться по комнате. Пройдя 10—15 м, она подкатилась под табурет, на котором сидел врач. Хотя она находилась непосредственно у его ног, так что они были частично погружены в нее, тепла он не ощущал. Вслед за этим шаровая молния притянулась к батарее центрального отопления и исчезла с резким шипением, проплавив участок батареи в 3—4 мм.

В обоих случаях не было никаких причин для образования у наблюдателей стойкого послеобраза, так как они не видели разряда линейной молнии, и все же шаровая молния несомненно была и оставила после себя вполне осязаемые последствия, которые по их характеру нельзя отнести на счет линейной молнии.

№ 7. М. И. Видюков в 1925 г. в селе Малая Лозовка Ростовской области увидел во время грозы разветвленную молнию; в точ-

ке разветвления пересекалось несколько каналов. После прекращения разряда в этом месте остался светящийся шар, который начал падать на землю, смещаясь по направлению ветра. Вот, казалось бы, классический случай, подтверждающий гипотезу послеобраза. Яркая точка на пересечении каналов вызвала поражение сетчатки глаза, а дальше потерпевший наблюдал естественное перемещение мнимого изображения вниз вслед за перемещением точки, на которую фокусировался глаз. Однако на высоте 1,5—2 м шар поплыл вдоль поверхности земли, слегка поднимаясь и опускаясь. И, наконец, совсем уже скандальный с точки зрения гипотезы послеобраза финал: пройдя в ворота двора, в котором находился наблюдатель, шаровая молния натолкнулась на ворох зерен пшеницы и взорвалась. Около половины зерна сгорело, горящие зерна разлетелись по двору и были заброшены взрывом даже на крышу амбара.

Еще одно очень весомое возражение против теории оптической иллюзии связано с тем, что шаровую молнию часто наблюдают и одинаково описывают несколько человек. Утверждение Хамфрейса, что в этих случаях в их описаниях «обычно» недостаточно деталей, доказывающих, что они видели одно и то же, совершенно несостоятельно. Траекторию движения, форму и размер как раз «обычно» описывают одинаково даже наблюдатели, находившиеся в разных местах, и это совершенно невозможно объяснить, исходя из представления о движении послеобраза, поскольку последнее может оказаться одинаковым у нескольких различных наблюдателей лишь в силу совершенно необъяснимых случайностей. Обратимся к фактам.

№ 8. Летом 1955 г. В. Н. Герасимова с двумя сестрами во время сильной грозы с ветром находилась в большой комнате своей

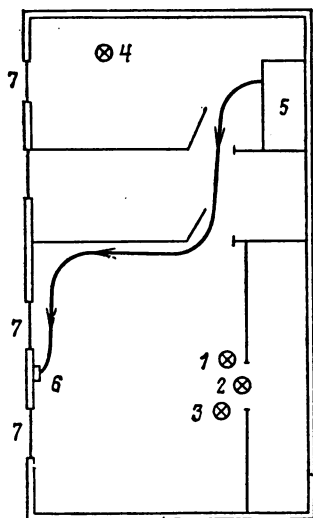


Рис. 1.2. Траектория двух шаровых молний, движущихся одна за другой (план прислан В. Н. Герасимовой): 1—3 — места, где стояли автор письма и две ее сестры; 4 — место, где находилась их мать; 5 — печь, из которой вылетели две шаровые молнии; 6 — заземление; 7 — окна



квартиры (см. рис. 1.2, присланный автором письма). В кухне между окном и печкой находилась ее мать. Одновременно с сильным ударом грома через печную трубу в кухню влетели два шара белого цвета диаметром приблизительно 10 и 15 см. Они летели один за другим на высоте 30—40 см от пола со скоростью 2—3 м/с (расстояние 10 м было пройдено за 3—4 с). В кухне их видела мать. Через открытые двери соседней комнаты, расположенной между кухней и большой комнатой, где находились сестры, шары влетели в большую комнату и направились вдоль стен к простенку между двумя окнами, где было проведено заземление. Подлетая к проволоке заземления, шары вытянулись, превратившись в эллипсоиды, и, коснувшись ее, бесшумно исчезли в отверстии пола, в которое уходило заземление. При их движении было слышно слабое потрескивание.

С точки зрения гипотезы послеобраза возникает сразу несколько трудных вопросов. Во-первых, разряда молнии никто не видел (слышали только гром). Во-вторых, шаровые молнии появились со стороны печки, а не от окна, и, наконец, самое главное — их траектория идентично описывается наблюдателями, которые находились в разных комнатах. Почему послеобраз, возникший у трех человек, стоявших в большой комнате, проделал один и тот же путь от двери в соседнюю комнату к заземлению и никому из них не показалось, что он прошел более естественный путь от окна к заземлению? Почему это так хорошо согласуется с показаниями матери, которая видела, как шар, вылетевший из печки, направился к двери соседней комнаты? Наконец, почему все четыре человека согласованно видели две шаровые молнии? В деталях, как мы видим, недостатка не ощущается.

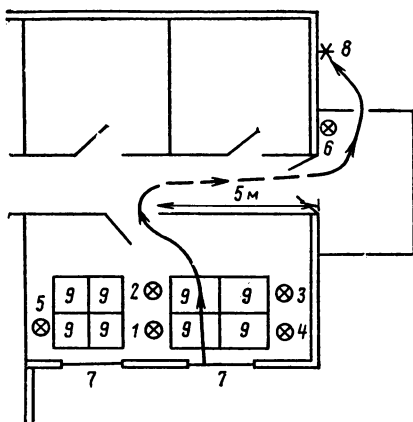
№ 9. Рассмотрим другой случай, происшедший также в 1955 г. в июне в полдень. О нем нам сообщил В. М. Бузик, наладчик контрольно-измерительных приборов. В данном случае шаровую молнию видели 6 человек — работники геологической партии. Она вошла во время грозы в открытую форточку окна (рис. 1.3), прошла над столом, за которым сидели люди, затем через комнату к двери и вышла в коридор. Шаровая молния была серебристого цвета, диаметром 10—20 см. Она кипела, потрескивала и «мигала». Кроме автора письма в комнате находились и видели происшедшее еще по крайней мере четыре человека (геолог, два коллектора, топограф). Автор письма приводит фамилии некоторых из них. Коридор выходил в сени, в которых были открыты двери на улицу. Там сидел рабочий. Он также видел, как что-то пролетело мимо него и вылетело на улицу. На улице около стены дома шаровая молния взорвалась; взрыв слышали все участники происшествия. Молния прошла по

комнате расстояние около 7 м за 5—10 с, т. е. летела со скоростью около 1 м/с, от момента появления молнии до взрыва прошло 10—20 с.

Итак, кроме коллективного и до странности одинакового наваждения, одновременно возникшего у всех сидящих в комнате, послеобраз очень кстати возник еще у одного человека, находившегося в другом месте (в сенях), и все это без прямого предшествующего разря-

Рис. 1.3. Траектория шаровой молнии (план прислан В. М. Бузиком):

1—6 — места расположения работников геологической партии, видевших шаровую молнию; 7 — окно; 8 — место взрыва шаровой молнии; 9 — столы для камеральной обработки. Те части траектории, где шаровая молния не была видна, помечены пунктиром



да линейной молнии. Взрыв же у стены дома надо приписать еще одному запоздалому разряду линейной молнии. Может быть, и можно было бы отмахнуться от подобных описаний, если бы они были единичными. Однако в действительности сходная картина, описывающая самостоятельно движущийся светящийся объект шарообразной формы, рисуется практически во всех письмах, описания отличаются только числом приводимых деталей.

Описания шаровых молний, приложенные ко многим анкетам, рисуют достаточно яркую, живую картину явления, обычно содержащую слишком много подробностей, которых нельзя ожидать от простой галлюцинации. В ответах на анкету 1976 г. было зарегистрировано свыше 150 случаев, когда шаровая молния наблюдалась с расстояния меньше 1 м; в некоторых из них сообщают о прямом контакте с шаровой молнией, который иногда кончается печально, но чаще — благополучно. В такой ситуации едва ли можно спутать галлюцинацию с ре-

ально существующим телом. Случаи, когда одну и ту же шаровую молнию наблюдают несколько очевидцев, оказываются совсем нередкими. Так, в наших данных оказалось, что шаровую молнию наблюдал один человек в 36 % случаев, два человека — в 29 %, три-четыре человека — в 14 % и, наконец, более четырех человек — в 21 % общего числа случаев. В опросе, проведенном в Ок-Ридже (отчет Мак-Нэлли), такие данные не были получены, зато в анкете NASA содержался вопрос: «Сколько человек, которых вы знаете, видели ту же шаровую молнию?». Согласно результатам, приведенным в отчете Рейла [7], в 33 % случаев наблюдатели видели шаровую молнию в одиночестве, в 30 % — вдвоем, в 29 % — втроем-четвером и в 8 % случаев молнию наблюдало больше четырех человек. Обращает на себя внимание хорошее совпадение вероятности увидеть одну и ту же шаровую молнию одному и двум наблюдателям. Что же касается различия вероятностей для большего числа наблюдателей, то оно естественно следует из различия в постановке вопроса. В нашей анкете был задан вопрос об общем числе людей, видевших шаровую молнию, в то время как в американской речь шла только о знакомых наблюдателю лицах. Естественно, число знакомых людей лишь в редких случаях превышало четырех, в то время как общее число наблюдателей довольно часто могло превосходить эту цифру, например при появлении шаровой молнии на улицах города. С учетом этого можно сказать, что в обеих анкетах был дан приблизительно одинаковый ответ на этот вопрос, и из него следует, что одну и ту же шаровую молнию нередко наблюдают несколько очевидцев.

Любопытное возражение против гипотезы послеобраза приводит В. Н. Чармен, сотрудник отдела глазной оптики Института науки и техники Манчестерского университета [14]. Он отмечает, что поскольку послеобраз локализуется на переднем крае фона, на котором он наблюдается, и поскольку видимый угловой диаметр его сохраняется, обычно он значительно меняет размеры в процессе движения. Когда фон удаляется, послеобраз также кажется более удаленным и поэтому (благодаря сохранению углового диаметра) значительно увеличившимся в размерах. При приближении фона происходит обратное. Колебания размеров могут достигать большого значения. Этого нет в наблюдениях шаровой молнии,

диаметр которой лежит обычно в пределах 10—20 см и существенно не меняется в процессе наблюдения. Кроме того, из ряда писем следует, что шаровая молния может заслоняться другими предметами, что едва ли возможно для послеобраза.

Заметим также, что если бы шаровая молния действительно определялась инерцией изображения от яркой вспышки, то воспроизвести ее в лабораторных условиях не представляло бы особого труда. При этом не обязательно прибегать к услугам молнии или высоковольтного сильноточного разряда. Вследствие того что реакция глаза на сильную вспышку (как и вообще реакция нервной системы на сильный внешний раздражитель) имеет насыщение, можно было бы воспользоваться достаточно яркой лампой, для того чтобы без труда создавать шаровые молнии в любом требуемом количестве. Этого, однако, не происходит.

В заключение трудно удержаться от того, чтобы не привести описание случая, когда одну и ту же шаровую молнию наблюдали 25 человек, довольно хорошо знавших друг друга. О нем нам сообщил художник А. А. Курицын.\*

№ 10. Это произошло в 1959 г. в июле вечером в Люберецком районе под Москвой. Туристическая группа из 25 человек шла во время грозы через лес. Тропинка была узкая, кусты мокрые, и приходилось идти гуськом. Группа растянулась примерно на 25 м. Вдруг идущий впереди крикнул: «Смотрите, шаровая молния!» Собраться в кучу туристы не могли, так как с обеих сторон тропинку обступали мокрые кусты. Шаровая молния была видна только с определенного места тропинки, в просвете между деревьями и кустами. Поэтому группа продолжала идти, и каждый останавливался, чтобы посмотреть на нее 5—6 с.

Идущие впереди видели, как ослепительно белый шар, находящийся на уровне верхушки дерева, медленно опускался вниз. Постепенно он менял окраску, превращаясь в желтый. Автор письма шел последним и мог несколько задержаться на тропинке. В это время шар сделался уже красным. Теряя вещество и испуская «ис-

---

\* Этот случай наблюдения шаровой молнии организованной группой далеко не единственный. Преподаватель В. Я. Шаршинов из Ярославля прислал сообщение о том, что он наблюдал шаровую молнию вместе с другими участниками велопробега Ярославль—Кострома—Углич—Ярославль 25 июля 1965 г. Описание события, которое мы здесь не приводим, было сделано по записи в дневнике пробега.

кры», он медленно опускался к земле по зигзагообразной траектории. «Искры» быстро гасли. Куски вещества гасли также, но несколько медленнее. Шар из ярко-красного стал темно-красным, затем в середине его появилось темное пятно и, наконец, он исчез.

Нетрудно подсчитать, что молнию наблюдали в течение 100—200 с. Она находилась на расстоянии нескольких метров. Автор письма прислал зарисовку того, что он видел, сделанную по памяти. Обилие деталей и согласованность того, что видели 25 человек, говорят сами за себя.

В связи со всем сказанным естественно теперь поставить обратный вопрос: имеется ли хотя бы один достоверно зарегистрированный случай, когда за шаровую молнию приняли галлюцинацию или, точнее, послеобраз, возникший от вспышки обычной молнии? За разрешением этого вопроса лучше всего обратиться к обзору Хамфрейса [5]. Надо думать, что из имевшихся в его распоряжении описаний 280 случаев он должен был выбрать для подтверждения своей точки зрения наиболее убедительные. Вот что мы там находим.

№ 11. Новозеландский фермер Белл доил коров под открытым навесом 19 января 1925 г. (напомним, что в Новой Зеландии январь — середина лета). Внезапно он увидел огненный шар диаметром около 30 см, который летел к нему. Скрывшись на момент за бревнами, шар вновь появился и прошел на расстоянии 1—1,5 м от наблюдателя через сарай. Из-за замешательства фермер не проследил его дальнейший путь. В момент наблюдения у Белла не было никаких сомнений в реальности явления, которое он наблюдал. Однако впоследствии, вспоминая этот случай, он удивился тому, что коровы никак не реагировали на виденный им огненный шар. Это показалось ему странным. Через несколько лет после этого ему случилось увидеть послеобраз светящейся лампочки, и тогда он пришел к заключению, что виденное им несколько лет назад было иллюзией.

Подчеркнем важную деталь описанного события. При своем движении шаровая молния скрылась за бревнами. Если бы речь шла действительно о послеобразе, то поведение его можно было бы объяснить только самовнушением. Нам кажется, однако, в высшей степени сомнительным, чтобы силой самовнушения можно было вылечить пораженное место сетчатки глаза, наличие которого определяет видение послеобраза, а затем через мгновение опять восстановить поражение настолько, чтобы увидеть прежний послеобраз среди бела дня. Белл

не описывает деталей того, что он увидел через несколько лет, когда наблюдал послеобраз от яркой вспышки лампы, но, вероятнее всего, ничего подобного он не видел. Поэтому, оставляя на совести коров их непростительное равнодушие к интересным грозovým явлениям, мы все же склонны думать, что новозеландский фермер видел настоящую шаровую молнию.

Другой пример, приведенный в [5], основан на сообщении руководителя исследований Национального управления по авиации и исследованию космического пространства Льюиса.

№ 12. В 1923 г. он наблюдал из своего дома сильную грозу и увидел, как светящийся шарообразный объект размером с детский воздушный шар двигался в 40 м от его дома в соседнем лесу на высоте 2,5 м над землей. Пройдя за несколько секунд 30 м, он натолкнулся на дерево и взорвался с громким звуком. На месте взрыва образовалась облака пыли. Соседи выскочили из домов, чтобы посмотреть, что случилось. Как оказалось, взрыв произошел в том месте, где в дерево были вбиты два гвоздя. В месте взрыва с дерева сошла кора.

На первый взгляд, мы имеем здесь дело с обычным случаем наблюдения шаровой молнии, правда, с довольно большого расстояния — 40 м. Среди писем в журнал «Наука и жизнь» можно подобрать десятки сходных случаев. Так считает и сам очевидец Льюис. Но вот интерпретация, которую дает Хамфрейс. В глазу наблюдателя образовался послеобраз, который только казался находящимся на расстоянии 40 м, но на самом деле возник от события, значительно более удаленного (например, от удара линейной молнии), которое не было замечено наблюдателем сознательно. Этот послеобраз начал перемещаться. Затем другая линейная молния (тоже не замеченная как линейная) поразила как раз то место, где, как казалось наблюдателю, находилась в тот момент шаровая молния. Итак, движущийся послеобраз и несколько случайностей: две случайно не замеченные молнии и случайное совпадение места поражения линейной молнии и точки, на которую проектировался послеобраз. Искусственность этого объяснения не требует комментариев. Если эти два события действительно представляют собой самые убедительные случаи, которыми располагают сторонники гипотезы послеобраза, то можно с уверенностью сказать, что мы пока не имеем ни одного примера, подтверждающего то, что линейная молния

может создавать послеобразы, поведение которых напоминает шаровую молнию.

Вернемся теперь к исходному феноменологическому определению шаровой молнии. Даже если наблюдения очевидцев не являются иллюзией и относятся к реальному явлению, вполне может оказаться, что причины, лежащие в основе его, тривиальны и не представляют особого интереса для физики. К такому выводу пришел, в частности, тот же Хамфрейс [5]. Он считает, что описанные очевидцами явления (в тех случаях, когда они не являются галлюцинацией) могут быть объяснены хорошо известными причинами, причем в различных случаях разными. Конечно, граница между интересным и тривиальным в широкой степени субъективна и во многом зависит от личного вкуса исследователя. Например, назвать вместе с Хамфрейсом шаровую молнию «фиксированным или движущимся кистевым разрядом» означает лишь просто заменить один термин другим, так как при этом мы автоматически приписываем кистевому разряду необычные свойства шаровой молнии и предоставляем будущему согласовать все противоречия, которые при этом возникают. (Например, вопрос о природе ЭДС разряда, о том, что он перемещается в воздухе, не имея видимой связи с проводниками, принимает устойчивую сферическую форму, а также о причинах неудачи попыток воспроизвести его в лабораторных условиях.)

Насколько обоснован взгляд на шаровую молнию как на единое явление? Неоднократно высказывалось мнение, что шаровая молния представляет собой комплекс разнородных явлений, обусловленных разными причинами. Такая точка зрения до некоторой степени представляет собой попытку уйти от решения вопроса. Как всегда сложности и противоречия возникают при сопоставлении наблюдений между собой и попытках объяснить их одной общей причиной. Если предлагать различные причины для объяснения разных сторон явления, то противоречия сами собой устраняются, но эвристическая ценность объяснения при этом теряется.

Посмотрим, насколько обоснован подобный подход к вопросу. Все основные наблюдаемые характеристики шаровой молнии: ее размеры, время жизни, цвет, энергия, выделяемая при взрыве, и др.—меняются в довольно широких пределах. Это, конечно, может быть указанием на то, что в природе имеется несколько различных

типов шаровой молнии. Однако ошибки наблюдения, равно как и ошибки, возникающие при передаче информации, также могут приводить к расширению диапазона наблюдаемых свойств. Это действительно случается. Например, если рассматривать все 1500 отобранных нами случаев наблюдения, то сообщения о диаметре больше 1 м составляют около 2,2 %, в то время как при наблюдении с расстояния меньше 10 м число таких случаев сокращается почти в 4 раза (до 0,6 %), то же происходит, если рассматривать только дневные наблюдения (здесь число молний с диаметром больше 1 м составляет всего 1,3 %). Можно поэтому считать, что все или почти все случаи наблюдения шаровой молнии с диаметром более 1 м являются следствием ошибочных оценок.

Если бы в природе существовало несколько групп шаровых молний, заметно различающихся по своим свойствам, то следовало бы ожидать значительно более тесной корреляции внутри соответствующих групп наблюдений. В действительности такие группы выделить не удается и обычно предполагаемые корреляции при более детальном рассмотрении оказываются в пределах возможной статистической погрешности. Во избежание недоразумения заметим, что речь здесь идет о совокупности свойств. Две величины, например размер и время жизни, как будет видно ниже, обнаруживают некоторую коррелятивную зависимость. Однако групп с четкими границами, различающихся по ряду параметров так, чтобы можно было говорить о разных типах шаровой молнии, выделить не удалось и пока нет никаких признаков того, что это удастся сделать в дальнейшем. Таким образом, пока нет оснований сомневаться в том, что шаровая молния представляет собой единое явление с одной физической природой.

Несмотря на сказанное выше в большой совокупности наблюдений шаровой молнии, видимо, всегда присутствует некоторая доля случаев, когда за шаровую молнию принимали другое явление, совершенно отличное по природе, например огни святого Эльма или коронные разряды на проводниках. Это вместе с неизбежными ошибками наблюдений и в передаче информации приводит к значительному увеличению ширины распределения наблюдаемых параметров шаровой молнии и затрудняет объяснение явления.

Можно с уверенностью сказать, что пытаться объяс-



нить все факты, сообщенные о шаровой молнии, — значит, с самого начала поставить перед собой неразрешимую задачу. И не только неразрешимую, но, пожалуй, и бессмысленную, так как при этом мы будем пытаться объяснить также и ошибки, неизбежно включенные в фактический материал. Поэтому совершенно естественно отказаться на первых порах от объяснения ряда экзотических фактов и ориентироваться на объяснение основной массы наблюдений. В будущем эти необычные факты, вероятно, будут объяснены посторонними причинами или окажутся ошибками наблюдателя. К сожалению, не существует более определенного пути отделения важных фактов от побочных, кроме собственной интуиции исследователя.

В заключение остановимся на явлениях столь сходных с шаровой молнией, что естественно возникает необходимость провести между ними более четкую границу. Прежде всего речь идет о различных формах коронного разряда. Электрические поля с высокими значениями напряженности вызывают стекание заряда с заряженных или поляризованных проводников в воздух. Вблизи проводников, где плотность тока небольшая и где могут развиваться различные предпробойные процессы, это может вызвать свечение воздуха — корону, которую можно принять за шаровую молнию. Существует, однако, несколько важных отличий.

Во-первых, коронный разряд всегда связан с проводниками, чего никак нельзя сказать о шаровой молнии. Так, по данным опроса в Ок-Ридже только в 25 % описанных случаев шаровая молния была связана с проводниками. В 31 % случаев она все время находилась в воздухе, не имея контакта с предметами, и еще в 19 % случаев она находилась в воздухе значительную часть времени жизни. Наши данные также показывают, что в подавляющем большинстве случаев шаровая молния свободно перемещается в пространстве, оставаясь большую часть времени (или все время) на значительном расстоянии от окружающих тел. При столкновении с предметами шаровая молния либо исчезает, либо отскакивает от них, чаще всего она обходит их на некотором расстоянии.

Во-вторых, коронный разряд не оканчивается взрывом или заметным оплавлением коронирующих проводников. Энергия электрического заряда проводников

обычно мала по сравнению с их внутренней энергией.

В-третьих, свечение короны не имеет обычно четких границ и определенной формы; сильные конвективные потоки, возникающие в ней из-за отталкивания одноименных (чаще отрицательных) зарядов, стекающих с проводника, делают ее более похожей на обычное пламя (отсюда и название «огни святого Эльма»), чем на сферическое образование, упорно стремящееся сохранить свой вид и форму. Шаровая молния хотя и не всегда, но имеет довольно резкую границу, отделяющую ее от окружающего воздуха, что также не характерно для короны. Вот, например, случай, свидетелем которого был Лэб — известный специалист в области газового разряда.

№ 13. Летом 1898 или 1899 г. в Спрингфилде (штат Массачусетс) разразилась сильная гроза, которую он наблюдал из окна дома родителей. Он заметил шар, светящийся так, как светятся возбужденные атомы азота. Шар медленно спускался с крыши соседнего дома по плавной криволинейной траектории. Диаметр его был равен диаметру двух детских воздушных шаров. Упав на лужайку перед домом, он подпрыгнул и исчез. После этого дом напротив поразил удар линейной молнии.

Хамфрейс, приводя этот случай в своем обзоре, рассматривает его как коронный разряд, возникший на крыше непосредственно перед разрядом линейной молнии. Движение вниз он считает следствием перемещения послеобраза коронного разряда, а его скачок после удара о землю — чистой иллюзией, которая была подсказана очевидцу воображением из-за сходства формы свечения с упругим детским воздушным шариком. Однако в нашем распоряжении имеются десятки случаев, когда шаровая молния ведет себя совершенно аналогично при падении на поверхность земли или на пол и не меньшее число случаев, когда она упруго отражается при ударе о твердые предметы.

Современный наблюдатель вряд ли спутает шаровую молнию с метеоритом, хотя в XVIII и даже в XIX в. это происходило довольно часто. Различаются они прежде всего по характеру движения. Метеориты движутся по прямой линии и с большой скоростью, шаровая молния часто парит в воздухе или медленно перемещается по довольно сложной траектории. Кроме того, в отличие от метеоритов шаровую молнию часто наблюдают на небольшом расстоянии: 2—3 м и даже меньше. Очевидно

также, что появление метеоритов никак не связано с грозами.

Капля расплавленного металла, попав в канал линейной молнии, также может образовать светящуюся сферу, движение которой, однако, будет существенно отличаться от движения шаровой молнии. В связи с большим удельным весом такие капли будут неизбежно стекать вниз или быстро падать, в то время как шаровая молния может парить, двигаться горизонтально или подниматься. Даже если предположить, что расплавленная капля металла приобретает в момент образования значительный импульс, ее движение из-за большой инерции мало будет напоминать движения, которые обычно приписывают шаровой молнии. Наконец, речь может идти в данном случае лишь о шаровых молниях небольшого размера, диаметр которых составляет несколько сантиметров, в то время как подавляющее большинство молний имеет значительно большие размеры (10—20 см, а иногда и больше).

В заключение рассмотрим еще одно явление, которое часто сопровождает шаровую молнию. Речь идет об обычной линейной молнии. На первый взгляд эти явления столь отличны друг от друга, что спутать их невозможно. Тем не менее в некоторых обзорах можно найти утверждение, что за шаровую молнию иногда принимают разряд линейной молнии, увиденной «с торца», т. е. направленной прямо на наблюдателя. Это мнение высказывает в своем обзоре и Хамфрейс, иллюстрируя его двумя примерами.

Заметим, прежде всего, что скорость распространения линейной молнии такова, что «заметить» разряд, направленный на наблюдателя, не представляется никакой возможности. Средняя скорость распространения ступенчатого лидера, с которого начинается разряд линейной молнии, составляет, как известно, около 100 км/с, и время его развития оказывается около 0,01 с. Наша нервная система не может реагировать на столь кратковременные процессы. Можно с уверенностью сказать, что разряд, который Вы увидели, не попадает в Вас, так же как и пуля, звук полета которой Вы услышали (правда, по несколько другой причине). Совершенно иное дело с шаровой молнией. Как будет показано ниже, скорость ее не превышает нескольких десятков метров в секунду, т. е. она на много порядков ниже, чем скорость линей-

ной молнии. Поэтому наблюдатель может не только заметить на расстоянии в несколько десятков метров быстро движущуюся к нему шаровую молнию, но даже и как-то реагировать на это. Именно так и было в двух описаниях, приведенных Хамфрейсом, и поэтому крайне мало вероятно, что речь здесь идет о линейной молнии.

Далее, шаровая молния беззвучна. Ее движение совершенно бесшумно или сопровождается слабым шипением или потрескиванием. Хотя в редких случаях шаровая молния пролетает несколько десятков метров в секунду и образует короткую светящуюся полосу длиной несколько метров (это связано с неспособностью наших зрительных анализаторов различить события, отделенные интервалом времени меньше 0,1 с), тем не менее эту полосу нельзя спутать с каналом линейной молнии, образование которого сопровождается оглушительным громом. Последствия от взрыва шаровой молнии также, как правило, значительно слабее, чем от разряда линейной молнии. В частности, взрыв — чаще всего хлопок, в сильных случаях — винтовочный или пистолетный выстрел, в то время как гром от близкой линейной молнии скорее напоминает по силе грохот разорвавшегося снаряда.

По приведенным выше причинам кажется несостоятельным и мнение Хамфрейса о том, что за шаровую молнию иногда принимают разряд линейной молнии, канал которой проходит вдоль разорванного в каком-то месте проводника. Многочисленные описания наблюдения разряда линейной молнии с близкого расстояния, содержащиеся более чем в 100 письмах, полученных нами, настолько резко отличаются от описаний шаровой молнии (в некоторых случаях присланных теми же авторами), что спутать эти два явления трудно даже не очень подготовленному наблюдателю.

#### **1.4 Как часто она появляется!**

Шаровую молнию обычно принято считать редким явлением. На первый взгляд это мнение обосновано достаточно надежно: подавляющее большинство людей может за свою жизнь наблюдать много разрядов обычной молнии, так и не увидев ни разу шаровой молнии. Однако при более тщательном рассмотрении вопрос оказывается не столь простым. Прежде всего надо различать

частоту наблюдения и объективную частоту появления молнии. Многие виды животных, отнюдь не редкие в местах своего обитания, казались редкими только потому, что жили в трудно доступных районах или вели скрытый образ жизни. Как же обстоит дело с шаровой молнией?

Попытаемся сначала оценить вероятность увидеть шаровую молнию своими глазами в течение нашей жизни. Выше уже отмечалось, что в опросе NASA около 10 % всех опрошенных сотрудников (180 из 1764) видели шаровую молнию [7]. Насколько характерна эта цифра? В Ок-Ридже предварительный опрос дал 5—6 % (110 из 1962), а более широкий опрос — около 3 % (513 из 15 923). Цифры, как видно, убывают с расширением контингента охваченных опросом лиц. Однако из этих данных следует, что вероятность увидеть шаровую молнию не слишком мала — порядка нескольких процентов. Полагая, что средняя длительность периода, в течение которого опрошенные могли увидеть шаровую молнию, составляет несколько десятков лет, можно принять, что вероятность увидеть шаровую молнию в течение года в США — около  $10^{-3}$ . Однако возникает вопрос, можно ли эти данные, полученные из сравнительно узкой выборки, экстраполировать на более широкие слои населения? Анкета журнала «Наука и жизнь» была ориентирована на более широкую аудиторию, численность которой, к сожалению, можно определить лишь весьма приблизительно. Поскольку тираж журнала составляет около 3 миллионов экземпляров, можно ожидать, что со статьей могли ознакомиться от 3 до 6 млн. человек. Мы получили около 2 тысяч описаний, что составляет  $1,5-3 \cdot 10^{-4}$  от этого числа, т. е. около 0,02 %, что намного ниже значений, полученных для США. Однако остается неясным, какова доля тех, кто видел шаровую молнию, читал статью в журнале и написал в редакцию.

Любопытно рассмотреть распределение числа событий по годам за последние несколько лет. Количество наблюдений за последние годы монотонно возрастает\*:

Год . . . . .	1971	1972	1973	1974	1975
Число событий . . .	24	32	40	61	71

Предполагая, что все читатели, видевшие молнию в течение последнего (1975) года, т. е. непосредственно

\* Используются данные, полученные в 1976 г.

перед опубликованием статьи, откликнулись на предложение журнала, находим, что вероятность наблюдать шаровую молнию в течение года в Советском Союзе составляет  $2 \cdot 10^{-5}$ ; тогда вероятность встретить ее в течение жизни равна приблизительно  $10^{-3}$ , т. е. около 0,1 %. Это все еще на порядок меньше той цифры, которая следует из опросов, проведенных в США. Частично это расхождение можно объяснить тем, что средняя частота и интенсивность гроз на территории СССР в несколько раз ниже, чем в США. Кроме того, надо учесть, что в данном случае обращение было адресовано к значительно (более чем в 200 раз) большему кругу людей, и нам кажется, что цифра  $10^{-5}$  должна действительно быть близка к истинной вероятности увидеть шаровую молнию в течение одного года в нашей стране. Речь идет, конечно, о наблюдениях в «обычных» условиях, т. е. без организации каких-либо специальных мер, например экспедиций в районы с повышенным количеством гроз, систематического наблюдения за телевизионными вышками и другими объектами, которые часто поражает молния, применения специальной аппаратуры и т. д.

Итак, наблюдение шаровой молнии действительно представляет собой довольно редкое явление, и большинство из нас проживает всю жизнь, так и не увидев ее. Тем не менее даже из самой нижней оценки частоты наблюдений следует, что мы получили сведения лишь о небольшой доле — порядка нескольких процентов — общего числа случаев появления шаровой молнии, известных населению нашей страны. Из этой оценки следует, что на территории Советского Союза ежегодно наблюдают 2—3 тыс. шаровых молний.

На первый взгляд кажется, что встречи с шаровой молнией должны представлять собой независимые события. В этом случае если, как следует из опроса NASA, вероятность наблюдения шаровой молнии в той выборке лиц, среди которых проводился опрос, составляла 0,1, то вероятность встретить ее дважды одному и тому же человеку равна 0,01, а 3 раза — 0,001. Это означает, что из 1800 опрошенных 2 раза ее должны были видеть 18 человек, а 3 раза — 1—2 человека. Между тем из отчета Рейла [7] следует, что из 180 очевидцев, наблюдавших ее, только 111 человек видели молнию 1 раз; 2 раза ее видели 34 человека; 3 раза — 6 человек и более чем 3 раза — 29 человек. Это значительно превышает

ет приведенные выше цифры. В более широком опросе в Ок-Ридже данные о числе случаев двукратного и трехкратного наблюдения молнии отсутствуют.

По нашим данным на 1100 случаев приходится всего 30 случаев двукратного наблюдения, т. е. около 3% общего числа. Трехкратных наблюдений шаровой молнии нет вообще, и лишь один человек утверждал, что видел шаровую молнию 4 раза\*. Однако и эти цифры значительно превосходят те, что можно ожидать из закона умножения вероятностей. Действительно, если как это следует из приведенных выше оценок, вероятность наблюдения шаровой молнии в течение жизни равна в среднем  $10^{-3}$ , то ожидаемое число двукратных наблюдений молнии должно быть около 1 на 1000 однократных наблюдений. По-видимому, второе наблюдение шаровой молнии нельзя считать событием, статистически не зависимым от первого. Возможно также, что в действительности прислала письма лишь сравнительно небольшая часть тех, кто видел шаровую молнию один раз, и все, или почти все, видевшие ее два раза.

Теперь обратимся к вопросу об объективной вероятности появления шаровой молнии, например, во время грозы. Условия наблюдения линейной и шаровой молнии сильно различаются не в пользу последней. Яркий канал линейной молнии виден за много километров, тогда как относительно слабо светящийся (примерно как стоваттная лампочка) небольшой шар можно увидеть лишь за несколько десятков метров. К тому же этот шар существует всего лишь несколько секунд, в лучшем случае — несколько десятков секунд, и не привлекает к себе внимание громом. Кроме того, его обычно наблюдают вблизи поверхности земли, где он легко может быть заслонен другими предметами. Только в случае благоприятных условий (хорошая видимость, отсутствие помех со стороны дневного света и др.) шаровую молнию можно увидеть на расстоянии более 100 м, причем возможность ошибки в этих случаях резко возрастает.

На рис. 1.4 приведена гистограмма числа шаровых молний, кратчайшее расстояние до которых указано под каждым столбцом гистограммы. На рис. 1.5 изображена плавная кривая, построенная на основе этой гистограм-

---

\* Заметим, что речь идет здесь не о наблюдении нескольких шаровых молний одновременно, а именно о двукратном и многократном наблюдении.

мы (см. кривую, проведенную по светлым кружкам). Ординаты точек этой кривой представляют собой долю тех событий, для которых наименьшее расстояние от наблюдателя до шаровой молнии было меньше или равно значению абсциссы. Как гистограмма, так и график построены на основе материалов, полученных в анкете

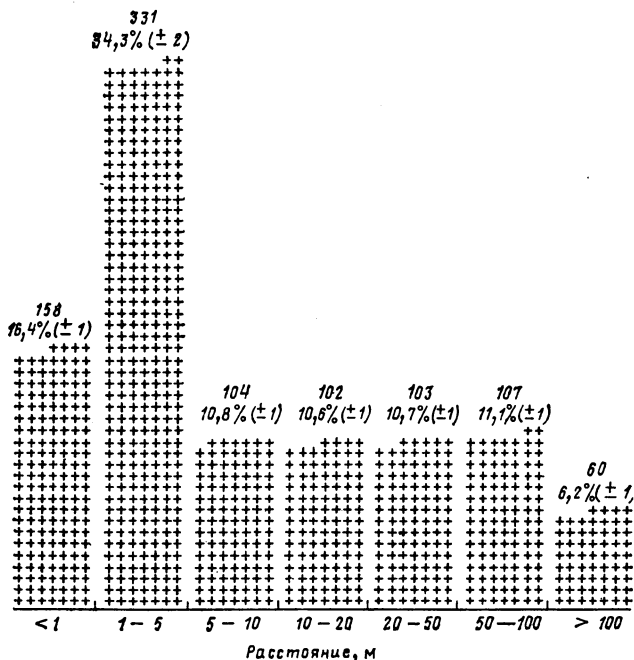


Рис. 1.4. Гистограмма наименьших расстояний от наблюдателя до шаровой молнии (данные 1976 г., 965 случаев). Указаны число сообщений, приходящихся на данный интервал расстояний, и их доля от общего числа случаев

1976 г., причем использовано 965 случаев, которые содержали ответы на соответствующие вопросы.

Из гистограммы и рисунка следует, что значительно больше половины шаровых молний (около 61,5 %, или 593 события) наблюдались с расстояния меньше 10 м. В 158 случаях (16 %) шаровая молния находилась на расстоянии меньше 1 м от наблюдателя. Только 6 % событий относится к наблюдениям, в которых минимальное



расстояние превышало 100 м. Заметим, что наблюдения, сделанные с расстояния более 100 м, кажутся нам довольно сомнительными. Действительно, поскольку характерный размер шаровой молнии, как будет показано ниже, составляет 10—20 см, угловой диаметр, под которым она наблюдается при расстоянии 100 м, равен

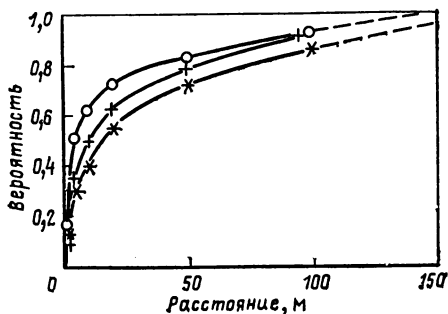


Рис. 1.5. Распределение шаровых молний по наименьшим расстояниям до наблюдателя (данные 1976 г., 965 случаев); ордината точек кривой дает вероятность того, что наименьшее расстояние во время наблюдения не превышало значения абсциссы:

О — по всем наблюдениям; + — только для молний в пасмурную погоду без грозы (155 случаев); \* — только для молний в ясную погоду (134 наблюдения)

приблизительно  $7'$ , иными словами, в 4 раза меньше углового диаметра Луны. В этих условиях шаровую молнию, может быть, еще можно заметить, но очень трудно правильно описать. Кроме того, сильно увеличивается вероятность спутать ее с каким-либо другим явлением. Однако при расстоянии менее 10 м ошибка вряд ли возможна.

Приведенные на рис. 1.5 данные не подтверждают гипотезы Рейла [7] о том, что число шаровых молний растет пропорционально квадрату или кубу расстояния до нее (в зависимости от того, появляется ли она у поверхности земли или в пространстве). Возможно, что при не слишком больших расстояниях это и было бы так, если бы шаровая молния наблюдалась в открытом пустом пространстве. В действительности же с ней чаще сталкиваются внутри строений, где трудно ожидать таких простых закономерностей.

Согласно Рейлу около половины всех молний наблюдалось с расстояния менее 15 м; в 30 % случаев мини-

мальное расстояние было меньше 3 м и в 66 % — меньше 30 м\*. Как видно из графика рис. 1.5, в нашем опросе приблизительно 35 % молний наблюдали с расстояния менее 3 м, приблизительно 77 % — с расстояния до 30 м. На интервал менее 15 м приходится 67 % случаев. Таким образом, можно считать, что в этом отношении условия наблюдения в обоих случаях примерно одинаковы. В опросе NASA [7] в 54 случаях, что составляет около 48 % общего числа наблюдений, шаровую молнию наблюдатели видели, находясь в здании. Хотя это и не означает, что сама шаровая молния была внутри здания, но, по-видимому, в большинстве этих случаев было именно так. В нашем случае, как это видно из рис. 1.5, 50 % наблюдателей видели шаровую молнию на расстоянии менее 5 м, что также обычно соответствует условиям наблюдения внутри помещений. Как будет показано ниже (см. рис. 2.10), примерно в 50 % случаев расстояние, пройденное шаровой молнией за время наблюдения, было менее 8 м. Итак, в нашем опросе также примерно в 50 % случаев, если не больше, шаровую молнию наблюдали внутри строений.

Вернемся снова к вопросу об объективной частоте появлений шаровой молнии. Естественным масштабом для сравнения является частота появления линейных молний. В предварительный опрос, проведенный NASA, были включены также вопросы о наблюдении четочной молнии\*\* и о месте попадания линейной молнии. В последнем вопросе имеют в виду наблюдение области диаметром около 3 м, расположенной там, где канал линейной молнии уходит в землю или в предметы, находящиеся на ней. Утвердительный ответ на этот вопрос означал, что наблюдатель видел это место достаточно отчетливо, чтобы иметь возможность заметить небольшой слабо светящийся шар около земли.

Оказалось, что из 1764 опрошенных шаровую молнию видели 180, четочную 112, а место удара линейной молнии 409 человек, что составляет соответственно 10;6 и 23 % общего числа опрошенных. Таким образом, вероятность наблюдения шаровой молнии всего в 2,5 раза меньше вероятности наблюдения точки поражения линейной

---

\* У Мак-Нелли этих данных нет, поскольку вопрос о минимальном расстоянии в ок-риджской анкете отсутствовал.

\*\* Это особая форма линейной молнии, канал которой распадается на ряд светящихся областей, разделенных темными перетяжками.

молнии, так что в определенном смысле можно сказать, что и линейная молния — довольно редкое явление, поскольку она редко появляется недалеко от наблюдателя. Частота появления шаровой молнии согласно этим данным — одного порядка с частотой разрядов облако — земля, и впечатление редкости явления возникает только из-за того, что условия ее наблюдения сильно затруднены (примерно так, как условия наблюдения места поражения линейной молнии). Если шаровая молния возникает при разряде линейной молнии, то можно ожидать, что она появляется при каждом таком разряде, или, говоря точнее, эта гипотеза не противоречит результатам опроса Рейла. Наоборот, предположение о том, что она образуется в редких, исключительных случаях, например когда ток достигает очень большого значения или когда канал линейной молнии приходит через какой-либо особый участок поверхности, не согласуется с этими результатами.

Совершенно иная ситуация имеет место при возникновении четочной молнии, условия наблюдения которой такие же, как и линейной. Поскольку, несмотря на это, ее наблюдали реже, чем шаровую молнию, становится ясно, что мы имеем здесь дело с действительно редким явлением.

Если, как это часто считают, шаровая молния образуется при разряде линейной молнии, то можно значительно увеличить вероятность ее наблюдения. Для этого достаточно организовать регулярное наблюдение за теми объектами, которые часто поражает линейная молния (высотные шпили, телевизионные вышки, опоры линий электропередачи и др.). Так, частота попадания линейной молнии в Останкинскую башню составляет несколько десятков случаев в год. Если вероятность появления шаровой молнии при разряде линейной молнии не меньше  $0,1—0,01$ , то имеется много шансов обнаружить шаровую молнию в течение одного сезона. При этом, конечно, необходимо допустить, что попадание молний в башню не исключает по тем или иным причинам появление шаровой молнии. Кроме того, нужно применять соответствующую аппаратуру, поскольку, если учесть большую высоту башни, угловой размер шаровой молнии (при наблюдении с земли) будет очень мал, а яркость ее ничтожна по сравнению с яркостью канала линейной молнии.

## 1.5. Шаровая молния и гроза

В начале этой главы мы упоминали, что шаровая молния появляется во время грозы. И снова это необычное явление ставит перед нами еще один нерешенный вопрос. Дело в том, что она может появляться и без грозы. Обратимся к фактам. На рис. 1.6 представлено распределение числа событий по месяцам, составленное по данным нашего опроса и содержащее 884 случая. Эта гистограмма довольно хорошо повторяет распределение грозовой активности в течение года. Мы видим отчетливый максимум в июле, на который приходится почти 40 % всех случаев наблюдения шаровой молнии. На три летних месяца падает 83 %, а если включить май и сентябрь, в течение которых также нередко случаются грозы, особенно в южных районах Советского Союза, то на этот период приходится 93 % общего числа событий. Сходная картина наблюдается и в США. Согласно [7] находим, что из 98 наблюдений, для которых был указан месяц, на июль приходится 35 (т. е. около 35 %), на июнь и август — 28 и 18; таким образом, три летних месяца дают 83 %. В мае наблюдалось 7 случаев, а в сентябре — 4, т. е. период с мая по сентябрь включительно охватывает 94 % всех событий. Кроме того, наблюдалось два случая в октябре, один — в ноябре и три — в апреле.

Эти данные убедительно показывают, что появление шаровых молний хорошо коррелирует с грозовой активностью. Небольшое число случаев (около 10 %), происходящих на осенние и зимние месяцы, а также на начало весны, вполне можно объяснить тем, что грозовая деятельность не прекращается полностью зимой, о чем свидетельствуют, например, зимние грозы.

Итак, для появления шаровых молний требуется, видимо, достаточно высокая интенсивность гроз. К сожалению, исследование индивидуальных наблюдений не дает столь же отчетливой картины связи между этими событиями. Из 1006 случаев наблюдения шаровой молнии, когда были достаточно ясно обрисованы погодные условия, 699, т. е. около 70 %, указывали на прямую связь с грозой. В этих случаях шаровая молния появлялась во время грозы, или непосредственно перед ее началом, или вскоре после конца. В 17 % случаев (173 события) никаких указаний на грозу не было, хотя погода и была пасмурная или шел дождь. И наконец, имеется

134 случая (около 13 %), когда шаровая молния наблюдалась в ясную погоду. Примерно такая же картина — около 70 % случаев во время грозы — была получена в опросе [12], который, к сожалению, был основан на довольно небольшом числе наблюдений (71 событие). Что же касается американских опросов, то там связь с грозой оказалась более тесной: согласно Рейлу [7]

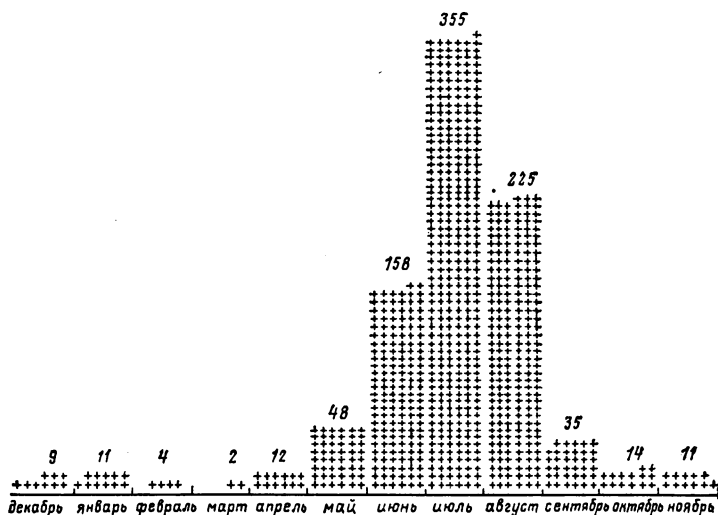


Рис. 1.6. Гистограмма распределения результатов наблюдений шаровой молнии по месяцам (данные 1976 г., 884 случая)

около 95 % наблюдений были сделаны во время грозы. В отчете Мак-Нелли [6] говорится только о трех случаях появления шаровой молнии в ясную погоду. В 376 случаях она появилась после удара линейной молнии, т. е. во время грозы. В остальных 134 случаях погодные условия не уточнены. Можно сказать, что, как правило, шаровая молния появляется не только в периоды повышенной грозовой активности, но и просто во время гроз. Однако случаи ее появления в ясную погоду, хотя и относительно более редкие, все же нельзя сбросить со счетов как ошибки наблюдений. Естественно, возникают сомнения, не имеют ли эти шаровые молнии, наблюдаемые при ясном небе, совершенно иную природу, чем шаровые молнии во время грозы. Однако

описание этих аномальных «негрозовых» шаровых молний так походят на обычные «типичные» случаи, что трудно отказаться от мысли, что мы имеем дело с тем же самым явлением. Чтобы не быть голословными, приведем несколько примеров. Вот что пишет инженер П. В. Шулепов из Челябинска.

№ 14. Был жаркий день. К вечеру на горизонте стали собираться тучи, вдали сверкали молнии, но грома слышно не было. Стемнело. Группа мальчиков (в их числе был и автор письма) возвращалась с реки Миасс и увидела, как на высоте 8—10 м над домами пересекает улицу огненный шар. Он находился на расстоянии 20—30 м и имел диаметр около 30 см. Шар был ясно виден на фоне неба и состоял как бы из отдельных разноцветных звездочек. Двигался он плавно, в сторону, противоположную движению, тянулся хвост из искр, в конце хвоста искры гасли. Шар пересек улицу и повис над домом. Затем он распался яркими искрами и, осветив на мгновение дом сиянием, погас. Все это происходило в июле 1940 г. в поселке Мелентьево Миасского района Челябинской области и продолжалось в течение одной минуты.

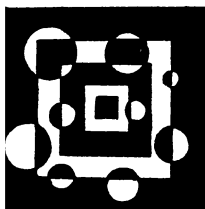
№ 15. В 1910 г. в солнечный, безоблачный день телеграфист И. Ф. Рыжков сидел у телеграфного аппарата почтово-телеграфной конторы. Во время приема телеграммы из аппарата выскочила молния размером «немного меньше футбольного мяча». Она медленно с гудением пролетела по комнате на высоте двух метров и вылетела в окно. Хотя погода в месте наблюдения шаровой молнии была ясная, на некотором расстоянии над линией была гроза. Возможно, что удар молнии в линию и вызвал появление шаровой молнии.

№ 16. 25—26 августа 1974 г. около 6—7 ч вечера шофер Ж. М. Шамбелев увидел две шаровые молнии ослепительно белого цвета около проводов высоковольтной линии. Они медленно двигались и исчезли с шипением и слабым следом дыма. Погода была ясная, грозы не было. Но, может быть, гроза была, как и в предыдущем случае, где-то над линией?

№ 17. В заключение приведем еще один случай, описанный Т. С. Юрковой. Он произошел в августе 1947 г. в 23 ч на берегу р. Камы в ясную теплую и безветренную погоду. Шаровая молния диаметром около 50 см оранжевого цвета плыла, выбрасывая искры и продвигаясь в это время скачками. Она прошла, поднявшись над лесом, поплыла к деревне и скрылась за домами, пройдя около 1 км примерно за 60 с. Наблюдалось все это с большого расстояния — около 300 м, но все приведенные данные вполне типичны для «обычной» шаровой молнии.

Итак, возникает вопрос: насколько шаровые молнии, которые наблюдаются в ясную погоду, по своим свойствам

вам аналогичны «типичным» шаровым молниям? Этот вопрос будет более подробно рассмотрен в гл. 2. Забегая вперед, отметим, что существенных различий между шаровыми молниями, наблюдаемыми в ясную погоду, и «грозовыми» шаровыми молниями обнаружить не удалось. В итоге мы пришли к заключению, что шаровая молния скорее связана с грозовой активностью, чем непосредственно с грозой.



*Свойства  
шаровой  
молнии*

2

## 2.1. Время жизни

К сожалению, большинство наблюдателей шаровой молнии не видят либо момента возникновения ее, либо момента гибели, либо ни того, ни другого. Поэтому время наблюдения шаровой молнии дает лишь приблизительное представление о времени ее жизни. Положение осложняется еще и тем, что при оценке длительности явления, как правило, приходится пользоваться не показаниями часов, а субъективным чувством времени наблюдателя. В этих условиях особое значение приобретает сравнение больших серий наблюдений, выполненных в разных местах, например в разных странах, что мы и постараемся сделать в этой главе.

Судя по имеющимся фактам, длительность наблюдения шаровой молнии не отличается значительно от средней длительности ее жизни, и поэтому в дальнейшем для простоты мы часто будем говорить о времени жизни, а не о длительности наблюдения. На рис. 2.1 представлена гистограмма распределения длительности наблюдения молнии, составленная на основе описания 982 событий, полученных в течение 1976 г.\* Под каждой колон-

---

\* Здесь речь идет только о тех событиях, для которых была указана длительность наблюдения.

кой указан интервал времени, а над ней — число случаев, в которых длительность наблюдения лежала в пределах этого интервала. Интервалы были выбраны так, чтобы человек, не следящий за временем по часам, мог тем не менее с достаточной степенью уверенности различить их. Поэтому размеры интервалов постепенно увеличиваются, так как можно отличить промежуток вре-

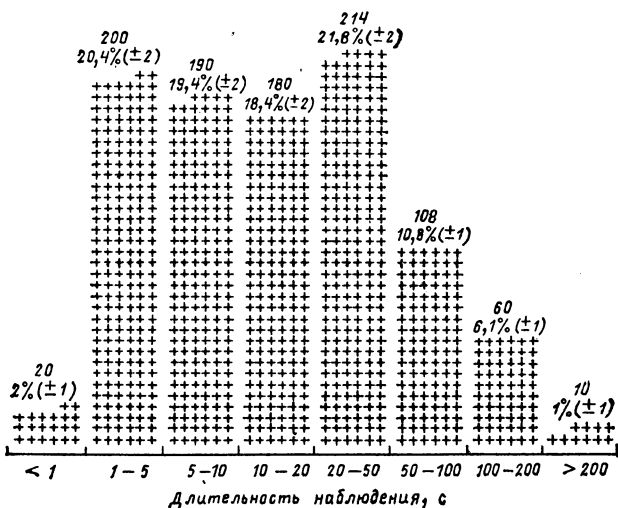


Рис. 2.1. Гистограмма распределения длительности наблюдения шаровых молний (данные 1976 г., 982 случая)

мени в 2 с, скажем, от интервала 7 с, но едва ли можно это сделать для 50 и 55 с. Над каждым столбцом гистограммы указано также, какую часть общего числа событий составляют события, отнесенные к данному столбцу. Первый и последний столбцы, содержащие сравнительно небольшое число событий, естественно, могут и не отражать из-за случайных ошибок действительной ситуации с достаточной точностью. Предполагая, что случайные отклонения от средних значений пропорциональны  $\sqrt{\bar{n}}/n$ , где  $n$  — число событий в рассматриваемой группе, можно вычислить вероятные пределы этих отклонений. Они указаны в скобках для каждого столбца гистограммы (в процентах). Кроме случайных возможны также и систематические погрешности. Для молний, существо-



вавших менее 1 с, это вполне естественно: далеко не все такие молнии могут быть замечены наблюдателями. Однако и очень большая длительность жизни — более 100—200 с — также может включать значительную систематическую погрешность, поскольку обычно эти наблюдения относятся к объектам, наблюдаемым с большого расстояния, что увеличивает вероятность ошибок. Хотя ошибки

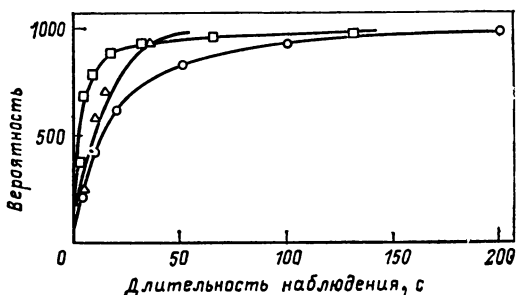


Рис. 2.2. Вероятность распада шаровых молний, нормированная на 1000:

по оси ординат указано число молний, исчезнувших к моменту  $t$ , соответствующему значению абсциссы; ○ — [9]; □ — [6]; △ — [7]; — — расчет по формулам (2.5) — (2.7)

при определении времени наблюдения могут приводить к удвоению его против действительного значения, все же из гистограмм с большой убедительностью следует, что время жизни шаровой молнии может значительно превышать 1—2 с, которые отводят ей некоторые авторы обзоров, но в то же время оно практически во всех случаях не выше 2—3 мин.

По гистограмме, просуммировав число событий, относящихся к соответствующим столбцам, легко найти число случаев, когда молнии наблюдались в течение времени меньше 5, 10, 20 с и т. д. Пересчитав эти данные на тысячу случаев (для чего нужно умножить на коэффициент  $1000/980$ ), получим результаты, приведенные на рис. 2.2. Аналогичные данные, полученные в ок-риджском [6] и льюисовском [7] опросах, также приведены на рис. 2.2. В первом случае они основаны на распределении по времени 445 событий, а во втором 95 событий, для удобства сравнения во всех трех случаях проведена нормировка на 1000 событий. Если время наблюдения действительно близко ко времени жизни молний, то можно считать, что

на рис. 2.2 представлена динамика распада 1000 шаровых молний, полученная по данным трех различных опросов.

Прежде всего отметим удовлетворительное согласие приведенных результатов. Из графика видно, что согласно нашим данным половина шаровых молний исчезает за 13 с, по данным Мак-Нелли за 3—4 с, по данным Рейла—

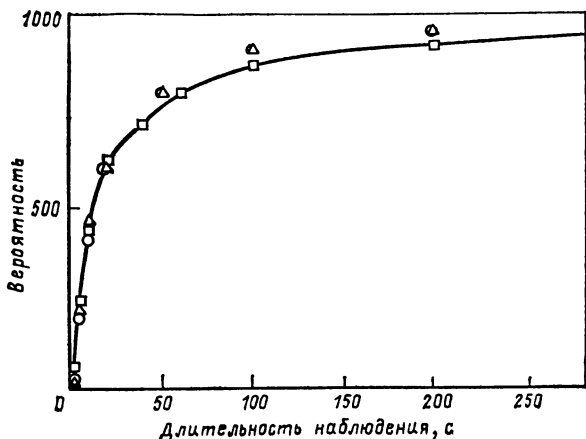


Рис. 23. Сравнение вероятности распада, нормированной на 1000: Δ — первая анкета (345 событий); □ — вторая анкета (те же события, что и для первой анкеты); ○ — данные, полученные по 980 случаям [9]

приблизительно за 9 с. Учитывая ненадежность субъективной оценки времени, это согласие можно считать удовлетворительным.

Как уже упоминалось ранее, части очевидцев, ответивших на первую анкету, была разослана вторая, более подробная анкета. Так как временной разрыв между ответами на эти анкеты составлял в большинстве случаев 2—3 года, то появилась возможность проконтролировать, насколько определенно очевидцы помнят то, что они наблюдали. Конечно, совпадение ответов не является гарантией правильности их в смысле соответствия с действительностью, но оно может стать мерилom четкости и определенности воспоминаний. Оказалось, что, как правило, очевидцы не помнят точных цифр, которые они давали ранее, и не повторяют их. Временные и простран-

ственные интервалы в новой анкете были намеренно выделены несколько иначе, чем в старой. Однако сильные (более чем в 2 раза) отклонения в оценках времени наблюдения и тем более размеров были довольно редки, хотя иногда и встречались.

На рис. 2.3 показана динамика распада 1000 шаровых молний, построенная на основе 345 сообщений второй анкеты (прямоугольники), и приведены данные тех же очевидцев по первой анкете (треугольники). Кроме того, кружками нанесены данные, построенные на основе 980 сообщений, которые были приведены на рис. 2.2 (первая анкета). Видно, что во второй анкете несколько увеличилось число наблюдений, в которых длительность наблюдения оценивается в 100 с и больше, однако различия не велики и общее согласие данных можно считать удовлетворительным.

Построив полученные результаты в полулогарифмическом масштабе, легко найти, что «закон распада шаровых молний» не имеет простого экспоненциального вида, однако его можно представить двумя экспонентами с сильно различающимися периодами распада:

$$N = N_0 [1 - \alpha_1 \exp(-t/\tau_1) - \alpha_2 \exp(t/\tau_2)], \quad (2.1)$$

где  $N$  — число молний, «распавшихся» в течение времени  $t$  из общего числа  $N_0$  молний, существовавших вначале (на рис. 2.2  $N_0 = 10^3$ );  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — доля молний, распадающихся с периодом  $\tau_1$  и  $\tau_2$  соответственно ( $\tau_1 \ll \tau_2$ ). Очевидно, что

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1. \quad (2.2)$$

При  $t \gg \tau_1$  все короткоживущие молнии исчезают и

$$\ln \frac{N_0 - N(t)}{N_0} = \ln \alpha_2 - \frac{t}{\tau_2}, \quad (2.3)$$

т. е. в полулогарифмическом масштабе зависимость относительного числа оставшихся молний  $v' = [N_0 - N(t)]/N_0$  от времени должна быть представлена прямой линией. Из рис. 2.4 видно, что это предположение хорошо выполняется для результатов нашего опроса (см. точки прямой 1, соответствующие 50, 100 и 200 с); в результате находим, что  $\tau_2 = 54$  с,  $\alpha_2 = 0,43$  и, следовательно,  $\alpha_1 = 0,57$ . Из (2.1) следует, что

$$\ln v'' = \ln \alpha_1 - t/\tau_1, \quad (2.4)$$

где  $v'' = (N_0 - N) / N_0 - \alpha_2 \exp(-t/\tau_2)$ , т. е. снова получаем прямую в полулогарифмическом масштабе. Как видно из рис. 2.4, это также хорошо выполняется для наших данных (прямая 2). Находим, что  $\tau_1 = 11$  с. Итак, согласно нашим данным шаровые молнии распадаются по следующему закону:

$$N = N_0 [1 - 0,57 \exp(-t/11) - 0,43 \exp(-t/54)], \quad (2.5)$$

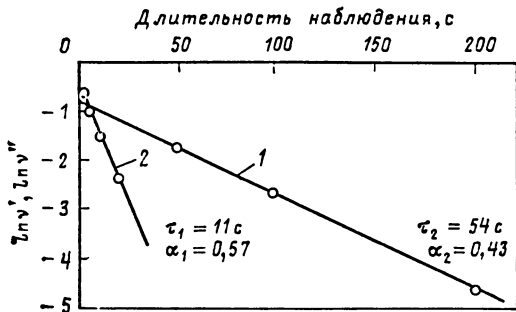


Рис. 2.4. Закон «распада» в полулогарифмическом масштабе для данных, полученных в 1976 г.

где время выражено в секундах. Линия, проходящая через кружки на рис. 2.2, рассчитана по формуле (2.5). Видно, что она хорошо аппроксимирует результаты наблюдения. Таким образом, существуют две группы молний, одну из которых условно назовем короткоживущей с периодом полураспада 7,5 с ( $0,69 \tau_1$ ), а вторую — долгоживущей с периодом полураспада 40 с ( $0,69 \tau_2$ ). Обе группы были представлены в наблюдениях этой серии примерно в одинаковых количествах: короткоживущие — 57 %, долгоживущие — 43 %. Аналогичная обработка, выполненная для результатов Мак-Нелли, дает

$$N = N_0 [1 - 0,86 \exp(-t/3,5) - 0,14 \exp(-t/64)], \quad (2.6)$$

в то время как для данных Рейла получаем

$$N = N_0 [1 - \exp(-t/14)]. \quad (2.7)$$

Соответствующие графики в полулогарифмическом масштабе приведены на рис. 2.5. Линии, проведенные на рис. 2.2 около точек Мак-Нелли и Рейла, представляют собой расчет по формулам (2.6) и (2.7). Эти линии хотя и несколько хуже, чем в первом случае, все же доста-

точно хорошо аппроксимируют результаты наблюдений. Мы видим, что в ок-риджских, так же как и в наших, наблюдениях имеются группы короткоживущих и долгоживущих молний, однако первые составляют подавляющее большинство случаев (около 86 %). Кроме того, их период полураспада оказался приблизительно в 3 раза меньше, чем в наших наблюдениях. В выборке Рейла

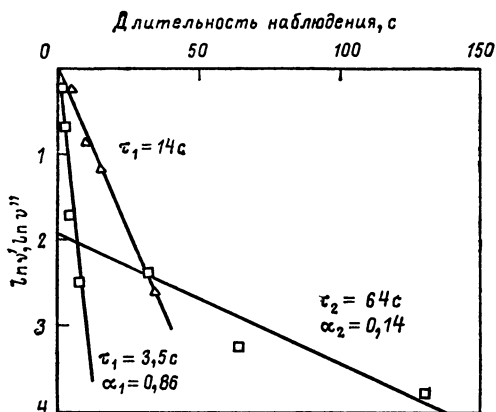


Рис. 2.5. Закон «распада» в полулогарифмическом масштабе по данным [6] (□) и [7] (Δ)

долгоживущие молнии отсутствуют, а период полураспада короткоживущих приблизительно соответствует тому, который был получен у нас. Небольшая доля долгоживущих молний, полученная Мак-Нелли, вполне согласуется с их отсутствием в небольшом по объему опросе Рейла.

Из рис. 2.2 и из полученных интерполяционных формул (2.5) — (2.7) следует, что производная  $dN/dt$  монотонно убывает с ростом  $t$ . Величина  $(1/N_0) dN/dt$ , равная плотности вероятности распада молнии в момент  $t$ , растет при  $t \rightarrow 0$ .

## 2.2. Размеры и форма

Неудивительно, что философы прежних времен выделяли протяженность и пространственную форму из всех остальных свойств физических тел, считая их первичными и неотъемлемыми свойствами материи. Действ-

вительно, эти характеристики тел особенно легко поддаются объективной оценке и менее всего зависят от индивидуальных особенностей наблюдателя. Поэтому в отношении формы и размеров шаровой молнии можно надеяться получить наиболее согласованные результаты. Эти надежды оправдываются. Подавляющее большинство наблюдателей говорят о форме, близкой к правильному шару, откуда возникло само название явления, причем не только в русском языке (ball lightning, ball of fire, Kugelblitz и др.). Так, в опросе, проведенном NASA, из 112 событий в 98 случаях (87,5 %) зафиксирована сферическая форма, в 9 случаях (8 %) — эллипсоидальная и только в 3 случаях сообщалось о кольцеобразной форме. Примерно 80—90 % наблюдателей сообщали о сферической форме и в старых обзорах, выполненных до 60-х годов (см., например, [15, 16]). К сожалению, ни в анкете Мак-Нелли, ни в первой нашей анкете, опубликованной в 1975 г., не было вопроса о форме молнии. В последующих редакциях анкеты этот недостаток был устранен, и в настоящее время мы располагаем описанием 878 случаев наблюдения шаровой молнии, в которых указана ее форма. Эти данные в значительной части случаев проконтролированы и подтверждены второй анкетой, в которой также содержался вопрос о приблизительном отношении наибольшего и наименьшего диаметров. Ответы распределились следующим образом:

Шар . . . . .	89,7 % (788 случаев)
Эллипсоид . . . . .	5,9 % (52 случая)
Грушевидная форма . . . . .	2,3 % (20 случаев)
Неправильная форма . . . . .	1,6 % (14 случаев)

Кроме того, в двух случаях была указана кольцеобразная форма, в одном — диск и в другом — цилиндр, что составляет в сумме 0,5 %. Эти результаты будут рассмотрены ниже в параграфе, посвященном устойчивости и поверхностной энергии шаровой молнии.

Гистограмма размеров шаровой молнии, полученная на основе анализа 1005 событий, сообщения о которых содержались в ответах на первую анкету (1976 г.), приведена на рис. 2.6. Над каждой колонкой гистограммы записаны число случаев, когда диаметры шаровой молнии лежали в данной области значений, и доля в процентах, которую составляют эти случаи от общего числа наблюдений, а также вероятные пределы случайных отклонений. Так же как и в случае распределения по ин-

тервалам времени наблюдений, первый и последний столбцы гистограммы, соответствующие диаметрам меньше 2 и больше 100 см, включают небольшое число событий и могут содержать значительные случайные и систематические погрешности. Разброс в оценке диаметров, как легко видеть из сравнения рис. 2.1 и 2.6, значительно меньше, чем в оценке времени жизни.

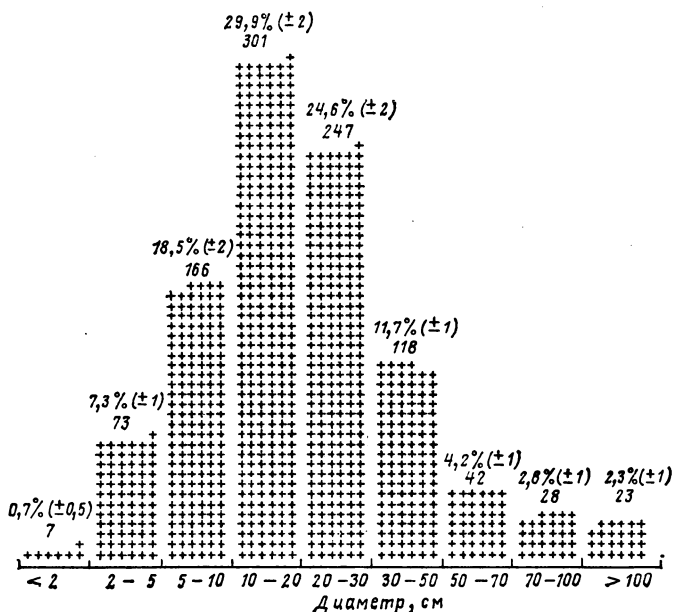


Рис. 2.6. Гистограмма распределения шаровых молний по интервалам диаметров (данные 1976 г., 1005 случаев)

На основе этой гистограммы можно построить плотность вероятности того, что молния имеет данный диаметр. Для этого нужно разделить число событий, происходящих на каждый интервал диаметров гистограммы, на этот интервал. Это дает плотность вероятности на единицу длины интервала, которую можно отнести затем к середине интервала. На рис. 2.7 результаты наших наблюдений представлены кружками. Аналогичным образом обработанные данные ок-риджского и льюисовского опросов приведены в виде соответственно прямоугольников и треугольников. Сплошные линии — сглаженные и нормированные на единицу распределе-

ния плотности вероятности. Они имеют отчетливый максимум в области значений диаметра 10—15 см. На рис. 2.7 видно также, что наши результаты и данные Мак-Нелли хорошо согласуются между собой. Согласно Рейлу плотность вероятности хотя и имеет максимум приблизительно в том же интервале диаметров, значительно медленнее спадает с увеличением диаметра после мак-

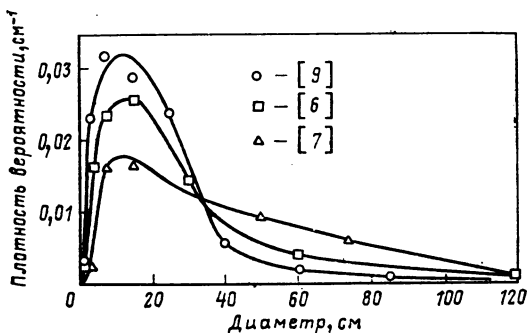


Рис. 2.7. Нормированная на единицу плотность вероятности распределения шаровых молний по диаметру (сплошные кривые проведены так, чтобы гладко аппроксимировать результаты наблюдений)

симума. Это объясняется, вероятно, недостаточной статистической выборкой, обследованной в этом опросе (всего 98 событий против 446 у Мак-Нелли и 1005 в нашем случае). Следует заметить, что первичные данные, приведенные у Рейла [7], разбиты на 9 диапазонов, вследствие чего некоторые из них содержат очень немного (меньше 10) наблюдений. Для уменьшения влияния случайных отклонений при обработке этих данных мы объединили соседние интервалы, поэтому на соответствующей кривой рис. 2.7 имеется только 6 точек. Во избежание недоразумений заметим также, что в книге Сингера [3, с. 98] приведен график, на котором отложено число наблюдений молнии данного интервала диаметров, не отнесенных к интервалу. Поэтому этот график представляет собой не плотность вероятности, а гистограмму числа событий, аналогичную той, которая приведена на рис. 2.6. Это приводит к значительному изменению формы кривой, в частности к смещению максимума в область больших размеров.



Средние значения диаметра молнии  $\langle x \rangle$  определяются как

$$\langle x \rangle = \int_0^{\infty} x f(x) dx, \quad (2.8)$$

где  $f(x)$  — нормированная на единицу плотность вероятности распределения по размерам;  $x$  — диаметр. Результаты определения этой величины посредством численного интегрирования содержатся в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Источник сведений	$x_{max}$ , см	$\langle x \rangle$ , см	$x_0$ , см	$\langle x \rangle$ по (2.10), см
Данные первой анкеты (1976)	12,5	22,5	11	22
Опрос в Ок-Ридже [6]	14	32,5	16	32
Опрос NASA [7]	12	45,4	18,5	37

В этой же таблице приведены значения наиболее вероятного диаметра  $x_{max}$ , для которого плотность вероятности  $f(x)$  имеет максимум. Хотя наиболее вероятный диаметр практически совпадает во всех трех случаях, средние значения диаметра различаются приблизительно в 1,5—2 раза, что указывает на заметное различие ширины вероятностных распределений. Наиболее узкое распределение получено в нашей анкете, наиболее широкое — в опросе NASA. Несмотря на эти различия можно считать, что результаты этих опросов хорошо совпадают между собой. Можно надеяться, что неизбежные индивидуальные ошибки наблюдателей достаточно хорошо компенсируются в больших статистических выборках\*. На рис. 2.8 приведена плотность вероятности распределения шаровых молний по диаметру, полученная из 359 описаний, взятых из второй анкеты (прямоугольники), и 342 описаний тех же событий из первой анкеты (треугольники), присланных двумя или тремя годами раньше. Кроме того, для сравнения приведена плотность распределения из данных рис. 2.7 (кружки). Все данные нормированы так, чтобы полная вероятность найти

\* В отчете [7] приведены также значения медианных размеров, для которых половина шаровых молний имеет меньший диаметр. Для данных [7] он оказывается равным 35 см, для данных Мак-Нелли — 25 см и для наших данных — 17,5 см.

шаровую молнию какого-либо размера равнялась единице. Видно, что совпадение всех этих распределений достаточно хорошее.

Возникает вопрос об аналитической аппроксимации полученных распределений. Мы пытались использовать для этой цели функции вида

$$f(x) = Ax^n \exp(-x/x_0). \quad (2.9)$$

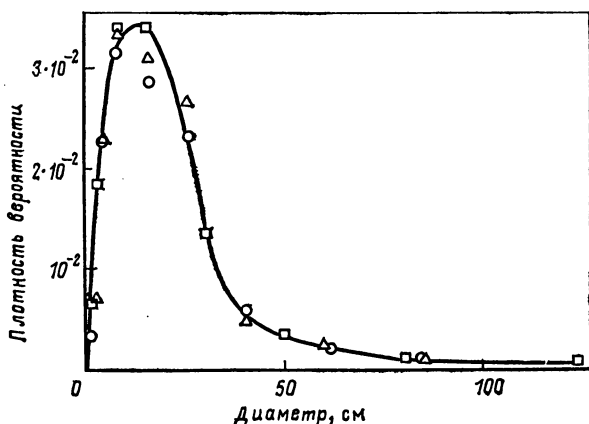


Рис. 2.8. Сравнение плотности вероятности распределения шаровых молний по диаметру, полученной из одних и тех же наблюдений:

□ — вторая анкета, 359 событий; △ — первая анкета, события, совпадающие с событиями, описанными во второй анкетe; ○ — распределение по 1005 сообщениям (см. рис. 2.7)

Оказалось, что наиболее подходящим является случай  $n=1$ . Константу  $A$  находим из условия нормировки

$\int_0^{\infty} f(x) dx = 1$ ; в результате получаем единую форму для описания результатов всех трех опросов:

$$f(x) = (x/x_0^2) \exp(-x/x_0). \quad (2.10)$$

Параметр  $x_0$  можно определить, построив в полулогарифмическом масштабе зависимость  $f(x)/x$  от  $x$ , которая согласно (2.10) должна иметь вид прямой линии. Это сделано на рис. 2.9 (обозначения те же, что и ранее). Из рисунка видно, что все точки, представляющие собой результаты наблюдений, за исключением первой и последней, с удовлетворительной точностью ложатся

на одну прямую. При этом во всех трех случаях точки, соответствующие малому диаметру (меньше 2 см в случае наших данных, 2,5 см [6] и 5 см [7]), лежат ниже прямой, а точки, соответствующие большому диаметру, — выше. Эти расхождения можно понять, если учесть, что наблюдения молнии малого диаметра затруднены из-за того, что они слишком быстро исчезают. Мол-

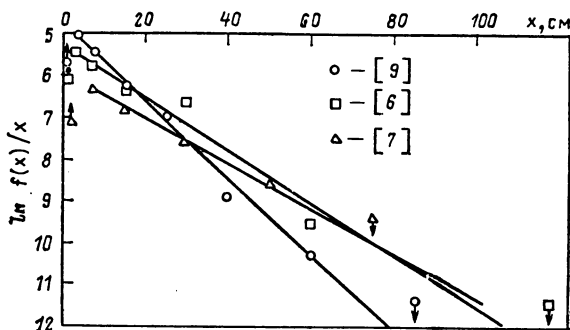


Рис. 2.9. Зависимость  $\ln f(x)/x$  от  $x[f(x)]$  — плотность вероятности наблюдения диаметра  $x$ : стрелками указано направление, в котором должны быть смещены первая и последняя точки, чтобы они легли на прямые, соответствующие формуле (2.10)

нии больших размеров (порядка 1 м и больше), как правило, наблюдаются с очень больших расстояний, что сильно увеличивает вероятность завышения размеров молнии. Действительно, обработка всех 1500 ответов, полученных на первую анкету в 1976—1980 гг., дала следующие результаты. Количество шаровых молний с диаметром 1 м и больше составляет около 2,2 % (33 случая). Однако в дневных и утренних наблюдениях этот процент сокращается до 1,3 %, в то время как для ночных и вечерних он возрастает до 4,8 %. Кроме того, в выборке, содержащей 958 наблюдений шаровой молнии с расстояния меньше 10 м, остается всего 6 случаев, когда диаметр шаровой молнии оценен в 1 м и больше, что составляет 0,6 %. В этой выборке заметно (примерно в 1,5 раза) возрастает число молний, диаметр которых меньше 5 см. Для остальных интервалов получается приблизительно то же распределение, что и для всех наблюдений. Таким образом, сведения о шаровых молниях с диаметром 1 м и больше связаны главным обра-

зом с ночными наблюдениями и наблюдениями с больших расстояний, когда вероятность ошибки возрастает.

По наклону прямых на рис. 2.9 можно найти единственный параметр распределения (2.10):  $x_0$ . Легко видеть, что наиболее вероятное значение диаметра  $x_{max} = x_0$ , а среднее значение диаметра  $\langle x \rangle = 2x_0$ . В третьем и четвертом столбцах табл. 2.1 приведены значения  $x_0$ , полученные из данных рис. 2.9, а также  $\langle x \rangle = 2x_0$ . Видно, что выражение (2.10) с достаточной точностью аппроксимирует наблюдаемые распределения размеров молнии, по крайней мере для нашего и ок-риджского опросов. Вероятность встретить шаровую молнию с диаметром, превышающим  $x_1$ , согласно (2.10) равна

$$W(x_1) = \int_{x_1}^{\infty} f(x) dx = \frac{x_1 + x_0}{x_0} e^{-x_1/x_0}. \quad (2.11)$$

При  $x_0 = 11$  см находим отсюда, что вероятность встретить шаровую молнию с диаметром более 1 м равна приблизительно 0,1 % (при  $x_0 = 12$  см она составляет 0,25 %).

### 2.3. Характер движения

Несмотря на то что различные наблюдатели обычно не имеют разногласий при определении траектории шаровой молнии, движения ее кажутся странными и трудно поддаются описанию. Уже сам факт свободного перемещения в пространстве, отсутствие связи с проводниками, по которым может подводиться энергия, вызывает естественное удивление очевидцев.

Рассмотрим сначала самые общие характеристики движения. Из результатов нашего опроса, полученных на основе анализа 928 сообщений за 1976 г., следует, что неподвижные молнии (точнее, молнии, прошедшие за время наблюдения расстояние меньше 1 м) встретились всего в 82 случаях (9 % общего числа). Молнии, прошедшие расстояние от 1 до 10 м, составляют 46,3 % (430 случаев), т. е. почти половину наблюдений. Эти молнии наблюдались, вероятно, нередко внутри помещений. Однако около 20 % общего числа наблюдений (183 случая) составляли молнии, прошедшие расстояние более 50 м.

На рис. 2.10 приведена нормированная на единицу вероятность того, что молния за время жизни (строго говоря, за время наблюдения) пройдет расстояние не больше значения, равного абсциссе точки. Плавная кривая проведена по точкам, отмеченным светлыми кружками, которые получены из 928 наблюдений; треугольниками обозначены точки, полученные только из наблю-

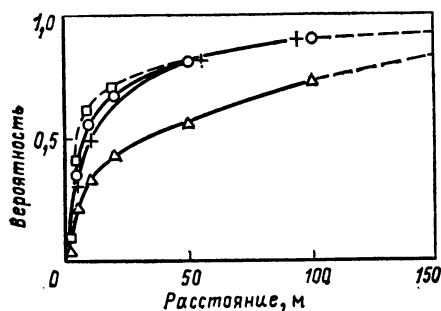


Рис. 2.10. Распределение шаровых молний по пройденным расстояниям (ордината точки дает вероятность для шаровой молнии пройти расстояние, меньшее значения абсциссы или равное ему):

○ — 928 наблюдений, полученных в 1976 г.; + — 155 наблюдений в пасмурную погоду без грозы; △ — 134 наблюдения в ясную погоду; □ — 120 наблюдений молний голубого конца спектра

дений в ясную погоду (134 случая) (большая их часть сделана вне помещений). Мы видим, что в последнем случае около 50 % молний проходят за время наблюдения расстояние свыше 50 м. (Крестиками отмечены результаты 155 наблюдений, полученных в пасмурную или дождливую погоду без грозы; они практически совпадают с первой кривой.) Таким образом, за время жизни шаровая молния может (при условии, что ее движение не ограничено стенами помещений) пройти расстояние в несколько десятков и даже более сотни метров.

Чаще всего шаровую молнию видят движущейся горизонтально. В нашем опросе это составило 684 наблюдения, или 75 % общего числа сообщений, в которых содержались данные о преимущественном направлении движения. Однако нередко она опускается вниз (183 наблюдения, т. е. 20 %) и только изредка поднимается вверх (47 случаев, или 5 %). В опросе NASA в 58 случаях (53 %) говорится о горизонтальном движении, в 20 (18,5 %) — о вертикальном (к сожалению, при этом не уточняется — вверх или вниз) и еще в 20 случаях (18,5 %) — о смешанном, т. е. как горизонтальном, так и вертикальном перемещении.

Чаще наблюдается плавное движение (83 % наблюдений в нашем опросе), чем скачкообразное. Гистограмма средней скорости движения приведена на рис. 2.11, где для каждого интервала скоростей, обозначенного внизу, указаны число наблюдений и их доля от общего числа 885 рассмотренных событий. Средняя скорость получена не по оценкам наблюдателей, а делением пройденного молнией расстояния на время наблюдения (сведения эти содержались в ответах на вопросы анкеты). Видно, что подавляющее большинство молний имеет небольшую среднюю скорость: в 74 % случаев скорость оказалась меньше 2 м/с и в 96 % — меньше 10 м/с. Молнии, имеющие среднюю скорость меньше 0,1 м/с, т. е. практически неподвижные, также немногочисленны — они составляют около 8 %. Подавляющее большинство молний (88 %) движутся со средней скоростью от 0,1 до 10 м/с. Эти данные интересно сопоставить с результатами опроса NASA, в котором выяснилось значение не средней, а максимальной и минимальной скоростей движения шаровой молнии. Согласно этим данным максимальная скорость оказалась меньше 10 м/с в 70 % наблюдений и меньше 30—40 м/с во всех остальных случаях. Таким образом, утверждения о том, что шаровая молния может двигаться со скоростью, приближающейся к скорости распространения линейной мол-

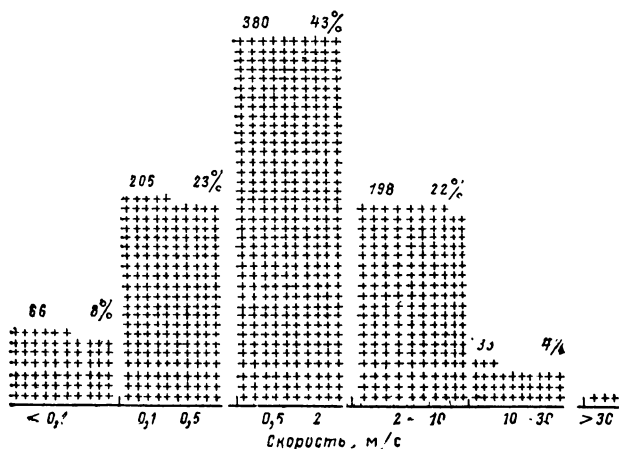


Рис. 2.11. Гистограмма средних скоростей движения шаровой молнии (данные 1976 г., 885 случаев)

нии, не подтверждается статистикой; различие между скоростями составляет 4—5 порядков.

Итак, шаровая молния движется горизонтально или падает вниз, не приобретая большой скорости. Это определенно указывает на то, что плотность ее вещества практически равна плотности окружающего воздуха или лишь немного превосходит ее. Вследствие этого на движение шаровой молнии слабо влияет сила тяжести, и именно в этом состоит одна из причин необычности этих движений: они кажутся для нас столь же странными, как и движение тел в состоянии невесомости.

Наиболее веское доказательство того, что шаровая молния представляет собой газоподобную среду, следует, конечно, из наблюдений характера ее движения, указывающих на то, что ее плотность приблизительно равна плотности воздуха. Но оказывается, над молнией проводились не только наблюдения, но и эксперименты.

№ 18. В. А. Бобрин, доцент из Хабаровска, встретил шаровую молнию в июле 1954 г. вечером перед грозой, когда шел на охоту. Она была около 20—25 см в диаметре, белая, двигалась горизонтально, повторяя рельеф местности. Когда она проходила на расстоянии 15 м, он выстрелил в нее из дробовика. Никакого эффекта не последовало; шар только слегка качнулся. Примерно через 40 с молния ушла из поля зрения, пройдя около 40 м. Таким образом, дробинки свободно прошли через вещество молнии, не передав ему сколько-нибудь заметного количества движения.

Поскольку движение вниз наблюдается значительно чаще, чем движение вверх, нужно ожидать, что плотность молнии все же несколько больше плотности воздуха. Вследствие этого молнии, образовавшиеся из разряда в облаках, либо падают на землю, либо останавливаются вблизи поверхности земли, где сила тяжести уравновешивается, и они начинают парить в воздухе. То же случается с молниями, возникающими вблизи земной поверхности, после того как они теряют импульс, полученный ими при образовании. Какая же сила уравновешивает силу тяжести или, точнее, небольшую ее часть, не скомпенсированную архимедовой силой? Если молния спускается из облаков с достаточно большой высоты (300—500 м), то эта сила снова может оказаться архимедовой, поскольку молния попадает при этом в более плотные слои атмосферы. Так, при изменении высоты на 500 м плотность воздуха меняется приблизительно на 6 %, и это может оказаться достаточным для того,

чтобы установилось безразличное равновесие. Небольшие изменения температуры вещества шаровой молнии также могут вызвать изменения его плотности и соответственно архимедовой силы. В частности, снижение температуры сразу же после ее образования может привести к тому, что шаровая молния будет спускаться вниз в более плотные слои воздуха. Однако более вероятно, что небольшое превышение силы тяжести уравнивается вблизи Земли действием электрических полей. В этом случае шаровая молния должна нести электрический заряд, одноименный с зарядом поверхности земли. Поскольку последняя обычно заряжается в грозу положительно, молния также должна иметь нескомпенсированный положительный заряд. Спустившись вниз, молния оказывается в состоянии безразличного равновесия на эквипотенциальной поверхности, при этом она то поднимается, то опускается над поверхностью земли при горизонтальном движении, повторяя ход этой поверхности. Так это и случается по рассказам очевидцев, когда она движется вверх по склону холма, повторяя форму рельефа, или огибает находящиеся на поверхности земли предметы: дома, верхушки деревьев и др.

В таком взвешенном состоянии движение молнии зависит либо от воздушных потоков, либо от небольших горизонтальных градиентов электрического поля. И в этом состоит вторая причина необычности, «немотивированности» ее движений. Дело в том, что мы не имеем органов, которые реагировали бы на напряженность электрического поля. Электрическое поле вокруг нас во время грозы может возрасти на 3—4 порядка, и тем не менее практически мы не ощущаем этого. Поэтому в повседневной жизни мы не знаем, как меняется электрическое поле вокруг нас, и в отличие от поля тяжести не привыкли считаться с ним как с возможной причиной, определяющей движение тел.

Иногда утверждают, что шаровая молния вообще не чувствует движения воздуха. Это, несомненно, преувеличение. Можно привести много примеров, когда она двигалась прямо по направлению движения воздуха как снаружи помещений, так и внутри них. Вспомним, например, случай № 3, уже описанный в гл. 1, когда порыв ветра, открывший, а затем захлопнувший дверь, вытолкнул шаровую молнию из помещения наружу через отверстие в стене. Об одном весьма анекдотическом



случае непочтительного обращения с шаровой молнией написал нам пенсионер Б. А. Писаренко с Дальнего Востока.

№ 19. В 1915 г., будучи еще мальчиком, он укрылся со своими товарищами от грозы в церкви. Через некоторое время они заметили, что в помещении на высоте 3 м от пола парит белый светящийся шар величиной с человеческую голову. Когда шар прикоснулся к стенкам, раздавался треск и появлялся дымок. Церковный сторож, оказавшийся тут же, не растерялся и вывел шаровую молнию из храма метлой. Дальнейшая судьба ее, к сожалению, не известна.

Более правильно, видимо, сказать, что шаровая молния движется не только под влиянием воздушных потоков. Дополнительным фактором, определяющим ее движение, является электрическое поле. Известно, что шаровая молния часто притягивается к предметам, особенно к проводникам. Это можно объяснить тем, что при достаточно близком расстоянии от предмета она наводит в нем значительный индуцированный заряд или, наоборот, заряженный проводник индуцирует заряды в шаровой молнии. Возможно, что этим также объясняется явление гидрирования — движения шаровой молнии вдоль проводника или вдоль какой-либо особенности рельефа. М. Т. Дмитриев, например, сообщает о том, как шаровая молния двигалась вдоль цепочки плотов, которая тянулась от берега поперек реки [17].

В [7] сообщается, что приблизительно в 16 % случаев движение шаровой молнии гидрируется проводниками или другими металлическими предметами. В 47 % случаев гидрирование не наблюдается (сюда мы отнесли также случаи, в которых шаровая молния движется просто вдоль поверхности земли). Согласно [6] движение вдоль проводников происходило в 20 % случаев. Из приведенных данных видно, что гидрирование проводниками не является преобладающей формой движения молнии, но все же распространено достаточно широко. Подчеркнем, что, как правило, речь идет о гидрировании без прямого контакта с проводниками. Шаровая молния перемещается при этом вдоль тела, оставаясь от него на заметном расстоянии, иногда до 3 м. Случаи, когда шаровая молния как бы прикрепляется к телу или движется вдоль него, касаясь его поверхности, также иногда встречаются.

Заряд шаровой молнии должен изменяться в процессе ее движения как из-за утечки, так и в результате

столкновения с телами. Вследствие этого характер движения может неожиданно меняться. При изменении заряда равновесие сил нарушается и молния может внезапно начать падать или подниматься вверх. Если молния в процессе движения полностью потеряет свой заряд, это еще не означает, что электрическое поле перестает влиять на нее. На расстоянии, равном диаметру шаровой молнии, разность потенциалов электрического поля, возникающая во время грозы, может достигать нескольких киловольт. Под действием поля вещество шаровой молнии будет поляризоваться, так что в ней возникнут наведенные электрические заряды. Поляризационные силы, действующие на незаряженную шаровую молнию, будут перемещать ее в область, где напряженность электрического поля больше. На большей высоте поле однородно и электрические силы не влияют на движение шаровой молнии, если она не заряжена. Однако вблизи поверхности земли незаряженная шаровая молния будет притягиваться к заряженным проводникам независимо от знака их заряда, что и наблюдается довольно часто. Возможно, этим и объясняется ее «упорное» стремление проникать в закрытые помещения даже через узкие отверстия. После соприкосновения с проводником часть индуцированного заряда нейтрализуется и молния, таким образом, снова может получить заряд одного знака.

С точки зрения, которая рассматривает шаровую молнию как сфокусированную электромагнитную волну, говорить о массе молнии так же бессмысленно, как и о запасе ее энергии. Перемещение означает в этом случае не движение вещества, а перемещение пучности стоячей электромагнитной волны, которая нагревает и ионизирует воздух в новом месте. Но все же при движении шаровой молнии мы, вероятно, имеем дело с движением вещества. Это следует хотя бы из того, что в момент рождения и при столкновении с предметами она может приобретать импульс или обмениваться импульсом с окружающими телами. Достаточно вспомнить, что шаровая молния, например, в случае № 1, летела по прямой линии. О другом случае сообщил нам машинист электроваз Л. И. Орлов.

№ 20. В августе 1969 г. ночью во время грозы с сильным дождем и ветром он видел на расстоянии 20—30 м, как после разряда линейной молнии в стальную опору линии электропередачи из места

поражения вылетел светящийся фиолетовый шар диаметром 10—15 см, который двигался под углом вверх по прямой с большой скоростью. Пролетев за несколько секунд около 30 м, он исчез, оставив после себя слабое светящееся облачко, которое быстро растаяло.

Это, конечно, не могла быть капля расплавленного металла хотя бы уже потому, что при таких размерах она имела бы массу от 10 до 40 кг, т. е. должна была бы иметь громадный импульс и двигалась бы по параболе, а не по прямой. То обстоятельство, что шаровая молния пролетела значительное расстояние по прямой вверх, доказывает не только то, что ее плотность близка к плотности воздуха, но и то, что она обладает инерцией и может приобретать в момент образования импульс под действием внешних сил.

Заметим в заключение, что при истолковании движения шаровой молнии мы пожертвовали чисто объективной манерой изложения, которая требует от нас оставаться при изложении фактов на почве чистого описания, а не придерживаясь заранее того или иного взгляда на природу шаровой молнии. Надо сознаться, что в данном случае это оказывается очень трудной, даже почти невыполнимой задачей. Движение шаровой молнии настолько похоже на перемещение обособленного тела, плотность которого приблизительно равна плотности окружающего воздуха, что отказаться от этого представления означало бы на самом деле исказить факты. Остается сказать несколько слов о вращательном движении шаровой молнии. С вихревым движением нередко связывают устойчивость формы. Действительно, закон Гельмгольца о сохранении вихря в идеальной жидкости приводит, например, к длительному сохранению дымовых колец в воздухе. Однако большинство наблюдателей (свыше 2/3) не видят никакого вращательного движения на поверхности шаровой молнии. Ее поверхность часто представляется деформирующейся, похожей на кипящую жидкость, но не вращающейся. В § 2.8, посвященном устойчивости шаровой молнии, мы еще вернемся к этому вопросу.

## **2.4. Излучение и температура**

Излучение видимого света является наиболее широко известным свойством шаровой молнии, которое обычно и позволяет ее обнаружить. Однако спектраль-

ный состав излучения оказывается довольно неопределенным. Трудности связаны не только с тем, что разные наблюдатели нередко расходятся в оценке цвета. Часто шаровой молнии трудно приписать определенный цвет. Иногда наблюдатели говорят о нескольких световых оттенках, или об изменении цвета в течение времени наблюдения. Наконец, в некоторых случаях шаровая молния имеет ядро и ореол, которые могут отличаться по цвету.

Статистика появления различных спектральных цветов приведена в табл. 2.2. В тех случаях, когда называ-

Таблица 2.2

Цвет шаровой молнии	Анкета № 1 (1976 г.)		Мак-Нелли [6]		Рейл [7]		Чармен [18]	
	Число наблюдений	Доля, %	Число наблюдений	Доля, %	Число наблюдений	Доля, %	Число наблюдений	Доля, %
Белый	244	26,1	44	20,4	27	17,8	10	22,2
Красный	180	19,2	40	18,6	7	4,6	4	8,9
Оранжевый	113	12,1	50	23,1	46	30,3	5	11,1
Желтый	246	26,3	38	17,6	37	24,3	16	35,6
Зеленый	12	1,3	3	1,4	10	6,6	2	4,4
Голубой	83	8,8	39	18,0	16	10,5	8	17,8
Синий	15	1,6	—	—	4	2,6	—	—
Фиолетовый	13	1,4	2	0,9	5	3,3	—	—
Неспектральные цвета	30	3,2	—	—	—	—	—	—
Всего	936	100	216	100	152	100	45	100

лись смешанные цвета, например красно-оранжевый, желто-зеленый, мы попеременно относили цвет то к одному, то к другому участку спектра. К неспектральным цветам отнесены 26 случаев «матового» и 4 случая «серого» цвета. Данные Мак-Нелли [6] содержат 216 наблюдений, поскольку в остальных случаях цвет сообщен не был. В отчете Рейла число наблюдений получилось 152 вместо 109, поскольку двухцветные ответы там учитывались дважды.

Красный, оранжевый, желтый, белый и голубой являются самыми распространенными цветами во всех

рассматриваемых случаях. Поскольку различие между соседними спектральными цветами не всегда легко определить на глаз, удобнее сравнивать результаты, сгруппировав их в три группы. К одной из них отнесем цвета красного конца спектра: красный, оранжевый и желтый, к другой — синего: зеленый, голубой, синий и фиолетовый. Наконец, третью группу составляет белый цвет.

Таблица 2.3

Цвет шаровой молнии	Данные анкеты № 1 (1976 г.)		Мак-Нелли [6]		Рейл [7]		Чармен [18]	
	Число наблюдений	Доля, %	Число наблюдений	Доля, %	Число наблюдений	Доля, %	Число наблюдений	Доля, %
Белый	244	26,9	44	20,4	27	17,8	10	22,2
Красный — желтый	539	59,5	128	59,2	90	59,2	25	55,6
Зеленый — фиолетовый	123	13,6	44	20,4	35	23,0	10	22,2
Всего	906	100	216	100	152	100	45	100

В этом случае получаем результат, приведенный в табл. 2.3. Результаты различных серий наблюдений удовлетворительно согласуются между собой. Белые молнии во всех случаях составляют 20—25 %. В подавляющем большинстве наблюдений — около 60 % — цвет относится к красному концу спектра; на коротковолновый конец спектра (зеленый — фиолетовый) приходится 15—20 %. Из таблицы видно, что молнии коротковолнового конца спектра (в частности, голубые) составляют хотя и наименее многочисленную, но все же довольно обширную группу. Ниже мы увидим, что по другим наблюдаемым свойствам молнии этой группы не отличаются от остальных. Вообще цвет шаровой молнии не является ее характерным признаком и, в частности, ничего не говорит о ее температуре, а также и о составе. Вероятнее всего он определяется наличием тех или иных примесей.

В более поздних редакциях первой анкеты содержался вопрос о световом потоке, испускаемом шаровой молнией. Для оценки предлагалось сравнить его со светом

Таблица 2.4

Световой поток	Слабее лампы 10 Вт	Как лампа 10—20 Вт	20—50 Вт	50—100 Вт	100—200 Вт	200—500 Вт	Более 500 Вт
Число случаев	55	83	109	140	150	39	21
Доля, %	9,2	13,9	18,3	25,5	25,1	6,5	3,5

электрической лампы. Всего было получено 597 ответов. Результаты приведены в табл. 2.4.

Чаще всего очевидцы называют два интервала: 50—100 и 100—200 Вт, на которые в сумме приходится около половины наблюдений. Промежуток между 20 и 200 Вт включает 2/3 случаев. Таким образом, световой поток от шаровой молнии в среднем сравним с тем, который испускает электрическая лампа мощностью 100 Вт. Это означает, что мощность света, излученного шаровой молнией в видимой части спектра, порядка нескольких ватт (учитывая, что КПД лампы накаливания около 1 %).

Не исключено, что шаровая молния может излучать мягкое ультрафиолетовое излучение, поглощением которого в окружающем воздухе можно объяснить наблюдаемый голубой ореол. Однако в нашем распоряжении нет никаких надежных данных, которые позволили бы приписать шаровой молнии более жесткое излучение (дальний ультрафиолет и тем более рентгеновское или  $\gamma$ -излучение). Любопытным свойством шаровой молнии является ее прозрачность в видимом свете. Сообщения о том, что сквозь молнию можно видеть окружающие предметы (конечно, в тех случаях, когда поток излучаемого ею света невелик и не может помешать этому), имеются и в обзорах, и в ответах на нашу анкету. Наиболее убедительным свидетельством в пользу прозрачности шаровой молнии являются результаты фотометрирования фотографии следа шаровой молнии [19, 20]. Снимок был сделан В. М. Дерюгиным 9 июля 1958 г. в 21 ч 30 мин во время грозы на метеостанции Карабад в Гурьевской области и был опубликован значительно позднее в журнале «Природа» [21]. Результаты поперечного фотометрирования этого следа в трех различных сечениях приведены

на рис. 2.12. Кружки, прямоугольники и треугольники представляют относительную интенсивность почернения в трех различных сечениях следа.

Если бы видимый свет, выходящий из шаровой молнии, поглощался ее веществом, то распределение интенсивности свечения и соответственно степени почернения фотопластинки в зависимости от расстояния от центра имело бы вид прямоугольного профиля, изображенного на рис. 2.12 пунктиром. В противоположном случае, когда свет свободно выходит из внутренней части молнии, степень почернения должна постепенно с удалением от центра убывать пропорционально толщине слоя вещества, лежащего на пути луча в шаровой молнии (сплошная линия). Видно, что экспериментальные точки для всех трех сечений с хорошей степенью точности ложатся на эту линию. Итак, шаровая молния прозрачна для видимого света. Поскольку она не является черным телом в видимой части спектра, ее температура никак не связана с ее излучением в этом спектре. Вывод этот важен потому, что именно на основании свечения шаровой молнии ей иногда приписывают температуру 5—10 тыс. градусов и даже выше. Аргументом против столь высоких значений температуры является также ее вес: если бы температура шаровой молнии была столь высока, молния была бы значительно легче, а не тяжелее окружающего воздуха.

Удивительным в шаровой молнии является не излучение света, а то, что, излучая свет, она почти совсем не излучает тепло. Из 1500 случаев наблюдения, которые были описаны в ответах на анкету № 1 в течение 1975—1981 гг., ответ на вопрос об ощущении тепла содержится

в 1297 случаях, причем в 1234 из них он отрицательный и лишь в 63 положительный. В табл. 2.5 показано, как распределились положительные ответы в зависимости от

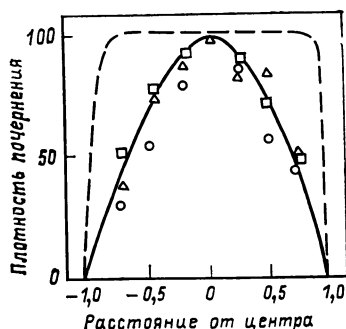


Рис. 2.12. Результаты поперечного фотометрирования следа шаровой молнии, заснятого В. М. Дерюгиным 9 июня 1958 г. на метеостанции Карабад

Таблица 2.5

Кратчайшее расстояние до шаровой молнии, м	0—1	1—2	2—5	>5
Число случаев с ощущением тепла	25	8	20	9
Общее число случаев наблюдения	294	131	379	676
Относительное число случаев с ощущением тепла, %	8,5	6	5,3	1,3

кратчайшего расстояния между наблюдателем и шаровой молнией.

В третьей строке таблицы приведено общее число наблюдений, когда кратчайшее расстояние укладывается в интервал, указанный в соответствующем столбце первой строки. Суммарное число случаев с ощущением тепла, записанное во второй строке, равно 62, а не 63, потому что в одной анкете с положительным ответом на вопрос об ощущении тепла не было указано кратчайшее расстояние до шаровой молнии. Как и следовало ожидать, число случаев с ощущением тепла быстро убывает с увеличением расстояния. Видно также, что наблюдатели склонны скорее преувеличивать, чем преуменьшать ощущение тепла. Действительно, почти наверняка можно сказать, что на расстоянии более 5 м ощущать тепловое воздействие шаровой молнии нельзя; сомнительно, чтобы оно могло ощущаться на расстоянии 2—5 м; между тем около 5 % наблюдателей ответили на вопрос положительно в последнем случае и даже для расстояния более 5 м это число еще отлично от нуля. Это не удивительно: очевидцы, введенные в заблуждение интенсивным свечением, склонны поверить в «раскаленный» шар, а отсюда и в ощущение тепла. Тем более интересно отметить, что даже при расстоянии до шаровой молнии менее 1 м только 8 % очевидцев сообщают о тепле, исходящем от нее. Можно добавить, что даже и эти наблюдатели обычно говорят в описаниях о слабом, иногда еле заметном тепле. Таким образом, не может быть и речи о температуре в тысячу или тем более несколько тысяч градусов для шаровой молнии.



В ряде случаев очевидцы сообщают о прямом контакте с шаровой молнией, не вызвавшем никаких ощущений тепла. Напомним в качестве примера случай, описанный В. В. Варсонофьевым (№ 6). Шаровая молния подкатилась под табурет, на котором сидел наблюдатель, так что его ноги на один момент оказались погруженными в нее. При этом тепла он не ощущал. Второе описание того же события, присланное им через несколько лет, было идентично первому. О непосредственном контакте с шаровой молнией сообщали также А. А. Баскаков, П. К. Медведь, З. Ф. Улитина и др. Некоторые из этих случаев будут описаны в § 2.6. З. Ф. Улитина, которая коснулась ладонью шаровой молнии, почувствовала слабое тепло. Остальные тепла не ощущали.

Часто шаровая молния проходит на расстоянии 10—20 см от не защищенных одеждой частей тела, например от лица, не производя не только ожогов, но и не вызывая простого ощущения тепла. В качестве одного из типичных примеров приведем случай, описанный В. Н. Архиповым из г. Бугульма Татарской АССР.

**№ 21.** Летом 1955 г. он во время грозы хотел укрыться вместе с двумя братьями под верандой дома. Нагнувшись, чтобы пролезть в лаз шириной 50 см, он оглянулся на крик младшего брата и увидел шаровую молнию около 10 см в диаметре, которая, испуская искры, приближалась к лазу. Хотя молния прошла менее чем в 0,5 м от автора письма и искры почти касались его лица, тепла он не ощутил. Пройдя расстояние 1,5 м от лаза до фундамента дома приблизительно за 2 с, молния ударилась в фундамент и взорвалась с сильным шумом, не причинив никакого вреда. Взрывной волны не было. Как выяснилось в дальнейшем, в доме расплавилась антенна.

Перейдем теперь от субъективных ощущений очевидцев к объективным данным. Тело, нагретое до высокой температуры и находящееся вблизи легко воспламеняющихся предметов, должно было бы поджигать их. Без прямого контакта шаровая молния обычно не в состоянии поджечь не только дерево, но даже и бумагу. Она может медленно скользить вдоль деревянных полок или мимо оклеенных обоями стен, не вызывая ни загорания, ни даже слабого обугливания. Особенно интересно то, что даже находясь недалеко от воды достаточно длительное время, молния не вызывает ее испарения.

Старший научный сотрудник из Новосибирска Н. Я. Наумов, ответивший на обе наши анкеты, прислал описание следующего случая.

№ 22. В начале августа 1955 г. он находился в г. Сковордино Амурской области. Была гроза и шел дождь. Из желоба двускатной железной крыши лилась вода, которую разбрызгивал ветер. Автор письма стоял приблизительно на расстоянии 1 м от желоба. Внезапно он услышал треск, и огненная полоска скользнула по струе воды вниз к луже на земле. В следующее мгновение из нее образовался огненный шар диаметром 10—15 см, который начал скользить по поверхности ручья, текущего вдоль пешеходной тропы. Шар был белого цвета с розоватым оттенком. Пройдя 30 м приблизительно за 30 с, шаровая молния спокойно исчезла.

О сходном случае написал нам также полковник милиции Е. С. Гасилин из Уфы.

№ 23. Находясь летом 1938 г. в г. Коломне Московской области, он видел, как во время грозы, сопровождавшейся сильным ливнем, шаровая молния диаметром 5—10 см выскочила из водосточной трубы, из которой лился поток воды. Двигаясь со скоростью около 0,5—1 м/с, она прошла вдоль ручья расстояние 30—40 м за 50—60 с и скрылась из виду за углом дома; при движении она все время держалась на расстоянии 30—40 см над поверхностью воды; в самой водосточной трубе это расстояние было, видимо, еще меньше.

В обоих случаях не было никаких признаков того, что вблизи воды, почти касаясь ее, находится нагретое до высокой температуры тело. Таким образом, требует доказательств не то, что шаровая молния не нагрета до высокой температуры, а то, что она вообще имеет температуру, отличную от окружающего воздуха. Итак, имеются ли факты, свидетельствующие о том, что шаровая молния нагрета?

№ 24. Была сильная гроза с очень сильным ливнем. В это время ученица седьмого класса Е. В. Приходько, находившаяся на проспекте Ленина в г. Иваново, увидела с расстояния 20—30 м шаровую молнию, которая, как ей показалось, вышла из окна второго этажа. Она была светло-желтого цвета, 30—50 см в диаметре. Сначала она двигалась вдоль стены на уровне второго этажа, а затем под углом около 30° к линии домов вышла на середину улицы. Видимо, капли дождя, падающие на молнию, испарялись, так как от нее поднимался пар. Слышалось шипение, напоминающее электросварку. Затем звук стал более высоким, молния взорвалась с сильным хлопком и исчезла. При этом она распалась на мелкие искры. На месте взрыва образовалось маленькое облачко пара, ко-

торое быстро растаяло. Все наблюдение длилось 50—70 с; молния прошла за это время 20—30 м. Это произошло в августе 1977 г. около 15 ч.

Поскольку пар был виден, капли дождя, видимо, испарялись около молнии, а не внутри нее, следовательно, около нее имелся нагретый слой воздуха. То, что большинство очевидцев, наблюдавших шаровую молнию во время дождя на улице, не сообщают ничего об испарении капель дождя, означает, что слой этот очень тонок. Тело, нагретое до температуры 1000 К или выше, было бы окутано густым облаком тумана. Мы уже знаем, что речь сейчас не идет о таких температурах. И все же из того, что испарение было видно, прямо следует, что вокруг шаровой молнии находился слой воздуха, нагретый до температуры выше 100 °С. Другое интересное наблюдение, содержащееся в этом сообщении, — образование облачка пара после взрыва. К нему мы еще вернемся в следующих параграфах, а пока обратимся к другим фактам.

№ 25. Наладчик аппаратуры В. М. Гиль возвращался домой в село Перевалочное Прилужского района Полтавской области перед начинающейся грозой. Проходя через мост, он увидел, что на середине реки в двух метрах над поверхностью воды движется огненный шар размером с футбольный мяч. Шар шипел от начинающегося дождя, и был виден исходящий от него пар. Поднявшись вверх, шар прошел над мостом в двух-трех шагах от очевидца, затем снова спустился к реке и, двигаясь дальше, скрылся за кустами.

№ 26. В августе 1937 г. через г. Куйбышев пронесся ураган. Много людей стало очевидцами следующего события. Двадцатидвухлетняя В. И. Логачева бежала по улице, спасаясь от дождя. С неба лились косые от сильного ветра струи воды. Неожиданно она увидела недалеко от себя небольшой (3—4 см в диаметре) светящийся матово-белый шарик, который падал вдоль водяных струй под углом к мостовой. В этот момент он был на расстоянии 1—2 м от нее и на высоте около 0,5 м над мостовой. В следующий момент шарик упал на мостовую, по которой рекой текла вода. Послышалось шипение, такое же, как при опускании в воду раскаленного металла. Нижняя половина шара разлетелась светлыми брызгами, которые гасли, пролетев 10—15 см. Верхняя еще секунду сохраняла цвет, форму и четкость очертаний, но в следующее мгновение она тоже распалась и погасла. Все это произошло уже на расстоянии меньше метра от девушки. Не удержав равновесия, она наступила на то место, где только что исчезла шаровая молния. Ничего не произошло.

Близкое соседство шаровой молнии со струями проливного дождя говорит о том, что ее температура не могла быть очень высокой, но шипение в момент, когда ее вещество смешалось с водой, текущей по мостовой, подтверждает, что температура была все же выше 100 °С. Все эти данные говорят о том, что 8 % очевидцев из числа тех, что наблюдали шаровую молнию с расстояния меньше метра, не зря сообщают об ощущении тепла; тепловой поток от нее все же имеется. Вот еще одно детальное описание встречи с шаровой молнией, подтверждающее это.

№ 27. В. И. Иванов из Калуги, провизор, в августе 1939 г., оставшись один на работе, увидел шаровую молнию, которая вылетела в виде светящейся «стрелы» длиной около 30 см из угла в том месте, где в комнату с улицы входили провода электрического освещения. Через мгновение из «стрелы» образовался тусклый светящийся шар диаметром около 20 см. Яркость света шара по оценке наблюдателя была сравнима с семилинейной керосиновой лампой. Шар был слегка вытянут сверху вниз. Шаровая молния начала медленно опускаться. Наблюдатель пригнулся и по мере ее приближения был вынужден лечь на пол. Шар повис над ним на высоте около полуметра. От него исходило очень слабое тепло. Провисев таким образом некоторое время, шаровая молния начала медленно подниматься, как бы движимая струей воздуха, к окну. Отойдя на 1—2 м от наблюдателя, она наткнулась на стойку с лекарствами на высоте 1,5 м от пола и взорвалась со звуком пистолетного выстрела. От сотрясения со стойки посыпалась стеклянная посуда; очевидца обдала струя горячего воздуха. На стойке, которая в нижней части была деревянной со стеклянным верхом, никаких повреждений не осталось. Погода была хорошей, грозы не было. Полную длительность наблюдения очевидец оценивает в 2—2,5 мин, хотя, судя по ситуации, эта оценка может быть завышена в 2—3 раза.

Таким образом, находясь в 50 см ниже шаровой молнии, очевидец чувствовал все же слабое тепло, которое передавалось, конечно, не конвективными потоками, а излучением. Шаровая молния может оставлять ожоги на легковоспламеняющихся предметах, особенно при непосредственном контакте с ними. Например, имеется сообщение о том, что шаровая молния, выходя из комнаты через форточку, прожгла отверстие диаметром 3—4 см в марлевой занавеске, которой была завешена форточка. Конечно, имея шаровая молния действительно высокую температуру, которую от нее ожидают авторы некоторых обзоров, она не задумываясь сожгла бы всю занавеску.

Существуют и другие подобные сообщения об ожогах от шаровой молнии. Например, в случае (№ 19), когда шаровую молнию вывели метлой из церкви, очевидец отмечает, что прутья метлы при прикосновении к шаровой молнии слегка дымились. Необходимо сказать еще несколько слов об оплавлении металлических предметов, о которых часто сообщают очевидцы. Эти оплавления имеют место только при прямом контакте с шаровой молнией и свидетельствуют лишь о том, что при таком контакте может выделиться значительная энергия, но отнюдь не о высокой температуре вещества молнии. В лучшем случае это говорит об энергии, накопленной в шаровой молнии, да и то, как будет видно из § 2.5, 2.6, вопрос остается еще спорным. Доказательством этому может служить то, что во многих случаях при значительном оплавлении металлических частей предмета неметаллические части его остаются нетронутыми. Может, например, оплавиться и сгореть обмотка катушек в репродукторе, но в то же время картонная мембрана репродуктора остается совершенно неповрежденной.

Следует заметить, что конвективная передача тепла от шаровой молнии в окружающий воздух, если бы таковая имела, должна была бы быть связана с размещением ее вещества и приводить к быстрому исчезанию молнии. Поскольку обычная молекулярная теплопроводность воздуха незначительна, нужно ожидать, что в стабильных условиях тепло передается через поверхность шаровой молнии только за счет теплового излучения. Мощность такого излучения для сферы диаметром около 20 см при температуре 1000 К составляет свыше 7 кВт. Сомнительно, чтобы такой источник тепла можно было не заметить, находясь от него на расстоянии меньше метра. Если температура шаровой молнии составляет 500—600 К, то мощность теплового излучения падает более чем на порядок — до 0,5 кВт, или около 40 Вт/м<sup>2</sup> на расстоянии метра. В таком случае уже неудивительно, что излучение замечают только 8 % наблюдателей, находящихся на этом или меньшем расстоянии. Итак, можно ожидать, что действительная температура шаровой молнии обычно не превышает 200—300 °С. По закону Вина максимум спектральной плотности при температуре 600 К приходится на длину волны 5 мкм и около 70 % излучаемой энергии заключено в интервале длин волн от 2 до 10 мкм. Мы предполагаем при этом, что в

инфракрасной области спектра имеет место тепловое равновесие с излучением, хотя в видимой области оно отсутствует, что в общем-то не вызывает особого удивления. Общая мощность излучения в видимой области, оцененная выше в несколько ватт, составляет ничтожную долю мощности теплового излучения, несущественную в энергетическом балансе шаровой молнии, но она на много порядков превосходит равновесное значение в рассматриваемой области температур.

Имеются также факты, указывающие на то, что шаровая молния является довольно интенсивным источником радиоизлучения.

№ 28. Вот, например, что пишет в журнале «Природа» М. Т. Дмитриев [17]. Это произошло 23 августа 1965 г. около 8 ч вечера на реке Онеге. Он находился в палатке на берегу реки. Раздался сильный треск в исправно работавшем до этого транзисторном приемнике и одновременно с ним близкий удар грома. Молния, как оказалось, ударила в берег реки в 70 м от палатки. Вот как описывает автор статьи дальнейшие события: «Несколько секунд было тихо, после чего из приемника послышался все более усиливающийся шорох, постепенно перешедший в гул. Приемник пришлось выключить, но шипение с резким потрескиванием теперь уже раздавалось со стороны реки». Выглянув из палатки, Дмитриев увидел над рекой шаровую молнию, которая медленно двигалась по направлению к палатке.

В [21] М. Т. Дмитриев, анализируя собранные им 45 случаев появления шаровой молнии, сообщает, что в шести случаях она оказывала влияние на радиосвязь. В нашем распоряжении также имеется несколько случаев, когда сообщается о радиопомехах, создаваемых шаровой молнией. В одном из них сообщается, что при исчезновении шаровой молнии затрещал репродуктор. В другом отмечается, что при взрыве шаровой молнии на расстоянии 40—50 м раздался оглушительный треск в телефонной трубке. Однако наиболее интересное сообщение было получено от В. И. Степанова из Ленинграда.

№ 29. В июле 1965 г. он работал в пос. Итат Кемеровской области Красноярского края. Надвигалась гроза; он забежал в контору, расположенную в вагончике, чтобы позвонить по телефону. Когда он стал набирать номер, в трубке появилось все усиливающееся потрескивание. Вслед за этим в открытую дверь конторы влетел огненный шар диаметром 8—10 см светло-желтого цвета. Он двигался горизонтально вдоль стен помещения на расстоянии 20—30 см от них, плавно огибая углы. В вагончике находился еще

один человек. Присланная автором схема с траекторией движения шаровой молнии изображена на рис. 2.13. Далее предоставим слово автору письма: «При входе шаровой молнии в комнату треск в телефонной трубке стал оглушительным и достиг своего апогея при минимальном расстоянии молнии до телефонного аппарата. Молния обошла весь вагончик по периметру на высоте 1 м от пола и вышла в ту же дверь, в которую вошла. При этом треск в телефонной трубке

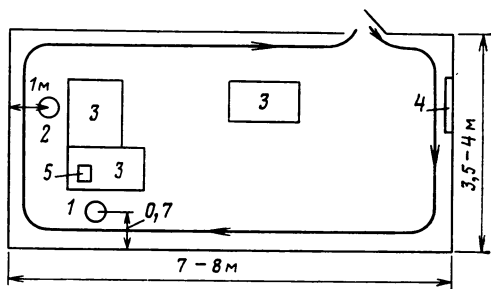


Рис. 2.13. Траектория шаровой молнии, вызвавшей треск в телефонном аппарате:

1 — местонахождение автора письма В. И. Степанова; 2 — местонахождение второго очевидца; 3 — столы; 4 — настенная вешалка; 5 — телефонный аппарат

ке продолжался еще несколько секунд и плавно затух. Восстановилась тишина».

Совершенно четкая корреляция уровня шумов с изменением расстояния до шаровой молнии, о которой сообщается в этом письме, убедительно доказывает, что источником радиопомех была именно шаровая молния. Радиоизлучение молнии, конечно, должно носить существенно неравновесный характер, поскольку интенсивность черного излучения в радиодиапазоне при  $T \approx 600$  К очень мала.

## 2.5. Оценки энергии

Хотя это и может показаться несколько странным, но, по-видимому, наиболее достоверную оценку энергии шаровой молнии можно получить из определения (не известного нам) потока тепла, который выходит из шаровой молнии за время ее жизни. Поскольку шаровая молния может нагреть прилегающие к ней слои воздуха до температуры выше  $100^\circ\text{C}$ , а в то же время ее темпе-

ратура в обычном состоянии едва ли превосходит 200—300 °С, определить поток равновесного теплового излучения из нее можно с точностью до множителя порядка нескольких единиц. Это — едва ли не самое лучшее, на что мы можем рассчитывать при оценке энергии. Мощность излучения шаровой молнии диаметром 20 см, определенная таким способом в § 2.4, составляет 0,5—1 кВт. Выше мы видели, что минимальное время жизни шаровой молнии равно в среднем 5—10 с, в то время как максимальное время — порядка минуты. Полагая, что для высвечивания энергии шаровой молнии и ее спокойного погасания требуется именно это максимальное время жизни, находим, что запас энергии, заключенной в шаровой молнии средних размеров, составляет, возможно, 20—50 кДж. Плотность энергии в таком случае равна 5—10 Дж/см<sup>3</sup>.

Другой способ оценки — исследование оплавлений, которые вызывает шаровая молния при прямом контакте с предметами. Обычно оплавляются либо стекло, либо металлы, причем по причинам, которые станут понятны ниже, для оценки энергии предпочтительнее выбрать случаи оплавления стекла. Известен ряд случаев проплавления оконного стекла шаровыми молниями, один из которых был недавно исследован [22].

№ 30. Летом 1977 г. в г. Фрязино Московской области преподаватель и группа школьников, находившихся в классе на втором этаже, увидели «мохнатый» светящийся шар приблизительно 5 см в диаметре, который приблизился к наружному оконному стеклу. В стекле образовалось небольшое круглое отверстие со светящимися краями красного цвета. Постепенно диаметр отверстия увеличился до 3—4 см. Вслед за этим шаровая молния ярко вспыхнула и исчезла с громким звуком. В этот момент преподаватель, державший в руках эпидиаскоп, включенный в цепь, почувствовал удар током. Второе (внутреннее) стекло оконной рамы не пострадало. Время, в течение которого молния проплавила наружное стекло, наблюдатели оценивают в 5 с.

Последующее обследование показало, что диаметр отверстия в стекле оказался 5 см при толщине стекла 2,5 мм, отверстие представляло собой правильный круг (в статье [22] приводится фотоснимок этого оконного стекла). Стенки отверстия конусообразные, так что его диаметр со стороны поверхности, обращенной к шаровой молнии, был на 1 мм больше. Это указывает на поверхностный характер нагрева: тепло притекало снаружи от



шаровой молнии, а не выделялось в объеме, например, вследствие испускаемого проникающего излучения. Некоторое недоумение вызывал тот факт, что края отверстия не были оплавлены и не имели трещин и признаков термонапряжений. Для выяснения механизма образования отверстия автор статьи [22] О. А. Колосовский произвел опыты с нагреванием аналогичного стекла лучом лазера с длиной волны 10,6 мкм (лазер на  $\text{CO}_2$  непрерывного действия, мощностью 500 Вт). Инфракрасное излучение лазера поглощалось в очень тонком слое стекла, так что поверхностный характер разогрева при этом моделировался и отверстия также получались конусообразными. При этом выяснилось несколько важных обстоятельств.

Во-первых, оказалось, что тепловой поток, идущий от шаровой молнии к стеклу, в месте контакта должен быть достаточно большим. При малой мощности нагрева стекло просто размягчалось и затем растрескивалось, образуя отверстия неправильной формы, но при достаточно большой мощности из стекла выпадал диск и образовывалось круглое отверстие с гладкими краями без трещин, аналогичное тому, которое образовалось от шаровой молнии. Во-вторых, выяснилось, что нагрев должен быть не только мощным и кратковременным, но также и локальным, так как замена лазера газовой горелкой достаточной мощности также приводила к образованию трещин и отверстий неправильной формы вместо правильного круга. Это было связано с растеканием по стеклу горячих газов, что приводило к нарушению локальности нагрева. Наконец, в-третьих, было установлено, что диаметр зоны нагрева меньше размеров образующегося отверстия. Оказалось, что между этими двумя диаметрами существует линейная зависимость, исходя из которой удалось установить, что диаметр нагретого шаровой молнией участка стекла составлял 3,5 см (при диаметре выпавшего из стекла диска 5 см). Если пренебречь потерями на теплопроводность, которые для таких коротких промежутков времени невелики, то для нагревания стеклянного диска диаметром 3,5 см при толщине 2—2,5 мм (масса стекла 8 г) до температуры 1000 °С, при которой стекло размягчается, требуется около 10 кДж. Такая же оценка (10—20 кДж) получилась (с учетом моделирования размеров) из опытов по проплавлению стекла лучом лазера. Итак, энергия, пере-

данная от шаровой молнии стеклу, составляет 10—20 кДж. Эта цифра согласуется с полученной выше для запаса энергии. Если время нагрева было 5 с, а диаметр области нагрева 3,5 см, то поток энергии из шаровой молнии в стекло был равен 4 кВт, а плотность потока энергии 400 Вт/см<sup>2</sup>. Заметим, что этот поток не имеет никакого отношения к потоку тепла из шаровой молнии в обычном состоянии, который, как мы видели выше, должен быть значительно меньше. Именно такой вывод вытекает и из рассматриваемого случая. В самом деле, отмеченная выше локальность нагрева означает, что столь большие значения теплового потока появились лишь в месте контакта шаровой молнии со стеклом. Если бы такой же тепловой поток излучался со всей поверхности шаровой молнии, то нагрев не был бы локальным и явление происходило бы так, как при нагревании стекла газовой горелкой, а не лучом лазера. О том, что за процессы привели к столь резкому возрастанию потока энергии в месте контакта, мы пока еще можем только гадать. Если предположить, что диаметр шаровой молнии действительно был 5—6 см, то плотность энергии, запасенной в ней, оказывается, по-видимому, слишком большой — около 100 Дж/см<sup>3</sup>, что на порядок превышает полученную выше цифру. Но вполне возможно, что в действительности ее диаметр был занижен. Очень вероятно, что диаметр отверстия в стекле (5 см) повлиял на последующие оценки диаметра шаровой молнии наблюдателями. Между тем многочисленные факты свидетельствуют о том, что, как правило, шаровая молния прodelывает на своем пути отверстия значительно меньше ее диаметра.

Эти результаты находятся в явном противоречии с оценкой Гудлета, которая повторяется почти во всех обзорах о шаровой молнии, вышедших за последние 40 лет (см., например, [3, 2], а также [23], где подробно описана история появления этой оценки). Последняя основана, как известно, на внешне довольно эффектном случае, когда по сообщению очевидца шаровая молния «размером с крупный апельсин» попала в бочонок, в котором находилось 18 л воды. При этом вода «бурлила» и часть ее — около 1 л — исчезла из бочонка. Предположив, что вода нагрелась до температуры кипения и 1 л ее испарился (скрытая теплота испарения воды при 100 °С равна 2260 Дж/г), найдем, что энергия, сообщенная ей, со-

ставляет около 8 МДж, т. е. приблизительно на два порядка больше полученных выше результатов. Если принять, что «большой апельсин» имеет диаметр 10 см, то плотность энергии шаровой молнии оказывается около 15 кДж/см<sup>3</sup>. Поскольку плотность вещества молнии такова же, как и воздуха, число молекул в 1 см<sup>3</sup> ее вещества должно быть порядка 10<sup>19</sup> и при плотности энергии 15 кДж/см<sup>3</sup> на каждую молекулу будет приходиться 10<sup>4</sup> эВ. Это на три порядка больше потенциала ионизации любого из известных атомов, который в свою очередь больше энергии связи химических соединений. Такая энергия вообще не может быть накоплена в электронной оболочке, так как она превосходит суммарную энергию связи всех электронов внешних оболочек атомов. (Возможность накопления энергии шаровой молнии в ядерной форме кажется маловероятной.)

Таким образом, если бы приведенная выше оценка Гудлета была верна, то это с неизбежностью означало бы, что шаровая молния получает энергию из внешнего источника. Но и при этом оставалось бы непонятным, почему поток энергии извне увеличился в данном случае на много порядков по сравнению с обычными наблюдениями. Если бы энергия таких масштабов передавалась при «разряде» шаровой молнии в металлический предмет, то это вызвало бы плавление более чем 6 кг железа или около 12 кг меди, что совершенно несравнимо по масштабам с реальными оплавлениями, вызываемыми шаровой молнией.

Точно так же и энергия, выделяемая при взрыве шаровой молнии, оказывается на много порядков меньше. Конечно, шаровая молния не имеет твердой оболочки и, по-видимому, представляет собой относительно слабосвязанное скопление вещества. Поэтому при взрыве в свободном пространстве ее вещество должно рассеиваться в атмосфере уже на самых ранних стадиях взрыва, не выделив содержащейся в нем внутренней энергии. Ситуация меняется при взрыве в тесном, замкнутом пространстве, например в печных трубах, или при прохождении через щели в стенах, древесных стволах и др. Как бы то ни было, выделение при взрыве даже 1 % энергии, полученной в оценке Гудлета, составляет около 100 эВ на частицу, что соответствует нагреванию вещества в объеме молнии до температуры около 1 млн. градусов. Такой взрыв должен сопровождаться световой вспыш-

кой, далеко превосходящей по яркости канал линейной молнии и сравнимой с яркостью ядерного взрыва. Другие последствия взрыва также были бы катастрофическими. Ничего подобного очевидцы не сообщают.

Взаимодействие шаровой молнии с водой также описано в большом числе писем, присланных очевидцами. Иногда ее исчезновение сопровождается появлением небольшого облачка пара, которое соответствует испарению в лучшем случае 1—2 г воды. Чаще всего и этого не происходит и об испарении можно судить лишь по легкому шипению, как от погруженного в воду горячего тела. Во многих случаях испарения воды вообще не заметно. Вот что пишет А. В. Матлов, инженер телецентра.

№ 31. В 1936 г. в г. Гатчина под Ленинградом около дома сидели четыре человека; в числе их был автор письма, которому тогда было 20 лет. Шел небольшой дождь. Вдруг они заметили шарик диаметром около 10 см, светившийся светло-оранжевым светом, приблизительно как лампа 10 Вт. Шарик спустился вниз, упал на землю в 3 м от людей и в 1 м от лужи воды. Затем он покатился к воде и взорвался в ней. Вода расплескалась и забрызгала сидевших людей. Капли были теплыми, но не горячими. От места падения шаровой молнии до лужи, по пути ее движения, земля высохла (что указывает на температуру выше 100 °С). В месте взрыва в земле образовалось углубление диаметром 0,5 см и глубиной несколько сантиметров.

В силу этих причин возникает подозрение, что оценка Гудлета ошибочна. В самом деле, не исключена возможность того, что «кипение» воды в бочонке было связано не с высокой температурой всей массы воды, а с образованием пузырей пара в местах локального разогрева (т. е. в тех местах, куда попало вещество молнии) при низкой средней температуре воды. Что же касается недостающего литра, то он мог не испариться, а просто вылиться на землю. Бочонок стоял на улице и пролившуюся воду можно было и не заметить, что едва ли можно сказать о 2 м<sup>3</sup> пара, которые должны были образоваться при испарении литра воды и о которых очевидец ничего не сообщает. Правда, очевидец говорил, что даже через несколько минут вода была горячей на ощупь. Но эти ощущения могли быть преувеличены, а действительная температура воды не была измерена. Отметим, что в одном из писем, полученных журналом «Наука и жизнь», сообщалось следующее.

**№ 32.** В июле 1962 г. в 11—12 ч в пос. Лозовск Молдавской ССР разразилась гроза. Во время грозы в открытую дверь с улицы влетела шаровая молния диаметром 5—8 см оранжевого цвета. Она летела наклонно вниз под углом  $45^\circ$  и, пролетев 3—4 м за 1—3 с, упала в ведро, более чем наполовину заполненное водой. От сильного всплеска часть воды вылилась через край ведра. Теплес, по утверждению очевидца, вода не стала.

Об этом случае сообщила нам В. А. Куприкова, которая наблюдала событие, находясь в той же комнате. Цвет и размер молнии приблизительно совпадают с гудлетовским случаем. Таким образом, имеются очень серьезные основания сомневаться в правильности широко распространенной оценки, согласно которой шаровая молния может передать окружающим ее телам энергию  $10^4$  кДж.

Имеются и другие, менее известные «мегаджоульные» оценки энергии шаровой молнии. Согласно одной из них, основанной на сообщении о том, что взрывом шаровой молнии был разрушен глинобитный дом, находившийся в 50 м от места взрыва, энергия шаровой молнии должна была превосходить 2300 мДж. Более тщательное исследование, однако, показало [23], что в действительности шаровая молния дома не разрушала и оценка основана на неправильной информации. В итоге можно согласиться с мнением Дж. Барри, который пишет в своей монографии [2]: «Одобрение неточных и неразумно больших значений плотности энергии было, конечно, популярно, так как это давало возможность для некоторых усложненных и может быть даже таинственных механизмов для объяснения большого энергосодержания».

Обратимся к реальным оплавлениям металлических предметов, которые производила шаровая молния. Интересный случай описан В. В. Липовецкой.

**№ 33.** В июле—августе 1938 г. после дождя с грозой шаровая молния белого цвета диаметром 20—30 см прошла сверху вниз расстояние 30—50 м. Затем она взорвалась около водопроводного крана. Этот кран представлял собой трубу диаметром 5—6 и высотой 70—80 см. После взрыва труба оказалась закрученной в петлю, была покрыта окалиной и имела вид обгорелого железа, хотя и не накалялась докрасна. Все это наблюдалось с расстояния 5 м. Во второй анкете был прислан рисунок поврежденного крана.

Для того чтобы согнуть в петлю железную трубу, нужно было разогреть участок, в который попала молния, до достаточно высокой температуры — предположи-

тельно до  $700^{\circ}\text{C}$  (нужно учесть, что свечения не было). Принимая, что длина нагретого участка была порядка диаметра (5 см), а толщина стенок трубы 4—5 мм, и учитывая плотность ( $7,8 \text{ г/см}^3$ ) и теплоемкость  $0,71 \text{ Дж/(г}\cdot^{\circ}\text{C)}$  железа, находим, что энергосодержание молнии составляло 80—100 кДж. При диаметре 25 см это дает плотность энергии 10—12 Дж/см<sup>3</sup>.

№ 34. Студент С. А. Кузнецов сообщил о случае, свидетелем которого он оказался в детстве, когда шаровая молния диаметром около 20 см прожгла дыру диаметром около 7 см в металлической заводской трубе.

Если толщина стенок трубы составляла 0,4—0,5 см, то для того чтобы расплавить соответствующий объем железа, энергия молнии должна быть около 150—200 кДж.

В большинстве случаев шаровая молния оплавляет или испаряет несколько граммов или даже доли грамма металла. Рассмотрим случай, описанный Я. В. Березовским (см. № 4, гл. 1), когда шаровая молния диаметром 10—20 см испарила металл на шомполе ружья. Автор письма подробно описал размеры лунки и специально отметил, что наплывов металла не было: металл испарился. Образовавшаяся лунка имела диаметр 5 и глубину 3 мм. Предполагая, что углубление было в виде параболоида вращения, находим, что испарилось около 0,22 г металла. Теплоемкость железа равна  $0,71 \text{ Дж/(г}\cdot\text{K)}$  в твердом и  $0,84 \text{ Дж/(г}\cdot\text{K)}$  в жидком состоянии. Точки плавления и кипения равны  $1500$  и  $2900^{\circ}\text{C}$ , а теплота плавления и парообразования — соответственно 269 и 6270 Дж/г. В результате оказывается, что для испарения 0,22 г железа требуется не менее 2 кДж тепла. Это число не соответствовало всей энергии молнии, так как после взрыва она продолжала существовать.

Ниже на рис. 2.15 приведена фотография конца садового водопроводного крана, оплавленного шаровой молнией. При этом исчезла нижняя половина конца крана длиной 2,5 см и диаметром 2 см; толщина железа была около 1 мм. Количество расплавленного железа составило 7 г, а сообщенная ему энергия — около 5300 Дж.

№ 35. Летчик Р. Е. Кузнецов встретился с шаровой молнией осенью 1967 г. в самолете на высоте 7000 м.

Облачность была 5—6 баллов. Молния размером с теннисный мяч ярко-белого цвета с небольшим ореолом прошла за 20—30 с от ввода радиоантенны до спинки сидения летчика приблизительно

1,5—2 м. Хотя она некоторое время находилась на расстоянии меньше 1 м до автора письма, тепла он не ощущал. Вслед за тем она взорвалась, выжгла часть металла (около 3 см<sup>3</sup>). Взрыв оглушил и ослепил всех присутствующих на 1—2 мин. Защитные цепи радиостанций самолета после «взрыва» вышли из строя. После посадки выяснилось, что почти на всех выступающих антеннах были выжжены черные полосы. Присутствие грозовых разрядов не обнаруживалось ни визуально, ни локаторами.

Таким образом, в результате взрыва шаровой молнии исчезло 24 г железа, на что должно было затратиться 18,4 кДж в случае плавления и почти 121 кДж при испарении. Диаметр шаровой молнии был около 8 см и соответственно, если считать, что вся выделившаяся энергия была запасена в шаровой молнии, получаем плотность энергии 8,6 Дж/см<sup>3</sup> в первом случае и 56 Дж/см<sup>3</sup> во втором.

№ 36. Врач Н. В. Соловьева из Адлера сообщила, что первая из двух ее встреч с шаровой молнией произошла на левом берегу Волги около Волгограда, где она отдыхала с родителями. Ранним утром после грозы они заметили медленно движущийся над травой слегка удлинненный шар диаметром около 10—12 см, светившийся оранжево-желтым светом, примерно как лампочка 50 Вт. Двигался он неравномерно, отклоняясь вверх — вниз и вправо — влево, огибая высокую траву. Вдруг шар резко притянулся к дубу, стоявшему в нескольких метрах от наблюдателей, к которому был прислонен металлический багор, укрепленный на высокой деревянной ручке. Поднявшись вверх, шар ударил в багор. Возникла ослепительная вспышка, и между багром и землей образовалось что-то похожее на канал обычной молнии. В стороны полетел веер искр и шар исчез. Все наблюдение длилось 54 с (по часам).

В письме приводятся подробный чертеж багра и описание повреждений, которые он получил при разряде. Не приводя всех имеющихся деталей, скажем, что багор сильно оплавился, на нем появились подтеки свежерасплавленного металла, острие расплавилось и превратилось в бесформенную шишку. Ручка багра загорелась. Общее количество расплавленного металла, по-видимому, составило около 6 г, и энергия, потраченная на плавление, — приблизительно 4 кДж. Плотность этой энергии на единицу объема шаровой молнии 4,2 Дж/см<sup>3</sup>.

Выше уже был описан случай № 6, сообщенный В. В. Варсонофьевым, когда шаровая молния диаметром 30—40 см «разрядилась» в батарею водяного отопления. Автор письма отмечает, что на батарее появилась лунка

диаметром 4—5 мм и глубиной около 0,5 мм, из которой исчез металл (приблизительно 0,08 г железа). Для испарения такого количества требуется энергия около 700 Дж.

Приведем вкратце еще несколько сообщений, в которых хотя и содержатся сведения об оплавлениях, но не приводится необходимой информации для оценки выделившейся энергии.

№ 37. Молния диаметром 30—50 см вращалась вокруг столба с проводами электрического освещения. При взрыве провода расплавились. Молния диаметром 10—15 см зацепила телеграфный провод и расплавила его. Молния диаметром 5—10 см расплавила антенну около изолятора. Молния диаметром 25 см прошла вдоль борта самолета ИЛ-14 и прожгла несколько отверстий в фюзеляже диаметром около 1—2 см (размером с наперсток). Молния диаметром 35—45 см взорвалась около выхлопного сопла ИЛ-18. Около места взрыва — следы оплавления. Молния диаметром около 20 см появилась из радиорозетки после удара линейной молнии. Коснувшись приоткрытой дверцы печки, она исчезла. Края заслонки и розетки оплавилась, часть металла испарилась.

Как сообщила Е. И. Близнюк, в августе 1913 г. шаровая молния ярко-белого цвета диаметром около 20 см взорвалась в машинном отделении котельной грязелечебницы в г. Анапе. Вслед за этим взорвался также большой котел с морской водой для грязевых ванн. Можно предположить, что взрыв котла был следствием его проплавления от взрыва шаровой молнии.

В очень многих случаях взрыв или бесшумное исчезновение шаровой молнии после соприкосновения с металлическими предметами не приводит к оплавлению последних или эти оплавления столь незначительны, что очевидцы не упоминают о них.

Так, молния диаметром 10—15 см «ушла» в спинку железной кровати, не повредив ее. Молния диаметром 5—10 см «ушла» в розетку, не нанеся никаких повреждений. Имеется несколько сообщений о том, что небольшие молнии диаметром около 5 см взрывались или «разряжались» около патронов электрических лампочек.

№ 38. И. И. Богданов, механик, в июле 1953 г. служил в армии в танковом батальоне. Начинаясь гроза, и он зашел в казарму. Послышался сильный раскат грома. Как оказалось, в этот момент линейная молния ударила в кирпичную трубу казармы, развалив ее. Секундой позже в слегка приоткрытую дверцу печки протиснулась шаровая молния. При прохождении через щель она имела форму «блина» и уже потом в помещении приняла форму шара.



Шар диаметром около 20 см оранжевого цвета поплыл над рядом коек на высоте 25—30 см от них. Автор письма шел за ним на расстоянии около 2 м. Поверхность шаровой молнии была как бы «прыщеватая», мелкобугорчатая, и из бугорков с треском выскакивали искры. По временам казалось, что поверхность как бы затягивается туманной пленкой и световой поток, приблизительно как от лампы в 20 Вт, становился меньше. Пройдя один ряд коек вдоль всей комнаты, шар повернул назад и начал двигаться над другим рядом. Здесь характер его движения изменился: шар начал прыгать, падая на спинки коек и отскакивая затем вверх. При этом он заметно уменьшался в размерах, так что к концу движения его диаметр был не больше, чем у большого яблока. В месте касания со спинкой коек сошел густой слой масляной краски. Затем шаровая молния вышла в соседнюю комнату и там взорвалась в печи, выбив несколько кирпичей.

В этом интересном и подробном описании, к которому мы еще будем возвращаться в дальнейшем, сейчас отметим только одно: несмотря на то, что шаровая молния убывала в размерах и, по-видимому, тратила свое вещество и энергию, в местах касания никаких признаков оплавления не было. Во всех перечисленных случаях энергия, сообщенная металлу, была, видимо, заметно меньше 1 кДж. Таким образом, разброс значений энергии, выделяющейся в месте контакта шаровой молнии с металлом, очень велик: от небольших долей килоджоуля до значений порядка 100 кДж. Случайно ли это?

Рассмотрим последствия взрыва шаровой молнии. Из описания 335 случаев взрыва, полученных в 1976 г., большая часть которых произошла внутри помещений, заметные последствия (не считая оплавлений, не всегда связанных со взрывом) зарегистрированы лишь в 34 событиях. Чаще всего это — расщепление деревьев или деревянных столбов (19 случаев).

Имеется одно сообщение о том, что при взрыве шаровой молнии разрушен легкий дачный домик, в другом случае — трансформаторная будка. Еще в одном случае молния диаметром 10—20 см, взорвавшись у поверхности земли, вырвала асфальт в круге диаметром около 2 м. Доктор технических наук С. В. Земблинов сообщил, что молния диаметром 10—15 см, светившаяся как лампа 100 Вт, при взрыве разбросала кучу камней. Имеется три сообщения о том, что шаровая молния пробивала легкие стенки и перегородки. В остальных сообщениях говорится о более легких повреждениях.

Например, при взрыве шаровой молнии диаметром около 50 см вблизи гирлянды изоляторов на столбе линии электропередачи от нее были отбиты куски фарфора. В другом случае при взрыве в помещении была разбита подставка для телевизионной антенны.

№ 39. Офицер запаса П. В. Шильников сообщил, что при взрыве шаровой молнии около стены шлакоблочного дома на ее поверхности появилось много раковин диаметром от 5 до 20 мм и глубиной 3—10 мм, над стеной была расщеплена березовая доска. Углубления в стене появились, видимо, в результате оплавления в тех местах, куда попало вещество молнии.

№ 40. По сообщению автора того же письма 14 июля 1974 г. линейная молния попала в дачный дом, стоявший на садовом участке, и разбила металлическую печку, находящуюся в нем. При этом образовалась небольшая шаровая молния 5—10 см диаметром, которая вылетела на веранду (это видел хозяин дома Н. М. Гаврилов, находившийся там). Обойдя человека, шаровая молния выкатилась через порог по ступенькам на улицу и там взорвалась. Автор письма находился недалеко и вскоре оказался на месте происшествия. Вместе с хозяином дома они установили следующее: 1) пачка стекол, стоявшая около дома, возле стенки у лестницы, была разбита вдребезги; 2) на дне железного бака для воды, установленного в двух метрах от дома на высоте 2 м от земли, — следы оплавления, похожие на след от электросварки; 3) в стене дома, обитого мягким картоном, образовались две дыры около 6 см диаметром и 2 см глубиной. На повреждениях внутри дома, связанных, видимо, с ударом линейной молнии, мы останавливаться не будем. Любопытно отметить одну деталь, сообщенную хозяином дома. Шаровая молния сначала ударила в пачку стекол, причем раздался сильный треск, после этого она отлетела и взорвалась снова.

Таким образом, взрыв (на это указывают очевидцы неоднократно) не всегда приводит к уничтожению шаровой молнии. Видимо, взрывная волна может отбросить шаровую молнию в сторону, после чего она еще остается цела. Приведем еще один пример такого события, интересный также и тем, что в нем описывается случай, когда шаровая молния пробила стену дома.

№ 41. Как рассказывает агроном А. С. Голоперов, в июле 1936 г. работавшие на огороде совхоза рабочие укрылись во время дождя с грозой в старом саманном (т. е. построенном из глиняных блоков) доме, в котором размещалась контора. В этом же доме находился и автор письма. Около 25—30 человек сидели в единственной комнате этого дома на скамьях вдоль стен; двери в сени и из них на улицу были открыты. Вдруг раздался громкий треск и все

присутствующие увидели, как от стены по прямой к находящейся напротив печке пролетел ярко-оранжевый шар диаметром около 10 см. В том месте, откуда вылетел шар, в глиняной стене было пробито отверстие примерно такого же диаметра. Молния пролетела по прямой расстояние 3—3,5 м за 1—1,5 с и скрылась в печке. Вслед за этим на чердаке дома послышался громкий удар. Печь осталась цела, хотя в ней и появилась трещина, но печная труба на чердаке была разрушена вместе с 2—2,5 м<sup>2</sup> черепичной крыши. Человек, который сидел непосредственно около того места стены, откуда вылетела молния, лежал без сознания 20—30 мин. Он был отправлен в больницу и выписался только через 3 дня. Его соседи справа и слева не пострадали.

В другом письме сообщается, что шаровая молния, вылетевшая из телефонного аппарата, пробила дыру диаметром 20 см в легкой фанерной перегородке, вышла в соседнюю комнату, а затем, пробив дыры в двух фанерных дверях, вышла на улицу.

Однако в подавляющем большинстве случаев последствия взрыва шаровой молнии незначительны: разбитое стекло при взрыве около окна, закопченная стена, обожженный пол. Чаще всего о последствиях ничего не сообщают.

№ 42. В качестве примера можно привести случай, когда шаровая молния диаметром 20—30 см взорвалась на расстоянии менее 5 м от человека. При взрыве его обдало легкой волной воздуха. В другом случае, о котором сообщил И. И. Царев, молния диаметром 15—20 см взорвалась над столом, зацепившись за металлическую подвеску для керосиновой лампы. За столом сидело четыре человека, и молния была на расстоянии около 0,5 м от них. О пострадавших ничего не сообщается.

№ 43. Экономист В. Н. Аносов пишет, что в июле 1952 г. во время сильного дождя с грозой он, войдя в комнату, почувствовал сильный удар по голове и потерял сознание. Сидевшие в комнате впоследствии рассказали ему, что одновременно с сильным ударом грома из патрона лампочки выскочил шарик диаметром 5—6 см, упал ему на голову и взорвался в волосах. Как оказалось, в этот момент линейная молния ударила в провода снаружи. После контузии боль в голове ощущалась в течение двух недель. Случай, как видно, очень сходный с рихмановским, но с благополучным концом.

Учитывая, что взрыв произошел рядом с пострадавшим, можно определенно сказать, что сила взрыва была невелика. Не имея ясных представлений о механизме взрыва, очень трудно оценить его энергию. Приведем интересное и очень живо описанное наблюдение шаровой

молнии, которое было получено от инженера-механика Г. М. Новородского 1905 г. рождения. Шаровую молнию он видел 15 августа 1923 г. в г. Артемовске.

№ 44. Она влетела в открытую порывом ветра форточку после сильного удара грома. Это был шар ярко-желтого цвета с голубовато-фиолетовым оттенком диаметром 15—16 см. Кроме автора письма молнию видели его отец и младший брат, причем последнему показалось, что диаметр молнии больше — около 30 см. На поверхности шара вспыхивали яркие белые искры в форме иголок, и слышалось легкое потрескивание или шуршание. Молния двигалась плавно, горизонтально, на высоте около 1,5 м от пола. Она сделала полукруг вокруг стола, у которого сидели люди. Около каминна она опустилась вниз и, вдвое ускорив движение, влетела в полуоткрытую дверцу топки. При этом она вытянулась и сжалась в поперечнике, пройдя через щель шириной не более 5 см. На дверце не осталось никаких следов. Через 2—3 с раздался грохот взрыва на крыше. Все это заняло приблизительно одну минуту. Оказалось, что на крыше кирпичная труба была разрушена до основания. Часть кирпичей нашли в 30—40 м от дома.

Полагая, что труба находилась на высоте 6 м, легко найти, что для того чтобы кирпич, летящий в начальный момент горизонтально, отлетел на расстояние 30—40 м, требуется начальная скорость 30—40 м/с, т. е. энергия 900—1600 Дж при массе кирпича 2 кг. В действительности максимальная дальность разлета получается у кирпичей, летящих под некоторым углом к горизонту, который зависит от высоты начальной точки. Учет этого обстоятельства после несложных выкладок приводит к тому, что для разлета на расстояние 40 м с высоты 6 м требуется (без учета сопротивления воздуха) скорость около 18,4 м/с и энергия при массе 2 кг будет равна 340 Дж. Таким образом, энергия взрыва едва ли превышала 10—20 кДж, а плотность энергии (при диаметре 15—16 см) 5—10 Дж/см<sup>3</sup>.

Как уже отмечалось, вещество шаровой молнии легко всасывается в щели или в поры, по-видимому, под действием электрических полей. В связи с этим можно предположить следующий механизм раскалывания столбов и деревьев, а также пробивания отверстий в стенах и перегородках при взрыве шаровой молнии. По-видимому, часть ее вещества перед этим быстро всасывается в поры или щели, имеющиеся в этих предметах. Быстрое выделение значительной энергии при затрудненном теплоотводе приводит к повышению температуры и взрыву. Раскалы-

вание столбов и деревьев связано, вероятно, с быстрым расширением нагреваемой или испаряемой воды. Впрочем, возможен и альтернативный механизм, который будет обсуждаться в § 2.6. Оценки энергии, которая должна выделиться при взрыве для нагревания необходимого количества воды, страдают неточностью главным образом из-за неопределенности предела прочности дерева на разрыв. Эта прочность, во-первых, резко различается для разрыва поперек волокон и вдоль волокон (при взрыве дерево, конечно, обычно расщепляется вдоль волокон). Во-вторых, прочность дерева при разрыве вдоль волокон, которая в среднем более чем на порядок меньше прочности поперек волокон, сильно зависит от состояния древесины, от наличия в ней трещин и т. д. Оценки, которым, впрочем, нет оснований особенно доверять, дают цифры от нескольких десятков до ста килоджоулей [2, 24]. В то же время взрыв шаровой молнии на открытом воздухе, как правило, не наносит ущерба и не влечет за собой ни появления сильной ударной волны, ни значительного нагревания воздуха. Подавляющее большинство взрывов относится именно к этому типу. По существу, это просто хлопок, который не сопровождается взрывной волной и не причиняет никакого вреда, даже когда он происходит на расстоянии 1—2 м от наблюдателя. Впрочем, выделение звуковой энергии может быть довольно значительным, однако в абсолютных единицах она дает, конечно, ничтожно малый вклад. Убедительным подтверждением слабости этих взрывов служит появление облачка пара или газа на месте взорвавшейся шаровой молнии, о котором иногда сообщают наблюдатели и которое может возникнуть лишь в спокойной атмосфере. В качестве одного из таких примеров можно сослаться на облачко пара, замеченное Е. В. Приходько (см. № 24). Имеются и другие примеры, один из которых будет описан ниже. Если бы при взрыве выделялась сколько-нибудь значительная энергия, приводящая к нагреванию продуктов взрыва и окружающего воздуха, это облачко было бы мгновенно разрушено взрывной волной. Энергия таких взрывов должна быть значительно меньше 1 кДж.

Итак, оценки энергии, выделяющейся при взрывах, также различаются не менее чем на 2—3 порядка. Конечно, запас энергии, накопленной в веществе шаровой молнии, может быть существенно разным из-за различия объемов. Изменение радиуса в два раза может при-

вести к восьмикратному изменению запаса энергии. Но и плотность энергии, если оценивать ее по энергии, выделяемой при взрывах и оплавлениях металлов, может различаться на несколько порядков. Вероятно, эти разногласия не случайны. Этой проблемой мы займемся в следующем параграфе, а пока еще раз обратим внимание на одну странную особенность. Из ряда наблюдений следует, что тепло взрыва шаровой молнии выделяется главным образом в проводниках, минуя расположенные рядом непроводящие тела.

№ 45. Инженер-металлург Г. И. Лесняков из Днепропетровска служил в 1943 г. в армии. В августе он находился в городе Выкса Горьковской области, где проводил занятия в военкомате. К вечеру началась сильная гроза, которую он наблюдал, лежа на кровати в своей комнате. Было около 18 ч, когда в комнату через закрытую форточку проникла шаровая молния. Щель между форточкой и рамой была не более 0,2—0,3 мм. Молния представляла собой правильный шар около 15—20 см в диаметре золотисто-оранжевого цвета, светившийся сильнее, чем лампа 100 Вт. Приблизительно за 30—40 с (в первой анкете было указано 50—70 с) шаровая молния обошла комнату по периметру, сделав почти два полных оборота и пройдя более 20 м (двигалась вдоль верхней части стены на одной и той же высоте). Наконец, она взорвалась примерно в 1,5 м от наблюдателя около висевшего на стене над кроватью репродуктора, включенного в сеть. Образовалось облачко дыма. Корпус репродуктора остался цел и невредим. Однако в мастерской сказали, что сгорела обмотка трансформатора; другие металлические части не пострадали, но были покрыты копотью.

№ 46. Л. А. Хромова, преподаватель, находилась в апреле 1948 г. в г. Кировске Киргизской ССР. В тот день, когда она видела шаровую молнию, небо было покрыто тучами. В комнате были открыты форточка и дверь. После сильного удара грома она увидела, как по комнате от двери плывет шар темно-фиолетового цвета размером с футбольный мяч. Было впечатление, что он прозрачный. Двигаясь по направлению к форточке, шар подлетел к репродуктору и, «выгнувшись, лизнул его». Раздался треск, и металлические части репродуктора стали светиться как раскаленное железо. Шаровая молния не спеша продолжала свой путь к форточке и, слегка сплюснувшись, прошла через нее. В 10—20 м от окна она медленно, «как молния не спеша продолжила свой путь к форточке и, слегка сплюснутых частях репродуктора была окалина. Мембрана не пострадала.

## 2.6. Электрические явления, связанные с шаровой молнией

Прежде всего отметим, что по многочисленным свидетельствам шаровая молния часто исчезает около металлических предметов, иногда оставляя на них заметные следы оплавления, а иногда без всяких последствий. Число этих свидетельств так велико, что нет необходимости подкреплять их конкретными описаниями. Однако в ряде случаев контакт проводника с шаровой молнией не приводит к каким-либо последствиям и для шаровой молнии. Возникает естественный вопрос, почему это происходит? И почему в одних случаях шаровая молния оплавляет проводники, в других же, на первый взгляд совершенно идентичных случаях, она не оставляет на них никакого следа? Для того чтобы ответить на эти вопросы, обратим внимание на то обстоятельство, что контакт шаровой молнии с проводником может сопровождаться возникновением в нем токов.

№ 47. Это произошло около деревни Черданцево в Свердловской области в июле 1956 г. Ю. П. Беленец, заведующий группой ВНИИ электросварочного оборудования, работал тогда механиком в геофизической экспедиции. Около 15 ч собралась гроза и начался небольшой дождь. Автор письма с несколькими товарищами по экспедиции укрылись под сосной на опушке леса. Вдруг они увидели, как на одной из клемм аккумуляторной батареи, находившейся в 50—80 м от них за низиной, появился светящийся бело-голубой шар, по цвету похожий на пламя газовой горелки. Диаметр его был несколько больше, чем у теннисного мяча (т. е. около 10 см), и светился он, по оценке наблюдателей, как лампа 150—200 Вт. Шаровая молния медленно (в течение примерно 10 с) поднялась в воздух на высоту около 1,5 м. В это время топограф экспедиции Зоя Богачева шла по поляне мимо батареи к тому месту, где собрались остальные члены экспедиции, таща за собой металлическую топографическую ленту длиной 20 м. Из-за разделявшей их низины ей пришлось идти более длинным окольным путем. Увидев шаровую молнию, она побежала, не выпуская из рук металлической ленты. Молния погналась за ней, постепенно нагоняя и спускаясь к ленте. Она пробежала около 40 м, когда молния опустилась на ленту. Раздался слабый треск и вылетела искра. Девушка вскрикнула, но не обернулась и продолжала бежать, не выпуская ленты. Молния поднялась вверх приблизительно на 0,5 м над лентой. Ее диаметр уменьшился примерно вдвое, но она по-прежнему летела вслед за лентой. Через 5—6 с шаровая молния снова спустилась на конец ленты и снова

подскочила вверх на 25—30 см, уменьшившись в диаметре до 2—3 см. Девушка снова вскрикнула, но продолжала бежать, не выпуская из рук ленты. Видеть, где находится шаровая молния, она не могла, потому что бежала, не оборачиваясь. Через секунду молния в последний раз опустилась на ленту и исчезла. Девушка опять вскрикнула, наконец, догадавшись бросить ленту. Через 5—6 с она присоединилась к товарищам и на вопрос, почему она вскрикивала, ответила, что ее в эти моменты било током.

В данном случае можно довольно точно оценить пройденное шаровой молнией расстояние и время ее жизни. Полагая, что девушка бежала со скоростью 10—12 км/ч, т. е. около 3 м/с, находим, что молния, пройдя от аккумуляторной батареи до места, где она исчезла, около 60 м, должна была затратить на это около 20—25 с. Вместе со временем, за которое она медленно поднималась вверх, это составляет не менее полминуты. Из этого описания, как и из многих других, видно, что время жизни шаровой молнии не всегда составляет 1—2 с. Однако главное не в этом. Это письмо заставляет задуматься над электрическими явлениями, которые сопровождаются гибелью шаровой молнии. Приведем еще несколько описаний.

№ 48. Самолет ИЛ-12, следовавший в июле 1957 г. по курсу Белая Церковь—Одесса, на высоте 1600 м столкнулся с шаровой молнией. Это произошло в густой облачности без признаков грозы. Как сообщает инженер А. В. Щербаков, неожиданно впереди по курсу перед самолетом появился светящийся шар диаметром 10—15 см. Он ударил в носовую часть самолета, в результате чего внутри самолета между обшивкой и антенной проскочила искра и перегорел радиопередатчик. Повреждений на обшивке обнаружено не было. Шаровую молнию кроме автора письма видели еще два пилота. Пробой внутри самолета видел штурман, а о порче передатчика сообщил радист.

№ 49. Машинист башенного крана А. Н. Хроменкова работала на стройплощадке г. Дмитрова. Во время грозы, после сильного разряда она, сидя в кабине крана, увидела, что прямо к окну кабины летит шар, светящийся, как лампа 150 Вт, около полуметра диаметром. Он летел на высоте 8 м от земли горизонтально с постоянной скоростью. Шар все время пульсировал, и сила света его периодически менялась. Влетев в кабину и пройдя в полуметре от машиниста, причем тепла она не ощущала, шар подлетел к защитной панели, которая закрывала щит электрооборудования. Щит находился в ящике размером 180×60×50 см<sup>3</sup>, причем панель плохо прикрывала его, так что оставалась щель шириной около 2 см. Ша-



ровая молния прошла через эту щель. Вслед за этим раздался громкий взрыв и появилась вспышка, как при коротком замыкании. Кран отключился. Увидев молнию, А. Н. Хроменкова от неожиданности бросила ручку управления крана, и он двигался, никем не управляемый, но после взрыва кран остановился вследствие отключения электроприборов. Взрыв оглушил и ослепил свидетельницу. Придя в себя, она выяснила, что молния притянулась к рубильнику, который был под напряжением 380 В. Угол железной панели оплавился и закоптился.

**№ 50.** Техник-электрик С. П. Галич наблюдал шаровую молнию в г. Дархан (Монгольская Народная Республика) в возрасте 14 лет в июне 1967 г. Около 14 ч из-за сопок показалась грозовая туча. Поднялся ветер. Стоя у окна, автор письма увидел под крышей четырехэтажной школы, расположенной напротив, шар 30—40 см диаметром, светившийся белым светом, как лампа 30—50 Вт (ему показалось, что шар вышел из-под крыши). Шар начал двигаться к дому, где находился наблюдатель (по ветру), со скоростью 1—1,5 м/с, постепенно снижаясь. Около дома он взорвался с сильным грохотом под крышей второго этажа. После взрыва сразу же отключился приемник. Через несколько секунд началась гроза. Последствия взрыва были следующие: 1) покорежен и оплавлен участок стального провода длиной 80—100 см диаметром 8 мм, который тянулся вдоль внешней стороны стены второго этажа; 2) оплавлен конец медной антенны радиоприемника, выведенной из окна первого этажа на уровень второго этажа; 3) сгорели предохранители в приемнике; 4) повреждена и оплавлена розетка питания, в которую был включен приемник.

Эти факты убедительно показывают, что шаровая молния может вызвать электрические токи. Если в последнем наблюдении плавление провода и оплавление вывода антенны могли еще произойти от тепла, непосредственно полученного от шаровой молнии, то перегорание предохранителей в приемнике и оплавление розетки могли быть вызваны только импульсом тока, возникшим в момент взрыва шаровой молнии.

Во время грозы на отдельных участках поверхности земли и находящихся на ней предметах могут наводиться значительные заряды. Часть этих зарядов нейтрализуется при разрядах молнии (каждый разряд переносит в среднем около 25 К), другая часть разряжается путем коронирования. По-видимому, шаровая молния обладает свойством снимать заряды с проводников. Для этого она, конечно, сама должна быть проводником, причем проводником с невысокой работой выхода зарядов. При кон-

такте шаровой молнии с заряженным проводником в последнем возникает ток, точнее, кратковременный импульс тока, при котором заряды, проходя через шаровую молнию, рассеиваются в воздухе. При этом сама шаровая молния распадается, что и воспринимается наблюдателями как взрыв. С этой точки зрения становится понятным, почему контакт шаровой молнии с предметами иногда кончается «безрезультатно». Это просто означает, что проводник не заряжен или не несет значительного заряда. А так как мы не воспринимаем непосредственно электрические поля нашими органами чувств, то мы ничего и не знаем о плотности зарядов на окружающих нас телах. Поэтому столь немотивированным кажется нам различное поведение шаровой молнии при контакте с ними.

Выше мы видели, что взрыв шаровой молнии на многих, особенно на высококвалифицированных наблюдателей производит впечатление электрического разряда. Можно сослаться, например, на уже проводившиеся ранее наблюдения В. В. Варсонофьева (№ 6) или Н. В. Соловьевой (№ 36), а также многих других. Многие пишут о пробое, образовавшейся дуге и др. Особенно интересно то, что шаровая молния может оставлять на деревьях длинные рубцы, похожие на след обычной линейной молнии.

**№ 51.** В понедельник 23 июня 1980 г. около 17 ч во время грозы с небольшим дождем на станции Быково Казанской ж. д. под Москвой в даче № 5 по Коллективной улице, принадлежащей Курыгиным, услышали сильный удар грома (единственный сильный удар в эту грозу). В соседней даче ее хозяйка видела в этот момент или, точнее, за мгновение до удара желтый огненный шар диаметром около 1 м, спускающийся к большой ели на территорию дачи Курыгиных. В результате взрыва дерево было расщеплено и вдоль ствола образовался длинный и расширяющийся к основанию шрам длиной около 10 м и шириной внизу более полуметра (рис. 2.14). На даче Курыгиных находились в это время один взрослый человек и двое детей. Они услышали взрыв и увидели блеск пламени, но никто не пострадал. Пластмассовая коробка счетчика, висевшего в прихожей, исчезла бесследно. Счетчик перегорел. Сгорели и исчезли провода заземления в доме. Металлические крышки распределительных коробок были выбиты, причем одна из них сильно деформировалась от удара о противоположную стену. На чердаке над прихожей были разбиты металлические распределительные коробки, две металличе-

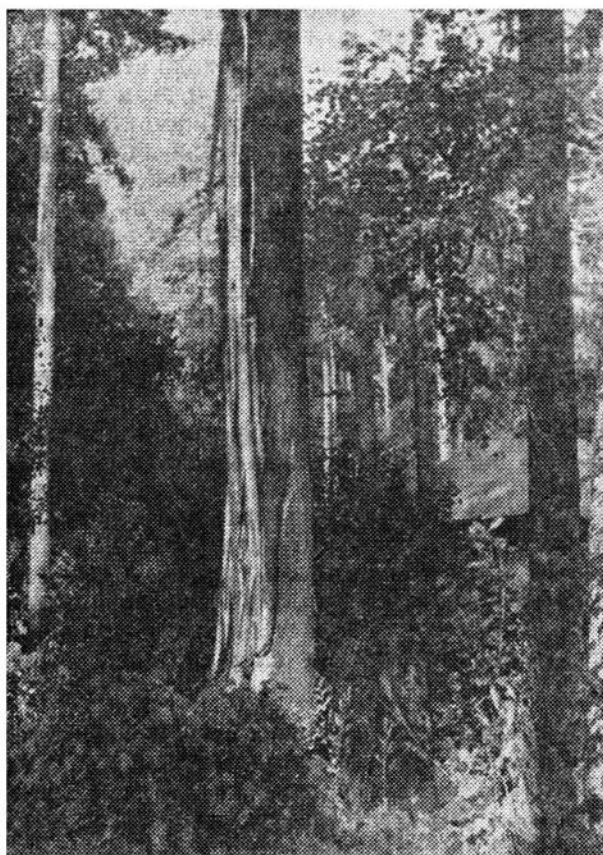


Рис. 2.14. След от взрыва шаровой молнии, оставшийся на дереве (ст. Быково Казанской ж. д.) (фото А. Б. Боровского)

ские черепицы из крыши также были выбиты. Около того места, где провода электрического освещения входили с садового участка на чердак, были оторваны деревянные доски. Один из трех изоляторов, на которых крепились провода, бесследно исчез. Исчез также заземленный провод, идущий от столба.

Как выяснилось после грозы, шаровая молния оставила после себя много последствий и на территории дачи. От расщепленной ели, которая находилась на расстоянии 25—30 м от дома, в песчаном грунте появились две неглубокие борозды, одна из которых вела

к водопроводному крану с оплавившимся при взрыве концом (рис. 2.15), а вторая — к душевой. Стенки душевой состояли из прибитых к следам тонких досок. Доски из боковой обшивки и из пола были выбиты. Вокруг оплавленного водопроводного крана появилась яма в песке 0,5 м в диаметре и глубиной тоже около 0,5 м. В кухне, которая находилась в нескольких метрах от душевой, исчезла пластмассовая крышка пакетного переключателя. Кабель, который был проложен в земле от этой кухни к мотору, на протяжении нескольких метров во многих местах перегорел и расплавился. Хлорвиниловая изоляция и резиновая оболочка, в которой он находился, были пробиты. В соседней даче испортился телефон.



Рис. 2.15. Оплавление садового водопроводного крана после взрыва шаровой молнии (фото А. Б. Боровского)

Описанные разрушения, конечно, не могли быть следствием ударной волны, расходящейся от места взрыва. Скорее это последствия мощного импульса тока, который привел к нейтрализации значительного электрического заряда, скопившегося на территории этой дачи к моменту появления шаровой молнии. Длинные шрамы на деревьях наблюдались и после других документально засвидетельствованных случаев взрыва шаровой молнии. Таким образом, возникает альтернативная возможность объяснения механизма расщепления деревьев при взрыве: это может происходить под влиянием импульса тока, возникающего при контакте с шаровой молнией. В этом случае энергия, выделяющаяся при «взрыве», конечно, не имеет никакого отношения к энергии, запасенной в самой шаровой молнии. Энергия накапливается в заряженных проводниках, а шаровая молния служит лишь триггером для освобождения этой энергии. Впрочем, возможность тепловых взрывов в результате выделения внутренней энергии шаровой молнии все же не исключена. Особенно убедительным свидетельством в пользу появления импульсов тока в присутствии шаровой молнии является то, что энергия может выделяться и на значительном расстоянии от места контакта шаровой молнии с проводни-

ком. Это видно уже на приведенном выше примере из письма С. П. Галича (№ 50). Рассмотрим еще несколько примеров.

№ 52. Преподаватель физики Н. П. Белозерский пишет, что при ударе шаровой молнии о распределительный щит, который сопровождался громким звуком взрыва, после чего шаровая молния отскочила и вылетела из помещения той же дорогой, которой пришла, в физическом кабинете, находившемся в другой комнате, из распределительной коробки выскочили искры.

№ 53. И. П. Потапов сообщил, что удар шаровой молнии в наружную антенну телевизора привел к пробоем между кабелем этой антенны, находившимся внутри квартиры, и проходившей рядом с ним на расстоянии 5 см силовой электрической проводкой. При этом перегорела одна жила провода, оставив на стене черное пятно диаметром 25—30 см. В квартире перегорели также электрический звонок и пробки.

№ 54. Л. Д. Маркович, в настоящее время пенсионерка, написала о том, что после удара шаровой молнии о стену дома перегорели пробки и вышел из строя телефон в квартире за этой стеной.

Число аналогичных сообщений очень велико. Остановимся на одном случае, который был исследован нами особенно детально.

№ 55. 5 июля 1979 г. в дачном поселке «Текстильщик» около ст. Купавна Московско-Горьковской ж. д. разразилась сильная гроза. К 15 ч она окончилась, дождь и ветер прекратились и стало тихо. Однако еще бежали низкие тучи и было довольно темно. С. А. Ильинский сидел около кухни своего дачного домика (летние кухни в этом дачном поселке вынесены в отдельное от дачи помещение). Прошло уже около 20 мин после окончания грозы. Вдруг он увидел, как со стороны озера Биссеро, куда ушла гроза, над рядом берез появился большой ярко светящийся шар правильной формы, диаметром около 0,5 м, оранжевого цвета с белым ядром. Расстояние до него было около 100 м, но шар постепенно приближался. Обогнув вершины берез, он прошел над вторым рядом деревьев, причем скорость его заметно возросла, а высота убывала. Далее он скрылся от наблюдателя за стоявшим недалеко дачным домом. В этот момент его заметили еще два человека, которые находились в кухне той же дачи. Оба они увидели среди деревьев красновато-оранжевый шар диаметром 30—40 см, который постепенно снижался. Через мгновение шар ушел из их поля зрения, ограниченного открытой дверью. Через несколько секунд все трое услышали взрыв, электрическая лампа, горевшая в кухне, «моргнула». Взрыв произошел около ствола березы, росшей рядом с кухней в другом дачном доме (№ 62), хозяином которой был полковник в отставке Н. И. Могильский.

В 6—7 м от этой березы находилась дача № 63, на веранде которой находились хозяин дачи Н. И. Трифонов и его взрослый сын. Один из них стоял на скамейке, а другой на столе — они поправляли повитёль, обвивающую веранду. Оба они, конечно, услышали взрыв и увидели вспышку, похожую, по словам сына, на дуговой разряд между кроной дерева и землей. Никакой взрывной волны не ощу-

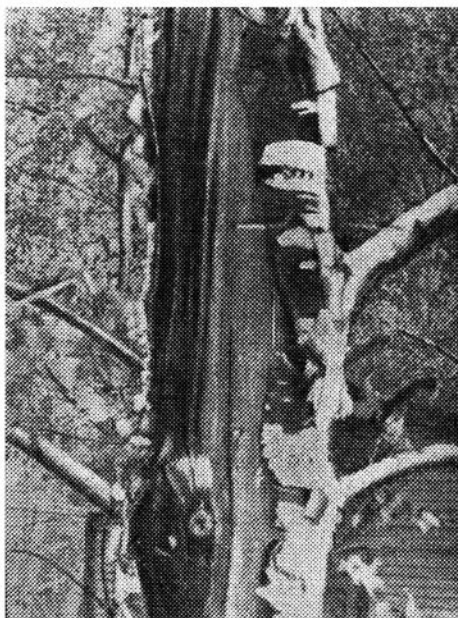


Рис. 2.16. Ствол березы, поврежденный взрывом шаровой молнии в дачном поселке «Текстильщик» (фото С. И. Назаркина)

щалось, хотя на пути между березой и ими не было препятствий. В самой кухне дачи Могильского находились внучка хозяина дачи, девяти лет, и соседка. Обе они стояли против открытой на улицу двери. Услышав грохот и увидев яркое пламя, они решили в первый момент, что взорвался газовый баллон.

Прибывший вечером хозяин дачи установил, что шаровая молния взорвалась на высоте 5 м, на уровне крыши. В этом месте кора березы, стоявшей вплотную к стене кухни, сошла с дерева, образовав шрам около 1 м и шириной 20 см. (рис. 2.16). Листья на ветке, около которой произошел взрыв, через некоторое время пожелтели и

завяли. Крыша осталась неповрежденной. Однако электрические последствия взрыва, или скорее разряда, шаровой молнии оказались значительными. Кухня была связана электрической проводкой, которая тянулась мимо березы к дачному дому, стоявшему примерно в 10 м от кухни. У входа в кухню висел пластмассовый пакетный переключатель ПБМ-10 на 10 А и 220 В, позволявший включать электромотор насоса на участке. В момент взрыва насос был отключен. Пластмассовый корпус переключателя был разбит вдребезги. Электрический мотор насоса не пострадал. В самом дачном доме, к которому подходили провода от кухни, сработал автоматический предохранитель на 10 А и освещение выключилось. В соседней даче № 63 перегорели пробки.

Итак, разрядные токи, появившиеся при взрыве шаровой молнии, текли и на значительном расстоянии от места взрыва. Свалить эти последствия на разряд линейной молнии в данном случае совершенно невозможно, так как гроза в это время уже кончилась. Появление сильных импульсов тока может приводить и к оплавлению металлов, следовательно, эти токи могут, хотя бы частично, быть ответственны за оплавления, вызываемые шаровой молнией. Конечно, энергия, потраченная на плавление, не заключена в самой шаровой молнии, и это может объяснить большой разброс тепловыделения.

Физиологическое действие шаровой молнии тоже, как правило, сводится к поражению током. В отсутствие значительных зарядов контакт с шаровой молнией кончается благополучно. Однако в других условиях финал может быть и весьма печальным. Приведем некоторые примеры.

№ 56. Н. Я. Проворкин, геолог, описал в ответах на две наши анкеты следующий случай, происшедший летом 1943 или 1944 г. В это время в возрасте 32 лет он находился в г. Белогорске Амурской области. Войдя в комнату весь промокший во время грозы с дождем, он увидел, как шаровая молния скользнула вдоль окна снаружи. Дойдя до открытой форточки, она повернула на 90° и вошла в комнату. Она представляла собой шар диаметром 25—30 см с резкой границей. В комнате находилось несколько человек. Шаровая молния двигалась со скоростью около 1 м/с прямо к автору письма. Несколько растерявшись от неожиданности, он попробовал было увернуться, но в этот момент шаровая молния разрядилась и исчезла. Как она исчезла, он уже не видел, потому что потерял сознание. Возможно, мокрая одежда сыграла с ним злую шутку. Очнулся он под дождем на улице, куда его вынесли товарищи, находившиеся в комнате. Он ощутил, что потерял чувствительность

тела от поясницы до ступней; подошвы ног совершенно онемели. В течение часа он не мог ни передвигаться, ни стоять без посторонней помощи. Через 30—40 мин чувствительность стала восстанавливаться, но на подошве ног она пришла в норму лишь через 1,5 суток.

№ 57. Другой случай описала Е. Г. Воевода, тоже геолог по профессии. В августе 1963 г. она отдыхала в палатке около ст. Лазаревская на Черноморском побережье Кавказа. В 12—13 ч разразилась сильная гроза с дождем. Внезапно она заметила, как на стенке палатки появился маленький огненный шарик, который начал постепенно расти, как бы просачиваясь через стенку; достигнув 8 см в диаметре, он оторвался и поплыл по воздуху. Шар был красно-оранжевого цвета и напоминал тлеющие угли, которые то разгорались, то темнели. Пройдя над человеком, сидящим на кровати, шарик подошел к столу, на котором находилась электрическая розетка. На расстоянии 10—15 см от нее шаровая молния сделалась ослепительно голубой и втянулась в розетку. Раздался треск и розетка покрылась слоем копоти. В этот момент все три находившиеся в палатке человека почувствовали удар током. Рядом стояло еще несколько палаток, соединенных с первой общей электропроводкой. Люди выскочили из них, так как они тоже почувствовали удар тока.

№ 58. Л. В. Мохов, кандидат экономических наук, доцент, встретился с шаровой молнией 7 июля 1953 г. в возрасте 27 лет, в 2 км от поселка Ис Свердловской области. Во время грозы 10 человек укрылись в домике лесной охраны, находившемся на горе в лесу. На вершине горы стояла геодезическая вышка, от которой телефонный провод шел к домику. Шаровая молния появилась после удара, по-видимому, линейной молнии в вышку, в результате чего было расщеплено бревно, по которому шел молниевод. Как появилась шаровая молния в доме, он не видел. Она представляла собой оранжевый шар диаметром около 40 см, светившийся как лампа 50—100 Вт, который стоял неподвижно, слегка колеблясь на уровне глаз сидящих вдоль стен людей. После взрыва автор письма потерял сознание. В бессознательном состоянии его вытащили из сторожки. Очнувшись, он пытался подтянуться на руках, так как ему казалось, что у него оторвало ноги. Правая половина тела была парализована; на правой ноге, начиная от бедра, проступило покраснение в форме «елочки». На левой щеке было несколько неглубоких ран, впрочем, один шрам так и остался на лице. Шелковая тенниска была вся изрешечена мелкими дырочками. У нескольких женщин, находившихся в доме, были поранены ноги — многочисленные маленькие ранки, ожог третьей степени.

Итак, шаровая молния может вызывать болезненные явления, аналогичные явлениям при поражении током. В нашей почте имеются и другие описания различных слу-



чаев воздействия шаровой молнии. В одном из них, например, было зафиксировано предынфарктное состояние, боль в сердце, ожог груди. Столь широкая шкала степени тяжести воздействия, начиная от полного отсутствия последствий и до случаев со смертельным исходом, вызывает, конечно, законное недоумение. И точно так же, как в случае взрывов и оплавлений, причина этого, вероятно, заключена не в самой шаровой молнии, а в электрическом состоянии окружающих ее предметов.

Оценим энергию, которая может выделиться при разряде через шаровую молнию. Предельную электростатическую энергию, которая накапливается проводниками во время грозы, можно найти, исходя из максимальной напряженности поля при пробое в воздухе—30 кВ/см. Если принять, что напряженность электрического поля  $E$ , наведенного нескомпенсированными при разряде молнии зарядами, составляет  $3 \cdot 10^3$ — $3 \cdot 10^4$  В/см, то плотность заряда на поверхности проводников будет составлять в этом случае  $0,3$ — $3 \cdot 10^{-9}$  К/см<sup>2</sup> и на участке поверхности земли радиусом около 10 м накапливается заряд  $10^{-3}$ — $10^{-2}$  К. Плотность энергии поля этого заряда  $E^2/8\pi$  равна  $(4 \div 400) \cdot 10^{-7}$  Дж/см<sup>3</sup>, а полная энергия слоя толщиной 10 м составляет  $10^3$ — $10^5$  Дж. Это примерно соответствует максимальному энерговыделению, связанному со взрывом шаровой молнии. Рассеяние заряда в течение  $10^{-3}$  с приводит к появлению среднего тока 1—10 А, а максимальное значение тока, вероятно, будет в несколько раз больше. Поражение таким током может привести к смертельному исходу.

Приведем также результаты более строгого расчета. Пусть в начальный момент времени заряд находится на поверхности земли или связанных с ней проводников. Будем для простоты считать эту поверхность плоскостью. Поле такого заряда равно  $E=4\pi\sigma$ , где  $\sigma$  — плотность заряда. Если в результате разряда через шаровую молнию этот заряд распределяется равномерно в слое толщиной  $l$  над поверхностью проводника, т. е. превращается в объемный заряд, то из уравнения Пуассона легко подсчитать поле такого объемного заряда. Расчет показывает, что энергия этого поля оказывается, как и следовало ожидать, меньше энергии поля заряда, распределенного на поверхности проводника, причем относительное уменьшение энергии составляет около  $2/3$ , т. е. энергия поля в слое толщиной  $l$  для заряда, распределенного в слое, со-

ставляет всего  $1/3$  энергии электрического поля в этом же слое при расположении заряда на поверхности. Итак, почти вся энергия может выделиться при разряде заряженного участка поверхности через шаровую молнию.

Если электрическое поле около поверхности земли не превышает  $300 \text{ В/см}$ , энерговыделение будет на два порядка меньше и достигнет десятков джоулей, что соответствует сильному «хлопку», не сопровождающемуся какими-либо серьезными повреждениями. Это и имеет место в подавляющем большинстве случаев. Заряд, рассеиваемый шаровой молнией, и электрический ток, вызываемый ею, уменьшаются при этом на порядок, и она становится безопасной.

Подведем итоги. Итак, шаровая молния состоит из проводящего вещества с низкой работой выхода, которое обладает свойством легко рассеивать заряды при контакте с заряженными проводниками. При приближении шаровой молнии к такому проводнику может возникнуть разряд между ней и проводником. Это приводит к быстрому распаду шаровой молнии, который производит впечатление «взрыва». Кратковременные, но мощные импульсы тока, которые возникают в этот момент, способны рассеять значительные заряды, наведенные во время грозы на большой территории — площадью, возможно, десятки и даже сотни квадратных метров.

## **2.7. Возникновение шаровой молнии**

Только немногие очевидцы, наблюдавшие шаровую молнию, видят также и момент ее зарождения. Из 1500 ответов на первую анкету определенный ответ на вопрос о том, как возникает шаровая молния, дали лишь 150 человек. Из них в 45 случаях она возникла вблизи канала линейной молнии, а в остальных 105 случаях — из различных металлических предметов (розеток, электроприборов, радиоприемников, телевизоров, телефонных аппаратов, батарей отопления и др.). В ответах на вторую анкету мы получили подробное описание почти всех этих событий.

Рассмотрим сначала возникновение шаровой молнии около канала линейной молнии. К сожалению, трудно найти в описаниях детали этого явления, поскольку его наблюдают обычно с расстояния не менее нескольких десятков метров (в противном случае деталей в описа-

нии может оказаться еще меньше). Иногда утверждают, что шаровая молния возникает в месте ветвления канала линейной молнии.

№ 59. Так, М. Г. Исангулов пишет о том, что в дуб, мимо которого он проезжал, ударила «с двух сторон» молния. При этом с дуба скатился на дорогу и покатился по склону холма ярко-красный шар диаметром 50—70 см. Его лошади в отличие от беспечных новозеландских коров, описанных в гл. 1 (№ 11), встали на дыбы и рванули в разные стороны, однако телега не опрокинулась. Шаровая молния образовалась на расстоянии 70—100 м от наблюдателя и через 5—10 с исчезла, скатившись по склону холма. Это произошло днем в мае 1926 г.

№ 60. Студент химического факультета А. Ю. Сазонов видел, как три шаровые молнии ярко-белого цвета отделились от средней части канала линейной молнии и начали медленно падать. Их диаметр оценивался в 30—50 см, расстояние до них — более 100 м.

№ 61. В. Г. Глазунов, старший научный сотрудник Гидрометеоцентра, кандидат географических наук, наблюдал шаровую молнию в ночь с 27 на 28 июня в г. Люберцы под Москвой. Была гроза с умеренным ветром и ливнем. Во время яркой вспышки короткой линейной молнии (разряд облако — облако) на одном из ее концов возник шар. Расстояние до этой точки (300 м) он определил по запаздыванию грома (1 с). Угловой диаметр шаровой молнии был около половины диаметра луны (15'). Если это так, то диаметр ее был около 1 м. Шаровая молния начала падать вниз по вогнутой дуге, постепенно переходящей в горизонтальную траекторию. Приблизительно через 10 с молния взорвалась подобно фейерверку, причем звук от взрыва пришел приблизительно через 3—4 с после вспышки, т. е. молния прошла около 0,7—1 км. Скорость ее движения в этом случае составляла около 70—100 м/с, что, конечно, не является характерным для шаровой молнии, но возможно, что расстояние или время наблюдения были определены неточно.

№ 62. А. Я. Боме, начальник отдела охраны окружающей среды Тюменской областной агрохимлаборатории, 7-го июля возвращался домой на автомашине. Около девяти часов вечера началась гроза и линейная молния ударила в подстанцию у дороги в 150—200 м по ходу машины. В месте удара возникла яркая голубая вспышка, затем ее яркость уменьшилась, а размеры увеличились. Образовался голубоватый шар диаметром раза в полтора больше футбольного мяча (т. е. 40—50 см). Шар светился в течение 5—7 с (за это время автомобиль поравнялся с подстанцией). Затем шар распался и вместо него на поверхности высоковольтного изолятора, около которого находилась шаровая молния, образовался обычный электрический дуговой разряд, быстро погасший.

В ряде случаев возникновение шаровой молнии наблюдалось с расстояний 20—30 м и меньше.

№ 63. П. Ф. Гришенков из г. Мурома в 1953 г. видел с расстояния около 10 м, что шаровая молния светло-желтого цвета диаметром 30—40 см выскочила из земли в месте удара линейной молнии. Поднявшись на высоту 6—8 м, молния начала двигаться горизонтально. При этом она пульсировала, принимая то шаровую, то эллипсоидальную форму. Пройдя за 1—1,5 мин расстояние 50—70 м, шаровая молния наткнулась на сосну и взорвалась.

№ 64. Преподаватель В. И. Балина видела в конце мая 1950 г., как после удара линейной молнии в тополь на расстоянии 30 м от нее скачками покотился под гору светящийся шар ярко-сиреневого цвета диаметром 30—40 см. В течение 30—40 с он исчез из поля зрения.

№ 65. Рабочий автомобильного завода (г. Тольятти) А. М. Полуструев, подходя к дому, увидел линейную молнию, ударившую в стоявшее недалеко дерево. В тот же момент он увидел вытянутый светящийся предмет, расколовшийся тут же на два шара, которые быстро падали к земле. В дальнейшем один из них проник в помещение и там взорвался, «разворотив» угол дивана.

№ 66. Очень подробное описание возникновения шаровой молнии прислал нам преподаватель вуза А. С. Тимошук из г. Гатчины. Это произошло в апреле 1946 г. утром в г. Белая Церковь (Киевская обл.). Из окна с расстояния 20—30 м он видел, как линейная молния ударила в провода недалеко от столба. Вслед за этим на проводе около столба возникла желто-зеленая «вспышка», которая стала «разгораться». Из нее образовался шар диаметром около 15 см, начавший медленно, но с небольшим ускорением катиться по провисающему проводу. Постепенно шар становился красным. Пройдя 4—5 м до места наибольшего провисания, он перескочил на нижний провод, прокатился еще около 0,5 м и свалился на ветки стоящего рядом тополя. Раздался сильный треск, полетели красные искры и по веткам тополя покотилось несколько маленьких шариков (размером немного больше теннисного мяча). Сам шар на какое-то мгновение был заслонен ветками, но затем около одной из нижних ветвей он снова стал виден: диаметр его стал заметно меньше. Шар упал на мостовую, рассыпая вокруг себя искры, и начал прыгать вдоль мостовой как мячик, подскакивая вверх на 10—15 см. После нескольких скачков он распался на куски, которые тут же погасли. Все это происходило приблизительно в течение 10—20 с и наблюдалось еще одним человеком.

№ 67. Другой интересный случай описал инженер Н. Д. Трушаев из г. Севастополя. Днем 16 мая 1938 г. автор письма видел, как после удара линейной молнии в вспаханное поле по нему побе-

жали как бы разноцветные «брызги» пламени, так что создалось впечатление, что «загорелась» земля. Через 3—5 с «брызги» собрались в кучу, образовав огненный шар белого цвета диаметром 50—70 см. Шар оторвался от пашни, поднялся на 2 м над поверхностью земли и начал двигаться вдоль нее. Его поверхность как бы кипела и казалась косматой, причем «космы» с одной стороны были длиннее, чем с другой. Шар двинулся к стене двора, тянувшегося вдоль вспаханного огорода, около которой стояли автор письма и его отец. Не дойдя 1,5—2 м до стены, он резко изменил направление на 90°; затем еще раз изменив направление, наткнулся на кучу соломы и поджег ее. Это явление наблюдали два человека (автор письма и его отец). Оно продолжалось в течение 30—50 с. Наименьшее расстояние до молнии было менее 5 м, а общий пройденный ею путь — около 400 м.

Наблюдалось появление шаровой молнии при ударе линейной молнии в воду. О нем сообщил нам И. А. Гулидов из Харькова.

№ 68. В июле 1963 г. днем во время дождя с грозой в озеро ударила линейная молния. Из воды в месте удара выскочила шаровая молния. Она имела диаметр 10—20 см и была оранжевого цвета. Подскочив на высоту 30—50 см, она начала двигаться горизонтально, вдоль поверхности воды, то поднимаясь, то опускаясь. Пройдя за 10—20 с расстояние 20—30 м, шаровая молния спустилась к воде и с грохотом исчезла, образовав облако пара. Это событие наблюдали с берега два человека (на расстоянии 50—70 м).

№ 69. Инженер-механик Л. Я. Ваганова наблюдала шаровую молнию 5 августа 1978 г. в 16 ч. Она с группой детей и взрослых увидела, как линейная молния дважды ударила в одно и то же место в землю на расстоянии 70—100 м от нее с интервалом 15 мин. Оба раза после разряда возникал снап искр, которые затем собирались в шар. Шары были яркого зеленовато-голубого цвета диаметром 30—50 см. Искры летели от них в разные стороны. Шары быстро деформировались, принимая то форму слабо вытянутого эллипсоида, то грушевидную форму. Одновременно они перемещались, поднимаясь сначала приблизительно на 5 м вверх, а затем начинали двигаться горизонтально. Через 5—10 с в первом случае и через 5 с во втором шары распались с выбрасыванием вещества и погасли.

№ 70. А. Селезнев из д. Кузовково Торжковского района Калининской области и еще четыре человека в июле 1975 г. пережидали грозу под навесом сарая. Было около 12 ч дня. В дерево высотой 20—25 м, находившееся от них в 60 м, ударила линейная молния, сбив макушку и расщепив его. Одновременно с этим ударом в 1 м от земли и приблизительно в 2 м от дерева образовался шар диаметром около 40 см бело-желтого цвета в середине и оранжевого

по краю; 5—10 с шар стоял неподвижно, а затем начал двигаться в сторону сарая. Пройдя примерно 45 м над дорогой за 15—20 с на высоте около 1 м, шаровая молния замедлила движение; задев за ветку дерева, она с треском рассыпалась на искры и исчезла в 20 м от сарая, где находились люди. Никаких следов на этом месте не осталось.

Заметим, что согласно последнему наблюдению шаровая молния возникла хотя и вблизи дерева, в которое ударила линейная молния, но все же несколько в стороне, в двух метрах от него.

Перейдем теперь к случаям наблюдения появления шаровой молнии из проводников.

№ 71. А. П. Соловей, пенсионер из г. Броцлава Винницкой области, утверждает, что молния диаметром 20—30 см вышла из висевшего на стене телефонного аппарата, прошла две комнаты на высоте 1,5 м от пола и через 6—7 с вылетела в открытую форточку. В письме приведены схема комнат, траектория движения молнии, а также расположение людей, находившихся в помещении. Произошло это в 1940 г.

№ 72. Н. В. Мартынов, метеоролог, наблюдал в 1943 г., как шаровая молния диаметром 10 см выскочила из корпуса висевшего на стене телефонного аппарата, у которого при этом отвалилась крышка. Это произошло вслед за разрядом линейной молнии. Шар покатился по полу и с треском взорвался, разбудив нескольких спящих человек, но никому из них не причинив вреда.

В письме В. В. Мошарова сообщается о том, что шаровая молния возникла после удара линейной молнии в антенну телевизора.

№ 73. Г. В. Калганов из г. Коломны сообщает, что шаровая молния появилась около щитка со счетчиком и приборами во время разряда линейной молнии.

В нескольких письмах приводятся случаи, когда шаровая молния выскакивала из патрона электрической лампы. Один такой случай уже был описан выше. Приведем также другой случай, из которого видно, что шаровая молния успела побывать и на комсомольском собрании.

№ 74. Это произошло в июле 1957 г. 28-летний (в то время) Герман Николаевич Пузанков, ныне инженер-конструктор, был командирован комитетом ВЛКСМ в колхоз им. Калинина, д. Чернеево Павловского района Горьковской области. Пятого или шестого июля комсомольцы (30—40 человек) собрались в бревенчатом одноэтажном клубе колхоза (комната 20×40 м<sup>2</sup>). Была вторая половина дня, надвигалась гроза. Герман Николаевич говорил с трибуны. В какой-то момент, повернув голову, он увидел, что с электрической

лампы, висевшей над столом президиума, стекает большая светящаяся капля. Капля имела грушевидную форму и быстро росла в размерах. Затем она оторвалась от лампы и стала медленно падать вниз. При этом шар принял правильную сферическую форму. Внутри капли все время происходило какое-то движение, словно кипение воды. Наружу выскакивали тонкие лучи-иглы. Шаровая молния упала на голову сидевшей за столом президиума девушке, подпрыгнула на 10—15 см, упала на плечо и покатилась вниз. Что произошло с молнией дальше, автор письма не знает, надо полагать, по причине поднявшегося переполоха. Что же касается девушки, то она отделалась легким обмороком. Как только молния коснулась ее, девушка уронила голову на руки, лежавшие на столе. Выключили свет, принесли воды; через несколько минут она пришла в себя и даже осталась на собрании. Двое других человек, сидевших за столом президиума, не пострадали.

Шаровая молния может вылететь и из других электроприборов.

№ 75. О. Ф. Кузнецова, художник по росписи тканей, в 1944 или 1945 г., находясь на даче в Малаховке под Москвой, видела, как во время сильной грозы после близкого разряда молнии из электрического счетчика вылетел «сноп огня». При этом счетчик громко загудел. Образовался шар оранжевого цвета диаметром 15 см, который покатился по стене и окнам. Вылетев из комнаты, он повис в трех метрах от дома на высоте 1 м от земли. Через 3—4 с он исчез. В соседнем доме, связанном электропроводкой с домом Кузнецовой, ударом молнии была убита женщина и контужен мальчик.

Особенно часто шаровая молния появляется из радио- и электрических розеток.

№ 76. Ю. П. Кисляков находился в доме в г. Сергач Горьковской области. Вместе с сильным разрядом молнии около радиорозетки, в которую не была включена вилка репродуктора, раздался треск. Подняв голову, он увидел, что на расстоянии меньше метра от розетки висит темно-красный шар. Несколько поколебавшись, шар поплыл в направлении раскрытой двери, прошел на расстоянии меньше метра от очевидца (причем он тепла не ощутил), вышел в коридор и затем через вторую открытую дверь — на улицу. Там он с треском взорвался, не оставив на месте взрыва никаких последствий. Наружный ввод радиопроводки оказался поврежденным и сгорел, розетка оплавилась.

№ 77. И. О. Прокопенко, экономист, выписавшись в июне 1944 г. из госпиталя, работал некоторое время по инвалидности в сапожной мастерской. Однажды в 12 ч началась гроза; в мастерской находились девять человек. Вдруг раздалось резкое шипение из репродуктора «Рекорд», так что все подумали, что начинается радиопе-

редача. Однако вместо этого из клеммы розетки, в которую был вставлен штепсель репродуктора, стала вытекать желтая струя около 10 см длиной, которая быстро закручивалась в клубок. На поверхности клубка образовались неровности, похожие на шипы. Ядро светилось оранжевым светом, а шипы были несколько темнее. В течение 2—3 с шипение прекратилось и образовалась светящаяся шаровидная масса, от которой исходил слабый шелест. Шар спустился до высоты 1 м, плавно сделал круг по комнате, обогнув рабочий стол длиной 3 м, стоявший посредине сапожной мастерской. Возвратившись к розетке, шар упал в угол и исчез с треском и яркой вспышкой. На полу осталось пятно обгорелой краски диаметром 25—30 см, на каменной стене — копоть. Репродуктор не испортился.

№ 78. Электромеханик В. И. Антонов написал о том, что после разряда линейной молнии, разбившей несколько столбов радиотрансляционной линии, из розетки появился шар диаметром 20 см. Он направился к печке и исчез в ней, оплавив край приоткрытой дверцы. Розетка тоже была слегка оплавлена.

№ 79. В июле 1958 г. Т. Г. Пряхина гостила в селе Ковалевка Полтавской области. Была гроза, и в разгар ее в украинской хатемазанке появилась шаровая молния. После сильного треска из радиорозетки вырвался огненный цилиндрический шнур длиной около 45 см и диаметром 10 см. Затем хвост шнура оторвался от розетки и шнур превратился в правильный шар диаметром около 15 см. Шар светился, как лампа 10—20 Вт, желтоватым светом с голубым оттенком. Он медленно проплыл около 1,5 м в 3 метрах от наблюдателя, затем остановился, повисел в воздухе и бесшумно погас. Все это длилось около 5 с. Шар висел над кроватью в 30 см от одеяла, на котором не осталось, однако, никаких следов. После окончания грозы включили радио. Радиосеть работала исправно.

Выше мы описывали главным образом случаи появления шаровой молнии из проводников во время близкого удара линейной молнии или, по крайней мере, когда возможность такого удара не исключалась. Возникает вопрос — может ли шаровая молния возникнуть и без предшествующего разряда линейной молнии. На основе анализа ряда случаев можно с полной определенностью ответить на этот вопрос положительно. В качестве одного из примеров можно напомнить случай (№ 47), описанный в начале § 2.6, когда шаровая молния появилась на клеммах аккумуляторной батареи. Приведем еще несколько примеров, в которых подробно описано возникновение шаровой молнии.

№ 80. Так, один из корреспондентов инженер-капитан в отставке И. В. Мочалов подробно описал случай, происшедший в августе



1956 г. днем в г. Нижний Тагил. Во время грозы он увидел, как на головке крана батареи отопления начал образовываться голубой шарик величиной с горошину, который раздувался, «как мыльный пузырь». Шарик стал светиться ярче, увеличился до 4—6 см в диаметре и, оторвавшись от крана батареи, прошел под столом по воздуху. Он остановился около кучи гвоздей, лежавших на стуле (при этом из него выскочила искра), отскочил вверх и опять поплыл под стол, где с треском («вроде пистолетного выстрела») лопнул и исчез. Все это наблюдалось с расстояния 1—2 м автором письма и его двумя детьми в течение 1 мин. К письму приложен план с указанием расположения предметов и людей в комнате и траектории шаровой молнии.

№ 81. В августе 1965 г. С. В. Кичанов (тогда пяти лет) возвращался домой с отцом. Это было в г. Чернушки Пермской области. Раздавались раскаты грома. Поднимаясь на второй этаж к себе в квартиру, он услышал позади шипение. Обернувшись, он увидел, как в нескольких шагах от него из гвоздя, торчавшего около окна, медленно появляется, постепенно увеличивая свои размеры, светящийся шар. Достигнув в диаметре 10—12 см, шар оторвался от гвоздя и начал двигаться за людьми, поднимающимися по лестнице. Они вскочили в квартиру, и отец попытался закрыть за собой дверь. Однако шаровая молния успела проскочить в узкую щель — менее 1 см шириной. Задержавшись около двери, она пролетела на расстоянии 0,5 м от мальчика, обдав его потоком чуть теплого ветра, и скрылась за дверью туалета. Больше ее не видели. Все это продолжалось 40—50 с. Позднее в стекле туалетной комнаты было найдено отверстие диаметром 2 мм. На гвозде не было обнаружено никаких оплавлений.

Вот подробный рассказ конструктора М. С. Клавдиева, которому посчастливилось наблюдать шаровую молнию от момента ее возникновения до гибели. В нашей почте имеется несколько десятков таких случаев, однако этот выделяется большим количеством важных деталей.

№ 82. В 1975 г. он находился на даче в пос. Кратово под Москвой. Грозы и дождя не было, но атмосфера была сильно «наэлектризована». Почувствовав тревогу за возвращавшихся в это время из Москвы жену и детей, он около 17 ч вышел на улицу. Убедившись в том, что дождя скоро не будет, он обратил внимание на звук (слабое жужжание), исходящий от верхушки столба, который стоял на участке около дома приблизительно в 20—25 м. Столб был старый, и с него была уже снята проводка. Присмотревшись, он увидел красное пятно размером с вишню, появившееся на металлическом крюке, вбитом в верхнюю часть столба, на котором раньше, по-видимому, крепился изолятор. Крюк находился на высоте 4 м от по-

верхности земли. Светящийся шарик начал расти, одновременно меняя цвет с красного на желтый, а затем на зеленый. Одновременно световой поток от него вырос, так что если его вначале можно было сравнить с лампой в несколько ватт, то теперь он светился, как лампа 500 Вт. Все это заняло около 2 с. Достигнув размеров 15—20 см в диаметре, шаровая молния оторвалась от столба и пошла, слегка отклоняясь в стороны, сначала по направлению к наблюдателю, а затем постепенно поворачивая в сторону дерева, которое росло рядом с соседним двухэтажным домом в 5—7 м от столба. Шаровая молния двигалась со скоростью от 0,5 до 1,5 м/с. Заметим, что после того как она оторвалась от крюка, ее размеры больше не менялись, но в процессе формирования диаметр ее вырос в 5—10 раз, т. е. объем на 2—3 порядка. Шар был правильной формы, но все же слегка вытянутый, с подвижной поверхностью. Сила испускаемого света периодически и довольно быстро колебалась на 20—30 %. Пределав приблизительно за 10 с путь около 10 м, шар натолкнулся на дерево и взорвался с сильным звуком. Как потом выяснилось, на дереве образовалась длинная обугленная трещина, идущая по стволу до земли. В момент взрыва автор, который стоял на земле приблизительно в 15—20 м от места взрыва, почувствовал удар током («непроизвольное рефлекторное сокращение мышц живота и ног, как при электрическом раздражении»). Такие же ощущения испытали еще три человека, находившиеся на участке (примерно на том же расстоянии). В здании, стоявшем рядом с деревом (в 2—3 м), перегорело несколько электрических лампочек и сгорел предохранитель радиоприемника, включенного в розетку. Два человека, находившиеся в доме, получили сильные токовые поражения, так что пришлось вызывать скорую помощь. Один из них был госпитализирован. К письму приложен план участка с указанием расположения всех предметов и людей.

Кроме уже известных нам электрических эффектов, которые были связаны с тем, что шаровая молния разрядилась наведенный на участке заряд, мы имеем в этом случае подробное описание появления шаровой молнии без предварительного разряда линейной молнии. В данном случае налицо сильная наэлектризованность участка поверхности, на котором появилась шаровая молния. Во многих случаях появление шаровой молнии коррелирует с появлением коронных разрядов (огней святого Эльма) и с сильной электростатической электризацией. Во вторую анкету были включены вопросы с целью выяснения, знают ли очевидцы, что такое огни святого Эльма, и могут ли они отличить их от шаровой молнии. Многие из них положительно ответили на один или оба

вопроса. Не оставаясь подробно на данной проблеме, приведем лишь два случая, где эта связь выступает довольно отчетливо.

№ 83. Штурман Б. В. Осипов в августе 1975 г. летел на самолете ТУ-104 из Ленинграда в Одессу. Облачность была 10 баллов на высоте 900 м, ветер восточный 3—5 м/с, температура за бортом 18 °С. Когда самолет вошел в облака, то на высоте 1200 м экипаж заметил, что на остеклении кабины появились электрические разряды длиной 15—20 см голубоватого цвета, которые срывались и улетали вперед. Через 3—4 с после этого у самой кромки остекления появился зелено-голубой шар диаметром 10—12 см. Вслед за этим раздался оглушительный взрыв и пламя охватило стекло. После проверки оборудования выяснили, что сгорели основная радиостанция РСР-70 и радиокомпас. После благополучного приземления в Одессе нашли небольшой рыжеватый ожог на дюралевой перекладине остекления. Стекло не было повреждено.

№ 84. Г. С. Саруханян в 1958 г. видел с балкона, как во время сильной грозы в 3 м от него на перекладине турника появились языки «пламени». Затем с конца металлической трубы, которая служила перекладиной турника, соскользнул яркий белый шар диаметром 15—20 см. Он спустился вниз и на высоте около 1 м от земли начал двигаться горизонтально. Исчез, зайдя за угол дома. Через 30—40 с раздался сильный треск. Это случилось в 22—23 ч на станции Силикатная Курской ж. д.

Итак, шаровая молния не всегда возникает в связи с разрядом линейной молнии, хотя, возможно, в большинстве случаев это и так. Можно предположить, что она возникает там, где накапливаются и не могут нейтрализоваться значительные электрические заряды. Медленное растекание этих зарядов приводит к коронированию или появлению огней святого Эльма, быстрое — к возникновению шаровой молнии. Это может происходить, например, в тех местах, где внезапно прерывается канал линейной молнии и значительный заряд выбрасывается в сравнительно небольшую область воздуха мощным коронным разрядом. Однако, вероятно, аналогичные ситуации могут возникать и без разряда линейной молнии.

Относительно большая длительность (1—2 с) возникновения шаровой молнии в некоторых описанных выше случаях не противоречит высказанной точке зрения. Повидимому, этот процесс имеет короткую начальную стадию, которую не улавливает глаз наблюдателя. Этот вопрос будет более подробно рассмотрен в гл. 5.

## 2.8. Устойчивость шаровой молнии

В двух предшествующих параграфах этой главы мы рассмотрели, как возникает и исчезает шаровая молния. Теперь посмотрим, каким образом она существует. И первый вопрос, который возникает при этом: почему она устойчива? В самом деле, все газы, как известно, легко смешиваются друг с другом и не образуют различных фаз с устойчивыми границами. Если шаровая молния представляет собой разновидность какого-то газа или смеси газов, то она должна постепенно расплываться в воздухе, что противоречит многочисленным наблюдениям. Уже вследствие обычной молекулярной диффузии границы шаровой молнии должны были бы несколько расплыться. Однако практически перемешивание газов определяется не молекулярной, а турбулентной диффузией и конвекцией, которые оказываются на несколько порядков эффективнее. Турбулентная диффузия возникает из-за различия плотностей диффундирующего газа и окружающей его атмосферы (неустойчивость Релея—Тейлора). Другая причина появления неустойчивости связана с различием тангенциальных скоростей движения газа по разные стороны границы, которое возникает при движении объема газа относительно окружающего воздуха (неустойчивость Кельвина—Гельмгольца).

В результате этого облако газа или пара в воздухе не может иметь определенных границ и быстро расплывается с течением времени. Это хорошо известно всем, и поэтому, не подводя никакой теоретической базы, очевидцы, не задумываясь, говорят о появлении на месте исчезнувшей шаровой молнии облачка пара или газа. Напомним, например, письмо Е. В. Приходько (№ 24), цитированное выше, в котором она говорит об образовании облачка пара. Пар после взрыва шаровой молнии видели также и другие очевидцы. Приведем в качестве примера описание наблюдения, полученное от инженера В. М. Костина.

№ 85. Шаровую молнию он наблюдал утром в начале июня 1945 г. в г. Горьком. Начиналась гроза. Он шел вдоль трамвайной линии. Неожиданно в провод ударила небольшая линейная молния. Через несколько секунд вблизи опоры линии электропередачи он увидел оранжевый шар 30—50 см в диаметре. Поверхность шара интенсивно колебалась. Шар перемещался, приблизился к основа-

нию молнисотовода на споре и с оглушительным грохотом взорвался.

На месте шара образовалось светло-коричневое облачко шаровидной формы, которое вскоре рассеялось.

Мы видим, что для наблюдателя не представляло особого труда отличить шаровую молнию от шарообразного облака газа. Шаровую молнию наблюдают также при сильном ветре и даже во время урагана. Обратимся сначала к статистическим данным. 1018 наблюдений, в которых содержались сведения о силе ветра, распределены следующим образом:

Штиль . . . . .	176
Слабый и умеренный ветер . . . . .	577
Сильный ветер . . . . .	231
Ураган . . . . .	34

Таким образом, 26 % всех наблюдений составляют случаи сильного и ураганного ветра. Дальнейшая обработка наблюдений показала, что ветер заметно сокращает число шаровых молний, прошедших расстояние более 50 м: с 21 % при слабом и умеренном ветре оно уменьшается до 15 % при сильном ветре и урагане. Этого, конечно, следовало ожидать, но отсюда видно также, что шаровая молния может все же не только существовать в этих условиях, но и пройти большое расстояние. Имеется ряд описаний наблюдения шаровой молнии на открытом воздухе во время сильного ветра. Вот одно из них.

№ 86. Инженер-проектировщик Т. Н. Марченко находилась в 1973 г. в г. Тирасполе Молдавской ССР. Ночью на город налетел шквальный ветер. Грозы не было, но ураган был сильный. В частности, он произвел большие разрушения в Одессе, развалив деревянные постройки, повалив телефонные столбы и др. Во время этой бури автор письма увидела в окно две шаровые молнии, одна из которых находилась на расстоянии 25—30 м, а другая — несколько дальше. Первая быстро скрылась из поля зрения, а вторая упала на асфальт, рассыпала вокруг себя искры и тоже скрылась, унесенная ветром. Диаметр молний был 30—40 см, форма — шар, цвет — белый, за время наблюдения (несколько секунд) каждая из них прошла путь около 70 м.

Совершенно ясно, что облако обычного светящегося газа не могло бы сохраниться в этих условиях. Итак, мы должны понять причину устойчивости шаровой молнии. Иногда полагают, что она представляет собой вихревое движение газа, поддерживающееся в силу закона сохранения вихря. Едва ли можно согласиться с этой точ-

кой зрения. Оставим в стороне то, что наблюдатели в большинстве случаев не замечают никакого вращательного движения в шаровой молнии. Не чувствуют они и движение воздуха около нее. Обратим внимание на то, что наиболее естественная для вихря кольцеобразная форма не только не характерна, но фактически отсутствует у шаровой волнии (см. § 2.2). Далее, из гидродинамики известно, что размеры вихря не остаются постоянными. Вследствие вязкости газа появляется так называемая диффузия вихря, которая приводит к расплыванию его на окружающие слои воздуха и к увеличению диаметра вихревого кольца пропорционально корню квадратному из времени ( $d \sim \sqrt{t}$ ). Это должно было бы приводить к постепенному и систематическому увеличению размеров шаровой молнии, какового фактически никогда не наблюдается.

Наконец, для того чтобы вихрь сохранялся несмотря на диссипацию в течение значительных промежутков времени и проходил большие расстояния, требуются весьма значительная энергия и скорость вращения газа в нем. Иногда авторы гипотез говорят о скорости, близкой или даже превышающей скорость звука. Но в таких условиях вихревое движение должно сопровождаться генерированием очень мощного звука, похожего на гром от реактивного самолета. Между тем наблюдения очевидцев говорят о том, что шаровая молния — практически беззвучное явление, если не считать слабого шипения или потрескивания при движении и громкого удара при взрыве. Перечисленные аргументы показывают, что вихревое движение не может быть ответственным за устойчивость шаровой молнии.

Подойдем к вопросу иначе. Допустим, что вещество шаровой молнии обладает поверхностным натяжением. Вспомним, что это вещество является проводником и, следовательно, существенно отличается по своим свойствам от непроводящего окружающего воздуха. Если предположить еще, что оно образует отдельную фазу в воздухе, то естественно ожидать, что между ним и воздухом должна образоваться фазовая граница, обладающая энергией. Правда, обычные газы, молекулы которых взаимодействуют лишь при столкновениях, не могут образовывать отдельной друг от друга фазы. Однако поскольку вещество шаровой молнии является проводником, оно должно состоять, по крайней мере частично,

из заряженных частиц, которые взаимодействуют между собой на больших расстояниях по закону Кулона. При достаточно большой плотности заряженных молекул не исключена возможность того, что они могут образовать отдельную фазу. Мы не будем заниматься здесь детальным теоретическим обоснованием этого, а просто примем как факт, что такая граница с поверхностным натяжением существует, и в дальнейшем приведем наблюдения, подтверждающие это заключение.

Заметим прежде всего, что это допущение сразу объясняет отсутствие быстрой диффузии вещества шаровой молнии в окружающий воздух, поскольку поверхностное натяжение стабилизирует соответствующие неустойчивости. В частности, неустойчивость Кельвина — Гельмгольца стабилизируется при выполнении условия [25]

$$u \lesssim \sqrt{2\sigma k/\rho}, \quad (2.12)$$

где  $u$  — разность скоростей движения газа по разные стороны границы;  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения;  $\rho$  — плотность газа (в нашем случае  $\rho \approx 1,3 \times 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>);  $k$  — волновое число рассматриваемого возмущения. Учитывая, что на теле, имеющем линейные размеры  $d$ , минимальное волновое число  $k = 2\pi/d$ , и полагая, что  $u \approx 0,5 \div 1$  м/с, находим, что для стабилизации неустойчивости при  $d \approx 10$  см требуется значение  $\sigma \approx 10^{-6}$  Дж/см<sup>2</sup>. Хотя формула (2.12) выведена для плоской границы раздела, ее можно для оценки применить и в случае сферической границы. Среды, состоящие из заряженных частиц, имеют, как правило, аномально высокую поверхностную энергию. Так, для жидких металлов  $\sigma \approx (5 \div 10) \cdot 10^{-5}$  Дж/см<sup>2</sup>, в то время как для органических жидкостей  $\sigma = (1 \div 2) \cdot 10^{-6}$  Дж/см<sup>2</sup>. Несмотря на то что вода как полярная жидкость имеет весьма высокий коэффициент поверхностного натяжения ( $\sigma = 8 \times 10^{-6}$  Дж/см<sup>2</sup>), для сильных электролитов это значение оказывается выше, чем для чистой воды, и растет с увеличением концентрации электролита. Плотность заряженных частиц в шаровой молнии  $n$  должна лежать между  $10^{16}$  и  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Действительно, с одной стороны, она едва ли превосходит плотность воздуха, а с другой, при  $n < 10^{15}$  см<sup>-3</sup> среда может считаться разреженной идеальной плазмой, так как при этом  $na^3 < 1$  ( $a$  — дебаевский радиус); в этих условиях она не может образовать отдельной фазы. Если предположить, что поверх-

ностная энергия при одинаковом характере сил взаимодействия пропорциональна числу частиц, приходящихся на  $1 \text{ см}^2$  поверхности, т. е.  $n^{2/3}$ , то, учитывая, что для жидких металлов  $n \approx 10^{22}$ , находим, что коэффициент поверхностного натяжения вещества шаровой молнии должен быть приблизительно в  $10^2$ — $10^4$  раз меньше, чем у металлов, и, таким образом, для него  $\sigma \approx (0,1 \div 10) \cdot 10^{-7} \text{ Дж/см}^2$ . Это число не расходится с оценкой, полученной выше.

Для того чтобы стабилизировать неустойчивость, возникающую из-за различия плотностей вещества шаровой молнии и окружающего воздуха, согласно [26] требуется выполнение следующего условия:

$$R \sqrt{g |\Delta\rho| / 2\sigma} < 2,5, \quad (2.13)$$

где  $R$  — радиус шаровой молнии;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\Delta\rho$  — разность плотностей воздуха и шаровой молнии. Эта неустойчивость появляется по той же причине, что и неустойчивость механического равновесия, при котором слой тяжелой жидкости располагается над слоем легкой. Малые возмущения в такой системе начинают аperiodически нарастать, и в результате слой более тяжелой жидкости распадается на отдельные «куски», которые проникают вниз, в легкую жидкость и тонут в ней. В рассматриваемом случае ситуация несколько осложняется тем, что речь идет не о плоском слое, а о сферической капле. Видно, что поверхностное натяжение может стабилизировать систему, так как при  $\sigma \approx 0$  условие устойчивости (2.12) вообще нельзя выполнить. Полагая  $\sigma \approx 10^{-7} \text{ Дж/см}^2$ , получаем, что для устойчивости границы разность плотностей  $\Delta\rho$ , отнесенная к плотности воздуха  $\rho_0 = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ , не должна превышать

$$|\Delta\rho|/\rho_0 < 44/d^2, \quad (2.14)$$

где  $d$  — диаметр шаровой молнии, см. Из последней формулы легко видеть, что интервал допустимых значений  $\Delta\rho$  быстро убывает с увеличением размеров шаровой молнии. В частности, при  $d = 100$  см допустимые относительные отклонения плотности вещества шаровой молнии от плотности окружающего воздуха должны быть меньше 0,5%. Это может объяснить, почему мы практически не наблюдаем шаровых молний, диаметр которых был бы больше метра. Для шаровых молний



средних и малых размеров (меньше 10—20 см диаметром) условие (2.13) не накладывает серьезных ограничений. Например, при  $d=10$  см оно требует только, чтобы плотность вещества молнии отличалась от плотности воздуха не более чем в 2 раза.

Рассмотрим теперь, какие фактические аргументы можно привести в пользу существования поверхностной энергии у вещества шаровой молнии. Прежде всего наиболее распространенными формами, которые принимает вещество, обладающее поверхностной энергией, должны быть сфера, эллипсоид и грушевидная форма, которые в сумме составляют около 98 % указываемых очевидцами для шаровой молнии (см. § 2.2). Наиболее распространенная форма — шар — соответствует минимуму поверхностной энергии и получается, когда тело свободно от действия каких-либо сил. Под действием направленной внешней силы или в результате деформаций при столкновении с другими телами шар принимает форму эллипсоида. Столкновения мы еще будем рассматривать несколько ниже. Что же касается свободно парящей шаровой молнии, то она может принимать эллипсоидную форму, например, под действием электрических полей, приводящих к поляризации ее вещества и наведению на ней электрических зарядов. Добавим, что это возможно только при наличии поверхностного натяжения, так как в противном случае эти силы должны вызвать не деформацию, а распад ее (согласно теореме Ирншоу). Следующая по распространенности в показаниях очевидцев грушевидная форма возникает, когда силы поверхностного натяжения малы, так что отношение капиллярной постоянной к радиусу шаровой молнии, т. е. величина

$$\sqrt{2\sigma/g/\Delta\rho} \quad (1/R),$$

оказывается порядка единицы. Обозначения те же, что и в формуле (2.14). Для того чтобы тело имело сферическую форму, необходимо, чтобы это отношение было много больше единицы. Если добавить к этому, что, как это часто видно из приложенных описаний, неправильная форма отмечалась очевидцами и тогда, когда на поверхности шаровой молнии наблюдались колебания большой амплитуды, приводящие к выбрасыванию ее вещества, то можно сказать, что практически все случаи наблюдения шаровой молнии согласуются или, если

угодно, не противоречат гипотезе о поверхностном натяжении.

Однако наиболее весомые аргументы в пользу существования поверхностной энергии следуют не из формы шаровой молнии, а из ее упорного стремления сохранить сферическую форму при деформациях, иногда очень сильных. По многочисленным свидетельствам очевидцев, некоторые из которых уже были приведены выше, при столкновении с предметами шаровая молния ведет себя подобно упругому шару, т. е. сначала сплющивается в направлении движения, а затем начинает колебаться, то сжимаясь, то расширяясь, как резиновый шар, заполненный несжимаемой жидкостью.

№ 87. Например, М. А. Булыгин пишет в письме, приложенном к анкете, что шар напоминал тело медузы и то вытягивался, то сокращался по направлению движения. При падении шаровая молния иногда несколько раз отскакивала и снова падала на пол.

№ 88. Техник-электрик Р. Т. Бирюкова, находясь в августе 1967 г. в доме родителей, во время грозы с ливнем увидела, как после сильного треска через открытую дверь влетела шаровая молния. Она ударилась о пол и подпрыгнула на высоту 80 см, потом ударилась и подпрыгнула еще несколько раз, каждый раз все меньше и меньше. Наконец, она упала на пол и, не отрываясь от него, стала кататься, рассыпаясь на мелкие шарики, которые в свою очередь разваливались на еще более мелкие — «как ртуть». Они бегали по полу и гасли. Так рассыпался почти весь шар. Остаток размером с «куриное яйцо», покачавшись, угас на полу.

Нередко целостность шаровой молнии сохраняется даже при «взрыве», когда она быстро отлетает в сторону от предмета. Пожалуй, наиболее поразительным примером связности вещества шаровой молнии является то, что она может проникать через узкие отверстия и даже щели, очень сильно деформируясь при этом и вновь восстанавливая сферическую форму после выхода в свободное пространство. Приведем несколько описаний подобных событий.

№ 89. Учительница Н. Г. Горностаева пишет, что в 1949 г. во время грозы молния 20—30 см в поперечнике, появившаяся после сильного удара грома, вошла в комнату через отверстие в стене для заземления.

№ 90. С. Б. Сергеева, также преподаватель, видела, как в 1943 г. во время грозы молния диаметром 10 см ушла в отверстие шириной 1 см, «вытянувшись сосиской».

№ 91. Н. К. Кулешова утверждает, что виденная ею во время

грозы в июне 1951 г. шаровая молния ушла в трещину оконного стекла. Диаметр молнии 10—20 см.

№ 92. Инженер Р. Ш. Ахмеров в июле 1956 г. во время грозы наблюдал, как молния диаметром 30—50 см вошла через маленькое отверстие в окне (отбитый угол стекла) шириной 1—1,5 см в виде «желтой нитки». Прodelав несколько кругов по комнате, она через 20—30 с взорвалась.

№ 93. Инженер-технолог Р. С. Козлов сообщает, что в 1968 или 1969 г. молния диаметром 5—10 см «вошла змейкой» во время грозы через приоткрытую форточку, образовав затем шарик. Пройдя по комнате расстояние 5—10 м за 20—30 с, она исчезла без взрыва около выключателя.

№ 94. И. И. Царев из Владивостока пишет, что в 1962 г. во время сильной грозы шаровая молния диаметром 15—20 см вошла в дом в щель между досками около трубы, при этом доска закоптилась, возник пожар.

№ 95. И. Ф. Ярошенко, слесарь из г. Тольятти, видел в 1966 г., как молния диаметром 10—20 см прошла через отверстие диаметром 8 мм.

№ 96. Инженер-электрик Н. Б. Тюрина сообщает, что молния «размером с теннисный мяч» прошла через закрытое окно, в стекле которого была трещина.

№ 97. В июне 1953 г. в д. Аколово Борисоглебского р-на Ярославской области шаровая молния, по словам очевидца Морозова Е.Н., «втeкла» в отверстие между бревнами в помещение кузницы. Ширина щели была значительно меньше размеров молнии. В кузнице она имела вид шара диаметром 12—13 см оранжевого цвета, светившегося, как лампа 50—100 Вт.

№ 98. В начале июля 1955 г. во время грозы ярко засветилась щель, в которую задвигалась задвижка печки, и в комнату через эту щель начал проникать блиноподобный диск, постепенно принявший форму шара диаметром 15—16 см. Шар поплыл к открытой форточке и вылетел в нее, ничего не задев в комнате. Это произошло в райцентре Щегарка Томской области. Письмо прислала видевшая это происшествие Т. С. Михайлова.

В некоторых письмах имеется довольно подробное описание самого процесса прохождения.

№ 99. Так, Ю. М. Агарков видел с расстояния 15—20 см, как в щель в стене пролезал желтый шарик величиной с крупный апельсин. И уточняет: «он, вернее, не пролезал, а переливался из одной половины в другую».

№ 100. К. К. Потерес из г. Нижнеудинска видел, как шаровая молния прошла в комнату в отверстие в стекле, сплюснвшись, так как размер ее был больше размеров отверстия. Вот что он пишет:

«Шар находился в 10—15 см от наших лиц, и мы хорошо видели, как он стал проходить через отверстие, принимая форму дыни. Он вытянулся, стал меньше диаметром и прошел через отверстие. Когда шар проходил через отверстие и уменьшался в размерах, он как бы все время дрожал, и казалось, что он весь состоит из студня, а с его поверхности постоянно исходили синие лучи длиной около 1,5 см и заканчивались на концах вспышками искр».

Таким образом, в щель проникает не малая по диаметру центральная часть молнии, как иногда полагают, но все ее вещество постепенно переливается в щель. Упорное стремление молнии восстановить свою форму обнаруживается также и при распаде ее на части, которые снова становятся сферическими. Это тоже можно подтвердить рядом полученных нами фактических данных. В литературе имеются сообщения о том, что шаровая молния проникает сквозь оконные стекла и сплошные стены, не причиняя им вреда. По-видимому, это является следствием либо неточной, либо неправильно понятой информации. Можно предположить, что в этих случаях мы в действительности имеем дело с прохождением ее через щели. Это можно иллюстрировать на одном примере из нашей корреспонденции.

№ 101. Учительница Л. А. Хромова, дважды встречавшаяся с шаровой молнией за свою долгую жизнь, прислала подробные и интересные описания этих событий. Второй раз это произошло в г. Фрунзе 14 октября 1980 г. Она кормила на кухне свою правнучку около 14 ч. Погода была пасмурная, но грозы не было. Вдруг она услышала со стороны окна громкий звук, похожий на выстрел. Бросившись к окну, она увидела, что через открытую форточку в кухню входит фиолетовый шар, светившийся, как лампа 100—200 Вт, около 10—12 см в диаметре. Пролетев по комнате к застекленному окну из кухни в ванную, он, как она написала, «проник через стекло» в ванную комнату, причем раздался звук бьющейся посуды (на окне ванной стояло несколько стеклянных банок). Через некоторое время шаровая молния вернулась обратно через то же окно, прошла над бабушкой, застывшей с девочкой на руках, на расстоянии около полуметра, ударилась о металлическую трубу отопления и стала медленно падать вдоль трубы вниз. Раздался звук взрыва и все исчезло. Около трубы стоял прислоненный к ней эмалированный тазик, в котором оказалось много отвалившейся эмали. По оценке все это заняло около 20 с.

В этом письме с большим количеством интересных деталей странным показались только слова прошел «че-

рез стекло». Вот как это происходило на самом деле, как выяснилось из дальнейшей переписки.

Шар подошел к наполовину загороженному окну в ванную и начал толкаться в углу рамы. При этом он вытянулся и ползал по стеклу, как бы ища места, где пройти. Наконец, он дернулся и быстро вошел в ванную, при этом раздался звон разбитой посуды. На обратном пути он прошел уже без задержки через то же место.

Из этого описания видно, что на самом деле шаровая молния не прошла через стекло, а найдя щель между стеклом и рамой и, возможно, слегка проплавив ее, выскочила в эту щель.

На поверхности шаровой молнии часто наблюдают колебания вещества, которые, вероятно, являются капиллярными волнами. В условиях, когда поверхность раздела с воздухом становится неустойчивой, амплитуда этих волн самопроизвольно нарастает и они приводят к выбрасыванию с поверхности капель ее вещества, о чем также нередко сообщают очевидцы. Выше уже приводились описания такого рода явлений. Приведем еще одно наблюдение.

№ 102. В. А. Пономаренко видел шаровую молнию в 1955 г. в г. Пятигорске. Находясь в комнате во время грозы, он услышал сильный хлопок и, обернувшись назад, увидел красный светящийся шар диаметром около 12 см. Шар пролетел 2 м по направлению к наблюдателю, затем повернул на  $90^\circ$ , ударился об стену и взорвался. Поверхность шара была неровная, она была вся покрыта вспучиваниями и бугорками, которые поочередно поднимались и опускались (см. также № 38).

Наконец, еще одним убедительным доказательством существования поверхностного натяжения у вещества шаровой молнии являются брызги: капли вещества, которые слетают с поверхности шаровой молнии. То, что при взрыве шаровая молния разлетается в виде отдельных капель, следует, например, из наблюдений врача В. А. Лагутиной (см. № 5), уже описанных нами ранее. После взрыва на расстоянии около метра у нее на ногах образовались ожоги в виде маленьких пятен. Небольшие темные пятна появились и на крашеном полу. Повидимому, они появились в тех местах, куда попали капли вещества. Напомним наблюдения П. В. Шильникова (см. № 39), согласно которым при взрыве шаровой молнии образовалось много мелких углублений на стене шлакоблочного дома, около которой произошел взрыв.

№ 103. Приведем еще одно описание события, происшедшего

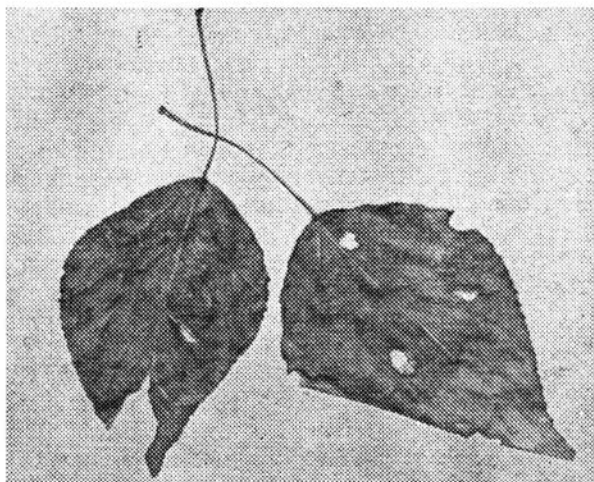


Рис. 2.17. Фотография листьев тополя, сорванных с дерева при взрыве в его кроне шаровой молнии. На листьях видны отверстия, прожженные каплями, разлетевшимися при взрыве вещества шаровой молнии. Листья собрал и прислал очевидец события М. И. Видюков (фото К. И. Алутиса)

12 августа 1978 г. в г. Красновишерске, свидетелем которого был М. И. Видюков. Находясь около окна своей квартиры, он заметил примерно в 5 м от кроны тополя, который рос около дома, светящийся белый шар около 15 см в диаметре, падавший сверху. Попав в крону, шар взорвался. Взрывом было сорвано и опалено некоторое количество листьев. Около дома проходили пять изолированных двухжильных кабелей, один из которых касался ствола дерева. В месте касания этот провод перегорел, испустив облачко светло-сизого дыма. Провод телефона самого автора письма остался цел, но телефон был выведен из строя.

Автор письма собрал и прислал некоторое количество листьев, упавших с дерева. Листья частично обгорели, часть поверхности листа истончилась и сморщилась. Они имели такой вид, как будто их обдало на мгновение горячим воздухом от костра. Интересно, что на некоторых листьях появились, кроме того, небольшие круглые или слегка вытянутые отверстия с обугленными краями. Фотография листьев приведена на рис. 2.17. Можно предположить, что эти отверстия образовались от мелких капель, разлетавшихся от места взрыва. Продолговатые прожоги могли образоваться при касатель-

ном к поверхности листа полете капель. Итак, вещество шаровой молнии разлетается при взрыве в виде мелких капель, аналогичных брызгам жидкости. Это было бы, конечно, невозможно для газоподобной среды. Шаровая молния образует отдельную проводящую фазу в воздухе, граница которой обладает поверхностным натяжением\*.

В течение своей жизни шаровая молния относительно мало меняется, приспосабливаясь к различным условиям, в которые она попадает. В некоторых письмах, полученных нами, содержится довольно детальное описание структуры молнии и изменения ее внешнего вида за время жизни. Достаточно напомнить описание молнии, которую наблюдала в подмосковном лесу группа туристов (см. № 10).

№ 104. Вот сообщение, полученное нами от А. А. Ленской из г. Ярославля. В июле 1974 г. в 14 ч в городе разразилась сильная гроза с ливнем. В открытую форточку окна кухни на втором этаже пятиэтажного здания влетела шаровая молния. Это был однородный желтый шар 20 см в диаметре. По словам автора письма, которая была очевидцем этого явления, шар двигался медленно, горизонтально, плавно, чуть снижаясь; прошел расстояние около 1 м. Он плыл в воздухе, как плавают тело внутри жидкости. Шар оказался на расстоянии вытянутой руки. Попятившись, Ленская вышла из кухни и закрыла за собой застекленную дверь, продолжая наблюдать через стекло за тем, что происходило с шаром. Внутри него стали образовываться «каналы» — тонкие полоски, направленные сверху вниз, зигзагообразной формы. Вокруг каналов вещество стало краснеть. Шар, таким образом, сделался неоднородным и начал казаться сероватым. Затем он, не распадаясь на части и не падая, тихо, без звука исчез. Она сразу же вошла в комнату, но на месте шара ничего не было: ни тепла, ни капелек жидкости. Наблюдение заняло около 30 с.

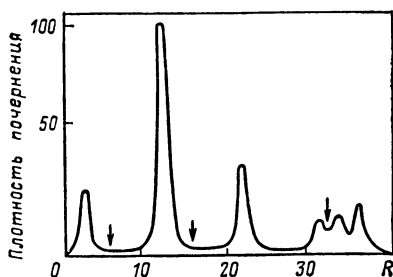
Другой тип гибели молнии описывает М. Т. Дмитриев [17]. Речь идет об уже упомянутом случае на реке Онеге 23 августа 1965 г. (см. № 28), когда после удара линейной молнии над рекой появилась шаровая молния, давшая о себе знать помехами в транзисторном радиоприемнике. Она направилась вдоль цепочки плотов,

---

\* В 20-х годах текущего столетия Е. Матиас (см., например, [2]) предположил, что вещество в канале линейной молнии обладает поверхностным натяжением и из него отделением части канала образуется шаровая молния. С этой гипотезой едва ли можно согласиться, поскольку температура канала линейной молнии — десятки тысяч градусов и ее вещество представляет собой обычную газоразрядную плазму.

стоявших на реке, к берегу и через 30—40 с, пройдя мимо палатки в 3 м от нее, попала в лес. Дальнейшие события Дмитриев описывает следующими словами: «В этот момент то с одной, то с другой стороны от нее стали сыпаться искры. При этом возникал дополнительный и более равномерный треск, и вся картина была весьма похожа на электросварку. Так продолжалось 5—7 раз, причем спустя короткое время после начала искрения молния как бы отскакивала в противоположную сторону, пока не возникло новое искре-

Рис. 2.18. Результаты продольного фотометрирования фотографии следа шаровой молнии [19]: стрелками показаны сечения, в которых было проведено поперечное фотометрирование следа (см. рис. 2.12)



ние уже с другой стороны». Затем цвет молнии стал из белого ярко-красным, после чего она погасла. Все наблюдение длилось 60—65 с.

Судя по отдаче, которую испытывала молния, «искры» были небольшими кусками вещества молнии, которые выбрасывались из нее, вероятно, вследствие развития неустойчивостей.

Фотометрирование следа молнии, о котором говорилось выше, также позволило обнаружить временные изменения состояния молнии, на этот раз периодические. Уже на фотографии В. М. Дерюгина [19] видно, что интенсивность свечения молнии периодически меняется, иногда оно даже вообще пропадает. Продольное фотометрирование следа дало распределение интенсивности почернения вдоль него, представленное на рис. 2.18. Вдоль горизонтальной оси отложено расстояние, пройденное молнией от начальной точки следа, причем в качестве единицы измерения выбран ее радиус (т. е. половина ширины следа). Видно, что интенсивность света периодически менялась в десятки раз (ее максимальное значение условно было принято за 100, тогда как для фона на фотографии она равна 1). Столь сильные изменения степени почернения едва ли можно приписать только изменению скорости движения молнии; ви-



димо, интенсивность свечения действительно периодически менялась. Если принять, что радиус молнии был около 10 см, а скорость движения — около 1 м/с, то время между соседними максимумами — порядка одной секунды. О периодическом изменении интенсивности свечения сообщалось также в некоторых описаниях, приведенных выше (см. № 57, 38).

В заключение выскажем гипотезу относительно причин существования у шаровой молнии двух характерных времен жизни или по крайней мере большого разброса в определении времени ее жизни. Поскольку шаровая молния все время испускает энергию в виде света и тепла, естественно допустить, что вещество, из которого она состоит, или, может быть, один из компонентов этого вещества неустойчивы и распадаются за некоторое время  $\tau_2$ . Это определяет постоянную распада и верхнюю границу жизни шаровой молнии: 50—100 с. В то же время, как это следует из фактов, рассмотренных в данном параграфе, вещество шаровой молнии образует обособленную фазу, которая, естественно, может испаряться подобно жидкости, смешиваясь с окружающим воздухом. Этот процесс многократно ускоряется в условиях, когда фазовая граница по той или иной причине становится неустойчивой. Нарастание возмущений приводит тогда к развитию турбулентной диффузии и выбрасыванию капель вещества с поверхности раздела фаз. В результате вещество шаровой молнии рассеивается в атмосфере и молния может исчезнуть за более короткое время  $\tau_1$ , которое в среднем составляет 5—10 с.\*

Если фазовая граница окажется устойчивой, то шаровая молния будет существовать до тех пор, пока не распадется значительная часть ее вещества. Поскольку скорость испарения растет пропорционально поверхно-

---

\* Взрыв шаровой молнии может оказаться крайней формой распада этого типа, который возникает вследствие протекания через нее импульса электрического тока при стекании зарядов с проводников в воздух. Это приводит к мгновенному «вскипанию» ее вещества и последующему рассеянию его в воздухе. С другой стороны, взрыв может быть связан с началом распада вещества молнии по другому каналу, отличному от обычного. Это может произойти, например, при ослаблении теплоотвода и связанном с ним повышении температуры. Новый канал распада дает начало цепной реакции, что и приводит к взрыву. Такой механизм, в частности, был предложен автором настоящей книги в [26]. Выбор между этими возможностями пока затруднителен. Не исключено, что могут осуществляться оба механизма взрыва.

сти (т. е. пропорциональна  $R^2$ , где  $R$  — радиус шаровой молнии), а запас вещества пропорционален объему, т. е.  $R^3$ , естественно ожидать, что время жизни шаровой молнии будет убывать с уменьшением размеров. Это позволяет понять, почему шаровые молнии малого диаметра (порядка 1 см и меньше) встречаются крайне редко: их вещество просто успевает испариться за очень короткое время. По той же причине быстро исчезают и капли вещества, слетающие с поверхности распадающейся шаровой молнии.

С другой стороны, поскольку время испарения  $\tau_1$  растет с увеличением радиуса, в то время как время распада молекул вещества  $\tau_2$  не должно зависеть от радиуса, следует ожидать, что шаровые молнии больших размеров должны жить в среднем дольше, чаще доживая до своего предельного срока жизни. В этом случае должна наблюдаться положительная корреляция между размерами шаровой молнии и временем ее жизни. Вопрос о том, существует ли такая корреляция, будет рассмотрен в следующем параграфе этой главы.

## 2.9. Корреляции в свойствах шаровой молнии

При исследовании результатов, полученных в опросе NASA, не было найдено ни существенно коррелирующих по своим свойствам групп или типов шаровых молний, ни закономерного изменения во времени этих свойств. В частности, не было обнаружено систематических изменений в свойствах молнии, например в цвете или интенсивности свечения к концу ее жизни. Если дело обстоит действительно так, то это — серьезный аргумент против того, что в молнии накоплен заложенный в нее с момента возникновения определенный запас энергии или вещества. Подобный вывод был сделан Рейлом [7], который считает это аргументом в пользу теорий, предполагающих подпитку шаровых молний извне. Однако полученный в опросе NASA материал слишком ограничен (всего 112 наблюдений), чтобы можно было установить надежные корреляции между свойствами шаровой молнии.

В обзоре [16] высказывается утверждение о том, что шаровые молнии не могут иметь синий или голубой цвет и то, что принимается за шаровые молнии с этой окраской, представляет собой на самом деле огни святого

Эльма. Как уже отмечалось, синяя часть спектра действительно встречается в наблюдениях значительно реже, чем красная, и поэтому естественно было в первую очередь проверить это утверждение на полученном нами материале.

Все шаровые молнии были разбиты по цвету на три группы: в первую включены молнии белого цвета, во вторую—красного, оранжевого и желтого цвета, которые для краткости будем называть «красными», наконец, в третью группу «голубых» молний включаются зеленые, синие, голубые и фиолетовые. Заметим, что в последней группе преобладали голубые молнии, поскольку, как видно из табл. 2.2, зеленые, синие и фиолетовые составляли в сумме не более 30 % этой группы. Исследованы распределения по времени жизни и размерам в каждой группе молний. Чтобы уменьшить роль случайных отклонений, были выделены три группы диаметров: 0—10 см, 10—30 см и больше 30 см и три диапазона времени жизни: 0—10 с, 10—50 с и больше 50 с. В табл. 2.6—2.7 приведены результаты, характеризующие распределение молний по этим группам. Верхняя цифра дает число молний в соответствующей группе, нижняя — долю, которую она составляет от полного числа молний. Цифра в скобках указывает вероятные случайные отклонения  $\sqrt{n/n}$  (в процентах), где  $n$  — среднее число событий, входящих в указанную группу. В последнем столбце даны для сравнения результаты распределения по тем же группам диаметров или времени жизни, полученные из общей гистограммы, включающей все молнии (см. рис. 2.1 и 2.6).

Таблица 2.6

Размер, см	Цвет			Все молнии
	Белый	Красный	Голубой	
0—10	73	106	37	246
	25,8±3 %	20±2 %	30,6±5 %	24,5±2 %
10—30	152	296	57	548
	53,7±4 %	55,8±3 %	47,1±6 %	54,5±2 %
>30	58	128	27	211
	20,5±3 %	24,2±2 %	22,3±4 %	21,0±2 %
Суммарное число наблю- дений	238	530	121	1005

Таблица 2.7

Время наблюдения, с	Цвет			Все молнии
	Белый	Красный	Голубой	
0—10	137 48,4±4 %	220 41,7±3 %	49 41,2±6 %	410 41,8±2 %
10—50	100 35,3±4 %	223 42,2±3 %	47 39,5±6 %	394 40,2±2 %
Больше 50	46 16,3±2 %	85 16,1±2 %	23 19,3±4 %	176 17,9±1 %
Суммарное число наблюдений	283	528	119	980

В нижней строке приведено суммарное число случаев, которое относится к молниям данной группы. Естественно, что общее число белых, красных и голубых молний оказалось в сумме несколько меньше, чем суммарное число молний, приведенное в последнем столбце, поскольку не во всех анкетах, содержащих размер и время наблюдения, был указан также и цвет шаровой молнии. Из приведенных таблиц видно, что имеется несколько большая доля белых молний с малым временем жизни (48 % белых молний живет менее 10 с по сравнению с 42 % в остальных группах). Среди красных молний малые диаметры встречаются несколько реже, чем среди остальных групп (20 % молний с диаметром менее 10 см по сравнению с 25 % белых и 30 % голубых). Наоборот, среди голубых молний малый диаметр встречается несколько чаще обычного. Голубые молнии содержат несколько меньшую долю средних диаметров (10—30 см), чем остальные молнии (приблизительно 47 % против 55 % в остальных случаях). Отклонения, на которых основаны все приведенные выводы, лежат в пределах допустимых погрешностей, и поэтому можно сделать заключение, что существенные различия в распределении по размерам и времени жизни у молний разного цвета отсутствуют. Нет оснований выделять голубые молнии, считая их по природе чем-то отличным от остальных. На это указывает также распределение этих молний по расстояниям, пройденным за время наблюдения, которое обозначено на рис. 2.10 пунктирной кривой. Видно, что оно практически не отличается от того же распреде-

ления всех остальных молний, помеченного кружками. Голубые молнии могут проходить значительные расстояния за время наблюдений. К тому же доля голубых молний, которые прошли расстояние менее 1 м, также не отличается существенно от таковой для остальных. В случае огней святого Эльма естественно было бы ожидать значительного возрастания этой доли.

Мы уже имели возможность отметить, что заметное число молний наблюдалось без связи с грозой. К ним относится около 130 случаев, когда молния появлялась в ясную погоду, и свыше 150 наблюдений, при которых очевидцы считают, что грозы не было, однако небо было пасмурное и, возможно, шел дождь. Хотя эти случаи составляют относительно небольшую долю — около одной четверти общего числа наблюдений, число их все же достаточно велико, чтобы сделать целесообразным статистическое исследование их свойств. На рис. 2.10 приведены данные о расстоянии, которое прошли молнии этих групп за время наблюдения. Крестиками обозначена доля молний, прошедших данное (или меньшее) расстояние (соответствующее абсциссе точки) при наблюдениях в пасмурную погоду без грозы, треугольниками — соответствующее значение для ясной погоды. Из рисунка можно видеть, что первая группа наблюдений не отличается от средних результатов, полученных для всех наблюдений (белые кружки), но шаровые молнии, появляющиеся в ясную погоду, проходят значительно большее расстояние, чем остальные. Так, около половины этих молний проходит расстояние свыше 50 м; расстояние менее 10 м (что приблизительно соответствует слу-

Таблица 2.8

Цвет	Тип молний		Все молнии
	Молнии в ясную погоду	Молнии в пасмурную погоду	
Белый	38 29,0±5 %	44 28,8±4 %	244 26,9±2 %
Красный	71 54,2±6 %	93 60,7±6 %	539 59,5±3 %
Голубой	22 16,8±4 %	16 10,5±3 %	123 13,6±1 %
Суммарное число наблюдений	131	153	906

Таблица 2.9

Размер, см	Тип молний		Все молнии
	Молнии в пасмурную погоду	Молнии в ясную погоду	
0—10	19 12,2±3 %	19 14,2±3 %	246 24,5±2 %
10—30	90 57,7±6 %	66 49,2±6 %	548 54,5±2 %
>30	47 30,1±4 %	49 36,6±5 %	211 21,0±1 %
Суммарное число наблюдений	156	134	1005

чаям наблюдений в помещениях) проходит не 55 %, а всего около 30 % молний. Можно думать, что такое различие является естественным следствием различия в условиях наблюдения: в ясную погоду молнии значительно чаще наблюдают вне помещений, где они проходят большие расстояния.

Обратимся к другим наблюдаемым свойствам молний. В табл. 2.8 приведены данные о цвете молний, причем все цвета спектра снова разбиты на три группы: белые, красные (красный, оранжевый и желтый) и голубые (зеленый, голубой, синий и фиолетовый). Верхняя цифра обозначает число наблюдений в соответствующей группе, нижняя — долю общего числа молний данного типа, указанного в нижней строке таблицы. Цифры в скобках означают границы случайных погрешностей, обратно пропорциональных корню из числа наблюдений в данной группе. Для сравнения в последнем столбце приведены данные для всех молний, взятые из табл. 2.3.

Из табл. 2.8 видно, что среди молний, наблюдаемых в ясную погоду, содержится несколько большая доля голубых (17 % против обычных 14 %) и несколько меньшая доля красных (54 % против 60 %). Впрочем, эти различия также лежат в пределах возможных случайных отклонений.

В табл. 2.9 и 2.10 приведены распределения молний по размерам и времени наблюдения, которые также разбиты на три группы для уменьшения статистической погрешности. Распределение времени жизни молний, замеченных в пасмурную погоду, такое же, как и всех ос-

Таблица 2.10

Время наблюдения, с	Тип молний		Все молнии
	Молнии в пасмурную погоду	Молнии в ясную погоду	
0—10	62 40,5±5 %	33 24,6±4 %	410 41,8±2 %
10—50	63 41,2±5 %	55 41,0±5 %	394 40,2±2 %
>50	28 18,3±3 %	46 34,3±5 %	176 17,9±1 %
Суммарное число наблюдений	153	134	980

тальных. Среди молний, встречающихся в ясную погоду, значительную долю составляют молнии с большим временем жизни (34 % вместо 18 % для времени жизни более 50 с) и значительную меньшую долю—короткоживущие (25 % против 42 % для времени жизни меньше 10 с).

Обе группы, особенно та, которая наблюдалась в ясную погоду, содержат несколько большее число молний большего диаметра (37 % и 30 % против 21 % в среднем для диаметра больше 30 см). Наоборот, молнии с диаметром меньше 10 см, которые в среднем составляют 24 %, в рассматриваемых группах составляют 12—14 %. Эти отклонения заметно выходят за пределы статистической погрешности. Однако не исключена возможность того, что они объясняются просто различием в условиях наблюдения. Если молнии в ясную погоду чаще наблюдаются вне помещения с больших расстояний, то, естественно, длительность их наблюдения оказывается больше и имеется тенденция к завышению их диаметра (светящийся удаленный объект кажется больше, чем на самом деле).

Подводя итоги, можно сказать, что имеются некоторые различия между молниями, появляющимися во время грозы и в ясную погоду. Последние оказываются значительно крупнее и наблюдаются в течение более длительного времени. Однако эти различия не столь велики, чтобы можно было приписать им существенно иную природу по сравнению с «обычными» шаровыми молниями, особенно если учесть разницу в условиях наблюдения.

В начале этой главы мы видели, что по длительности наблюдения (а возможно, и по закону распада) шаровые молнии можно разбить на две группы: короткоживущие с характерным временем распада  $\tau_1=11$  с и долгоживущие ( $\tau_2=54$  с). В исследованной нами совокупности наблюдений обе группы были представлены почти в одинаковых количествах (соответственно 57 и 43 %), в то время как в американских данных преобладали короткоживущие. Естественно, что с течением времени соотношение между этими двумя группами должно меняться в пользу долгоживущих. Поэтому необходимо посмотреть, не меняются ли наблюдаемые свойства рассматриваемой нами совокупности молний с увеличением длительности наблюдения. Если для всех молний в рассматриваемой нами совокупности имелось 57 % короткоживущих и 43 % долгоживущих молний, то среди молний, проживших более 20 с, как нетрудно подсчитать по их периодам распада, будет содержаться 76 % долгоживущих и всего 24 % короткоживущих, а для проживших более 50 с останутся только долгоживущие молнии (96,5 %). При этом из 1000 молний, которые мы имели в начальный момент, через 20 с еще сохранится около 380, а через 50 с — 175 молний — ансамбли достаточно большие для статистической обработки.

Рассмотрим прежде всего, как меняется (и меняется ли вообще) распределение по цвету по мере увеличения в исследуемом ансамбле доли долгоживущих молний. Снова разобьем все молнии на три группы по цвету: белые, красные и голубые — и рассмотрим, какова доля этих групп среди молний, проживших более 20 и более

Таблица 2.11

Цвет	Длительность наблюдения, с		
	$t > 0$	$t > 20$	$t > 50$
Белый	244 26,9±1 %	102 28,6±3 %	49 29,5±4 %
Красный	539 59,5±3 %	207 58,0±4 %	92 55,4±6 %
Голубой	123 13,6±1 %	48 13,4±2 %	25 15,1±3 %
Суммарное число молний	906	357	166



50 с. Эти результаты, а также распределения по группам всех молний ( $t \geq 0$ ) приведены в табл. 2.11.

Как и в приводимых ранее таблицах, в каждой клетке вверху указано полное число молний данной группы, а внизу — доля (в %), которую они составляют от общего числа рассматриваемых в данном столбце молний, и пределы возможных случайных отклонений от среднего значения. Заметим, что суммарное число молний при  $t \geq 0$ , по которым составлено распределение, несколько меньше 1000, поскольку в данную таблицу могли войти только те молнии, для которых кроме времени жизни был указан также и цвет. Всего таких молний было 906 (в то время как полное число молний с указанием времени жизни — 980). Для времени наблюдения  $t \geq 20$  с и  $t \geq 50$  с их оказалось соответственно 357 и 166; общее же количество молний, время наблюдения которых было более 20 и 50 с, составляло 380 и 175 в полном согласии с формулой (2.5). Из табл. 2.11 видно, что в пределах статистической погрешности распределение по цвету практически не меняется со временем, т. е. долгоживущие молнии не отличаются по цвету от короткоживущих.

Рассмотрим теперь распределение по размерам, которое приведено в табл. 2.12.

Таблица 2.12

Диаметр, см	Длительность наблюдения, с		
	$t > 0$	$t \geq 20$	$t > 50$
0—10	246 24,5±2 %	55 14,7±2 %	20 11,4±2 %
10—30	548 54,5±2 %	195 52,3±4 %	87 49,7±5 %
>30	211 21,0±1 %	123 33,0±3 %	68 38,9±5 %
Суммарное число молний	1005	373	175

Первый столбец получен из рис. 2.6, где гистограмма распределения по диаметрам составлена по 1005 наблюдениям. В данном случае мы находим сильную корреляцию между типом молнии (т. е. временем жизни) и ее размером. Доля малых размеров (диаметр до 10 см) уменьшается с 25 % для всех молний до 15 %

для молний, проживших больше 20 с, и до 11 % для молний, проживших дольше 50 с. Наоборот, для больших размеров ( $>30$  см) эта доля растет с 21 до 33 % при  $t \geq 20$  с и доходит почти до 40 % при  $t \geq 50$  с.

Считая, что к моменту  $t=50$  с остаются только долгоживущие молнии, и используя их закон распада, легко вычислить предполагаемое количество долгоживущих молний в начальный момент времени в каждой группе размеров. Поскольку полное число молний в начальный момент в каждой группе известно, можно также найти и количество молний с коротким временем жизни. Результаты приведены в табл. 2.13.

Таблица 2.13

Тип молнии	Размер, см		
	0—10	10—30	$>30$
Короткоживущие	198	336	45
	80 %	61 %	21 %
Долгоживущие	48	212	166
	20 %	39 %	79 %
Суммарное число молний	246	548	211

Итак, в начале наблюдения среди молний с малой длительностью жизни 80 % составляли молнии малых размеров (до 10 см) и только 20 % — больших (больше 30 см). Хотя начало наблюдений не всегда близко совпадает с моментом появления молнии (так же как и конец — с моментом ее гибели), можно все же утверждать, что молнии, имеющие малые размеры, живут в среднем в течение более короткого промежутка времени, и наоборот.

В только что приведенном расчете мы уже применили экспоненциальный закон распада, выведенный для всех молний в целом, к каждой отдельной группе молний, различающихся по диаметру. Справедливость этого, конечно, сама по себе не очевидна, поскольку отклонения от этой закономерности в одной группе могут компенсироваться противоположными отклонениями в другой. Для доказательства того, что это на самом деле не так, применим экспоненциальный закон распада с двумя временами жизни (2.5) для расчета количества мол-

ний в каждой группе диаметров. Используя для каждой группы размеров начальное количество короткоживущих и долгоживущих молний, приведенное в табл. 2.13, можно рассчитать, какое количество молний этого размера должны прожить более 20 с. Полученные результаты можно затем сравнивать с действительным количеством молний такого размера с временем жизни  $t \geq 20$  с (табл. 2.14).

Таблица 2.14

Диаметр, см	Количество молний с временем жизни $t \geq 20$ с	
	Вычислено по табл. 2.13 и формуле (2.5)	Наблюдалось
0—10	55	55
10—30	200	195
>30	122	123

Таким образом, формулой типа (2.5) можно пользоваться при расчете распада молний в каждой группе размеров.

Теперь вернемся еще раз к шаровым молниям, наблюдаемым в ясную погоду. Не относятся ли именно эти молнии к группе долгоживущих? Если бы это было так, то через 10 с их количество должно было бы уменьшиться на 17 %, а не на 24,6 %, как это оказалось в действительности (см. табл. 2.10).

Таким образом, молнии, наблюдаемые в ясную погоду, не все долгоживущие. Из табл. 2.15 видно, что не все долгоживущие молнии наблюдались в ясную погоду.

Таблица 2.15

Тип молнии	Условия наблюдения			Всего
	Гроза	Пасмурно	Ясно	
Молнии с временем жизни больше 50 с	86 52,8±6 %	30 18,4±3 %	47 28,8±4 %	163 100%
Суммарное число молний	699 69,5±3 %	173 17,2±1 %	134 13,3±1 %	1006 100%

Действительно, молнии, прожившие более 50 с, практически все относятся к группе долгоживущих, но, как видно из табл. 2.15, только около 30 % этих молний наблюдалось в ясную погоду. Хотя это заметно больше,

чем для всех молний (13 %), все же основная часть долгоживущих молний — свыше 50 % — появляется во время грозы.

Естественно поставить вопрос, почему же никакие следы корреляции между временем жизни и диаметром не были обнаружены в опросе NASA (у Мак-Нелли корреляции не исследовались)? В начале главы мы уже видели, что в этом опросе содержатся только короткоживущие молнии с временем распада 13 с, а долгоживущие, которые в более широком опросе Мак-Нелли составляли около 14 %, практически отсутствуют. Вероятно, в этом состоит причина того, что у Рейла не были замечены корреляции размеров и времени жизни шаровой молнии.

## **2.10. «Искусственные» шаровые молнии**

В этом параграфе речь пойдет о шаровых молниях, которые иногда появляются в устройствах, созданных человеком. Эти события еще нельзя назвать экспериментальным воспроизведением шаровой молнии по одной очень простой причине: они происходят случайно, а не в заранее запланированном эксперименте, и поэтому единственным средством исследования их, как и обычных шаровых молний, остается наблюдение, а не эксперимент. Все же тщательное изучение таких случаев могло бы пролить свет на исследуемое нами явление, поскольку приборы и установки, в которых они возникают, известны нам несравненно лучше, чем природные условия, в которых появляются естественные шаровые молнии.

К сожалению, такие события происходят крайне редко. Так, на 1500—2000 наблюдений шаровой молнии в естественных условиях приходится всего 20 случаев появления ее в устройствах, созданных человеком. В литературе также имеется некоторое число таких наблюдений, в том числе два наиболее эффектных, в одном из которых, описанном Зильбергом, светящийся шар появился на американской подводной лодке при замыкании аккумуляторной батареи [2]. Второй случай приведен в монографии Бранда [15] (см. также [2]); шаровая молния, описанная в нем, появилась при коротком замыкании мощного генератора электрического тока. Мы, однако, не будем останавливаться на фактах, уже описанных

в литературе, и рассмотрим только новые сообщения, имеющиеся в нашей почте. Первая серьезная трудность, которая возникает при их изучении, состоит в том, что совсем не просто доказать тождественность их природы с природой обычных шаровых молний хотя бы уже потому, что ни та, ни другая пока нам не известны. Кроме того, статистика наблюдений «искусственных» шаровых молний совершенно недостаточна, да и масштабы их обычно заметно отличаются. Перейдем к описанию фактического материала.

№ 105. В 1968 г. в Ростове В. В. Лещенко видел образование светящегося шара при коротком замыкании на подвесном кране. Кроме искр из места контакта появился блестящий шарик диаметром несколько сантиметров. Проплыв горизонтально за 3—4 с расстояния 2,5 м, он взорвался. При этом раздался сильный щелчок, полетели искры и появился слабый дымок.

№ 106. Н. М. Слобожанинов из пос. Майкор Пермской обл., работая в 1930 г. на понижающей трансформаторной подстанции, заметил огненный шар диаметром, как он считает, около 1 м, который появился в камере роговых разрядников. Шар плавно двигался, уменьшаясь в размерах, прошел мимо наблюдателя и затем исчез.

№ 107. Ф. Р. Маджитова из г. Нукус в 1962 г. наблюдала, как из неисправного электрического утюга, который обычно искрил при включении, однажды вместо искр вылетел светящийся шарик голубовато-белого цвета диаметром около 1,5 см. Он пролетел горизонтально по воздуху около 1,5—2 м, пройдя на расстоянии нескольких сантиметров от наблюдателя, и исчез, столкнувшись с железной печкой. Поверхность шарика была зеркально гладкой.

№ 108. Студент ЛГУ С. В. Малявко в 1966 г. видел, как в результате короткого замыкания (розетку на столбе электропередачи замкнули проволокой) появился светящийся шар диаметром 5—10 см. В течение 10—20 с шар проплыл несколько метров, постепенно снижаясь. Цвет его менялся от голубовато-белого до оранжевого. Затем шар исчез, спокойно погаснув на расстоянии 1—2 м от подбежавшего к нему очевидца.

№ 109. Ф. Ф. Семенов, научный сотрудник из Якутска, наблюдал в 1963 г. появление светящегося красного шарика диаметром около 2,5 см при включении в сеть через распушенный пучок тонких проводов настольной электрической лампы. Сначала в месте контакта слышалось потрескивание, а потом из него появился шарик, который на некоторое время повис в воздухе, а затем плавно поплыл вниз, к столу. Коснувшись поверхности стола, он взорвался с громким треском. Наблюдатель находился на расстоянии менее 1 м от шарика. На клеенке на месте контакта осталось темное пятно.

№ 110. В. О. Лазарев, физик из Таллина, в 1960 или 1961 г. в заводской испытательной лаборатории наблюдал, как при включении тока из сигнальной неоновой лампы вылетел светящийся шарик диаметром 2—3 мм. Лампа перегорела. Этот опыт удалось повторить. В момент перегорания неоновой лампочки от стеклянного баллона ее отлетел светящийся шарик диаметром 3—4 мм. Шарик упал на лист ватмана и, подпрыгнув на нем несколько раз на высоту несколько сантиметров, исчез. Однако в дальнейших опытах повторить результат не удалось.

Как видно из этих описаний, чаще всего движущиеся светящиеся шары возникают при коротких замыканиях.

№ 111. Преподаватель физики Н. И. Изелкова сообщила следующее. В 1951 г., когда ей было 8 лет, на кухне в их квартире испортился кран. Тонкая струя воды была вверх, доставая до электропроводки в хлопчатобумажной оплетке. К вечеру кран отремонтировали. Однако через несколько секунд после включения света, видимо, произошло короткое замыкание, свет погас и из того места, куда попадала вода, появился светящийся голубоватый шар 10—15 см в диаметре. Издавая слабое шипение и потрескивание, он прошел примерно в 1—1,5 м от автора письма, опускаясь по параболе вниз. Коснувшись пола, он исчез, не оставив никаких следов.

№ 112. Л. И. Звонарева в июне 1953 г. увидела, как из розетки электрического освещения выскочил светящийся шар оранжевого цвета, когда ее шестилетний сын пытался воткнуть туда два медных провода. Шар был диаметром 25—30 см. Пройдя мимо сына и обогнув мать, он направился на высоте 1,5 м от пола к открытой форточке, около которой он исчез со звуком выстрела. Все это продолжалось в течение 10—12 с.

№ 113. Инженер-технолог В. А. Ярош 1955 г. рождения в возрасте 12—13 лет засунул выводы электрического конденсатора в розетку обычной сети (220 В). Раздался сильный треск, и наряду с искрами из розетки появилось образование, излучавшее бело-голубой свет, размером около 10 см, принявшее грушевидную форму. Оно находилось всего в 5 см от пальцев автора письма. Подскочив вверх примерно на 15 см, шаровая молния стала опускаться на пол со скоростью детского воздушного шара. Было слышно слабое потрескивание. Упав на пол с высоты около 1 м, она начала двигаться медленными скачками, подпрыгивая на полу в сторону батареи отопления. Пройдя так около метра, она исчезла. В тех местах, где она касалась пола, остались ожоги на краске диаметром 1—3 мм.

№ 114. А. Л. Шевченко, инженер из Московского энергетического института, пишет, что при коротком замыкании в его квартире возник светящийся шар диаметром 10—15 см. Место, где произошло

замыкание, было закрыто мебельной стенкой. Раздался хлопок и из щели шириной около 1 мм между мебелью и полом вышел голубоватый шар диаметром 10—15 см. Он прокатился по полу около метра и погас, не оставив после себя никаких последствий. В комнате было темно. Ток в цепи был меньше 6 А, так как пробки не были выбиты. Шар имел правильную форму и слегка размытую границу. Сила света — как у лампы карманного фонаря мощностью 0,5 Вт. Длительность наблюдения — около 1 с. После замыкания в месте контакта загорелась изоляция.

№ 115. Е. А. Мейер, фрезеровщик 42 лет, занимался починкой телевизора. Когда он поднес отвертку к кинескопу, чтобы проверить наличие высокого напряжения, начала проскакивать искра. Раздался треск на кухне. При повторном испытании его дочь, которую он попросил посмотреть, что происходит, сказала, что на кухне проскочила молния от выключателя. День, однако, был безоблачный, жаркий и признаков грозы не было. После семи или восьми повторений разряды прекратились, но раздался треск около места ввода электропроводки и счетчика. Обернувшись, Е. А. Мейер увидел, что около ввода висит оранжевый шар диаметром 10—20 см правильной формы с резкой границей, который светился ровным светом, как лампа 50—100 Вт. Через 10—20 с шар погас. Оказалось, что произошло короткое замыкание, сгорели предохранители и обгорела изоляция на проводах.

№ 116. А вот описание опыта, которое было прислано из г. Барнаула инженером-конструктором Б. И. Сапчаевым. В стакан с соленой водой (соль была добавлена, чтобы сделать воду проводящей) был опущен шнур, подсоединенный к контактам патрона электрической лампы. При включении тока произошло короткое замыкание, в результате которого автоматический выключатель на распределительном щитке выключил ток. В тот же момент, по словам автора, вокруг стакана появился шар голубовато-зеленого цвета диаметром около 25 см. Хотя, как уже было сказано, ток отключился и электрическое освещение погасло, светящийся шар не исчез. Через 2—3 с он с громким звуком раскололся на два шара, которые покатались по столу в разные стороны, распадаясь при этом на более мелкие шары. Докатившись до края стола, шары падали на пол, дробясь на мелкие шарики диаметром около 1 см. Последние разбегались «как ртуть» по полу комнаты, но, пройдя 1,5—2 м, гасли. В течение приблизительно 5 с все прекратилось. Стакан остался цел, хотя часть воды была разбрызгана по столу.

№ 117. Об эксперименте с участием линейной молнии написал А. А. Марвин. К молниевотводу, установленному на геодезическом знаке, был подсоединен изолированный кабель диаметром 2 мм, длиной 12 м, заглубленный в землю на 30 см. Конец кабеля был

выведен над поверхностью земли на высоту 0,5 м и заострен. Перед грозой автор письма расположился в 40—50 м на склоне холма. В геодезический знак ударила молния. По влажной поверхности бревен проскочили огненные струи. Конец кабеля, выходящий из земли, ярко засветился, и над ним образовалась светящаяся масса шарообразной формы диаметром 10—15 см. Она поплыла по ветру, не меняя высоты. Через несколько секунд шаровая молния натолкнулась на бревно и исчезла с громким треском. Больше в течение нескольких лет автору письма не удалось увидеть попадания линейной молнии в то же место, а затем он уехал из этой местности. Все предприятие заслуживает названия эксперимента только потому, что кабель был подсоединен самим автором письма, надевшимся получить таким способом искусственные алмазы.

Таким образом, при коротких замыканиях кроме обычных искр могут образовываться светящиеся и самостоятельно движущиеся шаровидные образования, размеры, время жизни и поведение которых во многом напоминают описания шаровых молний (вплоть до просачивания через щели, упорного стремления сохранить сферическую форму при распаде и т. д.). Такие же образования могут возникать при сильной статической электризации.

№ 118. А. И. Колдомасов, инженер из Куйбышева, сообщил об интересном явлении, наблюдавшемся в 1970 г. на станции, испытывающей водяные насосы в г. Куйбышеве. В ноябре 1970 г. старший инженер К. Д. Варсонович видел, как в помещении станции во время работы появился светящийся шар белого цвета около 10 см в диаметре. Подобные явления наблюдались там неоднократно различными свидетелями: в частности, 1.12.70 мотористом С. Г. Карташевым, 18.1.71 мотористом В. А. Коротковым. Шары взрывались с громким звуком, не причиняя вреда и разбрасывая вокруг себя «искры». Как выяснилось, светящиеся шары появлялись около баков с водой и около фильтра, которые были установлены на резиновых прокладках. На этих баках во время работы накапливались большие электрические заряды. Маленькие шарики диаметром 1,5—2 см появлялись при обдувании фильтра струей воздуха.

На специальном совещании, созванном у начальника испытательной станции 19.01.71, копия протокола которого, подписанная всеми участниками и визированная главным инженером завода, была прислана нам, было решено принять ряд мер по созданию системы заземления водяных емкостей, фильтра и соединительных фланцев. После этого светящиеся шары перестали появляться.



№ 119. Инженер Б. Х. Маджидов сообщил со слов технолога И. И. Литвинова, что светящиеся шары появлялись при окраске деталей на установке «Хандспрей». Они начинали образовываться на потолке и верхней части стены над тем местом, где работала установка, примерно через 1 ч после начала работы, летели по комнате в другой угол и с треском исчезали в ванне с водой. Диаметр шаров был 10—20 см, форма — правильный шар, они светились желтовато-оранжевым светом и проходили расстояние несколько метров за несколько секунд. Установка «Хандспрей» работает на высоком напряжении (80 кВ, постоянный ток 0,45 мА), которое подается для электризации капель разбрызгиваемой струи краски, создаваемой компрессором. Другой (положительный) полюс этого напряжения подается через заземление на окрашиваемую деталь, чтобы красочная суспензия, заряженная отрицательно, перемещалась к детали. Поскольку заземление детали было плохое, значительная часть краски падала на потолок и стены.

Таким образом, можно прийти к заключению, что «искусственные» шаровые молнии возникают, так же как и естественные, там, где скапливаются значительные заряды, которые не могут нейтрализоваться.

№ 120. В заключение остановимся на очень интересном и детальном описании события, которое наблюдал в марте 1977 г. студент Чувашского университета Л. С. Яковлев, поскольку это описание позволяет сделать некоторые приближенные количественные оценки. Он работал тогда рабочим сборочного конвейера на Чебоксарском приборостроительном заводе. В результате нарушения изоляции во время работы под напряжением (38 В) попал металлический стержень паяльника. Случайный контакт стержня паяльника с винтом, удерживающим деревянный борт ленты конвейера и соединенным с массивной металлической опорой, вызвал короткое замыкание. Из места контакта наряду с бело-голубыми искрами выскочило три шарика желтовато-красного цвета. Шарик образовался при ударе паяльника о винт. Два из них имели диаметр около 1 мм, а третий — около 4 мм (3,5—5 мм по оценке очевидца). Первые два сразу погасли, а третий существовал около 4 с и проделал значительный путь, подскакивая на ленте конвейера (рис. 2.19) и оставляя при этом на ней вытянутые в направлении движения шарика следы (скорость движения ленты была небольшой — около 1 см/с). Шарик подскакивал на прорезиненной ленте на высоту около 1,5 см и снова падал на нее, оставляя закопченные следы. Постепенно его диаметр уменьшался и после 10—12 подскоков сделался равным приблизительно 1 мм, после чего шарик исчез. На месте исчезновения не осталось никаких следов металла. Не было сколько-нибудь заметных следов оплавления или испарения металла и на головке

винта, а также на паяльнике. На головке винта остались только следы удара паяльником в виде едва заметных точек, которые можно было хорошо рассмотреть через лупу. Оставленные шариком закопченные следы на ленте позволили определить его траекторию и фиксировать число скачков, которые сделал шарик.

Нетрудно убедиться, что мы не имеем здесь дело с расплавленным металлом. Во-первых, шарик исчез, чего не могло бы случиться, если бы он был жидким или твердым и соответственно содержал бы значительное количество вещества (около 0,3 г). Жидкий металл не мог также испариться, поскольку приток энергии к шарiku отсутствовал, а для испарения потребовалось бы подвести значительную энергию. Однако нельзя исключить заранее возможность того, что шарик представлял собой каплю жидкости в метастабильном состоянии, которая испарилась в течение 3—4 с.

Интересные заключения о веществе шарика можно сделать, рассматривая его движение. Пренебрежем сначала силами трения шарика о воздух, что, как будет видно ниже, возможно, по крайней мере для приближенных оценок. Тогда падение шарика на ленту должно происходить под действием силы тяжести, т. е. равноускоренно. Нетрудно оценить это ускорение. Пренебрегая временем столкновения шарика с лентой и учитывая, что он сделал 11 скачков за 3—4 с, находим, что время, затра-

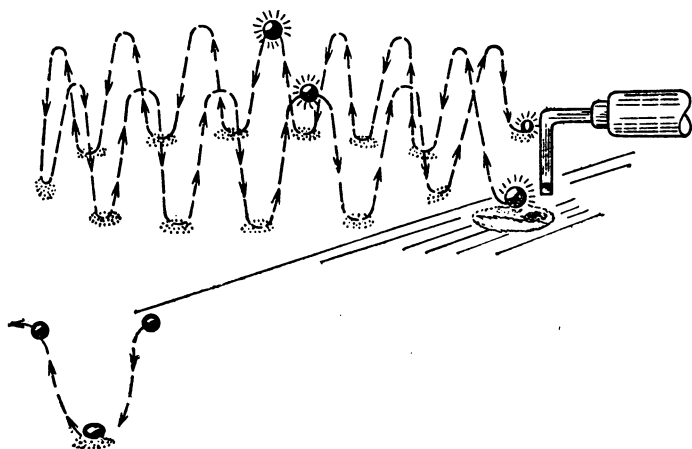


Рис. 2.19. Траектория светящегося шарика, возникшего при коротком замыкании (по рисунку из письма Л. С. Яковлева)

ченное на один скачок, составляет около 0,3 с, т. е. по 0,15 с на подъем и падение отдельно. При высоте  $h = 1,5$  см это дает ускорение  $a = 2h/t^2 = 130$  см<sup>2</sup>/с, что составляет всего 0,14 значения ускорения свободного падения. Такое расхождение нельзя объяснить ошибками наблюдения, так как трудно представить, что можно было бы ошибиться почти в три раза в оценке времени или в 7 раз в оценке высоты, на которую подскакивал шарик. Таким образом, сила тяжести компенсировалась архимедовой силой и плотность вещества шарика  $\rho$  была близка к плотности воздуха  $\rho_0 = 1,29 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>. Учитывая это, находим после несложных вычислений:

$$\rho = \rho_0 / (1 - a/g) = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3, \quad (2.15)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения. Таким образом, шарик представлял собой газоподобную, а не конденсированную среду. При диаметре 4 мм его масса была около  $0,5 \cdot 10^{-4}$  г. Учет силы трения не вносит радикальных поправок в эти расчеты и приводит к значению  $\rho = 1,65 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>.

Возникает вопрос, каким образом маленький газовый шарик более десяти раз подряд упруго отражался от твердой поверхности и не потерял своей формы? Очевидец утверждает, что шарик, в течение всего времени жизни имевший четкие очертания, при ударе о поверхность ленты деформировался, слегка сплющиваясь, так что его вертикальный диаметр сокращался примерно на 20 %, но затем, после соударения, в воздухе он вновь принимал вид правильной сферы. Все это было заметно при первых скачках. В дальнейшем, когда его диаметр стал значительно меньше, сплющивание было трудно заметить. Пользуясь этими данными, можно приближенно оценить энергию единицы поверхности шарика. Предположим, что при падении на ленту шарик диаметром  $2R$  сплющивался вдоль вертикальной оси и превращался в эллипсоид вращения с полуосями  $a, b$  ( $a > b$ ). Полагая в согласии с наблюдением, что  $b \simeq 0,8 R$ , и учитывая, что объем, занятый веществом шарика, при этом не меняется\*, т. е.  $R^3 = a^2 b$ , находим, что  $a^2 = 1,25 R^2$ . Подставляя выражение для  $a$  и  $b$  через  $R$  в обычные формулы для площади поверхности эллипсоида вращения, находим,

\* Постепенное уменьшение объема распределилось на 11 ударов, и поэтому можно считать, что при каждом соударении оно было невелико.

что она превосходит площадь поверхности сферы с радиусом  $R$  на  $\Delta S = 0,084 \pi R^2$ , что составляет при  $R = 0,2$  см около  $10^{-2}$  см<sup>2</sup>.

Приравнивая потенциальную энергию  $mgh = 0,975 \times 10^{-9}$  Дж увеличению энергии поверхности  $\sigma \Delta S$ , находим коэффициент поверхностного натяжения вещества шарика  $\sigma \approx 10^{-7}$  Дж/см<sup>2</sup>.

Итак, плотность и поверхностное натяжение вещества шарика по порядку величины близки к тем, которые можно ожидать у вещества обычных шаровых молний. Отсюда следует, что, по-видимому, природа светящихся шаров, появляющихся при коротких замыканиях, та же, что и у шаровой молнии.

## 2.11. Итоги обработки наблюдений

Подводя итоги, невольно испытываешь некоторое чувство разочарования. На первый взгляд кажется, что статистические опросы не дали ничего существенно нового по сравнению с тем, что человечество знало еще во времена Араго. Светящийся шар диаметром 10—20 см, живущий около 10 с и движущийся по весьма причудливой траектории, — это, в сущности, было известно и более 100 лет назад. Нужно, однако, учесть несколько существенных обстоятельств. Во-первых, надежность сведений, полученных из отдельных наблюдений, невелика. Чтобы эти сведения действительно можно было рассматривать как научно обоснованные данные, необходимо набрать большую статистику. Во-вторых, дело заключается в некоторых важных деталях явления. Например, диапазон называемых диаметров существенно сократился в больших статистически значимых сериях наблюдений, в частности, за счет больших размеров. Авторы обзоров иногда утверждали, что размеры шаровых молний могут составлять метры и даже десятки метров. С другой стороны, разброс времени наблюдений остался столь же большим (от нескольких секунд до длительностей порядка минуты). При этом если диаметр около 1 м составляет редкое исключение, то длительность наблюдения 50—100 с встречается отнюдь не редко и статистический вес таких наблюдений не проявляет тенденции исчезнуть с увеличением размеров выборки. Не исключено, что подобные детали могут иметь существенное значение при выяснении природы шаровой молнии.

Кроме того, можно надеяться, что в настоящее время мы в состоянии указать и нечто большее, чем просто пространственный и временной масштабы явления; мы можем теперь говорить о некоторых существенных чертах, позволяющих сделать первые шаги к раскрытию его природы.

Сформулируем основные выводы, которые можно сделать из анализа наблюдений.

1. Число шаровых молний  $N(t)$ , распавшихся за время  $t$ , определяется следующим выражением:

$$N(t) = N_0 [1 - \alpha_1 \exp(-t/\tau_1) - \alpha_2 \exp(-t/\tau_2)], \quad (2.16)$$

где  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ;  $\tau_1 = 5 \div 10$  с;  $\tau_2 \simeq 50 \div 80$  с;  $N_0$  — число молний в момент  $t=0$ . Доли короткоживущих ( $\alpha_1$ ) и долгоживущих ( $\alpha_2$ ) молний меняются в различных статистических выборках. Для наших данных они приблизительно одинаковы ( $\alpha_1 = 0,57$ ,  $\alpha_2 = 0,43$ ). В американских опросах преобладали короткоживущие молнии ( $\alpha_1 \simeq 0,86$  в ок-риджском опросе [6],  $\alpha_1 = 1$  в опросе NASA [7]).

2. Наиболее вероятный диаметр шаровой молнии равен 10—15 см, а средний диаметр 20—30 см. Распределение размеров шаровой молнии описывается формулой, включающей один характерный размер  $x_0$ :

$$f(x) = \frac{x}{x_0^2} \exp\left(-\frac{x}{x_0}\right), \quad (2.17)$$

где  $f(x)$  — плотность вероятности наблюдения шаровой молнии диаметром  $x$ ;  $x_0 = 11$  см для наших данных и  $x_0 = 16$  см для ок-риджского опроса.

3. Плотность вещества шаровой молнии практически совпадает с плотностью воздуха и обычно лишь немногим превосходит ее, т. е. она составляет вероятно около  $(1-2) \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>.

4. Температура шаровой молнии (не считая момента «взрыва») лишь относительно незначительно превышает температуру окружающего воздуха, достигая, по-видимому, всего нескольких сотен градусов (предположительно 500—600 К).

5. Вещество шаровой молнии является проводником с низкой работой выхода зарядов и поэтому обладает свойством легко рассеивать электрические заряды, накопившиеся на других проводниках.

Контакт шаровой молнии с заряженными проводниками приводит к появлению кратковременных импульсов электрического тока, довольно значительных по силе и проявляющихся иногда на сравнительно большом расстоянии от места контакта. Это вызывает перегорание предохранителей, срабатывание реле, вывод из строя электроприборов и другие аналогичные явления. Электрические заряды стекают со значительной площади через вещество шаровой молнии и рассеиваются в атмосфере.

Взрыв шаровой молнии во многих (не исключено, что почти во всех) случаях является следствием такого кратковременного электрического разряда. Поражения шаровой молнией людей и животных также, по-видимому, связаны с импульсами тока, которые она вызывает.

6. Запас энергии в шаровой молнии может составлять от нескольких килоджоулей до нескольких десятков килоджоулей, в некоторых случаях (особенно при больших размерах молнии), возможно, до ста килоджоулей. Плотность энергии  $1-10$  Дж/см<sup>3</sup>. Однако эффекты взрыва, равно как и оплавления металлов, могут определяться, по крайней мере в некоторых случаях, не энергией самой шаровой молнии, а энергией, накопленной во время грозы в заряженных проводниках и окружающих их электрических полях. Шаровая молния играет в этом случае роль триггерного механизма, включающего процесс освобождения этой энергии.

7. Вещество шаровой молнии образует обособленную фазу в воздухе, обладающую значительной поверхностной энергией  $(0,1 \div 10) \cdot 10^{-7}$  Дж/см<sup>2</sup>. На существование поверхностного натяжения указывают стабильность границы шаровой молнии, в том числе при перемещении ее в окружающем воздухе (иногда при сильном ветре), устойчивость сферической формы и восстановление ее после деформаций, возникающих от взаимодействия с окружающими телами. Необходимо отметить, что сферическая форма молнии восстанавливается и после больших деформаций, сопровождающихся распадом шаровой молнии на части.

Кроме того, на поверхности шаровой молнии нередко наблюдаются поверхностные волны. При достаточно большой амплитуде эти волны приводят к выбрасыванию капель вещества с поверхности, аналогичных брызгам жидкости. Наконец, многими наблюдателями установле-

но, что шаровая молния может проходить через узкие отверстия и даже через щели, сильно деформируясь при этом и восстанавливая сферическую форму после прохождения. Отклонения от сферической формы, о которых иногда сообщают наблюдатели, могут быть обусловлены поляризацией в сильных электрических полях.

8. Шаровая молния может нести электрический заряд, который появляется, например, при поляризации в электрическом поле (особенно если заряды разных знаков по-разному стекают с ее поверхности). Движение шаровой молнии в условиях безразличного равновесия, при котором сила тяжести уравновешена архимедовой силой, определяется как электрическими полями, так и движением воздуха.

9. Наблюдается корреляция времени жизни и размера молнии.

Долгоживущие молнии ( $\tau_2 \simeq 50$  с) оказываются в основном больших размеров (по нашим данным они составляют 80 % среди молний диаметром больше 30 см и только 20 % среди молний диаметром меньше 10 см). Наоборот, короткоживущие молнии ( $\tau_1 \simeq 10$  с) имеют малый диаметр (80 % молний диаметром меньше 10 см и 20 % — больше 30 см).

10. Большинство шаровых молний, возникновение которых могут описать очевидцы, появляются из различных металлических предметов и электроприборов, например из розеток электрических и радиосетей, антенн, радиоприемников, телевизоров, батарей отопления и других приборов и металлических предметов, включенных в сеть или заземленных. Обычно (но не всегда) это происходит во время грозы. Часто шаровая молния появляется при разряде линейной молнии. Однако иногда появлению шаровой молнии может предшествовать вместо разряда линейной молнии интенсивное коронирование проводников. Можно предположить, что шаровая молния появляется там, где накапливается значительный электрический заряд, при мощной, но кратковременной эмиссии этого заряда в воздух.

11. Исчезает шаровая молния в результате взрыва, развития неустойчивостей или из-за постепенного расходования запаса ее энергии и вещества (тихое погасание). Природа взрыва шаровой молнии не вполне ясна. Как уже говорилось выше (см. п. 5), взрыв может быть следствием интенсивного распада при прохождении через

молнию кратковременного импульса тока, нейтрализующего заряды, накопившиеся на окружающих телах.

12. Большая часть молний — около 60 % — испускает видимый свет, относящийся к красному концу спектра (красный, оранжевый или желтый). Около 15 % испускает цвет в коротковолновой части спектра (голубой, реже — синий, фиолетовый, зеленый). Наконец, приблизительно в 25 % случаев молния имеет белый цвет. Мощность излучаемого света — порядка нескольких ватт. Поскольку температура молнии не велика, ее видимое излучение имеет неравновесную природу. Возможно, молния излучает также некоторое количество ультрафиолетового излучения, поглощением которого в воздухе можно объяснить голубой ореол вокруг нее. Однако нет никаких указаний на то, что она может быть источником излучений с более короткой длиной волны, чем ближний ультрафиолет.

13. Теплообмен шаровой молнии с окружающей средой происходит через испускание значительного количества инфракрасного излучения. Если шаровой молнии действительно можно приписать температуру 500—600 К, то мощность равновесного теплового излучения, испускаемого молнией среднего диаметра ( $\approx 20$  см), порядка 0,5—1 кВт и максимум излучения лежит в области длин волн 5—10 мкм.

14. Кроме инфракрасного и видимого излучений шаровая молния, по-видимому, может испускать довольно сильное неравновесное радиоизлучение.



## *Краткий обзор многих в природе шаровой молнии*

### **3.1. Шаровая молния, получающая энергию извне**

В работе академика П. Л. Капицы, опубликованной в 1955 г. [27], приводится интересное сопоставление шаровой молнии и облака раскаленного ионизованного



газа, образующегося при ядерном взрыве. Последнее имеет диаметр около 150 м и высвечивается за время порядка нескольких секунд. Энергосодержание полностью ионизованного газа мало зависит от природы газа и поэтому оно пропорционально объему облака ( $V \sim R^3$ ), а скорость теплоотдачи через излучение пропорциональна площади его поверхности ( $S \sim R^2$ )\*. Поэтому с уменьшением объема ионизованного газа время его высвечивания должно убывать пропорционально радиусу. Следовательно, полностью ионизованный газ в сфере диаметром 10—15 см должен охлаждаться в 1000 раз быстрее, чем облако ядерного взрыва, т. е. за время порядка 10 мс, что приблизительно в 1000 раз меньше действительного времени жизни шаровой молнии.

Эти рассуждения могут быть весьма веским аргументом против того, что шаровая молния имеет высокую температуру. В противном случае они доказывают, что она должна получать энергию извне. Иными словами, если шаровая молния — нагретое до высокой температуры облако ионизованного газа, то она не может поддерживать себя в этом состоянии только за счет внутренней энергии в течение 10 с. Дело в том, что плотность энергии, которая может быть запасена в электронной оболочке, ограничена, и эта энергия не может превышать энергию ионизации атомов вещества. Другим аргументом в пользу существования внешнего источника, питающего молнию, является то, что интенсивность свечения практически не убывает за время ее жизни, как это было бы, если бы молния постепенно гасла от недостатка энергии.

Гипотезы, основанные на внешнем источнике энергии, можно разбить на две группы. В одной из них предполагается, что энергия подводится через излучение электромагнитных волн по волноводному каналу, связывающему шаровую молнию с облаком; в другой — рассматривается поступление энергии с электрическим током по проводящему каналу. Мы будем называть их соответственно волноводными и токовыми гипотезами. В первой группе более всего известна гипотеза П. Л. Капицы [27], в которой принимается, что шаровая молния возникает в пучности электрического поля стоячей электромагнитной волны. Случайное появление небольшого ко-

---

\* Последнее справедливо при условии оптической непрозрачности объекта,

личества свободных электронов приводит при достаточно высокой напряженности поля к лавинной ионизации и появлению сильно ионизованной плазмы в области диаметром порядка  $1/4$  длины волны. При дальнейшем увеличении диаметра электрическое поле падает и скорость ионизации убывает, в то время как теплоотдача растет с увеличением поверхности и это ограничивает рост ионизованной области. Учитывая размеры обычно встречающихся шаровых молний, находим, что длина волны излучения, ионизирующего воздух, должна приходиться на область дециметровых радиоволн (40—80 см).

При отражении от металлических поверхностей пучность электрического поля (т. е. центр шаровой молнии) располагается на расстоянии  $1/4$  длины волны от поверхности, и, следовательно, край должен находиться на расстоянии, равном радиусу молнии. Молния перемещается в основном вдоль поверхности земли в результате движения излучающей области (предположительно облака). Ее движение поэтому не должно зависеть от ветра. В рамках этой гипотезы легко объяснить проникновение молнии через твердые экраны в закрытые помещения (если бы таковое действительно имело место). Если поток радиоизлучения по каким-то причинам прекращается, то нагретый воздух быстро (примерно за 0,01 с) остывает и сжимается. Это приводит к громкому хлопку, который интерпретируется как взрыв. Взрыв с этой точки зрения вообще не связан с выделением энергии. Четочная молния рассматривается как цепочка шаровых молний, образовавшихся в нескольких пучностях стоячей электромагнитной волны.

Перейдем теперь к гипотезам, в которых шаровая молния связана с внешним источником энергии каналом, проводящим ток. В этом случае мы имеем дело с гигантским по масштабу тихим разрядом, связывающим облако с землей. Предположения о том, что шаровая молния представляет собой некоторую разновидность газового разряда, высказывались еще в прошлом веке, равно как и в первой половине текущего столетия [3, с. 145]. В частности, Теплер считал ее кистевым разрядом [3, с. 153]. К этим гипотезам настолько привыкли, что в некоторых монографиях ввели их в само определение исследуемого явления. Так, в книге Р. А. Леонова «Загадка шаровой молнии» [28] со ссылкой на монографию

И. С. Стекольников [29] говорится следующее: «Шаровая молния является сферическим, реже грушевидным, электрическим разрядом большой длительности, который появляется во время грозы». Здесь принято за доказанное то, что на самом деле еще требуется доказать, а именно, что шаровая молния действительно представляет собой разновидность газового разряда.

В работе [30] была высказана интересная мысль о том, что шаровая молния может быть связана с нелинейным характером проводимости газов в сильном электрическом поле. Известно, что в газовом разряде вольт-амперная характеристика, т. е. зависимость тока от приложенного напряжения, в отличие от простого закона Ома для металлов имеет сложный нелинейный вид. Она состоит из нескольких ветвей, так что одному и тому же напряжению может соответствовать несколько разных, иногда различающихся на порядок значений тока. Это встречается, в частности, при загорании тлеющего разряда вместо темного таунсендовского, причем сопровождающийся свечением тлеющий разряд связан с относительно большой плотностью тока. Два устойчивых участка вольт-амперной характеристики, соответствующие этим двум типам разряда, соединены третьим участком, на котором ток растет с уменьшением приложенного напряжения, вследствие чего вся характеристика приобретает S-образный вид. На этом промежуточном участке оба типа разряда могут сосуществовать, причем часть межэлектродного пространства занята светящимся тлеющим разрядом, в то время как другие части остаются темными. Плазма тлеющего разряда иногда собирается в середине межэлектродного промежутка в виде светящейся сферы, не имеющей контактов с электродами. Плотность плазмы и температура электронов, а также потенциал внутри этой сферы значительно выше, чем в окружающем пространстве [31].

Идея, высказанная в [30], состояла в том, что шаровая молния представляет собой промежуточную, переходную форму темного и тлеющего разрядов. При этом внутри молнии возникает разряд с высокими концентрацией плазмы, температурой и плотностью тока, а вне — темный разряд с низкими значениями этих параметров. В [32], где эта идея получила развитие, приводится подробный расчет модели шаровой молнии. В основу расчета положено совместное решение системы уравнений, со-

стоящих из стационарного уравнения переноса тепла (с учетом джоулева разогрева) и уравнения переноса зарядов (тоже стационарного). Учитывается зависимость электрической проводимости и теплопроводности от температуры. Рассмотрен простейший сферически-симметричный случай. Температура в центре шара принимается равной приблизительно 5000 К, а на периферии, на расстоянии 10—15 см, она оказывается около 3000 К. Ток, текущий через молнию диаметром 20 см, составляет несколько десятков ампер. Выделяемая в молнии тепловая мощность равна примерно 10 кВт, и приблизительно столько же выделяется во внешней, несветящейся части молнии, где температура постепенно спадает до температуры атмосферного воздуха. Мощность излучаемого света оказывается порядка 100 Вт. Темный токовый канал, по которому ток подводится к шаровой молнии, имеет диаметр значительно больше диаметра молнии. Плотность тока в нем порядка  $10^{-2}$  А/см<sup>2</sup>, а электрическое поле  $10^2$ — $10^4$  В/см.

Возникновение шаровой молнии можно представить с этой точки зрения следующим образом. После удара линейной молнии остается небольшая часть ее канала, нагретая до высокой температуры. С окончанием разряда ток не прекращается. Теперь яркий искровой разряд сменяется темным, несветящимся разрядом, в котором ток течет вдоль погасшего канала линейной молнии. Воздух здесь содержит повышенное количество ионов, не успевших рекомбинировать. Проводимость этого столба воздуха, заполненного ионами, ширина которого предполагается значительно большей первоначального диаметра канала молнии, принимается порядка  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  м<sup>-1</sup>·Ом<sup>-1</sup>. Движение шаровой молнии возникает от действия магнитного поля тока на тот же ток при нарушении цилиндрической симметрии. Взрыв рассматривается как схлопывание в результате прекращения тока. Впрочем, при резком и сильном возрастании тока может произойти взрыв в обычном смысле этого слова. Тихое погасание происходит при медленном прекращении тока.

Ахиллесовой пятой всех теорий, предполагающих внешние источники энергии, является перемещение шаровой молнии. Молния движется как автономное тело, не связанное какими-либо токонесущими или волноводными каналами. Мы не будем еще раз останавливаться на сложном характере ее движения; они были подробно

описаны выше, в гл. 2. Предоставим самому читателю судить о том, насколько мало они согласуются с представлением о молнии, все время находящейся на конце невидимого поводка, который тащит ее за собой или движется вместе с нею. Неверно, что движение шаровой молнии не зависит от ветра, как это было бы, если бы она на самом деле представляла собой пучность стоячей радиоволны. В действительности шаровая молния скорее напоминает детский воздушный шарик, наполненный газом слегка тяжелее воздуха. Как следует из наблюдений, описанных выше, шаровая молния обладает инерцией. Однако на ее движение оказывают влияние не только металлические предметы, как это было, например, в том случае, когда ее вывели из помещения обыкновенной метлой (см. № 19).

Возникает и еще один вопрос. Почему шаровая молния образуется, как правило, одна? Почему не возникают плазменные густки в соседних пучностях стоячей электромагнитной волны? Ведь появление небольшой затравочной ионизации едва ли представляет собой редкость во время грозы. В конце концов некоторое количество зарядов может попасть из шаровой молнии в соседние точки и положить тем самым начало новым молниям. Почему же этого не случается? Ссылка на четочную молнию (не случайно, все гипотезы этого типа стремятся включить в себя и это явление — оно представляется естественным следствием такого взгляда на шаровую молнию) на самом деле говорит против теории с внешним источником энергии. В самом деле, четочная молния встречается настолько редко по сравнению с шаровой, что нет никаких оснований связывать эти два явления. Об относительной редкости четочных молний мы уже говорили в гл. 1. Добавим также, что сам характер этих явлений тоже совершенно различен, например диаметр отдельных звеньев четочной молнии, судя по фотографиям, во много раз больше диаметра обычных шаровых молний. Резко различается и характер их движения, а также яркость, поскольку четочную молнию всегда наблюдают только с больших расстояний.

Взрыв шаровой молнии — не только хлопок, получающийся от сжатия быстро охлажденного горячего воздуха. При взрыве может выделиться значительная энергия. Волна от взрыва направлена от молнии, а не в нее, как было бы при схлопывании. Некоторые наблюдатели го-

ворят о том, что их обдало волной; молния, попавшая в костер туристов, разметала его в стороны; молния, взорвавшаяся над землей, вымела весь сор из круга диаметром около 2 м и т. д. Слабый эффект взрыва объясняется просто тем, что шаровая молния не имеет прочной оболочки и ее вещество разлетается на начальных стадиях взрыва.

Для компенсации потерь к объему, занятому плазмой, требуется подводить по волноводному или токовому каналу внушительное количество энергии — около 100 Вт на 1 см<sup>2</sup>. В случае волнового механизма требуется, чтобы эта энергия была сосредоточена в узком участке спектра вблизи частот 400—500 МГц, так как в противном случае будет нарушено условие резонанса с плазменным объемом. Наиболее интенсивное радиоизлучение, образующееся при разряде линейных молний, лежит в области десятков килогерц, и даже в этой области его интенсивность на много порядков ниже той, которая требуется для образования и поддержки в нагретом состоянии объема плазмы соответствующих размеров. С ростом частоты интенсивность излучения убывает обратно пропорционально частоте.

Обращаясь к теории токнесущего канала, заметим, что образование и тем более существование в течение десятков секунд такого канала кажется маловероятным. В самом деле, ток силой  $10^{-2}$  А при разности потенциалов в темной части канала  $10^2$  В/см приводит к тепловыделению мощностью 1 Вт/см<sup>3</sup>. Если бы это тепло не отводилось интенсивной конвекцией, то, как указывают авторы [32], оно привело бы к увеличению температуры на 2000 К за 1 с. Конвекция, разумеется, может отвести требуемое количество тепла, но почему в таком случае она не разрушает канал? Ведь конвекция должна приводить к быстрому рассеянию ионов. И уже тем более это относится к самому объему шаровой молнии, в котором выделяется значительно большая мощность. Как при таком большом тепловыделении молния сохраняется и противостоит конвекции в течение многих секунд? Заметим, что переходное состояние разряда, при котором часть межэлектродного промежутка занята плазмой тлеющего или дугового разряда, а остальная остается темной, крайне неустойчиво. Его удастся стабилизировать только в очень узком диапазоне давлений, токов и расстояний между электродами. (При этом расстояние меж-

ду электродами оказывается порядка 1 см и сравнимо с диаметром светящегося шара.)

Настоящая же шаровая молния появляется, как правило, во время грозы, нередко при сильном ветре. Позволительно спросить, как удастся в этих условиях сохранить в течение десятков секунд канал, связывающий облако с землей, т. е. канал длиной, по крайней мере, несколько сотен метров, следящий за весьма сложными движениями шаровой молнии и состоящий из обычного воздуха с небольшой примесью ионов? Канал линейной молнии возобновляется стреловидным лидером через каждые 30—40 мс, да и существует он не более 0,1—0,2 с.

Главное же возражение, пожалуй, состоит в том, что шаровая молния не имеет той высокой температуры, для обеспечения которой и приходится прибегать к внешнему источнику энергии. Гипотеза о внешнем источнике энергии просто оказывается излишней: она создана для объяснения свойства, которое на самом деле не существует. Мы только что видели, что расчет [32] основан на предположении о том, что температура в центре молнии достигает 5000 К; даже на границе молнии ее температура все еще остается 3000 К. Около  $10^4$  Вт выделяется внутри молнии и столько же за ее границей (главным образом на расстоянии порядка радиуса, где плотность тока наибольшая). Чтобы отвести такое количество тепла, требуется сильный конвективный поток горячего воздуха. Кроме того, при таких температурах от молнии шел бы мощный поток теплового инфракрасного излучения. Возможно ли, чтобы на расстоянии меньше 1 м от центра такой молнии не ощущалось никакого тепла? Между тем именно так и было в 269 случаях из 294 (см. гл.2). Наконец, световой поток, как уже говорилось, также составляет в этом расчете около 100 Вт, что эквивалентно (при КПД, равном нескольким процентам) источнику света в несколько тысяч свечей. Это значительно превосходит то, о чем говорят показания очевидцев.

Таким образом, предположение о том, что шаровая молния представляет собой разряд, соединенный токовым каналом с внешним источником энергии, не оправдывается. В заключение статьи [5], к которой мы уже неоднократно обращались, Хамфрейс (перечислив 11 различных видов явлений, которые можно принять за шаровую молнию) ставит вопрос: «Итак, значит нет ничего тако-

го, что можно было бы назвать шаровой молнией?» И отвечает: «Я не знаю. Я знаю только, что многое может быть названо шаровой молнией, что на самом деле является чем-то еще. Возможно, что проволока длиной в 100 футов или, если необходимо, больше, несомая более или менее вертикально в свободном воздухе, когда градиент потенциала очень велик, будет давать на конце кистевой разряд, более яркая часть которого будет заметна и может сойти за шаровую молнию... Это будет редким событием, конечно, но также и настоящей шаровой молнией, если она существует вообще». На протяжении этой книги мне уже столько раз приходилось спорить с Хамфрейсом, что сейчас я рад отметить совпадение наших взглядов (хотя и в весьма ограниченных пределах). Едва ли существует другой токовый канал, кроме названного выше, который мог бы эффективно подводить энергию извне к шаровой молнии. Кончает свою статью Хамфрейс следующими словами: «Идея, часто выдвигаемая, о том, что шаровая молния представляет собой баллон светящегося газа без стенок, кажется, не сделала никакого прогресса на пути ее научного признания». Именно к теориям такого типа мы сейчас и переходим.

### **3.2. Плазменные и химические гипотезы**

В связи с развитием работ над проблемами управляемого термоядерного синтеза наши знания о свойствах и законах удержания высокотемпературной плазмы значительно расширились. Неудивительно, что это привело к новым попыткам объяснения физической природы шаровой молнии. Идея их заключается в том, чтобы представить себе шаровую молнию как плазмоид, т. е. объем, заполненный высокотемпературной плазмой, удерживаемой собственным магнитным полем. То же самое магнитное поле, которое мешает разлету частиц плазмы, может изолировать ее от окружающего воздуха и помешать быстрому рассеянию ее энергии.

Такие плазмоиды с вмороженным в них магнитным полем были получены экспериментально [33]. Магнитное поле создается током, текущим в самой плазме, и естественно, что вся система может существовать только в отсутствие соударений между частицами плазмы, которые приводят к прекращению тока и быстрой диссипации магнитного поля. К счастью, в полностью ионизованной плаз-



ме всегда имеется возможность удлинить время свободного пробега частиц, увеличивая их температуру.

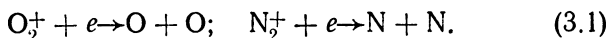
Однако исследования по теории устойчивости [34] показали, что имеются важные ограничения на параметры плазмы, с которыми приходится считаться. Прежде всего оказалось, что система, удерживаемая собственным магнитным полем (в отличие от систем с наложенным внешним полем, к которым относятся, например, токамаки), устойчива лишь при наличии внешнего давления, т. е. плазмод должен находиться в газовой атмосфере. Далее теорема вириала [30] утверждает, что полная энергия плазмоида, складывающаяся из кинетической энергии упорядоченного и хаотического движения его частиц и энергии магнитного поля, не может превышать  $3pV$ , где  $V$  — объем, занятый плазмой,  $p$  — внешнее давление окружающего газа. Это сильно ограничивает энергию шаровой молнии до тысячи джоулей (при атмосферном давлении и радиусе около 10 см). Здесь не учитывается энергия, затраченная на ионизацию, но, как будет видно дальше, вследствие высокой температуры и низкой плотности плазмы она оказывается пренебрежимо малой.

Давление плазмы в плазмоиде не должно сильно отличаться от давления газа вне его, т. е. равно атмосферному в случае шаровой молнии. Кроме того, как уже говорилось, время жизни плазмоида ограничено временем свободного пробега его частиц. Можно подсчитать [30], что для того чтобы оно было порядка 1 с или больше, требуется, чтобы температура плазмы превышала  $10^5$  К и, следовательно, плотность ее (при атмосферном давлении) была в несколько сотен раз меньше плотности воздуха. Такой плазмод будет всплывать, а не тонуть в атмосфере. Верхнюю границу температуры можно получить, учитывая синхротронное излучение электронов в магнитном поле. Естественно, что в результате этого излучения молния не должна терять запасенную в ней энергию менее чем за несколько секунд. При этом оказывается, что температура плазмы должна быть ограничена значением около  $10^7$  К [30].

Новые трудности, как было указано в [30], возникают при сопряжении этой горячей плазмы с окружающим ее холодным воздухом. На границе должно существовать сильное магнитное поле, препятствующее прямому контакту горячей плазмы с воздухом. Близлежащие внешние

слои воздуха должны быть полностью ионизованы и, следовательно, нагреты («скин-слой»). В противном случае нейтральные молекулы свободно пройдут через магнитное поле во внутренние части шаровой молнии. Внешний скин-слой должен иметь уже значительно меньшую температуру, чем плазма в ядре шаровой молнии, и соответственно диссипативные процессы в нем будут протекать достаточно интенсивно. Отсылая за деталями расчетов к [30], сформулируем только общее заключение, которое из них следует. Оболочка плазмоида (внешний скин-слой), окружающая его высокотемпературную центральную часть, должна иметь температуру несколько тысяч градусов. В этой оболочке будет происходить быстрая диссипация энергии, которая должна приводить к быстрому (за время порядка  $10^{-3}$  с) исчезанию шаровой молнии, если подвод энергии извне отсутствует.

Таким образом, модель, основанная на высокотемпературной бесстолкновительной плазме, не выдерживает критики и проблема шаровой молнии не имеет, к сожалению, ничего общего с осуществлением управляемого термоядерного синтеза. Однако приготовить шаровую молнию из обычной низкотемпературной плазмы оказывается ничуть не легче из-за рекомбинации ионов при столкновениях. При не очень высокой температуре атомарные ионы, сталкиваясь с молекулами, превращаются в молекулярные. Например,  $N^+ + N_2 \rightarrow N_2^+ + N$  или  $O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O$ . Константы скорости этих реакций равны  $10^{-11}$  и  $6 \cdot 10^{-10}$  см<sup>3</sup>/с, и, следовательно, при концентрации молекул порядка  $10^{19}$  см<sup>3</sup> все атомарные ионы кислорода за время порядка  $10^{-8}$  с превращаются в молекулярные ионы. Последние быстро рекомбинируют вследствие диссоциативной рекомбинации [35]:



Коэффициент рекомбинации  $\alpha$  для этих процессов порядка  $2 \cdot 10^{-7}$  см<sup>3</sup>/с. Для простоты оценки предположим, что имеется только один сорт ионов. Плотности электронов и ионов тогда, разумеется, равны, и, обозначая их  $n$ , получаем

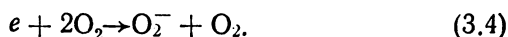
$$dn/dt = -\alpha n^2; \quad (n_0 - n)/n_0 = \alpha t, \quad (3.2)$$

где  $n_0$  — плотность плазмы в начальный момент времени ( $t=0$ ). При  $t=1$  с получаем, что

$$n_0 n / (n_0 - n) \simeq n = 1/\alpha t \approx 0,5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}, \quad (3.3)$$

т. е. независимо от начальной плотности плазмы  $n_0$  уже к концу первой секунды остается ничтожное число еще не рекомбинировавших заряженных частиц.

Правда, при низких температурах в плазме не должно быть свободных электронов, которые прилипают к молекулам, образуя отрицательные ионы:



Константа скорости этой реакции  $k = 3 \cdot 10^{-30} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$  [35], и при  $n_{O_2} \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$  характерное время образования отрицательных ионов  $1/kn_{O_2}^2$  порядка  $10^{-8} \text{ с}$ . Однако положительные ионы рекомбинируют с отрицательными ионами столь же быстро, как и с электронами. Возбужденные молекулы при атмосферном давлении быстро высвечиваются за счет соударений.

Таким образом, остается предположить, что шаровая молния состоит либо из нейтральных молекул в основном состоянии, либо из молекул, возбужденных на метастабильные уровни. В первом случае мы приходим к так называемым химическим гипотезам шаровой молнии. Их родоначальником называют иногда Араго, и для подтверждения этого взгляда, несомненно, есть достаточно оснований. Например, Араго утверждал, что шаровая молния состоит из окислов азота, озона и пропитана «молниевой материей». Впрочем, взгляды Араго на молниевую материю сформулированы в столь общем виде, что любая гипотеза шаровой молнии, основанная на автономном источнике энергии, тоже может при желании вести свою родословную от работ Араго. Гипотезы о химической природе шаровой молнии были высказаны Н. А. Гезехусом [36], В. Торнтоном [3, с. 121], Я. И. Френкелем [37, с. 140], сравнительно недавно Дж. Барри [2], [38] и другими авторами. В этих работах предполагается, что шаровая молния содержит некоторое химическое соединение (обычно называют озон или окислы азота, у Барри речь идет об углеводородах), которое образуется при электрическом разряде и каким-то образом (в объяснении того, каким, собственно, и должен состоять один из важнейших пунктов гипотезы) достигает значительной концентрации в относительно малом объеме. Наиболее детально эта гипотеза разработана Б. М. Смирновым в самые последние годы [39—41]. Именно на результатах этих работ мы и остановимся несколько подробнее, от-

сылая читателей, интересующихся историей вопроса, к существующим обзорам (например, [2], [3]).

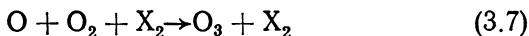
Б. М. Смирнов предполагает, что энергия молнии заключена в озоне и выделяется при его разложении. Атомарный кислород, который получается в больших количествах в канале линейной молнии при разложении молекулярного кислорода, может, как оказывается, при определенных условиях частично превратиться в озон. Обычно атомарный кислород рекомбинирует по схеме



$X_2 = O_2, N_2$ , причем константа скорости реакции  $k_1 = 3 \cdot 10^{-33}$  см<sup>6</sup>/с при температуре 400 К. Число элементарных актов этой реакции в единицу времени и в единицу объема равно  $k_1 n_O^2 (n_{O_2} + n_{N_2})$ , а время поглощения атома кислорода при  $n_{O_2} + n_{N_2} \simeq 3 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> составляет

$$\tau_2 = [k_1 n_O (n_{O_2} + n_{N_2})]^{-1} = 10^{12} / n_O. \quad (3.6)$$

Наряду с этим происходит образование озона по следующей схеме:

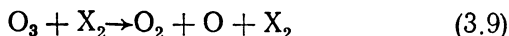


с константой скорости  $k_2 = 6 \cdot 10^{-34}$  см<sup>6</sup>/с. Если атомарный кислород составляет малую примесь к молекулам  $O_2$  и  $N_2$ , то скорость последней реакции, пропорциональная  $n_O$ , а не  $n_O^2$ , может оказаться значительно больше, чем первой. Действительно, время поглощения атома кислорода с образованием озона с,

$$\tau_2 = [k_2 n_{O_2} (n_{O_2} + n_{N_2})]^{-1} = 10^{-5}. \quad (3.8)$$

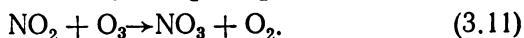
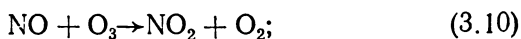
и при  $n_{O_2} \simeq 0,6 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>,  $n_{N_2} \simeq 2,4 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>,  $n_O \ll \ll 10^{18}$  см<sup>-3</sup> (т.е. при концентрации атомарного кислорода порядка или меньше 1 %)  $\tau_2 \ll \tau_1$  и почти весь оставшийся атомарный кислород превращается за время  $10^{-5}$  с в озон.

В дальнейшем озон начинает разлагаться при взаимодействии с остатками атомарного кислорода. Дело в том, что реакция (3.7) обратима, хотя обратная ей бимолекулярная реакция



протекает очень медленно (константа скорости  $k_3 = 2 \times 10^{-22}$  см<sup>3</sup>/с). В результате в равновесной смеси с озоном всегда присутствует некоторое, хотя и очень неболь-

шое, количество атомов О (около  $0,5 \cdot 10^{-7} n_{O_3}$ ). Этот кислород, взаимодействуя с озоном, постепенно превращает его в молекулярный кислород  $O_3 + O \rightarrow 2O_2$  (константа скорости  $6 \cdot 10^{-14} \text{ см}^3/\text{с}$ ). Впрочем, процесс идет очень медленно из-за низкой равновесной концентрации атомарного кислорода. Если в смеси присутствуют окислы азота, то разложение озона происходит значительно быстрее вследствие дальнейшего окисления этих окислов:



Именно эти реакции обычно и определяют время жизни образовавшегося озона. Константы скорости их сильно зависят от температуры [например, для последней реакции  $k = 7 \cdot 10^{-12} \exp(-3520/T)$ ], так что при температуре выше 400—500 К время разложения озона оказывается малым по сравнению с временем жизни шаровой молнии.

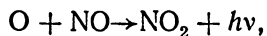
Образование шаровой молнии из канала линейной молнии с рассматриваемой точки зрения представляется следующим образом. Некоторое количество горячего диссоциированного воздуха, выброшенного ударной волной из канала линейной молнии, смешивается с окружающим холодным воздухом и охлаждается столь быстро, что небольшая доля атомарного кислорода в нем не успевает рекомбинировать. По изложенным выше соображениям этот кислород должен превратиться за  $10^{-5}$  с в озон. Допустимая доля горячего воздуха в образовавшейся смеси сильно ограничена, так как температура смеси не должна превышать 400 К, в противном случае образовавшийся озон быстро разложится. Это ограничивает количество озона в смеси значением порядка 0,5—1 % [40]. Для получения более высоких концентраций озона в [41] рассмотрено возбуждение кислорода током молнии. Автор приходит к выводу, что это может привести к возникновению смеси, содержащей до 2,6 % озона. Таким образом, в данном случае разряд молнии действительно входит в предложенную схему как необходимая деталь картины. Это выгодно отличает рассматриваемую гипотезу от других химических гипотез, где собственно разряд не играет, на первый взгляд, никакой роли и остается непонятным, почему шаровая молния так тесно связана с грозой.

Полученная таким образом шаровая молния должна состоять из обычного воздуха, имеющего температуру примерно на 100 К выше температуры окружающей атмосферы, и содержать около 1 % озона (а также некоторое количество окислов азота). Время, в течение которого озон будет разлагаться, рассчитано в [41]. Учитывается, что при разложении озона выделяется тепло, что в свою очередь приводит к увеличению температуры, а следовательно, и скорости реакции. Если пренебречь теплопроводом, то разложение 1 % озона приводит к возрастанию температуры смеси на 50 К. Вследствие этого скорость разложения резко увеличивается со временем. Периоды полураспада озона, вычисленные в [41], оказались равными 1,4 и 0,4 с соответственно при 1 и 3 % озона. Начальная температура смеси принималась равной 400 К, а концентрация ядер азота, входящих в окислы, составляла 10 % концентрации озона. В отсутствие окислов азота время разложения равно в тех же условиях 15 и 2 с. Приведенные времена распада озона совпадают по порядку с временем жизни шаровой молнии. При разложении 1 %  $O_3$ , содержащегося в воздухе при атмосферном давлении, выделяется энергия порядка 300 Дж. Таким образом, энергия шаровой молнии в этой модели заключена между 0,3 и 1 кДж.

Основная цель данной гипотезы состоит в объяснении видимого свечения шаровой молнии. Кроме реакции



в которой максимум интенсивности приходится на ближнюю инфракрасную область спектра ( $\lambda \simeq 1$  мкм), видимый свет излучается также в реакции



где максимум спектральной плотности падает на длину волны около 0,6 мкм. Однако в действительности, как показали проделанные расчеты и эксперименты [42], приведенные реакции, как и вообще химические взаимодействия в системе  $O_3$ — $NO_2$ —воздух, не могут объяснить видимого излучения шаровой молнии. Полученная интенсивность свечения оказывается в действительности на много порядков ниже, чем требуется. Однако, по нашему мнению, дело не в использовании тех или иных конкретных реакций. Все химические гипотезы независимо от механизма, на котором они основаны, обладают

принципиальными недостатками, не позволяющими надеяться, что с их помощью можно объяснить шаровую молнию. Дело в том, что эти теории исходят из допущения о том, что шаровая молния представляет собой облако обычного газа, состоящего из нейтральных молекул. Это, как видно из гл. 2, не подтверждается наблюдениями. Разберем этот вопрос подробнее на примере гипотезы Б. М. Смирнова.

Прежде всего эта гипотеза не в состоянии объяснить форму молнии и ее устойчивость при движении. Облако нейтрального газа не может сохраниться в таких условиях. Ссылки на опыты с горением, которые иногда приводят [3, с. 124], неубедительны, так как масштабы и условия, в которых проводились эти опыты, не соответствуют обстоятельствам наблюдения шаровой молнии. Последняя проходит сотни метров в беспокойной атмосфере, может проникать через узкие отверстия и щели, восстанавливая после этого свою форму, и сохраняется даже при взрыве, отскакивая в сторону и вновь принимая обычный вид. Очень трудно представить себе, что все это возможно только в силу «симметрии поля температур», как полагает Б. М. Смирнов [41]. Кстати, поле температур как раз не будет симметричным вследствие конвективных потоков, возникающих в поле силы тяжести. Ожидать же у среды с плотностью газа поверхностного натяжения можно только в том случае, если ее молекулы заряжены и взаимодействуют по закону Кулона.

Далее, энергия шаровой молнии в рассмотренной выше модели оказывается слишком низкой: порядка нескольких сотен джоулей, в то время как из разобранных в гл. 2 примеров видно, что она должна быть порядка нескольких десятков килоджоулей. Нужно учесть, что потери энергии на излучение за время жизни шаровой молнии именно такого порядка. Попытки увеличить концентрацию озона свыше 1—3 % наталкиваются на принципиальные трудности [40, 41].

Не последней трудностью остается и проблема массы молнии. Выше мы видели, что шаровая молния имеет плотность, превосходящую плотность атмосферного воздуха. Но смесь, содержащая менее 3 % озона и нагретая с самого начала до 400 К, должна быть легче воздуха. По мере разложения озона температура смеси увеличивается примерно до 500 К и плотность ее становится почти вдвое меньше плотности воздуха при комнат-

ной температуре. В итоге молния из смеси озона с воздухом должна всплывать, а не тонуть в земной атмосфере.

Наконец (и это, возможно, самое главное возражение), не видно, как в рамках химических гипотез можно было бы объяснить различные электрические эффекты, связанные с шаровой молнией, которые подробно рассматривались в гл. 2. Газ, состоящий из нейтральных молекул, не может быть проводником, и все описанные в § 2.6 явления оказываются необъяснимыми. Между тем именно они, а не факт длительного свечения, который лишь помогает визуально обнаружить шаровую молнию, представляют наиболее интересные и характерные черты этого явления. Вещество шаровой молнии образует не только особую фазу в воздухе, но фаза эта оказывается проводящей.

Те же перечисленные выше принципиальные трудности, которые возникают в химических гипотезах, остаются и в гипотезах, пытающихся объяснить свечение шаровой молнии высвечиванием возбужденных метастабильных молекул (электролюминесцентные гипотезы, см., например, эксперименты Пауэлла и Финкельштейна, которых мы еще будем касаться ниже в 5.1 [2, 43]). Независимо от успеха или неудач этих гипотез в объяснении длительного свечения воздуха главного в шаровой молнии они и не пытаются объяснить. Поэтому мы снова в конце этой главы возвратимся к гипотезам, в которых шаровая молния строится из заряженных частиц, в данном случае речь пойдет о молекулярных ионах и пылинках.

Гипотезы этого рода были выдвинуты Я. И. Френкелем [37], а в самое последнее время Хиллом [44] (см. также [45]). Остановимся несколько подробнее на гипотезе Хилла. В ней предполагается, что молния представляет собой область, заполненную ионами одного знака или облаками ионов противоположных знаков, отделенными друг от друга. Таким образом, она должна нести большой пространственный заряд. Рассматриваются в основном молекулярные ионы, получающиеся при ионизации сложных органических молекул. Кроме молекул в ней согласно Хиллу может находиться также большое количество заряженных пылевых частиц. Рекомбинация, которая у сложных молекулярных ионов происходит даже быстрее, чем у простых, задерживается тем, что ионы разных знаков разделены в пространстве, а так-



же тем, что значительная часть зарядов связана с мало-подвижными пылевыми частицами. Свечение возникает вследствие пробоя и образования разрядов между противоположно заряженными облаками ионов, а также из-за коронирования частиц пыли.

Каких-либо серьезных количественных расчетов в обоснование высказанных взглядов не приводится. Главная трудность, которая сразу же возникает при любой попытке уточнить количественно эту точку зрения, состоит в громадном значении кулоновских сил, действующих между облаками зарядов. Эти силы приведут к быстрому перемешиванию облаков ионов разного знака и к рекомбинации их или, если вся молния состоит из ионов одного знака, к быстрому (за долю секунды) распаду ее и рассеянию в воздухе.

Особого рассмотрения заслуживают пылинки. Для того чтобы плотность молнии была сравнима с плотностью воздуха, концентрация пылинок должна быть не слишком велика. Пусть  $N$  — число пылинок в  $1 \text{ см}^3$ ;  $r$  — их средний радиус;  $\rho$  — плотность их вещества. Тогда

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho N \leq \rho_0, \quad (3.12)$$

где  $\rho_0$  — плотность воздуха. При выполнении неравенства (3.12) плотность молнии (с учетом воздуха и пылинок, содержащихся в нем) не больше чем вдвое превосходит плотность чистого воздуха. Энергия, заключенная в  $1 \text{ см}^3$ , равна

$$\omega = z E_i N, \quad (3.13)$$

где  $E_i$  — энергия ионизации;  $z$  — среднее число элементарных зарядов, приходящихся на пылевую частицу. По сравнению с  $\omega$  можно пренебречь электростатической энергией пылинок (при  $r \leq 10^{-3} \text{ см}$ ).

Для определения  $z$  рассчитаем максимальный заряд, который можно накопить на частице. Обозначим  $\epsilon_0$  напряженность поля, при которой происходит пробой воздуха:  $\epsilon_0 = 3 \cdot 10^4 \text{ В/см}$  ( $10^2$  в абсолютной системе). Очевидно, что

$$ze/r^2 \lesssim \epsilon_0 \quad (3.14)$$

( $e$  — заряд электрона). Отсюда можно определить  $z$ . Заметим, что найденное таким образом значение  $z$ , а следовательно, и энергия  $\omega$  завышены, так как в действительности заряд начинает стекать с пылинки вследствие коронирования задолго до того, как напряженность

на ее поверхности достигнет  $\epsilon_0$ . Определяя  $z$  из (3.14) и  $N$  из (3.12) и подставляя эти значения в (3.13), находим, что

$$\omega \lesssim E_i \frac{3\epsilon_0}{4\pi e} \frac{\rho_0}{\rho} \frac{1}{r}. \quad (3.15)$$

Полагая  $\rho_0/\rho \simeq 10^{-3}$ ;  $E_i \simeq 10$  эВ  $\simeq 1,6 \cdot 10^{-18}$  Дж, получаем, Дж/см<sup>3</sup>:

$$\omega \lesssim 1,8 \cdot 10^{-10}/r. \quad (3.16)$$

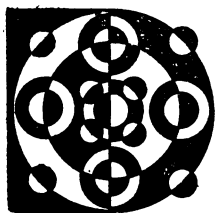
Мы видели в гл. 2, что плотность энергии, заключенной в шаровой молнии, должна быть порядка 1—10 Дж/см<sup>3</sup>. Для этого радиус пылинок, который выражается в (3.16) в сантиметрах, должен быть порядка радиуса атома. Если же ограничиться обычными для пылевых частиц размерами  $r \simeq 10^{-4}$  см, то плотность энергии, запасенной в них (при разумном значении массы молнии), оказывается ничтожной: порядка  $10^{-6}$  Дж/см<sup>3</sup>, что дает для молнии диаметром 10 см запас энергии, равный всего  $4 \cdot 10^{-3}$  Дж. Еще меньшее значение получается для крупных частиц, радиус которых больше 10 мкм (в этом случае основная часть энергии накапливается в электростатическом поле заряженных пылинок).

Оценку верхнего предела электростатической энергии пылевых частиц также легко получить, используя (3.12) и (3.14):

$$\omega' = N \frac{z^2 e^2}{2r} \leq \frac{\rho_0}{\rho} \frac{3\epsilon_0^2}{4\pi r^3} \frac{r^4}{2r} = 3 \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\epsilon_0^2}{8\pi}. \quad (3.17)$$

Отсюда при  $\rho_0/\rho \simeq 10^{-3}$ ,  $\epsilon_0 = 100$  (абс. ед.) находим  $\omega \lesssim 1,2 \cdot 10^{-7}$  Дж/см<sup>3</sup>.

Итак, запас энергии, которая может быть накоплена в шаровой молнии, состоящей из пыли, ничтожно мал. То же можно сказать и о поверхностной энергии вещества из пылинок. В последнее время интересные гипотезы были высказаны в работах И. В. Подмошенского [46, 47], где рассматривалась возможность образования шаровой молнии из мелких пылевидных или нитевидных частиц.



#### 4.1. В чем сущность кластерной гипотезы

Известно, что дипольные молекулы притягиваются к ионам, причем их энергия связи может оказаться весьма значительной. Так, молекула воды имеет дипольный момент  $p = 1,83 \cdot 10^{-18}$  (в абсолютной системе) и, как легко подсчитать, ее энергия связи с однократно заряженным ионом оказывается около 1 эВ, если расстояние  $r$  между ионом и центром диполя составляет  $(2 \div 2,5) \cdot 10^{-8}$  см. Подчеркнем, что в данном случае речь идет только об электростатической энергии, равной  $pe/r^2$  ( $e$  — заряд электрона). Она достаточно велика, чтобы при не очень высоких температурах ион и дипольная молекула образовали прочное соединение. В присутствии большого количества таких молекул у иона может возникнуть устойчивая сольватная оболочка (рис. 4.1). Ион вместе со своей оболочкой составляет фактически одну крупную молекулу — сольватированный ион, который также называют *кластерным ионом* или просто *кластером*. Мы будем рассматривать кластер как прочно связанное соединение положительного или отрицательного иона с оболочкой из нейтральных частиц.

В гидратированных ионах или гидратах кластерная оболочка, состоящая из 3—5 молекул воды, имеет энергию связи около 4 эВ, и она не должна разрушаться от соударений при температуре ниже 1000 К. Естественно предположить, что такая оболочка может помешать рекомбинации. Допустим, что шаровая молния состоит из кластерных ионов. Эта гипотеза была высказана автором настоящей книги в [48]. При низких температурах, характерных для шаровой молнии, свободные электроны соединяются с нейтральными атомами или молекулами, образуя отрицательный ион, который затем сольватируется. Для выполнения условия квазинейтральности количество положительных и отрицательных ионов, есте-

ственно, должно быть приблизительно одинаковым. Кроме кластерных ионов вещество шаровой молнии должно содержать некоторое количество нейтральных молекул в свободном состоянии. Поскольку широко распространенная в природе вода прочно удерживается ионами, речь может идти, вероятнее всего, именно о молекулах воды и соответственно гидратированных ионах.

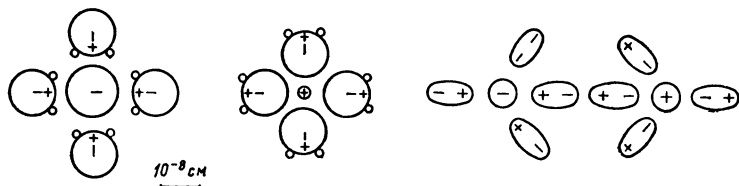


Рис. 4.1. Схематический вид гидратированных ионов: слева — два гидратированных иона, объединившихся в один нейтральный комплекс

Если кластерные оболочки действительно могут задерживать рекомбинацию, то это объясняет, почему шаровая молния существует в течение долгого времени. При этом она, постепенно рекомбинируя, выделяет заключенную в ней энергию ионизации.

Эту энергию можно приближенно оценить. При рекомбинации ионов освобождается около 10—15 эВ. Кроме того, в последующих химических реакциях обычно еще выделяется энергия 3—5 эВ. Так, при рекомбинации ионов  $O^+$  и  $O^-$  образуются два атома  $O$ , которые соединяются затем в молекулу  $O_2$  с выделением энергии 5 эВ. Точно так же ионы  $N^+$  и  $O^-$  после нейтрализации образуют молекулу  $NO$  или молекулярный азот и кислород. В результате энергия, выделяющаяся в конечном счете при нейтрализации пары ионов, составляет 15—20 эВ. Необходимые затраты энергии таковы: во-первых, на разрушение кластерных оболочек двух ионов должно уходить около 6—8 эВ; во-вторых, на диссоциацию отрицательного иона на электрон и атом нужно затратить еще 1—2 эВ. С учетом этого каждая пара кластерных ионов может дать при рекомбинации 5—10 эВ. Если в  $1 \text{ см}^3$  вещества молнии содержится около  $0,5 \cdot 10^{19}$  пар ионов, то плотность энергии, заключенной в нем, составляет 5—10 Дж/см<sup>3</sup>. В таком случае молния с наиболее вероятным диаметром (20 см) несет в себе энергию,

равную 20—40 кДж. Это согласуется с оценками, приведенными в гл. 2.

Весьма важным преимуществом высказанной точки зрения является простое решение проблемы массы шаровой молнии. Сольватные оболочки делают кластерные ионы очень тяжелыми, и это компенсирует уменьшение плотности вследствие повышения температуры. Гидратная оболочка из четырех или пяти молекул воды имеет молекулярную массу, равную 72—90, к которой надо добавить еще массу самого иона. Вследствие этого даже при температуре вдвое более высокой, чем температура окружающего воздуха, и при значительном содержании свободных молекул воды плотность вещества молнии все еще может быть больше плотности воздуха в обычных условиях.

К тому же плазменные среды, частицы которых взаимодействуют по закону Кулона, обнаруживают свойства, сходные с поверхностным натяжением жидкостей. Степень ионизации рассматриваемого нами вещества оказывается весьма значительной, поскольку заметная часть нейтральных молекул в нем связана в кластерных оболочках. На расстоянии, значительно превышающем радиус кластерного иона, его электрическое поле такое же, как и у обычного иона. Как уже отмечалось, поверхностное натяжение дает возможность объяснить некоторые свойства шаровой молнии, начиная от формы и кончая устойчивостью.

Нетрудно набросать также качественную картину излучения шаровой молнии. При сравнительно высокой температуре ее вещества (500—600 К) колебания молекул в гидратных оболочках ионных кластеров должны быть заметно возбуждены. Вследствие этого следует ожидать черное излучение в инфракрасной области спектра ( $\lambda \simeq 5 \div 10$  мкм, энергия переходов 0,1—1 эВ). Однако видимое излучение молнии имеет неравновесный характер. Вероятно, оно возникает при рекомбинации двух кластерных ионов, которая сопровождается выделением около 10 эВ. Освободившаяся энергия в начале распределяется приблизительно на 10 молекул, из которых состоят два кластера. Пока эта избыточная энергия не будет передана окружающим частицам через столкновения, вещество рекомбинировавших кластеров будет нагрето до очень высокой температуры:  $10^4$  К (в среднем около 1 эВ на частицу). Для охлаждения этого ве-

щества требуется несколько десятков соударений с холодными молекулами из-за значительного количества частиц, участвующих в процессе. Можно предположить, что в таком состоянии некоторая (хотя в среднем очень небольшая) доля энергии будет уноситься в форме видимого или даже ультрафиолетового излучения.

Движение ионов в веществе молнии может сопровождаться радиоизлучением. Интенсивность дипольного излучения частицы, несущей заряд  $e$  и движущейся с ускорением  $a$ , определяется, как известно, формулой

$$J = 2e^2 a^2 / 3c^3. \quad (4.1)$$

Ускорение иона в поле другого иона равно

$$a = e^2 / Mr^2. \quad (4.2)$$

Полагая массу кластера  $M \simeq 80 \cdot 1,6 \cdot 10^{-24}$  г, расстояние  $r$  равным среднему расстоянию между ионами (при плотности заряженных частиц  $10^{19} \text{ см}^{-3}$   $r \simeq 5 \cdot 10^{-7}$  см), находим, что мощность дипольного излучения из  $1 \text{ см}^3$  равна,  $\text{Вт/см}^3$ ,

$$10^{19} J = 3 \cdot 10^{-7}. \quad (4.3)$$

Молния диаметром 20 см должна излучать около  $10^{-3}$  Вт энергии. Частоту излучения  $\nu$  можно оценить приравняв ускорение  $a$  (4.2) к центростремительному ускорению  $4\pi^2 \nu^2 r$ ; отсюда получаем  $\nu \simeq 20$  ГГц. Это соответствует излучению радиоволн в сантиметровом диапазоне. Мощность, подсчитанная по формуле (4.3), на несколько порядков превосходит мощность равновесного радиоизлучения при температуре 600 К. Из приведенных формул видно также, что шаровая молния не может содержать сколько-нибудь значительного количества свободных электронов. В самом деле, из-за малой массы ускорение электрона в  $1,5 \cdot 10^5$  раз больше, чем ускорение гидратированного иона, а излучаемая мощность — соответственно в  $2 \cdot 10^{10}$  раз больше. Шаровая молния диаметром 20 см излучала бы при этом около 10 МВт, или приблизительно 2 кВт/см<sup>3</sup> (при концентрации электронов  $0,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ). Это привело бы к высвечиванию всей энергии молнии приблизительно за  $10^{-3}$  с.

Для объяснения причины взрыва шаровой молнии можно допустить наличие двух каналов рекомбинации кластерной плазмы. Один из них связан с тем, что в системе, состоящей из кластерных ионов, всегда должно

содержаться некоторое, хотя и экспоненциально малое, количество ионов, лишенных полностью или, по крайней мере, частично своих кластерных оболочек. Так как плотность таких ионов (см. § 4.2) экспоненциально убывает с уменьшением температуры [ $\sim \exp(-E/T)$ , где  $E \simeq 2 \div 3$  эВ], а скорость рекомбинации пропорциональна произведению концентраций положительных и отрицательных ионов, то при низких температурах этот канал рекомбинации будет подавлен и рекомбинация идет по другому каналу — через наиболее распространенные кластерные ионы, имеющие большие сольватные оболочки. Два таких разноименно заряженных кластера образуют при столкновении довольно рыхлую нейтральную систему, которая с определенной, предположительно небольшой, вероятностью может рекомбинировать. В большинстве же случаев она снова распадается под воздействием окружающих частиц на два заряженных кластерных иона. Так как плотность наиболее распространенных ионов (в отличие от примесей ионов, лишенных оболочек) практически не зависит от температуры, то скорость рекомбинации в этом канале сравнительно слабо зависит от температуры. При достаточно низкой температуре, обычной для вещества молнии (предположительно 500—600 К), первый канал «подавлен» и рекомбинация идет в основном по второму каналу. Это приводит к установлению стационарного состояния, при котором тепло, выделяющееся в объеме молнии, успевает отводиться от него. Такое состояние оказывается устойчивым в определенном интервале температур, в результате чего шаровая молния существует до тех пор, пока не израсходуется запас ее энергии или пока не нарушатся условия, обеспечивающие ее целостность как единого тела (условия затухания колебаний поверхности). В первом случае молния спокойно погаснет, во втором развалится, выбрасывая из себя «искры».

Однако с ростом температуры роль первого канала в процессе рекомбинации резко возрастает. Вследствие сильной зависимости скорости рекомбинации от температуры в этом канале стационарное состояние становится неустойчивым, так как выделяющееся тепло не успевает отводиться. В результате температура повышается, что в свою очередь увеличивает скорость рекомбинации. Возникает цепная реакция, которая оканчивается взрывом.

Особенно важно то, что с точки зрения кластерной гипотезы можно легко понять появление импульсов тока при контакте шаровой молнии с проводниками. Кластерные ионы легко могут выходить из такой «рыхлой», почти газообразной системы, какой является шаровая молния. При контакте с проводниками, на которых сохранились заряды, ионы противоположного знака по отношению к знаку заряда проводника будут двигаться внутри шаровой молнии к месту контакта с проводником и нейтрализовать его заряд. При этом, конечно, будут возникать токи и в самих проводниках, действие которых может быть замечено на больших расстояниях от места контакта. Одновременно через свободную поверхность шаровой молнии начинается сильная эмиссия ионов того же знака, что и заряд проводника. Это должно привести к быстрому распаду, что также может восприниматься как взрыв. При значительной разности потенциалов приближение шаровой молнии вызывает пробой воздушного промежутка между ней и проводником.

## 4.2. Кластеры и кластерные оболочки

Какие имеются основания считать, что кластерные, в частности гидратные, оболочки ионов могут задерживать рекомбинацию? Со времени появления теории электролитической диссоциации известно, что именно это и случается в растворах, если теплота сольватации превосходит энергию, выделяющуюся при рекомбинации ионов. Нас интересуют, однако, не растворы, а газовое состояние вещества. О том, что оболочки из нейтральных молекул могут образовываться около ионов и в газовой фазе, известно уже давно. Ланжевен и Томсон более полувека назад обнаружили аномально низкую подвижность ионов в воздухе, приписав это тому, что они покрываются «шубой» нейтральных частиц, прочно связанной с ионами. Так впервые был введен термин кластер [49].

В шестидесятых годах этого столетия кластеры типа  $H^+(H_2O)_n$ ,  $NO_3^+(H_2O)_n$ ,  $CO_3^+(H_2O)_n$  ( $n=1\div 3$ ) и ряд других были обнаружены в больших количествах в D-слое ионосферы [50]. Интересно, что это произошло на таких высотах, где пары воды практически отсутствуют: они вымерзают из-за низкой температуры стратосферы и поднимаются выше уровня 20—30 км лишь в очень



небольших количествах. Поэтому вначале предполагали, что результаты масс-спектрографических исследований ионного состава, полученные на ракетах, ошибочны. Вода могла быть занесена туда в виде продуктов сгорания ракетного топлива. Однако в дальнейшем выяснилось, что это не так. В конце концов было установлено, что ионы типа  $H^+(H_2O)_n$  являются наиболее распространенными ионами в ионосфере ниже высот 80—85 км, а отрицательные гидратированные ионы преобладают над концентрацией свободных электронов, начиная с высоты около 70 км (и ниже).

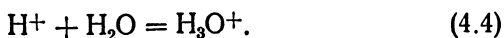
Естественно задать вопрос: как ионы  $H^+(H_2O)_n$  образуются из первичных ионов  $O^+$  и  $NO^+$ , возникающих вследствие ионизации солнечным излучением атомов основных нейтральных компонент на этих высотах? К началу 70-х годов этот вопрос также был выяснен. Оказалось, что в результате ряда ионно-молекулярных реакций ионы  $O^+$  и  $NO^+$  действительно должны превращаться в  $H^+(H_2O)_n$ , причем на промежуточных стадиях образуются такие ионы, как  $O_2^+O_2$ ,  $O_2^+(H_2O)$ ,  $(NO)^+N_2$  и т. д. Мы не будем останавливаться на этой проблеме, но заметим, что экспериментальные исследования, проведенные при ее решении, весьма важны и для нас, так как именно в этих исследованиях были определены энергия гидратации ионов, а также константы равновесия и скорости реакции гидратации при различных температурах.

Вернемся теперь к вопросу о том, может ли кластерная оболочка помешать рекомбинации ионов в газовой фазе. Нам представляется это бесспорным, по крайней мере в тех случаях, когда энергия гидратации превосходит энергию, выделяющуюся при их рекомбинации. То, что это не исключено для газовой фазы, видно из табл. 4.1, в которой приведены экспериментально измеренные значения энергии связи молекул воды (эВ) в гидратных

Таблица 4.1

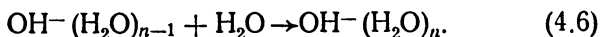
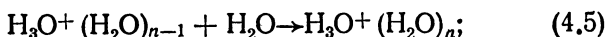
$\Delta H$	$n-1;$ $n$	$n-1;$ $n$	$n-1;$ $n$	$n-1;$ $n$	$n-1;$ $n$	$n-1;$ $n$	$n-1;$ $n$
	0; 1	1; 2	2; 3	3; 4	4; 5	5; 6	6; 7
Для $H_3O^+(H_2O)_n$	1,56	0,97	0,74	0,67	0,57	0,51	0,45
Для $OH^-(H_2O)_n$	1,1	0,71	0,66	0,62	0,61	—	—

оболочках ионов  $\text{H}_3\text{O}^+$  и  $\text{OH}^-$  [51], [52]. Заметим, что ион  $\text{H}_3\text{O}^+$ , так называемый ион оксония, является по существу продуктом гидратации протона одной молекулы воды:



Однако энергия связи (7, 18 эВ), выделяющаяся при этой реакции, так велика по сравнению с энергией связи последующих молекул воды, что удобнее говорить о гидратации иона  $\text{H}_3\text{O}^+$ , а не протона. В соответствии с этим мы часто будем писать формулы ионных гидратов протона в виде  $(\text{H}_3\text{O})^+(\text{H}_2\text{O})_n$ , а не  $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ .

В табл. 4.1 приведены значения энтальпии  $(\Delta H)_{n-1,n}$  реакций



Из таблицы видно, что энергия связи гидратной оболочки из семи молекул воды иона  $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_7$  составляет около 5,4 эВ. Почти такой же (около 4,5 эВ) должна оказаться энергия образования гидратной оболочки иона  $\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})_7$ . Правда, теплота гидратации этого иона при  $n=6-7$  не измерена, но видно, что она близка к  $\Delta H$  для гидрата иона оксония  $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$  при одинаковом  $n$ . Учитывая энергию связи  $\text{H}^+$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в ионе оксония (7, 18 эВ), находим, что для разложения двух кластерных ионов  $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_7$  и  $\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})_7$  на  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$  и 15 молекул  $\text{H}_2\text{O}$  требуется энергия 18,8 эВ. В то же время при рекомбинации протона с электроном выделяется всего 13,5 эВ. Даже с учетом того, что образовавшийся при этом атом водорода может соединиться с группой  $\text{OH}^-$ , образовав еще одну молекулу воды и выделив около 5 эВ, получаем значение 18,5 эВ. Рекомбинация в этих условиях приводила бы к увеличению внутренней энергии. Как будет показано ниже, при атмосферном давлении и температуре меньше 500 К именно такие кластеры с  $n \simeq 7$  оказываются наиболее распространенными в смеси ионов и паров воды.

Итак, в газовой фазе, казалось бы, могут возникнуть условия, когда рекомбинация ионов энергетически невыгодна, подобно тому как это случается в растворах электролитов. Однако суть гипотезы, которую мы сейчас обсуждаем, состоит не в этом. В рассмотренном выше

случае система гидратированных ионов оказывается энергетически устойчивой; она не может служить источником энергии. Нас интересуют условия, когда рекомбинация, несмотря на то что она все еще происходит с выделением энергии, заторможена, т. е. случаи метастабильного, неравновесного состояния системы. К сожалению, экспериментальные подтверждения этого факта пока отсутствуют. Измерены только сечения рекомбинации положительных гидратированных ионов оксония со свободным электроном [53]. Коэффициент рекомбинации с электроном оказывается большим и растет с увеличением числа молекул в гидратной оболочке кластеров от  $10^{-6}$  для  $\text{H}_3\text{O}^+$  до  $10^{-5}$  см<sup>3</sup>/с для  $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_5$ . Этого и следовало ожидать из-за увеличения их геометрических размеров. Однако коэффициенты рекомбинации положительных и отрицательных гидратированных ионов при  $n=3\div 5$  измерены не были.

Появлению таких метастабильных состояний для систем из кластерных ионов в газовой фазе способствует то, что в отличие от растворов ионы разных знаков не находятся в постоянном контакте друг с другом. Конечно, при неупругих соударениях возможно образование нейтральных кластеров, в которых противоположно заряженные ионы, разделенные оболочками, связаны в одну частицу (см. рис. 4.1). Однако энергия связи таких больших образований, по-видимому, невелика и они, вероятно, легко распадаются при повышенной температуре.

Для выяснения вопроса о том, в какой степени кластерные оболочки мешают непосредственному контакту ионов при соударениях, важно понять, насколько наши наглядные представления о ионах как о заряженных шариках определенного радиуса соответствуют действительности. Структура иона оксония напоминает молекулу воды (рис. 4.2, *a, z*): их диаметры близки между собой и составляют около  $2 \cdot 10^{-8}$  см. Если полностью заполненная первая гидратная оболочка состоит, как это обычно считают, из трех или четырех молекул воды, плотно упакованных вокруг иона, то диаметр такого кластера должен быть около  $6 \cdot 10^{-8}$  см, а сечение столкновения двух кластеров  $\pi D^2 \simeq 10^{-14}$  см<sup>2</sup>. Это до некоторой степени подтверждено экспериментально в работах по изучению рассеяния ионов  $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$  с энергией 10—60 эВ на атомах He [54—56]. К сожалению, в них измерялось только относительное сечение рассеяния кластеров с раз-

ными  $n$ . При переходе от иона  $\text{H}_3\text{O}^+$  к  $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_3$  и от иона  $\text{OH}^-$  к  $\text{OH}(\text{H}_2\text{O})_3$  поперечное сечение возрастает приблизительно в 6 раз, что указывает на увеличение диаметра в 2,5 раза. Ионы  $\text{OH}^-$  и  $\text{H}_3\text{O}^+$  имеют практически одинаковые диаметры, равные диаметру молекулы воды ( $2 \cdot 10^{-8}$  см).

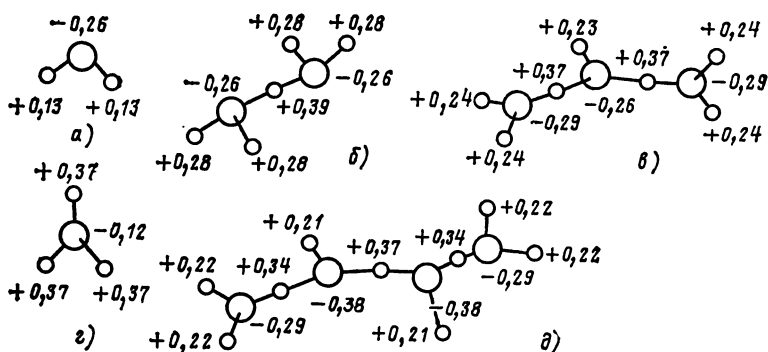


Рис. 4.2. Различные возможные структуры гидратированных ионов атома водорода:

а — молекула воды; б, в, д — цепочная структура ионов  $\text{H}_3\text{O}_2^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}_3^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}_4^+$ ; в — ион оксония  $\text{H}_5\text{O}^+$ ; О — атомы кислорода; О — атомы водорода (указаны заряды атомов в единицах заряда электрона, рассчитанные численно [57])

С учетом указанных размеров можно рассчитать энергию связи молекулы воды с ионом как энергию взаимодействия точечного заряда с диполем. Нужно принимать во внимание, конечно, и геометрию расположения диполей в молекуле воды (положительный конец диполя находится дальше от центра молекулы, чем отрицательный). Такой расчет дает довольно хорошее совпадение вычисленных значений энергии связи с их экспериментальными значениями. При  $n > 3$  или 4 начинается следующая гидратная оболочка; при этом становятся заметными взаимодействия между молекулами в оболочках. Конечно, истинную структуру гидратированных ионов может дать только квантовая механика, но соответствующие квантовомеханические расчеты очень сложны.

Кроме энергии связи важно знать также пространственную структуру иона и распределение в нем заряда. Действительно ли заряд иона оказывается запертым

внутри кластерной оболочки, и не может ли он выходить на поверхность иона? Хотя казалось бы энергетически выгоднее иметь заряд внутри кластера окруженным диполями, но по аналогии с проводящим заряженным шариком можно ожидать распределение заряда иона по поверхности гидратной оболочки.

К сожалению, структура гидратированных ионов пока еще не установлена. Даже для кластеров с неболь-

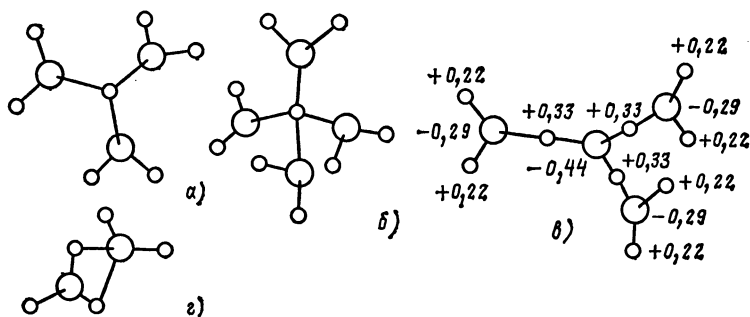


Рис. 4.3. Возможные структуры гидратированных ионов атома водорода:

*a, б* — протоноцентрированные структуры  $\text{H}_3\text{O}_3^+$ ,  $\text{H}_5\text{O}_4^+$ ; *в* — оксониевая структура  $\text{H}_9\text{O}_4^+$ ; *г* — кольцевая структура  $\text{H}_5\text{O}_2^+$  (обозначения те же, что и на рис. 4.2)

шим  $n$  предлагаются различные структурные формулы. Например, для  $\text{H}_5\text{O}_2^+$  можно нарисовать цепочную (рис. 4.3, б) и кольцевую (рис. 4.3, г) структуры. Что же касается более сложных кластеров, то здесь число возможностей быстро растет. Так, для  $\text{H}_9\text{O}_4^+ = \text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_4 = = \text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_3$  предлагаются цепочная (рис. 4.2, д), протоноцентрированная (рис. 4.3, б) и оксониевая модель (рис. 4.3, в). Аналогично и для  $\text{H}_7\text{O}_3^+ = \text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_3$  имеются цепочная (рис. 4.2, в) и протоноцентрированная (рис. 4.3, а) структуры. Последняя основана на том, что в центре кластерного иона находится протон, который окружен со всех сторон молекулами воды, обращенными к нему отрицательными концами своих диполей. В отличие от этого на рис. 4.3, в представлена структура с ионом оксония в центре, гидратированным симметрично расположенными около него тремя молекулами воды. При этом формулу иона естественно писать в виде

$\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_3$ , в то время как для протоноцентрированной структуры больше подходит  $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_4$ .

Еще одной возможностью оказываются цепочные структуры (см. рис. 4.2, б, в, д). В них мы имеем дело с повторяющейся ОН-группой, атомы О которой расположены вдоль цепи и соединены между собой водородными атомами, а атомы Н повернуты почти под прямыми углами к цепи. Как показали квантовомеханические расчеты, наибольшую (по абсолютной величине) энергию связи для  $\text{H}_7\text{O}_3^+$  имеет цепочная структура [57]. Для  $\text{H}_9\text{O}_4^+$  цепочная и оксониевая структуры одинаково выгодны энергетически, а протоноцентрированная модель имеет несколько меньшую энергию связи. Правда, энергетический выигрыш невелик (меньше 1 эВ). Как видно из рис. 4.2, цепочные структуры не вытянуты в прямую линию, но обнаруживают тенденцию к скручиванию, которая, вероятно, проявится сильнее в более сложных кластерах.

В то же работе [57] рассчитаны заряды атомов Н и О для цепочной и оксониевой моделей кластеров. Они указаны на рис. 4.2 и 4.3 (в единицах заряда электрона  $e$ ). Напомним, что в обычной модели молекулы воды два протона несут заряды  $+0,13e$ , а атом кислорода —  $0,26e$ . Как видно из рис. 4.2, в цепочной структуре кластера  $\text{H}_9\text{O}_4^+$  боковые атомы водорода, расположенные вдоль цепи, имеют заряд, близкий к заряду атома водорода в нейтральной молекуле воды ( $0,21e$  вместо  $+0,13e$ ). Концевые молекулы воды (кислород и два атома водорода) имеют суммарный заряд всего  $0,15e$ , т. е. в 7 раз меньше обычного заряда иона. Основной заряд иона концентрируется в атомах водорода, расположенных вдоль оси молекулы. Этот заряд частично связан заметными отрицательными зарядами атомов О на оси. В оксониевой структуре (см. рис. 4.3, в) концевые молекулы воды имеют небольшие заряды ( $+0,15e$ ); главная же часть положительного заряда находится внутри кластера в ионе оксония, где он частично связан отрицательным зарядом кислорода. Таким образом, в кластерах  $\text{H}_9\text{O}_4^+$  проявляется тенденция к связыванию заряда иона во внутренних частях кластера. Аналогичные структуры возникают и для кластеров  $\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})_n$  [57], которые во многом напоминают гидратированный ион оксония.

В настоящее время обнаружены и более сложные ус-

тойчивые структуры (клатраты). Например, известен устойчивый ион  $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_{21}$ , состоящий из 21 молекулы воды и протона [58]. Предполагается, что эта система образует додекаэдр (рис. 4.4, а), в вершинах которого расположены 20 молекул кислорода, входящих в 20 молекул воды; 21-я молекула воды находится во внутренней полости додекаэдра. Первоначально предполагалось, что

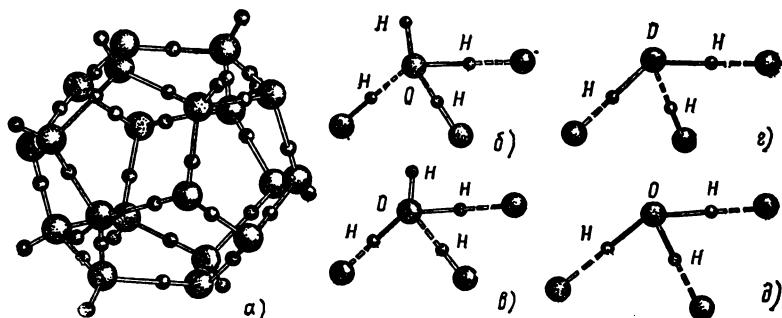


Рис. 4.4. Ион  $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_{21}$ :

а — структура иона; б, в — вершина первого типа, в которой находится соответственно молекула воды и ион оксония; г, д — вершина второго типа с молекулой воды и ионом оксония; сплошные линии — валентные связи; пунктир — водородная связь

там же находится и избыточный протон, т. е. внутри додекаэдра содержится не молекула воды, а ион оксония  $\text{H}_3\text{O}^+$ . Однако в дальнейшем стали полагать, что этот протон включается в структуру самого додекаэдра. 30 из 41 протонов, входящих в додекаэдр, расположены на 30 ребрах додекаэдра и связывают атомы кислорода, находящиеся в соседних вершинах. С одним из них устанавливается валентная связь (как в обычной молекуле воды), а с другим протон соединен водородной связью. Остальные 11 протонов образуют так называемые «торчащие» валентные связи, выступающие за пределы додекаэдра (рис. 4.4). Таким образом, додекаэдр состоит из 19 молекул воды и одного иона оксония. В последнем в отличие от молекул воды имеются три протона, связанных с атомом кислорода валентными связями. В каждой вершине додекаэдра сходятся, как известно, три ребра. Таким образом, в девяти вершинах, в которых отсутствуют торчащие наружу связи (так называемые вершины второго типа), один из трех соседних протонов должен быть свя-

зан водородной связью, а два других, если в этой вершине находится молекула воды, — валентными связями (рис. 4.4, *г*). Если же в такой вершине находится ион оксония (т. е. избыточный протон), то все три связи, направленные вдоль ребер, оказываются валентными (рис. 4.4, *д*). Около вершины первого типа (с торчащей наружу валентной связью) только одна из трех связей, направленных вдоль ребер в случае молекулы воды, и две в случае иона оксония являются валентными (рис. 4.4, *б*, *в*).

Положение иона оксония не фиксировано на определенном месте поверхности додекаэдра. Его перемещение связано с так называемым туннелированием протона вдоль водородной связи. Речь, конечно, не идет о реальном туннельном эффекте для протона. Процесс сводится к замене водородной связи на валентную, приводящей к переходу протона в соседнюю молекулу. Как уже было упомянуто выше, каждый протон, находящийся на ребре додекаэдра, связан с двумя кислородными атомами: с одним — валентной, с другим — водородной связью. В силу симметрии системы эти связи могут меняться местами (переставляться). При такой перестановке избыточный протон, находящийся около одной из вершин, переходит к другой вершине, что связано с превращением молекулы воды, находящейся в этой вершине, в ион оксония. Частота таких перестановок оказывается порядка  $10^{12}$  с<sup>-1</sup>, в то время как время разупорядочения за счет теплового движения рассматриваемой системы составляет  $10^{-6}$  с. Таким образом, за время существования системы происходит приблизительно  $10^8$  актов туннелирования и ион оксония успевает много раз побывать во всех вершинах додекаэдра. Это приводит к размазыванию избыточного заряда по всей поверхности додекаэдра и минимизирует энергию системы, делая ее более устойчивой. Заметим, что все экспериментальные исследования проводились пока только в средах с очень низкой плотностью электрического заряда, т. е. в газах или в разреженной идеальной плазме.

Выше рассматривались главным образом гидратные кластеры, оболочки которых состоят из молекул воды. Гидратированные ионы, так же как и водные растворы электролитов, наиболее часто встречаются в природе и лучше исследованы экспериментально. Однако в настоящее время известно много кластеров, оболочки которых



состоят из других молекул. К ним относятся, например,  $O_2^+$  ( $O_2$ )<sub>n</sub>,  $NO^+NO_2$ ,  $NH_4^+$  ( $NH_3$ )<sub>3</sub> и др. [59, 60]. Равным образом гидратироваться могут не только протон и  $OH^-$ , но практически все известные ионы ( $NO^+$ ,  $O_2^+$ ,  $O^-$ ,  $N_2^+$ ,  $O_2^+$  и др.).

### 4.3. Некоторые оценки

Все, что мы знаем о кластерных ионах, получено в экспериментах над системами с очень низкой плотностью ионов, которые вследствие этого должны рассматриваться либо как заряженные газы, либо как идеальная плазма. Как известно, различие между этими средами определяется соотношением характерного размера среды  $R$  и радиуса Дебая  $a$ :

$$a = \sqrt{T/4\pi e^2 n}, \quad (4.7)$$

где  $T$  — абсолютная температура в энергетических единицах;  $n$  — плотность заряженных частиц,  $см^{-3}$ ;  $e$  — заряд электрона. При  $R \lesssim a$  мы имеем заряженный газ, в то время как при  $a \ll R$  — плазму. Разреженная или так называемая идеальная плазма, в которой кинетическая энергия частиц значительно превосходит потенциальную энергию их взаимодействия, ведет себя во многих отношениях так же, как обычный газ, в частности она свободно смешивается с газами, не образуя в них обособленной фазы с определенной фазовой границей. Для такой плазмы можно ввести понятие о длине свободного пробега ее частиц, которая, как и у молекул обычного газа, оказывается значительно больше характерного радиуса взаимодействия ионов в плазме. Последний должен быть порядка упомянутого выше дебаевского радиуса  $a$ . Дело в том, что на расстоянии порядка  $a$  любая заряженная частица в плазме экранируется зарядом противоположного знака, что и приводит к отсутствию взаимодействия у частиц, находящихся на расстоянии больше  $a$ .

Введем среднее расстояние между частицами  $r_0 = n^{-1/3}$  и расстояние  $L = e^2/T$  (томсоновский радиус), на котором потенциальная энергия взаимодействия двух зарядов равна их средней кинетической энергии ( $T$  — абсолютная температура в энергетических единицах). Отношение среднего расстояния между частицами к томсоновскому радиусу  $\xi = r_0/L = r_0 T/e^2$ , очевидно, равно отношению средней кинетической энергии частицы в плазме к средней потенциальной энергии взаимодействия

двух зарядов. Другой параметр  $\eta = a/r_0$ , равный отношению радиуса экранирования к среднему расстоянию между частицами, определяет среднее число частиц, одновременно находящихся в дебаевской сфере и, следовательно, взаимодействующих между собой:  $\eta^3 = na^3$ . Как легко установить из формулы (4.7), ее можно переписать в виде

$$\eta = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\xi} = 0,282 \sqrt{\xi}. \quad (4.8)$$

В идеальной плазме  $\xi \gg 1$  и, следовательно, согласно (4.8)  $\eta \gg 1$ , т. е. в сфере взаимодействия содержится много заряженных частиц. В сильно неидеальной плазме кинетическая энергия частицы становится порядка средней потенциальной энергии взаимодействия частиц,  $\xi \lesssim 1$ , при этом из (4.8) следует, что  $\eta \ll 1$ , т. е. характер экранирования зарядов становится существенно отличным от дебаевского. Однако первые отступления от идеальной плазмы появляются при  $\eta \lesssim 1$ . Возможно, что неидеальная плазма может образовать особую фазу, отличную от обычных газов.

В случае шаровой молнии мы имеем дело с относительно низкой температурой и высокой плотностью заряженных частиц, т. е. с неидеальной плазмой. Действительно, при температуре 600 К ( $T = 1,38 \cdot 10^{-16} \cdot 600 = 0,828 \cdot 10^{-21}$  Дж) имеем  $L = 2,78 \cdot 10^{-6}$  см и  $\xi = 1$  при  $n \simeq 0,5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, в то время как  $\eta = 1$  уже при  $n \simeq 2,3 \times 10^{13}$  см<sup>-3</sup>.

Таким образом, если плотность заряженных частиц шаровой молнии превышает  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>, то мы заведомо имеем дело с сильно неидеальной, или плотной, плазмой. При этом возможно появление фазовой границы с заметным поверхностным натяжением.

В [61], [62] содержатся теоретические расчеты, основанные на предположении о том, что шаровая молния представляет собой неидеальную электронно-ионную плазму. Нам кажется, однако, весьма сомнительным, чтобы при столь низких температурах могли существовать электроны, не связанные с нейтральными молекулами. Конечно, наблюдения за поведением шаровой молнии не позволяют определить характер проводимости ее вещества. Однако многочисленные эксперименты с рекомбинацией обычной газоразрядной плазмы показывают, что при охлаждении она полностью рекомбинирует, превращаясь в нейтральный газ. Состояний; сколько-нибудь

аналогичных веществу шаровой молнии, при этом не возникает.

С точки зрения кластерной гипотезы шаровая молния состоит из положительных и отрицательных кластерных ионов. В отличие от электронно-ионной плазмы такая плазма вообще не может существовать при повышенной температуре (выше 1000 К), так как при такой температуре остаются только очень устойчивые кластерные структуры, оболочки которых состоят из небольшого числа молекул воды. Оболочки с очень сложной и развитой структурой могут существовать только при низкой температуре и высокой плотности, и это может быть причиной того, что это вещество не удается получить в обычном газовом разряде.

К сожалению, расчеты неидеальной плазмы очень сложны и весьма мало разработаны, особенно когда речь идет о столь сложных системах, как кластерные ионы. Одна из наиболее серьезных проблем состоит в необходимости указать причину, препятствующую схлопыванию системы до прямого контакта между оболочками кластеров в условиях, когда кинетическая энергия частиц становится меньше потенциальной. Для электронно-ионной плазмы эта причина может быть обусловлена квантовомеханическими эффектами отталкивания между электронами, связанными с принципом Паули. В случае кластерной плазмы причина может заключаться в значительной внутренней энергии, накопленной в оболочках кластеров, или в чем-то еще. Во всяком случае плотность вещества шаровой молнии, как мы знаем, сравнима с плотностью газа, но не конденсированных сред.

Если, исходя из этого, воспользоваться для грубых оценок законом действующих масс, который, строго говоря, применим только к смесям идеальных газов, и взять константы равновесия реакций гидратации ионов  $\text{H}_3\text{O}^+$  и  $\text{OH}^-$  из [51], [52], то при атмосферном давлении,  $T=600$  К получим [24] значения для числа ионов  $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$  и  $\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})_n$ , приведенные в табл. 4.2. В этом расчете принималось, что поддерживается квазинейтральность и что суммарное количество положительных и отрицательных ионов равно числу свободных, т. е. не связанных в гидратных оболочках, молекул воды ( $0,6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ); рекомбинация ионов предполагалась приостановленной.

Таблица 4.2

$n$	$\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n, \text{ см}^{-3}$	$\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})_n, \text{ см}^{-3}$
4	$0,5 \cdot 10^{17}$	$0,2 \cdot 10^{18}$
5	$0,5 \cdot 10^{18}$	$0,9 \cdot 10^{18}$
6	$2,5 \cdot 10^{18}$	$1,9 \cdot 10^{18}$
Итого	$3 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{18}$

Подсчитаем энергию, заключенную в такой системе. При рекомбинации ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  выделяется 11,8 эВ (потенциал ионизации водорода равен 13,5 эВ, а энергия связи электрона с гидроксильной группой 1,7 эВ). Соединение атомов Н и ОН с образованием молекул воды дает еще 5 эВ. Таким образом, энергия, выделившаяся в конечном итоге после рекомбинации пары ионов, составляет около 17 эВ. Но на разложение иона  $\text{H}_3\text{O}^+$  на протон и молекулу воды уходит 7,2 эВ. Следовательно, при рекомбинации  $\text{H}_3\text{O}^+$  и  $\text{OH}^-$  с превращением продуктов рекомбинации в молекулу воды должно выделяться около 9,6 эВ. В результате при рекомбинации  $3 \cdot 10^{18}$  пар ионов  $\text{H}_3\text{O}^+$  и  $\text{OH}^-$ , заключенных в  $1 \text{ см}^3$ , выделяется энергия 4,6 Дж.

Пользуясь данными табл. 4.1, легко подсчитать, что на разложение гидратных оболочек ионов уходит энергия (табл. 4.3).

Таблица 4.3

$n$	$\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n, \text{ эВ}$	$\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})_n, \text{ эВ}$
4	3,94	3,09
5	4,41	3,70
6	5,01	4,2

На разложение гидратных оболочек с учетом их энергии связи (табл. 4.3) и числа ионов с соответствующей оболочкой (табл. 4.2) затрачивается около 4,3 Дж/см<sup>3</sup>. Кроме того, необходимо учесть, что при разрушении гидратных оболочек выделяются молекулы воды. По табл. 4.2 нетрудно подсчитать, что с учетом  $0,6 \cdot 10^{19}$  молекул воды в  $1 \text{ см}^{-3}$ , не связанных в кластерных оболочках, и

двух молекул воды, которые образуются при рекомбинации ионов  $\text{H}_3\text{O}^+$  и  $\text{OH}^-$ , получаем  $4,6 \cdot 10^{19}$  молекул воды в  $1 \text{ см}^3$ . При конденсации этой воды выделяется около  $3,3 \text{ Дж/см}^3$  ( $0,45 \text{ эВ}$  на каждую молекулу). Таким образом, при полном превращении  $1 \text{ см}^3$  вещества кластеров в воду выделится  $3,6 \text{ Дж/см}^3$ . В сфере диаметром  $20 \text{ см}$  в этом случае содержится около  $15 \text{ кДж}$ . Плотность рассматриваемого вещества, как легко подсчитать, составляет около  $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ , т. е. совпадает с плотностью воздуха.

Разумеется, данный расчет приведен лишь для того, чтобы показать, что в кластерной плазме можно при желании получить плотность вещества и количество запасенной энергии, по порядку совпадающие с ожидаемыми для шаровой молнии. На что-либо большее этот расчет не претендует. В частности, не утверждается, что, как это получилось в данном расчете, основная часть энергии шаровой молнии связана с конденсацией паров воды, которая образуется при распаде ее вещества. В действительности энергетические соотношения могут быть совершенно иными, что зависит от рода ионов и соотношения между числом ионов и количеством свободных молекул воды в кластерном веществе. Однако при современном уровне знаний едва ли стоит уточнять эти оценки.

Остановимся еще на ионах с малыми кластерными оболочками. При низких температурах такие ионы составляют ничтожно малую примесь, плотность которой можно приближенно оценить из законов химического равновесия для идеальных газов. Легко показать, что их концентрация обратно пропорциональна произведению констант химического равновесия реакций гидратации, и в конечном счете  $\sim \exp(-E_s/T)$ , где  $E_s$  может составлять около  $3 \text{ эВ}$  для  $n=2$ . Поэтому следует ожидать, что число таких ионов экспоненциально мало при низких температурах, но быстро растет с температурой. Действительно, расчеты [24] дают следующие значения концентраций ионов с малыми кластерными оболочками при атмосферном давлении и температуре  $600 \text{ К}$  (число свободных молекул воды равно числу ионов) (табл. 4.4).

Из сравнения этих данных с табл. 4.2 видно, что содержание ионов с  $n=2; 3$  на несколько порядков меньше, чем с  $n=4$ . Однако расчеты при других температурах показывают, что увеличение температуры на  $100^\circ\text{C}$

Таблица 4.4

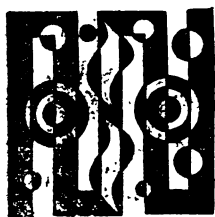
$n$	$\text{H}_3\text{O}^+ (\text{H}_2\text{O})_n, \text{ см}^{-3}$	$\text{OH}^- (\text{H}_2\text{O})_n, \text{ см}^{-3}$
3	$3,1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{16}$
2	$4 \cdot 10^{12}$	$1,5 \cdot 10^{13}$

приводит к возрастанию концентрации ионов с  $n=2$ ; 3 на два-три порядка. Это может вызвать быстрый рост скорости рекомбинации с ростом температуры и дать начало цепной реакции при превышении определенного температурного предела [26]. В [63] сделана попытка объяснить причины колебаний интенсивности свечения шаровой молнии. Ряд свойств кластерных ионов рассмотрен в [64].

Оценим импульсный ток, который может возникнуть при контакте шаровой молнии с проводником. Диаметр кластерного иона с оболочкой, состоящей из пяти-семи молекул воды, составляет, как уже отмечалось, около  $6 \cdot 10^{-8}$  см, а его эффективное сечение — около  $10^{-14}$  см<sup>2</sup>. Это дает для подвижности такого иона в воздухе значение  $5-10$  см<sup>2</sup>/(В·с), что согласуется с результатами эксперимента [65]. Если электрическое поле, возникающее вблизи заряженных предметов, в грозу достигает нескольких сотен вольт на сантиметр, то скорость разлета ионов в воздухе может достигать до  $10^4$  см/с, а время, в течение которого шаровая молния распадается, при взрыве оказывается порядка  $10^{-3}$  с. Токи внутри вещества шаровой молнии будут ограничены кулоновским рассеянием, которое при низкой температуре ее вещества имеет высокое эффективное сечение. В результате ее проводимость сравнительно невелика  $[(1 \div 2) \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}]$ . Тем не менее, если электрическое поле составляет  $300$  В/см, это дает плотность тока около  $0,5$  А/см<sup>2</sup>, а полный ток через поперечное сечение шаровой молнии с диаметром  $20$  см может достигать  $100$  А. Если заметная часть этого тока будет проходить через обычную электрическую сеть, то это вызовет срабатывание предохранителей, а также может вывести из строя электроприборы. За  $10^{-3}$  с такой импульс тока может разрядить значительный заряд, порядка десятых долей кулона, накопившийся на окружающих телах и на поверхности земли.

С точки зрения кластерной гипотезы шаровая молния представляет собой уникальный ионно-химический реактор, работающий при относительно низких температурах. Именно в этом и состоит, по-видимому, наиболее интересное практическое применение кластерной плазмы, хотя возможность накопления значительной энергии в сравнительно небольшом объеме и при совершенно ничтожной массе также не стоит сбрасывать со счетов. Создание и исследование кластерной плазмы представляют интерес даже безотносительно к выяснению природы шаровой молнии. Что же касается последней, то до тех пор, пока шаровая молния не будет создана в лабораторном эксперименте, ее истинную природу нельзя считать окончательно установленной.

Однако представляется, что изложенная в этой главе точка зрения требует для объяснения различных свойств шаровой молнии наименьшего числа различных гипотез. Одно предположение о возможности задержки рекомбинации в плотной неидеальной кластерной плазме делает понятными и логически объяснимыми все остальные особенности шаровой молнии. Что же касается самой исходной гипотезы, то, во-первых, в ней нет на первый взгляд ничего, что противоречило бы фундаментальным законам физики, а, во-вторых, она кажется довольно вероятной, особенно если энергетический выигрыш от рекомбинации, сопровождающийся разрушением больших кластерных оболочек, невелик,



5

*Как создать шаровую молнию?*

### 5.1. Что же мы хотим получить!

В настоящее время, пожалуй, наиболее волнующим вопросом является вопрос не о природе шаровой молнии, а о том, как она возникает. Если бы мы могли воспроизвести в контролируемом лабораторном эксперименте шаровую молнию, то мы, конечно, изучили бы ее

с помощью современной экспериментальной техники и таким образом поняли бы ее природу. Но этого пока еще сделать не удалось. Для того чтобы создать шаровую молнию, не обязательно иметь точные сведения о ее природе. Достаточно иметь лишь приблизительно верное представление о ней. И прежде всего требуется знать, что, собственно, мы должны получить. Необходимо выработать правильный критерий успеха: в каком случае мы можем уверенно утверждать, что явление, которое мы получили, представляет собой шаровую молнию или хотя бы ее модель. Естественно, что для этого нужно отчетливо представлять, каковы ее наиболее существенные свойства, непосредственно связанные с природой явления. Выяснению этого вопроса, в сущности, и была посвящена гл. 2.

Можно определенно сказать, что у первых исследователей, ставивших опыты в XIX в., не было правильного представления о проблеме. Так, Планте и ряд других исследователей того времени [2, 3] пытались воспроизвести светящийся разряд сферической формы. Такой разряд действительно удалось получить, но он ни в коей мере не является моделью шаровой молнии. Этот разряд существовал в близком соседстве с электродами и лишь до тех пор, пока по цепи к ним подводилась электрическая мощность. Точно так же получение светящихся сферических сгустков в безэлектродном разряде, например в фокусе мощного пучка сходящихся радиоволн, которое было осуществлено в начале этого столетия в опытах Тесла [2], а в середине столетия — в экспериментах Г. И. Бабата [2, 3], нельзя рассматривать как успешное моделирование шаровой молнии, поскольку явление исчезало вместе с выключением подводимой мощности.

Несколько лучше обстояло дело с опытами, которые проводили со смесями химически активных веществ, например углеводородов, в начале века наш соотечественник Н. А. Гезехус [2, 36], а в 60—70-х годах — американский физик Барри [2, 38]. Здесь разряд применялся лишь для иницирования процесса, который в дальнейшем поддерживается сам по себе. Светящаяся область имела приблизительно сферическую форму и могла перемещаться на некоторое расстояние (порядка десятка сантиметров) в закрытых кюветах. В нашу задачу не входит делать подробный обзор попыток экспериментального моделирования шаровой молнии, тем более что



данный вопрос обстоятельно освещен в монографии Барри [2]. Однако некоторые критические замечания, прежде чем переходить к дальнейшему изложению, сделать необходимо.

По-видимому, наиболее удачным, во всяком случае по мнению Барри, были опыты Пауэлла и Финкельштейна [2, 43] с высокочастотным разрядом при атмосферном давлении, поставленные в конце 60-х годов. В них удалось получить послесвечение воздуха, наблюдавшееся в течение приблизительно 1 с после прекращения разряда. Светящееся образование могло перемещаться по разрядной трубке на расстояние порядка 10 см. Предполагается, что свечение обусловлено передачей энергии возбужденных на метастабильный уровень молекул кислорода молекулам углекислого газа, которые затем высвечиваются видимым светом. Таким образом, спектр свечения определяется молекулами  $\text{CO}_2$ , в то время как энергия запасается главным образом в  $\text{O}_2$ . Концентрация возбужденных метастабилей достигает  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а плотность энергии, запасенной в них, доходит до  $0,9 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/см}^3$ . Постоянная распада 0,2—0,3 с.

Несмотря на несомненную важность этих опытов мы все же полагаем, что явление, называемое шаровой молнией, воспроизведено не было и даже не было моделировано. И дело здесь совсем не в том, что при постоянной распаде 0,2—0,3 с нельзя воспроизвести явление, длящееся десятки секунд. По-видимому, можно найти экзотические молекулы с метастабильными уровнями, распадающимися в течение секунд или даже десятков секунд. Дело в том, что во всех опытах с химическими реакциями или возбуждением молекул пытаются воспроизвести только одно и далеко не самое интересное свойство шаровой молнии — продолжительное свечение. При этом молчаливо предполагается, что шаровая молния — всего лишь светящийся газ. В действительности же из наблюдений, описанных в гл. 2, следует, что шаровая молния — значительно более интересный физический объект. Она образует отдельную от окружающего воздуха проводящую фазу с четкой и устойчивой фазовой границей. Это невозможно для обычного газа с примесью возбужденных молекул. И действительно, форма светящегося образования в опытах Пауэлла и Финкельштейна определялась, по-видимому, в основном стенками трубки. При выходе в открытую атмосферу время жизни ее сокращалось

вдвое и сводилось к долям секунды даже в спокойной атмосфере лаборатории. Очень сомнительно, чтобы светящаяся воздушная масса, полученная в этом опыте, могла продемонстрировать, хотя бы отдаленно, свойства, описанные в § 2.6 или 2.8. Нам представляется, что говорить об успешном моделировании шаровой молнии в лабораторном эксперименте можно только в том случае, если мы получим метастабильное вещество с временем распада порядка минуты, имеющее плотность, близкую к плотности воздуха при комнатной температуре, и образующее в воздухе обособленную фазу с хорошей проводимостью. Наличие свечения является хотя и необходимым, но относительно второстепенным свойством, вытекающим из метастабильности этого вещества.

## **5.2. Рождение шаровой молнии в импульсном коронном разряде**

Не вызывает сомнения, что происхождение шаровой молнии в большинстве случаев тесно связано с разрядом линейной молнии. Необходимо прежде всего обсудить два вопроса: 1) откуда берется энергия, запасенная в шаровой молнии; 2) откуда доставляется вещество, из которого она состоит? Относительно первого вопроса практически нет сомнения в том, что по крайней мере в тех случаях, когда рождение шаровой молнии сопровождается разрядом линейной молнии, энергия подводится к ней через канал линейной молнии, а затем согласно кластерной гипотезе запасается в форме энергии ионизации кластерных ионов. Полагая, что разность потенциалов между облаком и землей может достигать  $10^8$  В, а заряд, переносимый разрядом молнии, 20—30 К [1], находим, что энергия, выделяемая в разряде линейной молнии, составляет  $(2 \div 3) \cdot 10^9$  Дж. При средней длине канала 3—5 км [1] энергия на единицу длины составляет около  $5 \cdot 10^5$  Дж/м. Во время заряда эта энергия распределяется вдоль канала и может положить начало возникновению шаровой молнии. В некоторых случаях она может быть передана по проводникам на значительное расстояние от места удара линейной молнии.

Сложнее решить вопрос о веществе, из которого возникает шаровая молния. Исходным материалом, вероятно, должны служить ионизованные частицы воздуха, которые затем гидратируются молекулами воды или дру-

гими молекулами, имеющими большой дипольный момент. Как показывает опыт исследования химии *D*-слоя ионосферы, ионный состав может в дальнейшем существенно измениться вследствие ионно-молекулярных реакций, протекающих в системе. Количество воды, необходимой для образования гидратных оболочек ионов, относительно невелико. Так, в рассмотренном выше примере для образования  $1 \text{ см}^3$  плазмы из ионных гидратов  $\text{H}_3\text{O}^+$  и  $\text{OH}^-$  с учетом также и свободных молекул  $\text{H}_2\text{O}$ , находящихся в равновесии с оболочками ионов, требуется  $4,6 \cdot 10^{19}$  молекул воды. На шаровую молнию диаметром 20 см уходит в этом случае около 5,8 г воды даже в том случае, если она целиком состоит из молекул воды и не содержит других частиц, например  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  и др.

Вблизи земли найти эту воду не представляет никакого труда. Она может содержаться в воздухе и на поверхности земли, на листьях в виде росы и на других предметах. За время разряда молнии (0,1—0,2 с) она испаряется и может заполнить значительный объем. В воздухе (в частности, в облаках) вода распределена в виде капель и паров. Поскольку вещество шаровой молнии обладает поверхностным натяжением, оно будет иметь тенденцию собираться в одном месте подобно растянутой упругой пленке. Поэтому можно думать, что ионы, из которых состоит шаровая молния, образуются и одеваются в гидратные оболочки в довольно большом объеме, во много раз превышающем объем самой шаровой молнии, и лишь после этого сжимаются и объединяются в одно тело. На это указывают и очевидцы (см. гл. 2). Напомним, что один из них, в частности, говорит, что после удара линейной молнии во вспаханное поле по его поверхности побежали «огоньки», которые собрались затем в один шар, оторвавшийся от земли и поплывший по воздуху (см. № 67).

Мы подошли к наиболее сложному вопросу о том, где и как образуется шаровая молния. По крайней мере два веских соображения говорят в пользу того, что она не может возникнуть в канале разряда линейной молнии. Во-первых, против этого свидетельствуют ее размеры. Ширина токнесущего канала линейной молнии по современным данным порядка 1 см, в то время как средний диаметр шаровой молнии — около 20—25 см. Существенно также то, что плотность вероятности появления шаровой молнии с диаметром меньше 10—15 см быстро

убывает с уменьшением размеров. Если бы она возникла непосредственно из токнесущего канала, следовало бы ожидать максимума плотности вероятности в области диаметров порядка нескольких сантиметров.

Второй аргумент заключается в том, что образование шаровой молнии занимает интервал времени в несколько секунд. Хотя шаровая молния и появляется вслед за разрядом линейной молнии, однако, судя по показаниям очевидцев, требуется некоторое время, чтобы она «разгорелась» или выросла в диаметре до стационарного размера или сформировалась в самостоятельное сферическое тело. Это время (1—2 с) приблизительно на порядок превосходит полную длительность существования канала линейной молнии (0,1—0,2 с) и более чем на два порядка больше времени распада канала (10 мс).

Наиболее вероятным местом возникновения шаровой молнии является, по нашему мнению, *корона разряда линейной молнии*. Как и всякий проводник, находящийся под высоким потенциалом, канал линейной молнии окружен коронным разрядом, занимающим широкую область (порядка 1 м в диаметре), в которой во время разряда образуется большое количество ионов. Температура этой области во много раз ниже температуры канала молнии и едва ли превышает, особенно в ее периферических частях, несколько сотен градусов. В таких условиях ионы легко могут покрыться гидратными оболочками, превратившись в ионные гидраты или другие кластерные ионы. Мы видим, что как размеры, так и температурные условия, существующие в короне, значительно лучше подходят для образования шаровой молнии, чем условия, характерные для токнесущего канала разряда.

Выше уже отмечалось, что объем сформировавшейся шаровой молнии не обязательно совпадает с тем объемом, в котором первоначально возникло ее вещество. За неимением лучшего критерия предположим, что последний должен быть таким, чтобы в нем содержалось требуемое количество паров воды. В таком случае этот объем должен быть порядка 0,25—0,5 м<sup>3</sup>. (Масса насыщенных водяных паров в 1 м<sup>3</sup> при температуре 18 °С составляет 15,4 г.)

Главным теперь оказывается вопрос: как в таком объеме короны образуется необходимое количество ионов? Вследствие низкой температуры большое число ионов может возникнуть здесь только через различные

неравновесные механизмы, в частности из-за коронирования токонесущего канала линейной молнией. Заметим, что сам канал молнии не содержит в себе нужного количества ионов. При радиусе 0,5 см и температуре  $10^4$  К на каждый его метр приходится около  $10^{20}$  пар ионов. Между тем для образования шаровой молнии диаметром 20 см необходимо около  $10^{22}$  пар ионов. Поэтому даже если пренебречь рекомбинацией при охлаждении, то для одной шаровой молнии средних размеров потребовалось бы собрать все ионы с участка канала длиной в десятки или даже сотни метров.

Нетрудно подсчитать также, что энергия, заключенная в веществе канала, сама по себе незначительна: она равна энергии ионизации  $10^{20}$  ион/м, т. е. составляет около 200 Дж/м. Таким образом, почти вся энергия разряда, которая, как мы видели, исчисляется сотнями килоджоулей на 1 м длины, уходит из канала главным образом в виде излучения, причем значительная часть ее застревает в короне. Для образования  $2 \cdot 10^{22}$  пар ионов требуется около 30—50 кДж, что составляет менее 10 % общей энергии (на 1 м длины). Легко подсчитать, что даже полное поглощение 500 кДж в цилиндрическом объеме воздуха радиусом 1 м и высотой 1 м нагревают воздух в нем до температуры не более нескольких сотен градусов. Для образования необходимого количества ионов в объеме  $0,5 \text{ м}^3$  средняя плотность ионов в короне должна составлять около  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Наиболее вероятный механизм образования этих ионов — импульсный коронный разряд. Если по тем или иным причинам канал линейной молнии обрывается в некотором месте, то заряд, переносимый через канал молнии, начинает накапливаться и затем быстро стекать в воздух. При этом напряжение резко возрастает и заряд должен стекать главным образом в виде электронных пучков, которые могут быть ускорены до энергии в десятки и может быть даже сотни килоэлектрон-вольт. Во всяком случае из описанных в § 2.7 случаев видно, что длина светящейся струн составляет несколько десятков сантиметров, что, как будет показано в следующем параграфе, соответствует энергии электронов в пучке около 100 кэВ. На то же указывает и наиболее типичный диаметр шаровой молнии 20—25 см. На создание пары ионов по современным данным в таком пучке уходит около 100 эВ [66], поэтому каждый электрон создает на своем

пути около тысячи пар ионов (отрицательные ионы образуются вследствие прилипания электронов к нейтральным молекулам), в то же время довольно слабо нагревая пробиваемый газ. Для создания шаровой молнии средних размеров требуется выбросить заряд 0,1—1 К (напомним, что в каждом возвратном ударе линейной молнии переносится заряд несколько кулон [1]), который рассеивается в воздухе, в то время как образовавшиеся ионы быстро гидратируются (за время порядка  $10^{-8}$  с, как будет показано в следующем параграфе) и начинают стягиваться вместе, если их плотность оказалась достаточно большой. Импульсное коронирование заряда должно продолжаться в течение времени более короткого, чем длительность возвратного удара, т. е. порядка  $10^{-8}$  с.

Следующая фаза образования шаровой молнии занимает, по-видимому, значительно больше времени — около 1—2 с. Именно о ней и говорят наблюдатели, когда описывают появление шаровой молнии. Речь идет, по-видимому, о процессе контракции или конденсации образовавшегося ионного вещества в более плотное сферическое образование, что соответствует уменьшению как объемной, так и поверхностной внутренней энергии системы. Если первоначальный объем, в котором образуется и гидратируется ионное вещество, составляет около  $0,5 \text{ м}^3$ , то сжатие его до размеров шара диаметром около 20 см соответствует уменьшению объема приблизительно на два порядка. Возможно, что этот процесс аналогичен выпадению жидкой фазы при конденсации пересыщенного пара. Естественно, что у наблюдателей возникает впечатление, что появляется постепенно раздувающийся светящийся шар, который как бы выдувается из проводника. Если плотность получившегося вещества не очень отличается от плотности окружающего воздуха и если его температура достаточно низка, чтобы исключить возможность взрыва, то возникает автономное сферическое тело, состоящее из метастабильного и постепенно распадающегося ионного вещества, — шаровая молния.

Если шаровая молния образуется при коронировании проводников, а не при разряде линейной молнии, ее образование, вероятно, также происходит в два аналогичных этапа. Значительный заряд скапливается на проводнике, не успевая стекать с него через обычный коронный разряд. Это приводит к импульсному выбрасыванию

электронных пучков из коронирующего проводника и образованию в воздухе большого числа гидратированных ионов, которые затем постепенно конденсируются в более плотное ионное образование. Если изложенная точка зрения близка к истине, то шаровая молния действительно имеет отношение к коронному разряду, но не представляет собой разновидность, а является следствием коронного разряда, возникающего, когда значительный заряд скапливается на проводнике, не успевая нейтрализоваться. То же самое можно сказать и о появлении образований, сходных с шаровой молнией, при коротких замыканиях в устройствах, созданных человеком.

### 5.3. Об экспериментах с электронным пучком

На основании материала, изложенного в предшествующем параграфе, можно прийти к заключению, что наиболее прямой путь к созданию, или по крайней мере моделированию, шаровой молнии лежит через исследование импульсных сильноточных электронных пучков. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Если количество ионов, порождаемых электронным пучком в единицу времени в  $1 \text{ см}^3$ , равно  $q$ , то в стационарном состоянии скорость возникновения ионов должна уравновеситься скоростью рекомбинации  $\alpha n^2$ :

$$dn/dt = q - \alpha n^2 = 0, \quad (5.1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент рекомбинации для молекулярных ионов порядка  $10^{-6}$ — $10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$  [35]. Выше, в § 4.3 мы видели, что существенные отступления от идеальной плазмы в интересующих нас условиях можно ожидать только при  $\eta < 1$ , т. е. при плотности плазмы  $n \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Из (5.1) видно, что для того чтобы довести плотность плазмы  $n$  до уровня  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , мощность источника  $q$  должна быть порядка  $10^{24}$  ион/ $(\text{см}^3 \cdot \text{с})$ .

Главная трудность эксперимента состоит в том, чтобы столь мощный источник существенно не нагревал ионизируемый газ; в противном случае кластерные обложки будут разрушены или вообще не возникнут. В результате мы получим обычную газоразрядную электронно-ионную плазму, которая, как показывают различные эксперименты, не приводит к созданию метастабильных плазменных состояний. Ограничить повышение температуры можно только одним способом: сильно сократив

длительность воздействия пучка. Если на создание пары ионов уходит энергия  $I$ , то длительность воздействия пучка  $\tau$  должна быть подчинена неравенству

$$Iq\tau \leq NC_p \Delta T, \quad (5.2)$$

где  $N$  — число молекул в  $1 \text{ см}^3$  газа;  $C_p = 7k/2$  — теплоемкость молекулы газа;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  — постоянная Больцмана;  $\Delta T$  — допустимое изменение температуры, К. Согласно оценкам, приведенным выше,  $\Delta T$  не должно превышать  $200\text{—}300 \text{ К}$ . В этом случае при  $N = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  получим  $NC_p \Delta T = 0,39 \text{ Дж/см}^3 = 2,4 \cdot 10^{18} \text{ эВ/см}^3$ . Так как энергия, затрачиваемая электронным пучком на создание пары ионов в газовой мишени, составляет около  $I \approx 10^2 \text{ эВ}$  [66], то из неравенства (5.2) следует, что длительность нагрева не должна превышать  $10^{-8} \text{ с}$ . Необходимость иметь дело со столь кратковременными импульсными пучками может объяснить трудность реализации эксперимента по созданию искусственной шаровой молнии.

Если энергия электрона  $E$  заключена в интервале

$$15 \text{ эВ} \approx me^2/2\hbar \ll E \ll mc^2 \approx 500 \text{ кэВ},$$

где  $m$  — масса электрона;  $\hbar$  — постоянная Планка, то энергия, поглощаемая на единицу длины пути пучка в газовой мишени, определяется следующей формулой [66]:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi e^4 Nz}{E} \ln\left(1,17 \frac{E}{I}\right), \quad (5.3)$$

где  $z$  — число протонов в молекуле газа (для воздуха  $z = 14 \div 16$ ). Отсюда можно определить глубину проникновения  $L$  пучка в газ:

$$L = \frac{E}{dE/dx} = \frac{E^2}{2\pi e^4 Nz} \frac{1}{\ln(1,17E/I)}. \quad (5.4)$$

Полагая  $z = 14$ ,  $N = 2,7 \cdot 10^{19}$ ,  $I = 10^2 \text{ эВ}$ , получаем следующие значения  $L$  при различной энергии  $E$  электрона в пучке:

$E, \text{ эВ}$	. . . . .	$10^4$	$0,5 \cdot 10^5$	$10^5$	$2 \cdot 10^5$
$L, \text{ см}$	. . . . .	0,4	8	29	105

Если умножить  $dE/dx$  на плотность потока электронов  $j$  ( $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ), то можно найти мощность, которую выделяет пучок электронов в единице объема; разделив ее на энергию  $I$ , затрачиваемую в среднем на создание од-



ной пары ионов, получаем мощность источника ионов  $q$ , генерируемых пучком:

$$q = j \frac{2\pi e^4 N z}{IE} \ln\left(1,17 \frac{E}{I}\right).$$

Удобнее выразить плотность потока электронов в единицах плотности тока, т. е. в  $\text{А/см}^2$ , а энергию электрона в пучке  $E$  — в эВ. Тогда, заменяя множитель 1,17 под логарифмом на 1, получаем для значений  $N$ ,  $z$  и  $I$ , принятых выше,

$$q = 3 \cdot 10^{24} \frac{j}{E} \ln(10^{-2} E). \quad (5.5)$$

Легко видеть, что источник ионов требуемой мощности ( $q \approx 10^{24} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ) можно получить при различных значениях  $j$  и  $E$ , причем чем больше энергия электронов в пучке, тем более высокое значение плотности тока необходимо. Это связано с обратной зависимостью между энергией, выделяемой на единицу длины пути в газе, и энергией пучка [см. (5.3)]. Так, при энергии пучка 10 кэВ требуется плотность тока порядка 1 кА/см<sup>2</sup>. Однако в этом случае пространственные и энергетические масштабы явления будут незначительны. Так, из табл. 5.1 видно, что такой пучок будет поглощаться на расстоянии порядка нескольких миллиметров, создавая лишь очень короткий по длине столб ионов.

Более сравним по масштабу с рассматриваемыми нами естественными процессами пучок электронов, имеющий энергию около 100 кэВ. Для получения необходимой мощности источника ионов  $q$  требуется высокая плотность тока — около 10 кА/см<sup>2</sup>. Такой пучок будет создавать в воздухе столб ионов длиной около 30 см. За время действия пучка ( $10^{-8}$  с) с каждого 1 см<sup>2</sup> поверхности эмитирующего проводника должен быть выброшен заряд около  $10^{-4}$  К.

Необходимо учесть также кулоновское рассеяние пучка в образовавшемся столбе плазмы и генерацию плазменных колебаний. Первый эффект будет играть существенную роль, если кулоновская длина свободного пробега электронов  $l$  с энергией  $E$  в плазме с температурой  $T$  окажется меньше длины пробега  $L$  пучка в воздухе. Это будет иметь место, если

$$\frac{L}{l} = \frac{E}{T} \frac{n\Lambda}{Nz} \frac{1}{\ln(1,17E/I)} \gtrsim 1, \quad (5.6)$$

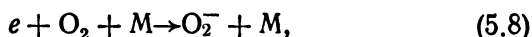
где  $\Lambda \approx 1$  — кулоновский логарифм;  $n$  — плотность плазмы. При  $n \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$  неравенство (5.6) начинает выполняться лишь при  $E > 2 \cdot 10^5 \text{ эВ}$ . Таким образом, кулоновское рассеяние пучка либо вообще несущественно, либо существенно лишь на заключительных стадиях процесса.

Обратимся к рассеянию на плазменных колебаниях. При рассматриваемых энергии и плотности тока плотность электронов в пучке  $n'$  должна быть порядка  $10^{12}$ — $10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Инкремент  $\gamma$  резонансной моды пучковой неустойчивости (это наиболее быстро нарастающие колебания, для которых  $kv = \omega_e$ , где  $k$  — волновое число,  $v$  — скорость электронов в пучке,  $\omega_e$  — плазменная частота столба плазмы) равен [67]

$$\gamma = \frac{\sqrt{3}}{2^{4/3}} \omega_e \sqrt[3]{\frac{n'}{n}} \approx (1,5 \div 3) \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1} \quad (5.7)$$

при плотности плазмы  $n \approx 10^{15}$ , плазменной частоте  $\omega_e \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ . Частота столкновений электронов с молекулами  $\text{O}_2$  и  $\text{N}_2$  при атмосферном давлении оказывается равной около  $10^{12} \text{ с}^{-1}$ , т. е. значительно больше  $\gamma$ . Вследствие этого можно ожидать, что значительного нарастания плазменных колебаний вследствие пучковой неустойчивости происходить не будет.

Таким образом, пучок электронов с энергией около 100 кэВ и плотностью тока  $10 \text{ кА/см}^2$  может создать в воздухе за время порядка  $10^{-8} \text{ с}$  столб плазмы длиной около 30 см и плотностью порядка  $n \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , нагревая воздух не более чем на 200—300 К. При этом электроны плазмы уже за время действия пучка превратятся в воздухе в отрицательные ионы  $\text{O}_2^-$ . Наиболее эффективно такие ионы в рассматриваемых условиях будут возникать при тройных столкновениях типа



где  $\text{M}$  — любая молекула ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ). Константа скорости этой реакции равна  $2 \cdot 10^{-30} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$  [35]. При концентрации кислорода в воздухе  $[\text{O}_2] = 0,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и  $[\text{M}] = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  получаем, что за время порядка

$$1/2 \cdot 10^{30} [\text{O}_2] [\text{M}] \approx 0,4 \cdot 10^{-8} \text{ с}$$

свободные электроны превратятся в отрицательные ионы.

Несмотря на относительно низкое содержание воды в обычном воздухе  $[\text{H}_2\text{O}] = (0,2 \div 0,5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  гидратные оболочки ионов должны образоваться очень быстро, так

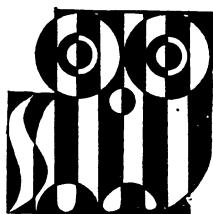
как константы скорости реакций гидратации очень велики — порядка  $10^{-28}$  см<sup>6</sup>·с<sup>-1</sup> [35], [68]. В [59], [69] получены даже еще большие значения константы скорости гидратации — примерно  $10^{-27}$  см<sup>6</sup>·с<sup>-1</sup>. Таким образом, время гидратации ионов при тройных столкновениях оказывается порядка

$$1/10^{-28} [\text{H}_2\text{O}] [\text{M}] \simeq 10^{-9} \text{ с.}$$

Итак, практически еще за время действия пучка возникающий столб плазмы должен превратиться в столб холодной неидеальной кластерной плазмы с плотностью ионов порядка  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>. После выключения пучка образовавшиеся ионы могут исчезнуть в результате рекомбинации по закону, который следует из решения уравнения

$$dn/dt = -\alpha n^2, \text{ т. е. } [n_0 - n(t)]/n(t) = n_0 \alpha t, \quad (5.9)$$

где  $n_0$  — концентрация ионов в момент выключения пучка. Если  $\alpha \simeq 10^{-7} \div 10^{-6}$  см<sup>3</sup>/с, то характерное время рекомбинации будет порядка  $1/n_0 \alpha \simeq 10^{-8} \div 10^{-9}$  с при  $n_0 \simeq 10^{15}$ . Нам представляется, однако, что не исключена возможность того, что при достаточно больших значениях  $n_0$  рекомбинация не будет происходить столь быстро. Вместо этого произойдет фазовый переход, который приведет к созданию относительно плотной (возможно, значительно более плотной, чем в исходном состоянии) неидеальной плазмы из кластерных ионов. Постановка подобного эксперимента в принципе осуществима при современном уровне техники.



## Заключение

В гл. 4 и 5 мы довольно далеко отклонились от той цели, которая была поставлена в предисловии к настоящему изданию: нарисовать общую картину явления, вытекающую только, или хотя бы в основном, из наблюдаемых фактов. Кластерная гипотеза, равно как и все остальные гипотезы, не является прямым следствием наблюдения. В лучшем случае она представляет собой удобную рабочую гипотезу, которая может стимулировать правильное направление экспериментальных исследований, т. е. базу для постановки дальнейших вопросов о природе исследуемого явления.

Вернемся назад и подведем итоги. Результаты весьма трудоемкой работы по сбору и анализу наблюдений можно сформулировать очень коротко, в нескольких фразах.

Шаровая молния представляет собой проводящую среду с плотностью воздуха, при температуре, близкой к комнатной. Эта среда образует отдельную фазу в воздухе с устойчивой фазовой границей и поверхностной энергией на границе раздела фаз. Рассматриваемый проводник имеет низкую работу выхода и может снимать и рассеивать заряды с других проводников. Его молекулы метастабильны и выделяют энергию, служащую источником излучаемого тепла и свечения.

Рассмотрим теперь вкратце аргументацию, приводящую к этим выводам. Априори возможны два типа ответов на вопрос о том, что такое шаровая молния.

*Ответ первый.* Шаровая молния — автономное тело, состоящее из какого-то неустойчивого вещества, при разложении которого выделяется энергия.

*Ответ второй.* Шаровая молния — некоторый процесс, например особый вид газового разряда или волноводного процесса, который связывает ее с окружающей средой, откуда она непрерывно черпает свою энергию.

Изложенные в этой книге факты говорят скорее в пользу первой точки зрения. В пользу автономности ша-

ровой молнии можно привести следующие аргументы:

1) характер ее движения: движется, как самостоятельное отдельное тело, не проявляя каких-либо следов каналов, связывающих ее с другими предметами;

2) существование границы раздела между шаровой молнией и окружающей средой, которая обладает, по видимому, поверхностным натяжением;

3) существование корреляции между временем жизни и размером шаровой молнии.

То, что энергия шаровой молнии накоплена в веществе, а не в электромагнитном поле, следует хотя бы из оценки ее массы. Плотность шаровой молнии приблизительно равна плотности воздуха, в то время как масса излучения при любых разумных значениях энергии ( $W$ ) должна быть ничтожно мала ( $W/c^2$ ). Плазмоиды, т. е. образования из электромагнитного поля и вещества, неустойчивы и должны быстро отдавать свою энергию окружающей среде. К тому же, чтобы диссипативные процессы внутри молнии были малы, требуется очень высокая температура — сотни тысяч или миллионы градусов, которой молния не имеет.

Далее мы должны ответить на вопрос, из каких частиц состоит вещество молнии: заряженных или нейтральных? На первый взгляд логика подсказывает, что это — нейтральные частицы, так как при температуре шаровой молнии известные нам газообразные плазменные среды рекомбинируют. Однако необходимо обратить внимание на следующее:

1. Появление сильных кратковременных импульсов электрического тока в проводниках при контакте с шаровой молнией, приводящих к перегоранию предохранителей, оплавлению проводников и выходу из строя электроприборов, иногда на большом расстоянии от места контакта прямо указывает на то, что вещество шаровой молнии — проводник и, следовательно, оно должно состоять из заряженных частиц.

2. На то же самое указывает появление большей части наблюдаемых шаровых молний из различных электроприборов, розеток, батарей отопления и других металлических предметов.

3. Обычные газы, состоящие из нейтральных молекул, не образуют в других газах, в частности в воздухе, отдельную фазу, как это случается с веществом шаровой молнии.

4. Газ, имеющий плотность и температуру, отличные от плотности и температуры окружающего воздуха, должен быстро рассеиваться (особенно при движении в нем), в то время как шаровая молния может проходить сотни метров и существовать в течение минуты и даже больше. Границы шаровой молнии проявляют признаки устойчивости, не свойственные смесям обычных газов.

5. Нейтральные молекулы не могут давать радиоизлучения и вызывать появление ради шумов, которые, по видимому, создает шаровая молния.

Всеми этими свойствами могут обладать только среды, состоящие из заряженных частиц. Однако проводник, имеющий плотность газа,— газоразрядная плазма—имеет обычно очень высокую температуру—тысячи или десятки тысяч градусов. В то же время среды, проводящие ток при комнатной температуре,—металлы и электролиты—имеют высокую плотность конденсированных сред. Наиболее удивительное свойство шаровой молнии состоит в том, что она, имея плотность газа, является в то же время проводником при низкой комнатной температуре. Несмотря на всю необычность этого факта он не противоречит каким-либо фундаментальным законам природы, известным в настоящее время, и вследствие этого нельзя прийти к заключению, что такая среда в принципе не могла бы существовать.

До настоящего времени нам были известны проводники двух типов. В одном из них (металлы и полупроводники) господствует электронная или электронно-дырочная проводимость. В другом (электролиты) основными носителями тока являются ионы. Если кластерная гипотеза верна, то вещество шаровой молнии представляет собой скорее аналог электролита, чем металла, но электролита с очень низкой плотностью. Однако здесь мы подходим вплотную к границам возможностей простого наблюдения, не вооруженного современной экспериментальной техникой. Решить вопрос о том, каков характер проводимости среды, из которой состоит шаровая молния, и таким образом окончательно раскрыть ее природу может только эксперимент.

## Список литературы

1. Юман М. Молния: Пер. с англ. М.: Мир, 1972.
2. Barry J. D. Ball lightning and bead lightning. N. Y. and Lond.: Plenum Press, 1980.
3. Сингер С. Природа шаровой молнии: Пер. с англ. М.: Мир, 1973.
4. Humphreys W. J. Physics of the air. N. Y.: McGraw-Hill, 1929.
5. Humphreys W. J. Ball lightning. — Proc. Amer. Philos. Soc., 1936, vol. 76, № 5, p. 613.
6. McNally J. R. Jr. Preliminary report on the ball lightning. O. R. NL-3938 Oak-Ridge Nat. Lab., 1966.
7. Rayle W. D. Ball lightning characteristics. Rept. N. A. S. A., T. N.O.-3188, 1966.
8. Стаханов И. П., Лопатников С. Л. Шаровая молния: загадки остаются. — Наука и жизнь, 1975, № 12, с. 86.
9. Стаханов И. П. Эксперимент продолжается. — Наука и жизнь, 1978, № 2, с. 82; 1978, № 8, с. 147.
10. Стаханов И. П. Шаровая молния: продолжаем наблюдения. — Наука и жизнь, 1979, № 5, с. 123.
11. Стаханов И. П. На снимке — шаровая молния. — Наука и жизнь, 1982, № 2, с. 56.
12. Charmen W. N. Ball lightning. — Phys. Rept., 1979, vol. 54, № 4, p. 230.
13. Argyle E. Ball lightning as an optical illusion. — Nature, 1971, vol. 230, p. 179.
14. Charmen W. N. After-images and ball lightning. — Ibid., p. 576.
15. Brand W. Der Kugelblitz. Hamburg: Henri Grand, 1923.
16. Barry J. D. Ball lightning. — J. Atmos. Terr. Phys., 1967, vol. 29, p. 1095.
17. Дмитриев М. Т. Природа шаровой молнии. — Природа, 1976, № 6, с. 98.
18. Charmen W. N. Ball lightning photographed? — New Scientist, 1976, vol. 69, p. 444.
19. Дмитриев М. Т., Дерюгин В. М., Калинин Г. А. Об оптическом излучении шаровой молнии. — Журн. техн. физ., 1972, т. 42, № 10, с. 2187.
20. Дмитриев М. Т. Новые проблемы шаровых молний. — Природа, 1973, № 4, с. 60.
21. Дмитриев М. Т. Шаровые молнии, новые наблюдения и новые гипотезы. — Природа, 1971, № 6, с. 50.
22. Колосовский О. А. Исследование следа шаровой молнии на оконном стекле. — Журн. техн. физ., 1981, т. 51, № 4, с. 856.
23. Имянитов И., Тихий Д. За гранью законов науки. М.: Атомиздат, 1980.
24. Стаханов И. П. Физическая природа шаровой молнии. М.: Атомиздат, 1979.

25. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М.: Физматгиз, 1953.
26. Стаханов И. П. Об устойчивости шаровой молнии. — Журн. техн. физ., 1974, т. 44, № 7, с. 1373.
27. Капица П. Л. О природе шаровой молнии. — Доклады АН СССР, 1955, т. 101, № 2, с. 245.
28. Леонов Р. А. Загадка шаровой молнии. М.: Наука, 1965.
29. Стекольников И. С. Изучение молний и грозозащита. М.: Изд-во АН СССР, 1955.
30. Finkelstein D., Rubinstein J. Ball lightning. — Phys. Rev., 1964, vol. 135, № 2A, p. 390.
31. Стаханов И. П., Черковец В. Е. Физика термоэмиссионного преобразователя. М.: Энергоатомиздат, 1984.
32. Uman M. A., Helstrom C. W. Theory of ball lightning. — J. Geophys. Res., 1966, vol. 71, № 8, p. 1975.
33. Vostik W. H. Experimental study of plasmoids. — Phys. Rev., 1957, vol. 106, № 4, p. 404.
34. Шафранов В. Д. О равновесных магнитогидродинамических конфигурациях. — Журнал эксперим. и теорет. физ., 1957, т. 33, № 3, с. 731.
35. Смирнов Б. М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Наука, 1974.
36. Гезехус Н. А. О шаровой молнии. Санкт-Петербург: Изв технологического ин-та, 1898.
37. Френкель Я. И. Теория явлений атмосферного электричества. М. — Л.: Гостехтеориздат, 1949.
38. Barry J. D. Laboratory ball lightning. — J. Atmos. Terr. Phys., 1968, vol. 30, № 2, p. 313.
39. Смирнов Б. М. Об анализе природы шаровой молнии. — Успехи физ. наук, 1975, т. 116, № 4, с. 731.
40. Смирнов Б. М. Возникновение шаровой молнии. — Доклады АН СССР, 1976, т. 226, № 4, с. 806.
41. Смирнов Б. М. Процессы в шаровой молнии. — Журнал техн. физ., 1977, т. 47, с. 814.
42. Легасов В. А., Маринин А. С., Синявский В. Ф. Экспериментальное и расчетное исследование химической модели шаровой молнии. Препринт ИАЭ-2962, 1978.
43. Powell J. R., Finkelstein D. Ball lightning. — Amer. Sci., 1970, vol. 58, p. 262.
44. Hill E. L. Ball lightning as a physical phenomenon. — J. Geophys. Res., 1960, vol. 65, № 7, p. 1947.
45. Войцеховский Б. В., Войцеховский Б. В. Природа шаровой молнии. — Доклады АН СССР, 1974, т. 218, № 1, с. 77.
46. Александров В. Я., Голубев Е. М., Подмошенский И. В. Аэрозольная природа шаровой молнии. — Журнал техн. физ., 1982, т. 52, № 10, с. 1987.
47. Голубев Б. М., Подмошенский И. В. О возможности стабилизации больших концентраций ионов в капиллярных конденсаторах. — Письма в ЖТФ, 1977, т. 3, № 11, с. 509.
48. Стаханов И. П. О природе шаровой молнии. — Письма в ЖЭТФ, 1973, т. 18, № 3, с. 193.
49. Кулик П. П., Борман Г. Е., Поллак Л. С. Химические и физические кластеры. — Химия высоких энергий, 1976, т. 10, № 3, с. 203.



50. **Narcisi R. S., Bailey A. D.** Mass-spectrometric measurements of positive ions at altitude from 64 to 112 kilometers. — *J. Geophys. Res.*, 1965, vol. 70, № 15, p. 3687.
51. **Kebarle P., Searles S. K., Zolla A. e. a.** The solvation of the hydrogen ion by water molecules in the gas phase. — *J. Amer. Chem. Soc.*, 1967, vol. 89, № 25, p. 6393.
52. **Arshadi M., Kebarle P.** Hydration of  $\text{OH}^-$  and  $\text{O}_2^-$  in the gas phase. — *J. Phys. Chem.*, 1970, vol. 74, № 7, p. 184.
53. **Biondi M. A., Leu M. T., Johnsen R.** Recombination of electrons with positive ions of the  $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$  series. — *Aeronomy Rept.*, 1972, № 48, p. 266.
54. **De-Pas M., Leventhol J. J., Friedman L.** Experimental study of heat of proton solvation. — *J. Chem. Phys.*, 1968, vol. 49, № 12, p. 5543.
55. **De-Pas M., Leventhol J. J., Friedman L.** Tandem mass-spectrometry study of  $\text{D}_3\text{O}^+$  solvated derivatives. — *Ibid.*, 1969, vol. 51, № 9, p. 3748.
56. **De-Pas M., Giardini A. G., Friedman L.** Tandem mass-spectrometry study of solvated derivatives of  $\text{D}^-$ . — *Ibid.*, 1970, vol. 52, № 2, p. 687.
57. **De-Pas M., Ehrenson S., Friedman L.** Study of the  $\text{H}^+$  and  $\text{OH}^-$  hydrated ions by the CNDO/2 method. — *Ibid.*, 1970, vol. 52, № 7, p. 3362.
58. **Holland P. M., Castelman A. W.** A model for the formation and stabilisation of charged water cluthrates. — *Ibid.*, 1980, vol. 72, № 1(11), p. 5984.
59. **Puckett L. J., Teaque M. W.** Production  $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$  from  $\text{NO}^+$  precursor in  $\text{NO}-\text{H}_2\text{O}$  gas mixtures. — *Ibid.*, 1971, vol. 54, № 6, p. 2564.
60. **Niles F. E., Heimerl J. M., Keller G. E. e. a.** Reactions involving cluster ions. — *Aeronomy Rept.*, 1972, № 48, p. 245.
61. **Биберман Л. М., Норман Г. Е.** О возможности существования переохлажденной плотной плазмы. — *Теплофизика высоких температур*, 1969, т. 7, № 5, с. 822.
62. **Манькин Э. А., Ожован М. И., Полуэктов П. П.** К вопросу о природе шаровой молнии. — *Журнал техн. физ.*, 1982, т. 52, № 3, с. 127.
63. **Стаханов И. П.** Кластерная плазма и излучение шаровой молнии. — Там же, 1976, т. 46, № 1, с. 82.
64. **Гудзенко Л. И., Держиев В. И., Яковленко С. И.** Некоторые свойства ионной и кластерной плазмы. — *Тр. ФИАН*, т. 120, с. 50—63.
65. **Henson V. Z.** Ion mobilities in pure water vapour of saturation. — *J. Phys.*, 1978, vol. D11, № 10, p. 1405.
66. **Экспериментальная ядерная физика. Т. 1: Пер. с англ./Под ред. Э. Серге. М.** — Л.: 1965.
67. **Михайловский А. Б.** Теория плазменных неустойчивостей. Т. 1. М.: Атомиздат, 1970.
68. **Young C. E., Edelson D., Fulconer W. E.** Water cluster ions: rates of formation and decomposition of hydrates of hydronium ion. — *J. Chem. Phys.*, 1970, vol 53, № 11, p. 4295.
69. **Good A., Durden D. A., Kebarle P.** Ion-molecule reactions in pure nitrogen, containing traces of water at total pressure 0,5—4 torr. Kinetics of clustering reactions froming  $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ . *Ibid.*, 1970, vol. 52, № 1, p. 212.

## Оглавление

	Стр.
Предисловие . . . . .	3
<b>Глава 1. Что такое шаровая молния?</b> . . . . .	<b>6</b>
1.1. Загадки шаровой молнии . . . . .	6
1.2. Источники сведений о шаровой молнии . . . . .	9
1.3. Существует ли шаровая молния? . . . . .	17
1.4. Как часто она появляется? . . . . .	35
1.5. Шаровая молния и гроза . . . . .	43
<b>Глава 2. Свойства шаровой молнии</b> . . . . .	<b>46</b>
2.1. Время жизни . . . . .	46
2.2. Размеры и форма . . . . .	52
2.3. Характер движения . . . . .	59
2.4. Излучение и температура . . . . .	66
2.5. Оценки энергии . . . . .	78
2.6. Электрические явления, связанные с шаровой молнией . . . . .	98
2.7. Возникновение шаровой молнии . . . . .	105
2.8. Устойчивость шаровой молнии . . . . .	115
2.9. Корреляции в свойствах шаровой молнии . . . . .	129
2.10. «Искусственные» шаровые молнии . . . . .	139
2.11. Итоги обработки наблюдений . . . . .	147
<b>Глава 3. Краткий обзор гипотез о природе шаровой молнии</b> . . . . .	<b>151</b>
3.1. Шаровая молния, получающая энергию извне . . . . .	151
3.2. Плазменные и химические гипотезы . . . . .	159
<b>Глава 4. Кластерная гипотеза</b> . . . . .	<b>170</b>
4.1. В чем сущность кластерной гипотезы . . . . .	170
4.2. Кластеры и кластерные оболочки . . . . .	175
4.3. Некоторые оценки . . . . .	184
<b>Глава 5. Как создать шаровую молнию?</b> . . . . .	<b>190</b>
5.1. Что же мы хотим получить? . . . . .	190
5.2. Рождение шаровой молнии в импульсном коронном разряде . . . . .	193
5.3. Об экспериментах с электронным пучком . . . . .	203
<b>Заключение</b> . . . . .	<b>203</b>
<b>Список литературы</b> . . . . .	<b>206</b>

