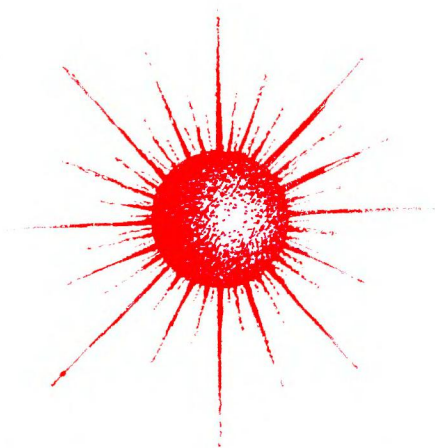


С.СИНГЕР

ПРИРОДА

ШАРОВОЙ

МОЛНИИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО · МИР ·

THE NATURE
OF BALL LIGHTNING

S. Singer

PLENUM PRESS

NEW YORK 1971

С. Сингер

ПРИРОДА

ШАРОВОЙ

МОЛНИИ

Перевод с английского
П. С. Гурова и В. В. Рыбина
Под редакцией
А. М. Комелькова

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

МОСКВА 1973

Книга дает довольно полный обзор существующих наблюдений и теорий одного из удивительных явлений природы — шаровой молнии, до сих пор не получившего общепринятого объяснения.

Автор знакомит читателя со свидетельствами многочисленных очевидцев, обсуждает вопрос о реальности явления шаровой молнии, суммирует ее характерные особенности, вытекающие из наблюдений, кратко и популярно разбирает все имеющиеся теории шаровой молнии. Книга снабжена обширной библиографией, представляющей самостоятельную ценность.

Книга представит интерес для лиц, работающих в области атмосферного электричества и разрядов в газах, а также для читателей, интересующихся различными проблемами науки.

*Редакция космических исследований,
астрономии и геофизики*

© Перевод на русский язык, «Мир», 1973

С $\frac{234-111}{041(01-73)}$

С $\frac{294-111}{041(01-73)}$

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Загадочные явления образования огненных шаров при грозах неизменно привлекают к себе внимание людей. Однако трудно назвать какую-либо другую естественно-научную проблему, которая вызывала бы столь скептическое отношение большого числа серьезных естествоиспытателей, как проблема шаровой молнии. В то же время вполне понятно стремление исследователей найти пути для решения этой задачи с использованием всех достижений современной науки.

Такое до известной степени парадоксальное положение объясняется прежде всего недостатком надежных наблюдений шаровой молнии и отсутствием убедительных лабораторных экспериментов, хотя бы в какой-то степени моделирующих явление шаровой молнии.

Автор предлагаемой вниманию читателя книги взял на себя большой труд собрать и классифицировать наблюдения и описания случайных очевидцев, большинство которых не только не были специалистами в области атмосферного электричества, но и вообще не обладали научной подготовкой.

Однако автор сделал и следующий шаг, дав краткое, в значительной степени общедоступное изложение всех имеющихся в литературе теорий (точнее, гипотез) шаровой молнии, что позволит интересующимся этой проблемой учесть в своей работе ранее выдвинутые идеи.

Несомненно, критическая сторона данной книги могла бы быть развита шире и значительно глубже. Однако основные трудности решения такой естественно-научной проблемы, как шаровая молния, все же нашли отражение в книге.

Вот почему знакомство с этой книгой будет полезным для лиц, работающих в области атмосферного электричества, грозозащиты, физики газового разряда, физики плазмы, а также для широкого круга читателей, интересующихся еще не решенными загадками природы.

А. М. Комельков

ПРЕДИСЛОВИЕ

Появившиеся в 1838 г. в «Ежегоднике» французского Бюро географических долгот обширные публикации о молнии, где один из разделов был посвящен шаровой молнии, послужили началом научной литературы об основных свойствах этого странного явления природы. Автором статьи был Франсуа Араго, один из видных членов Французской академии наук XIX в., принятый в нее в возрасте 23 лет. Своей работой он, несомненно, способствовал тому, что эта проблема вызвала обоснованный научный интерес. В статье были очень четко сформулированы некоторые из основных вопросов, связанных с шаровой молнией. Последующие обсуждения часто не давали почти ничего нового по сравнению со статьей Араго.

В дальнейшем всегда находилась небольшая смелая группа ученых, которая на основе последних достижений науки пыталась найти объяснение такому случайному и, казалось бы, простому явлению, как шаровая молния, как правило, наблюдаемому во время грозы. Однако все попытки разгадать это явление оказывались неудачными. Характеристики шаровой молнии можно систематизировать, но они трудно поддаются экспериментальному воспроизведению и теоретическому объяснению. Можно утверждать, что и сегодня не существует теории, которая удовлетворяла бы большинство ученых. Этой проблемой занимались крупные ученые, добившиеся значительных успехов в других областях науки, в том числе Фарадей, Кельвин и Аррениус. Аррениус довольно подробно рассмотрел шаровую молнию в своем учебнике космической физики. Монография Бранда (1923 г.), ставшая теперь классической, была опубликована отдельным томом в серии, посвященной проблемам космической физики. Современные исследователи чаще всего считают шаровую молнию плазменной сферой. Краткая, впечатляющая статья Капицы вызвала и мой интерес к проблеме, в особенности к структуре плазменной сферы малого размера, над которой сейчас продолжает работать мой коллега Нак Гу Ким.

Как видно из опубликованных работ, интерес к шаровой молнии, этому труднообъяснимому явлению, не ослабевает вот уже более

125 лет. В последних публикациях обнаруживается знакомство лишь с малой частью информации о шаровой молнии; частые запросы показывают, что монография Бранда, вышедшая более 45 лет назад, стала библиографической редкостью. Многие ценные наблюдения и вполне обоснованные заключения, сделанные в прошлом, по-видимому, малодоступны современным исследователям. Одна из целей настоящей работы состоит в изложении и сопоставлении всех имеющихся в литературе сведений о шаровой молнии. Статьи на эту тему появлялись в прошлом нерегулярно: периоды бурной активности сменялись длительными периодами, когда совсем не публиковалась информация о шаровой молнии. В настоящее время интерес заметно возрос. В данной книге учтена литература вплоть до 1969 г., причем некоторые исследователи любезно сообщили материалы, которые еще только должны появиться в печати.

Автор попытался описать теории шаровой молнии, в какой-то мере подчеркивая достоинства, которыми эти теории обладали в тот период, когда они были выдвинуты. Однако было бы ошибочным считать, что автор им симпатизирует. Во-первых, некоторые из них действительно имеют мало достоинств. Невероятное разнообразие прошлых и современных теорий может вызвать определенные затруднения или даже путаницу. С другой стороны, это, быть может, снизит вероятность дублирования прежних теорий и предотвратит появление в будущем не оправдывающих себя представлений, способствуя таким образом появлению теории, которой наконец удастся объяснить все свойства шаровой молнии.

В рассматриваемую проблему вовлечены некоторые специальные разделы метеорологии, физики и химии. Отсутствие убедительной теории время от времени приводит к тому, что новые достижения в этих областях преждевременно, если не с излишней поспешностью, используются для создания теоретических моделей шаровой молнии. Использование этих данных (например, из физики плазмы, значение которой все более возрастает) представляет собой логическую задачу. Автор стремился подчеркнуть физический смысл результатов. Математические выражения, хотя они более четки, обычно в обсуждении опускаются, что, впрочем, не должно помешать читателю восстановить их, если он того пожелает. Целью автора было представить материал каждой области в легко воспринимаемой форме для тех, кто, быть может, не обладает специальными знаниями, а также для широкого читателя, интересующегося естественными науками, которого может привлечь это чрезвычайно любопытное и интересное явление.

Глава 1

ГРОЗОВЫЕ РАЗРЯДЫ И ЗАГАДКА ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Бесчисленные грозовые облака заключают в себе колоссальные электрические машины, работа которых проявляется в разрядах молний. Огромная величина их электрической мощности вполне очевидна для наблюдателей, у которых звенит в ушах и слепнут глаза — как, например, у свидетеля настоящей канонады вспышек, который за одну минуту насчитал 200 ударов молний, или у автора сообщения о том, что массивная каменная стена была сдвинута на несколько футов в результате воздействия одного-единственного разряда.

В древности на молнию взирали с вполне понятным трепетом. Утверждают, например, что этруски призывали на вражеские армии небесные стрелы. Древним было известно существование нескольких видов молний: линейной, зигзагообразной, ленточной и шаровой. Бенджамин Франклин с поистине великолепным научным прозрением заметил сходство между разрядами, создаваемыми с помощью электрических машин XVIII в., и обычной молнией. Для проверки своей гипотезы Франклин предложил простой и ясный эксперимент — сведение электрического заряда с неба, чтобы он стал доступным исследователю, с помощью проводника, поднятого воздушным змеем; вскоре он с несомненностью установил, что молния действительно представляет собой электрический разряд.

Через сто лет Бойс сконструировал фотокамеру с вращающимися на диске объективами, благодаря которой удалось проследить за стремительной сменой событий в разряде молнии. Почти невидимый электрический пилот-лидер движется от заряженной грозовой тучи короткими быстрыми толчками с паузами между ними, отыски-

вая наиболее подходящий путь к земле или к другому облаку. Когда канал уже сформировался, следует мощный главный разряд, при котором на малую долю секунды возникает ток, достигающий 100 000 А при разности потенциалов между облаком и землей в миллиард вольт. Этот разряд порождает яркую вспышку, которую мы и видим как молнию.

Лишь совсем недавно были выяснены механизмы разделения зарядов в облаках, способные, по-видимому, создавать электрические поля, близкие к тем, которые необходимы для возникновения молнии. Однако скорость образования зарядов, если оценивать ее исходя из одного какого-то механизма, все же недостаточна для того, чтобы объяснить возникновение молний даже обычного типа. Разделение зарядов объяснялось столкновением дождевых капель, замерзанием, трением капель или твердых частиц о воздух, разрушением капель при столкновении и другими подобными взаимодействиями газа и частиц. Хотя приемлемые механизмы накопления электрических зарядов известны, реальные процессы, протекающие в облаке, пока не установлены.

Разряд обычной молнии в основных чертах уже вполне понятен; весьма значительный прогресс достигнут в изучении его физического механизма. Но с шаровой молнией дело обстоит совсем иначе, если говорить о научном понимании этого явления. Хотя шаровая молния привлекала внимание многих крупных ученых — Бойля, Араго, Фарадея, Планте, Лоджа, Аррениуса, Теплера и Капицы, — единого мнения об этом, по-видимому, одном и том же грозовом явлении пока не существует. Причины противоречивости гипотез о шаровой молнии становятся очевидными, как только мы приступаем к изучению имеющихся о ней сведений.

Упоминания о шаровой молнии встречаются в древней литературе с тех самых пор, как появились первые записи о метеорологических явлениях. Еще раньше явление шаровой молнии находило отражение в древнем искусстве. Многим современным исследователям шаровой молнии неизвестны весьма ценные наблюдения, проведенные каких-нибудь сто лет назад. Критические обзоры этой проблемы, появившиеся в последние несколько лет

и претендующие на полноту, на самом деле опираются лишь на относительно небольшую часть имеющихся сведений и на обзоры, опубликованные в основном за последние 25 лет. В то же время рассмотрение всей проблемы, еще не превзойденное ни по критичности суждений, ни по детальности разбора, появилось в печати более 50 лет назад. Возможно, отчасти поэтому нередко объявляются «новыми» теории, которые на самом деле уже выдвигались в прошлом. Случалось, что в достаточно авторитетных работах делались абсолютно неверные утверждения, даже когда в современной им литературе имелись вполне надежные данные по рассматриваемому вопросу. Во всей истории науки найдется немного загадок природы, решение которых давалось бы с таким трудом.

Шаровая молния представляет собой светящуюся сферу, которая возникает во время грозы. Чаще всего она красная, хотя нередко сообщалось о светящихся шарах других цветов, включая желтый, белый, голубой и зеленый. Размеры ее бывают самыми разными, однако наиболее обычен диаметр около 15 см. Шаровая молния представляет собой разительный контраст с обычной молнией, так как она часто движется горизонтально вблизи земли с небольшой скоростью. Она может на какое-то время застыть неподвижно или изменить направление своего движения. В отличие от мгновенной вспышки обычной молнии шаровая молния существует сравнительно долго — несколько секунд или даже минут. Перемещаясь, светящаяся сфера нередко оказывается внутри помещений и проходит иногда совсем близко от наблюдателя. Она проникает в помещение через окно или через печную трубу и может покинуть его через такое же отверстие. Проф. К. Иборн (факультет молекулярной физики Суссекского университета) вспоминает, что в дни его детства окна их дома во время грозы всегда оставались открытыми, чтобы шаровая молния, если она вдруг появится, могла вылететь беспрепятственно. Зелкевич, наоборот, рассказывает, что в их доме окна во время грозы закрывались, чтобы сквозняки не втянули огненный шар в комнату. Во многих случаях люди, видевшие шаровую молнию, отмечали, что шар, хотя он и чрезвычайно ярк, не испускает тепла и исчезает бесшумно. В других

случаях происходили сильные взрывы, разбрасывающие по сторонам и повреждавшие оказавшиеся поблизости предметы.

В этих общих описаниях замечается большое разнообразие. Светящаяся сфера редко представляет собой правильный шар. Часто это масса довольно неправильной формы, иногда с несколькими выступами. Шаровая молния может испускать искры. В одних случаях границы ее отчетливы, в других несколько размыты. Часто сообщается о шипении или потрескивании, словно при электрическом разряде, а иногда шар движется совершенно бесшумно. Он то падает из тучи прямо на землю, как тело с заметной массой, то парит над землей или даже отскакивает от нее, как бы обладая упругостью. В некоторых случаях шаровую молнию, по-видимому, несет ветер, в других она движется в направлении, прямо противоположном ветру.

Такое большое разнообразие сообщаемых свойств приводит к значительной путанице при попытках найти четкое объяснение явлению шаровой молнии. Теорий было, пожалуй, даже слишком много. В большинстве объяснений грозовому электричеству отводится роль возбуждающего фактора, вызывающего возникновение светящейся массы. Длительную же активность шара пытаются объяснить в первую очередь химическими реакциями или электрохимическими процессами. Химические теории, если рассматривать их в порядке возникновения, исходили из того, что шар состоит из веществ, возникающих при грозовых разрядах: иодистого азота, смеси водорода и кислорода или озона, — свойства которых определяют энергию, высвобождающуюся при последующем распаде шаровой молнии. Высказывалась идея, что при вспышке молнии образуется активный азот и что этот выделившийся азот «горит» затем в атмосфере, в результате чего возникают окислы азота. Чисто электрические теории рассматривают шаровую молнию как кистевой разряд. Выдвигалось предположение, что короткий участок канала молнии отделяется от нее в виде вихря. Шаровую молнию могло бы также создать испарение какого-нибудь металла — например, меди — при интенсивной вспышке обычной молнии. Обсуждалась также идея та-

ких распределений электрически заряженных частиц пыли, дождевых капель или ионов атмосферных газов, в которых нейтрализация противоположных зарядов каким-то образом замедляется. Многие из совсем недавно предложенных моделей используют теорию плазмы — область физики, исследующую свойства материи при высоких температурах и быстро развивающуюся сейчас в связи с проблемой управляемых термоядерных реакций.

Поскольку каждой из этих теорий удастся объяснить по крайней мере некоторые свойства шаровой молнии, зачастую игнорируя при этом прочие, не так-то легко найти убедительное опровержение таких неадекватных теорий с помощью безукоризненных аргументов. Иногда один и тот же автор выдвигает весьма отличающиеся друг от друга объяснения, никак не упоминая об ошибках своей прежней модели и не проводя никакого сравнения, которое показало бы преимущества новой. Предлагается удивительно много новых теорий, в которых недостаточно принимаются во внимание предшествующие исследования, простейшие физические законы и описание этого явления.

Чтобы обсудить эту проблему систематически, мы рассмотрим ниже различные теории шаровой молнии. Их можно будет оценить, опираясь на весьма значительную информацию, накопившуюся по многим новым вопросам. Имеющиеся в настоящее время данные в каждой конкретной области дают основания отвергнуть почти все старые теории. Изучение многочисленных конкретных наблюдений (в литературе их описано свыше тысячи), а также анализ некоторых лабораторных экспериментов совершенно неожиданно позволяют вывести из данных, имевшихся налицо уже в течение 50 лет, определенное заключение о сущности одной из форм шаровой молнии. Результаты, полученные совсем недавно, дали нам ценную информацию относительно новой теории, которая может помочь лучше понять это явление.

Глава 2

ШАРОВАЯ МОЛНИЯ В ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ ВЕКА

Во время гроз возникают вспышки молний различного типа. Наблюдение разных форм молний привело к их классификации по типам уже в античные времена, но эти описания до наших дней не сохранились и известны только по ссылкам на них в более поздних книгах. Три наиболее распространенных типа молнии: обычная, или линейная, молния, которая часто видна в небе как яркая, четко очерченная дорожка; ленточная молния, слабо светящаяся и охватывающая широкую полосу небосвода, и, наконец, шаровая молния, светящаяся иногда очень слабо, а иногда очень ярко, но в целом представляющая собой очень специфическое явление как в отношении формы, так и в отношении своего движения. Эгрусские памятники искусства показывают нам именно эти типы молний, включая и огненный шар [160]. Рассуждения о шаровой молнии имелись, по-видимому, и в метеорологических трудах Аристотеля, жившего в IV в. до н. э. [17].

Аристотель упоминает о медленно движущейся стреле молнии и о молнии, возникающей в закрытых пространствах, однако остается неясным, имел ли он при этом в виду шаровую молнию. Сенека ссылается на труды жившего в I в. до н. э. Посидония, который различал шесть классов молний, включая и шаровую [176]. Считается [102], что Лукреций в своей поэме «О природе вещей» [294] рассматривает и шаровую молнию, однако не все согласны с этим выводом. Лукреций утверждает, что обычная молния состоит из твердых сферических светящихся атомов, что позволяет ей проникать через твердые тела.

С электрическими явлениями, возникающими во время грозы, нередко путали огненные следы метеоров и бо-

лидов — тел, на большой скорости входящих в атмосферу из космического пространства. Такая путаница встречается не только в прежних трудах [240], но и в современных метеорологических обзорах [462]. Различия свойств твердого тела, летящего сквозь воздух, и светящегося шара, возникающего во время грозы, обнаруживаются очень легко.

Твердые тела, с большой скоростью проносящиеся сквозь атмосферу, летят по прямой линии. К концу полета, когда их масса заметно уменьшается, они могут внезапно несколько раз подряд отклониться от прямолинейного пути. Позади них тянется характерный светящийся след из вещества, которое отделилось от основной массы. Иногда первоначальное тело распадается на несколько частей, которые движутся по расходящимся путям. Вторгшееся в атмосферу тело может разрушиться целиком до того, как оно успеет упасть на землю, или же может расплавиться и удариться о землю уже в жидком состоянии. Часто на землю попадают и твердые куски этих тел.

Появление метеорита в небе во время грозы — явление возможное, но редкое и чисто случайное. Многие их характеристики противоположны отмеченным нами свойствам шаровой молнии.

Шаровая молния, как правило, связана с грозой, хотя, подобно другим формам молнии, она нередко наблюдалась и в отсутствие грозы. Хотя прямыми измерениями и не удалось установить, из какого вещества состоит шаровая молния, тот факт, что она возникает благодаря какому-то действию естественного электричества, а также ее сложные траектории, часто наблюдавшиеся у самой поверхности земли при очень малой скорости передвижения, указывают на то, что наличие в ней твердого ядра весьма маловероятно.

Шаровую молнию нередко называли «электрическим метеором», хотя на ее отличие от других светящихся объектов в атмосфере указал еще Мушенброк [352], которому приписывается изобретение лейденской банки. Однако болиды продолжали путать с шаровой молнией, как это видно из ошибочных сообщений о шаровой молнии, которые публиковались даже полтора столетия спустя. По-

рой, наоборот, шаровую молнию — явление относительно редкое — принимали за метеорит [65, 240]. Повторные обсуждения вопроса о правильной идентификации огненного шара как метеорита или шаровой молнии были вызваны многими сообщениями, из которых не было ясно, какое же из этих явлений наблюдалось в действительности.

Например, в конце XIX в. несколько раз сообщалось о появлении «медленных болидов», или «брейдитов» [83]. Эти объекты выглядели как метеориты, но двигались с очень малой скоростью. В одном случае такой объект наблюдался двумя очевидцами, находившимися довольно далеко друг от друга, причем один из них уже видел до этого обычные метеориты. Все остальные характерные черты этих явлений, как бы редко они ни наблюдались, позволяют отнести их к метеорам. Необычные же скорость и длительность существования объясняются, как это бывает в такого рода вопросах, необычными траекториями, из-за чего трудно оценить истинные значения этих величин. Например, в основе указанных сообщений мог лежать тот факт, что траектория проходила на большой высоте почти параллельно поверхности земли.

Ранние наблюдения шаровой молнии дают весьма ограниченный материал. Систематические же исследования в этой области не могут быть осуществлены из-за редкости явления.

Ценными являются три источника информации: непосредственные наблюдения, обеспечивающие первоначальные данные; теоретическое осмысление этих наблюдений, при котором проводится сравнение свойств шаровой молнии со свойствами других явлений природы, и, наконец, лабораторные эксперименты, в первую очередь с различными типами электрических разрядов, ставящие своей целью воспроизведение характерных черт шаровой молнии, нередко в соответствии с условиями, которые принимаются в теории за исходные. Следует с самого начала сказать, что экспериментально воссоздать все свойства естественной шаровой молнии пока еще ни разу не удалось.

Характерные свойства шаровой молнии мы изложим ниже на материале ряда наблюдений, собранных в лите-

ратуре. Приведем некоторые из самых ранних сообщений, представляющих главным образом исторический интерес.

Самое раннее описание [62] явления, которое могло быть шаровой молнией, было обнаружено в трудах Григория Турского, относящихся к VI в.

Во время освящения часовни над процессией церковных и светских сановников города Тура появился ослепительно яркий огненный шар. Зрелище вселяло такой ужас, что все члены процессии кинулись ничком на землю. Рассуждения Григория об этом явлении показывают, что он был знаком со сходными случаями. Он упоминает о том, что в некоторых местностях в определенное время года у людей из волос исходят огни — тут речь, несомненно, идет об огнях св. Эльма, т. е. о святящихся разрядах в сильном электрическом поле на возвышающихся предметах. Григорий упоминает также о сиянии и об огненных языках, которые отдельные люди видели над религиозными реликвиями, хотя остальные ничего подобного не замечали. Он подчеркивает, что огненный шар над процессией видели все. Не найдя никакого рационального объяснения этому явлению, Григорий приходит к выводу, что участники процессии были свидетелями чуда.

В Англосаксонской хронике в записи от первой недели 793 г. рассказывается о сильнейшей грозе, во время которой, кроме чрезвычайно ярких молний (по-видимому, обычных зигзагообразных разрядов), наблюдались еще и «огненные драконы» [92].

В мемуарах XVI в. [41] сообщается, что в спальню Дианы Французской вечером в день ее свадьбы, 3 марта 1557 г., влетело пламя. Оно кружило по комнате и, когда приблизилось к кровати, опалило простыни и волосы нобвобрачной.

На клотиках парусных судов нередко видели неподвижные святящиеся шары огней св. Эльма. Несколько раз в море наблюдались и шаровые молнии, которые перемещались на значительные расстояния. В 1749 г. в трех милях от корабля «Лизард» был замечен голубой огненный шар величиной с жернов, быстро приближающийся к кораблю [96]. Прежде чем моряки успели поставить

добавочные паруса, шар оказался на расстоянии не более пятидесяти ярдов от корабля, затем взмыл прямо вверх и взорвался, загрохотав, как сотни пушек, и издав очень сильный запах серы. Грот-стенга была разбита в щепки, а грот-мачта расколота до самого низа. Вырванные из грот-мачты костыли были с такой силой вбиты в палубу, что плотнику пришлось вытаскивать их с помощью лома. Взрыв сбил с ног пять человек, а один матрос получил сильные ожоги.

Выдвижение Франклином гипотезы об электрической природе молнии побудило новую группу естествоиспытателей, получивших затем название «электриков», начать широкое изучение грозового электричества. Предполагается, что причиной смерти проф. Рихмана, погибшего в Петербурге летом 1753 г., была шаровая молния или, согласно недавнему описанию этого события в советской научной печати [102], первый эксперимент, приведший к созданию искусственной шаровой молнии. Свидетелем этого «эксперимента» был друг проф. Рихмана, гравер Петербургской академии наук. Кроме гравюры, сделанной этим очевидцем, имеется еще и описание этого случая, пересланное в Лондонское королевское общество и содержащее дополнительные сведения, полученные от Ломоносова, который посетил лабораторию и подробно ее исследовал [561].

Рихман вместе со своим другом гравером наблюдал воздействие грозы на изобретенное им устройство для измерения электрического поля в атмосфере. Свидетели, находившиеся вне лаборатории, видели, как молния попала в металлический стержень на крыше, который был соединен с измерительным аппаратом, установленным в лаборатории Рихмана. Внутри лаборатории от металлического стержня устройства отделился голубой огненный шар величиной в кулак и ударил Рихмана, стоявшего примерно в полушаге от прибора (рис. 1), прямо в лоб. Когда шар коснулся Рихмана, раздался треск, напомилавший выстрел из пистолета, а раскаленные проволоки от аппарата задели гравера и зажгли на нем одежду.

Несмотря на то что связь между разрядами обычной молнии и шаровой молнии отмечалась часто, первые тео-



Р и с. 1. Смерть Рихмана.

рии, выдвинутые «электриками», не были связаны с электричеством. Мушенброк предположил [352], что шаровая молния представляет собой сгусток воспламенившихся газов.

Фарадей отметил [147], что скорость перемещения и время существования шаровой молнии несопоставимы со всеми известными свойствами обычных электрических разрядов, и сделал отсюда вывод, что какая-либо связь шаровой молнии с обычными молниями или атмосферным электричеством «более чем сомнительна». С другой стороны, образование вращающегося красного огненного шарика во время одного из экспериментов с лейденской банкой было выдано в конце XVIII в. за эффект, объясняющий образование болидов, которые, как мы знаем теперь, являются твердыми телами, раскаляющимися до свечения при быстром полете сквозь атмосферу. Огненный шар в лейденской банке разорвался с громким шумом, и в ее стенке образовалась дыра с ровными краями. После этого чувствовался сильный запах серы.

Первый глубокий анализ материалов о шаровой молнии был сделан в работе Араго [16], которая включена в 1838 г. в ежегодную публикацию французского Бюро долгот. Много лет спустя Араго вспоминал, что ему не советовали заниматься работами в этой области, поскольку ее исчерпывающим образом исследовал Франклин.

Работа Араго, совершенно в духе нынешних обзоров, включала общее описание характерных свойств шаровой молнии, содержала более двадцати сообщений о наблюдении шаровой молнии (в более поздних изданиях Араго добавил еще несколько примеров, отобранных из большого числа дополнительных сообщений, которые он получил после того, как стало известно, что он занимается этим явлением), а также предположение о возможном сходстве этих огненных шаров. Он перечислил некоторые из сложных проблем, на которые наука того времени еще не дала ответов, и попытался выяснить вопрос, существует ли шаровая молния действительно или это просто оптическая иллюзия. Его уверенность в реальном существовании шаровой молнии, а также его теория о том, что

она частично состоит из вещества, образующегося при разряде обычной молнии, будут рассмотрены ниже, в главах, посвященных этим вопросам. В книге о грозах, опубликованной через 5 лет после появления работы Араго, Гаррис [200] выдвинул предположение, что шаровая молния представляет собой электрический кистевой разряд. Но как бы то ни было, именно после статьи Араго вопрос о шаровой молнии вошел в круг научных проблем.

Глава 3

СВОЙСТВА РАЗРЯДА МОЛНИИ И ПРОТЕКАЮЩИЕ В НЕМ ПРОЦЕССЫ

Во многих сообщениях о шаровой молнии указывается на ее тесную связь с разрядами обычной молнии во время грозы. Хотя в ранних теориях шаровая молния не считалась электрическим явлением — даже когда роль электричества в возникновении обычной молнии стала уже хорошо известна, — тесная связь шаровой молнии с грозами, сопровождавшимися интенсивными электрическими явлениями, вскоре породила идею, что эти различные формы молнии находятся в тесной связи. Так, шаровую молнию считали стационарной молнией [240], а обыкновенную молнию — траекторией быстро движущейся шаровой молнии [348, 494].

Упоминания Аристотеля о медленно движущихся «грозовых стрелах» в отличие от быстро движущихся, а также Лукреция о молниевых вихрях, возможно, означают, что они считали обе молнии различными формами одной и той же природной субстанции, а не просто разными явлениями при грозах. Теории шаровой молнии, выдвигавшиеся в различные эпохи, постоянно связывали это явление с обычной молнией, с важнейшими процессами, происходящими в ней. Поэтому будет уместным рассмотреть здесь хорошо известные формы линейной молнии.

Грозовым разряд — этот непрерывно обновляющийся дар Прометея, принесшего человеку огонь — происходит, когда колоссальная разность потенциалов, накапливающаяся при разделении зарядов в облаке, внезапно порождает электрический ток, уничтожающий эту разность потенциалов. Яркий свет молнии излучается каналом, по которому проходит ток, отчетливо выделяя эту область из окружающей атмосферы (рис. 2).

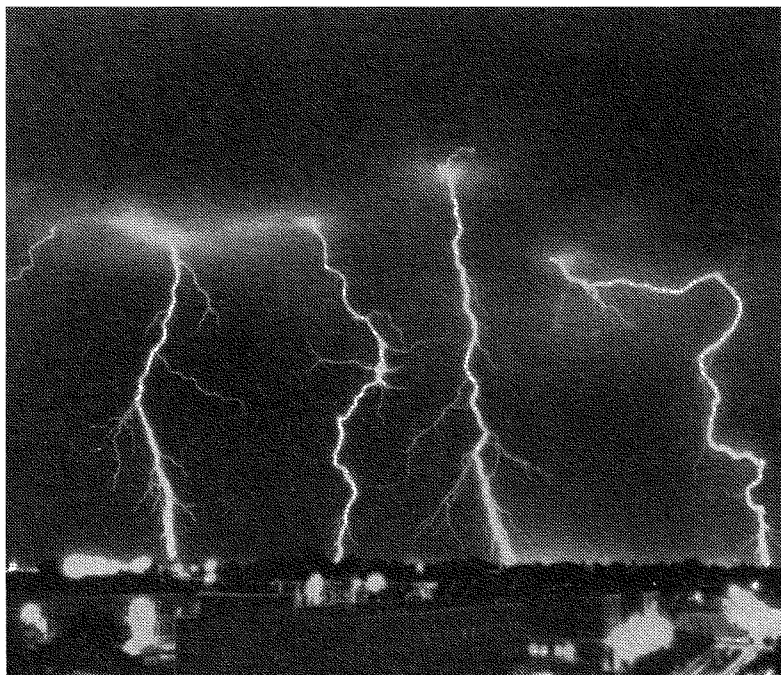


Рис. 2. Разряд молнии.

Разность потенциалов между грозовым облаком и землей может достигать 10^9 В, а градиент электрического поля, при ясной погоде равный 100—400 В/м (над океаном меньше, над однородными плоскими пространствами суши больше), во время грозы возрастает до многих киловольт на метр [66, 97, 461]. Предлагалось, например, использовать эту колоссальную разность потенциалов как своего рода естественную лабораторию для электрических экспериментов [66]. Средний ток в импульсе молнии составляет примерно 10 000 А, а максимальная наблюдавшаяся сила тока [97] превышает 100 000 А. Полный перенесенный заряд оценивается величинами от 0,02 до более 100 Кл. Принятой средней величиной является 20 Кл. В соответствии с этими цифрами мощность, выделяющаяся в канале молнии, может достигать 10^{12} Вт, а соответствующая энергия — 10^9 Дж.

Высокоскоростная фотосъемка, а также электрические измерения показали, что приведенные выше электрические характеристики отдельной вспышки молнии связаны с развитием нескольких самостоятельных процессов. После образования канала молнии по нему нередко могут пройти три, а иногда и более срока импульсов. Суммарная продолжительность вспышки составляет примерно 0,25 с с интервалом между импульсами в 10—100 мс. Вспышки молний, состоящие из многократных разрядов, могут длиться от 40 мс до 0,27 с [253]. В каналах, сохраняющих достаточную проводимость, ток может возрастать без повторения лидерного процесса, и возникает длительное свечение, связанное с непрерывно текущим током. С помощью фотометра свечение ионов азота N_2^+ еще удалось наблюдать в течение 0,8 с после вспышки молнии.

В излучении разряда имеется полоса около 3914 \AA ($B^2 \Sigma u^+ \rightarrow x^2 \Sigma g^+$), находящаяся в ультрафиолетовой, невидимой области спектра. Наибольшая интенсивность превышала фон неба примерно на 50 Релей ($5 \cdot 10^7$ фотон/см² с). Однако это долго существующее излучение приписывается молекулярному и резонансному рассеянию света молнии с длиной волны 3914 \AA , а не свету от самой вспышки.

При вспышке обычной зигзагообразной молнии канал образуется первичным потоком электронов, или лидером*, который уходит из тучи со скоростью $\approx 10^7$ см/с и продвигается ступенями ≈ 50 м длиной с интервалами 50 мкс. Так лидер довольно извилистым путем движется вниз, к земле, достижением которой завершается образование канала с достаточной проводимостью для последующих мощных электрических импульсов. Путь молнии от облака до земли нередко достигает 5 км длины. Когда лидер заканчивает формирование канала, от земли вверх со скоростью до 10^{10} см/с внезапно устремляется мощный импульс тока, создающий яркую световую вспышку, которую мы и видим. В небольшом по дли-

* В действительности лидер — это не поток электронов, а относительно высоко проводящая токовая нить, окруженная слабо свещающимися стримерами, на фронте которых протекают процессы ионизации — *Прим. ред.*

тельности обратном, или главном, разряде (100—115 мк/с) переносится ограниченный заряд, несмотря на высокие значения максимальных токов [365]. В итоге лидер может перенести вдвое больший заряд, чем обратный разряд. Каждый из них может перенести до 20 Кл [534]. Напряжение пробоя, вызывающее небольшие искры в воздухе, содержащем водяные капли, оценивается в 10^6 В/м, но естественный процесс в облаке, включающий развитие лидера и образование разрядного канала, может протекать и при более низких градиентах электрического поля.

Известны вспышки, процессы в которых отличаются от тех типичных процессов, которые здесь описаны. Разряды, имеющие отрицательную полярность относительно земли, чаще всего состоят из нескольких импульсов, тогда как вспышки, несущие положительный заряд к земле, чаще всего содержат один импульс [44].

Особый интерес представляют для нас свойства обратного разряда молнии, вызывающего в канале интенсивное свечение, так как часто полагают, что шаровая молния представляет собой иную конфигурацию того же самого вещества, что и в канале при обратном разряде. Диаметр молний измерялся по размерам отверстий, проплавленных ею в фиброгласовых экранах [530]. Измеренные отверстия разделились на два основных класса: относительно маленькие (2—6 мм в диаметре) и вдесятеро большие (2—3,5 см в диаметре); возможно, однако, что держатель экрана был способен привлекать нетипичные молнии [290]. Измерения по фотографиям, сделанным с расстояния примерно 100 м, дали диаметры 3—11 см [144].

Максимальная температура в светящемся канале при обратном разряде, измеренная по относительной интенсивности в его оптическом спектре линий атомарного азота, атомарного кислорода и однократно ионизованного азота, оказалась равной примерно 24 000 К [531]. 5-микросекундное разрешение по времени спектрограмм обратного разряда указывает на максимальную температуру в 30 000 К, которая затем снижается до 16 000 К за 30 мкс. Плотность вещества канала, согласно расчетам [531], оказалась равной 0,1 плотности воздуха при стандартных условиях, однако давление нейтральных и

ионизированных частиц было оценено величиной 18 атм. Временное разрешение спектров [366] выявило пик давления в 8 атм в первые 5 мкс с уменьшением до 1 атм через 20 мкс. Ионизация бывает значительной в первые 15 мкс, после чего начинает уменьшаться. Согласно оценкам, полученным для максимальных условий, в канале разряда содержится примерно $4 \cdot 10^{18}$ электронов на 1 см^3 (при относительной концентрации примерно 0,81 электрона на каждую частицу воздуха другого вида — нейтральную или ион), а давление в канале разряда, создаваемое только электронами, составляет 14 атм. Основными ионами являются однократно ионизированные атомы азота и кислорода N^+ и O^+ при относительной концентрации соответственно 0,64 и 0,16. Другими основными ионами являются молекулярные ионы N_2^+ и NO^+ [531]; их относительные концентрации составляют соответственно $7,2 \cdot 10^{-6}$ и $5,8 \cdot 10^{-6}$. Плотность и давление определяются по оптическому спектру. Также по оптическому спектру и термодинамическим характеристикам воздуха определяется и температура вспышки. При таком определении параметров приходится исходить из некоторых допущений, однако полученные величины хорошо согласуются с более ранними оценками. Видимый свет молнии в основном излучается нейтральными атомами азота и кислорода, а также основными ионами N^+ и O^+ . Кроме того, некоторый вклад в излучение дают молекулярные спектры нейтральных и ионизированных молекул азота N_2 и N_2^+ , циан CN, аргон, а также бальмеровская линия водорода H α [534].

Выяснение механизмов грозового облака, генерирующих огромные поля и сильные токи, в результате чего происходит описанный выше мощный разряд, по-прежнему остается трудной проблемой в изучении атмосферного электричества, относительно которой не существует единого мнения. В теориях рассматриваются процессы разделения зарядов, в которых необходимые носители образуются из нейтральных газовых частиц, дождевых капель и кристаллов льда. Особую трудность представляет объяснение переноса колоссальных зарядов в многочисленных разрядах молнии во время грозы. Соглас-

но [51], при некоторых грозах наблюдалось свыше 200 вспышек в минуту.

Выдвигалось немало вполне правдоподобных гипотез относительно механизмов разделения зарядов, и существует много экспериментальных данных, показывающих, что такие процессы действительно приводят к разделению зарядов [108, 307]. Столкновение дождевых капель разных размеров в слабом электрическом поле, которое существует даже в ясную погоду, приводит к образованию заряда на каплях. Капли, падающие в таком поле, способны, кроме того, захватывать находящиеся в атмосфере свободные ионы или электроны. Далее, столкновение капель в электрическом поле может привести к их раздроблению и к сопровождающему его разделению зарядов [189]. Рассматривалась возможность подобных же процессов и для содержащихся в облаке частиц льда. Замерзание воды в облаке наступает после переохлаждения, на что указывают, в частности, изменения температуры и электрического поля в зависимости от высоты; переохлажденная вода остается жидкой вплоть до температуры — 40° С. С частицами возникающего льда могут происходить процессы, подобные описанным выше для дождевых капель. К тому же эксперименты показали, что замерзание само по себе вызывает разделение зарядов [585]. В качестве возможного основного процесса, создающего электрические поля при грозе, указывалось на слипание переохлажденных дождевых капель с частицами града и их последующее замерзание и раздробление [108, 307]. При этом наблюдается и термоэлектрический эффект — перепад температур создает в частицах льда разделение зарядов.

Хотя большинство исследователей старалось установить преобладание какого-то одного из этих механизмов образования зарядов в естественных условиях, общий ток, который имеет место во время гроз с большой частотой разрядов молнии, ни один из этих процессов, взятый в отдельности, генерировать не может. Чрезвычайно высокая скорость разделения зарядов доказывается как возникновением молний уже через несколько секунд после начала грозы, так и высокой частотой разрядов молнии. Некоторые из указанных выше процессов при

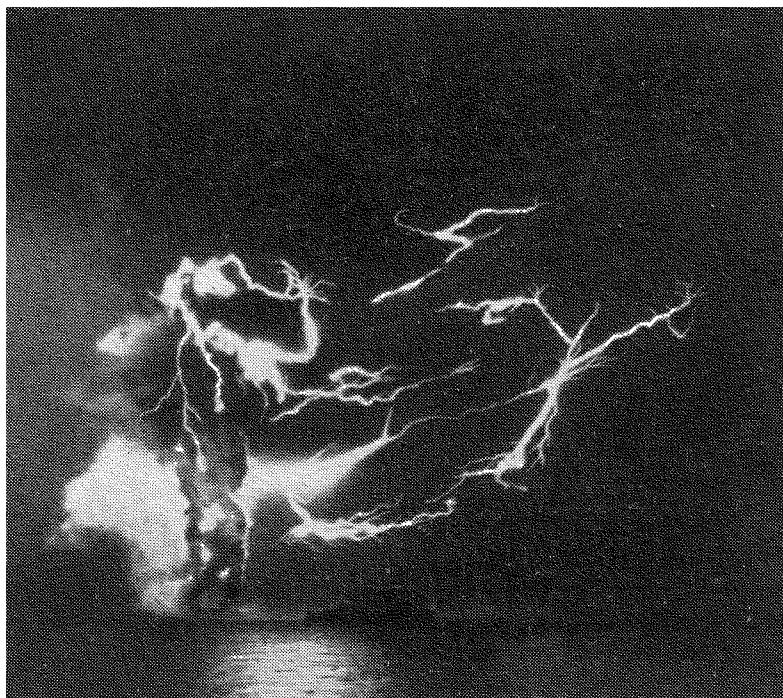


Рис 3 Молния при извержении вулкана.

благоприятных условиях, несомненно, более эффективны, чем другие,— например, столкновение переохлажденных дождевых капель с частицами града может обеспечить скорость возникновения зарядов, достаточную для того, чтобы объяснить повторение молний со средней наблюдавшейся частотой. Однако и теплые облака, в которых замерзание из-за их температуры произойти не может, обладают заметной электрической активностью [108].

Подобные трудности, несомненно, заставят уделить большее внимание расчетам совместных эффектов в разделении зарядов нескольких процессов, протекающих в облаках одновременно. Следующий вопрос — о том, как заряды, разделенные с помощью этих механизмов, могут быть перенесены в относительно отдаленные области грозового облака — привел к появлению теорий, учитывающих важность циркуляции и конвективных потоков в облаках [553, 585]

Все процессы разделения зарядов, очевидно, являются гетерогенными, и в них участвуют частицы: дождевые капли или кристаллы льда, снег, град и т. д. Тесная взаимосвязь между электризацией облака и наличием таких частиц в определенной степени доказывается сделанными в течение столетия наблюдениями, что в некоторых случаях за вспышкой молнии сразу же следуют ливни [103, 343]. Возникновение в вулканических облаках ярких электрических разрядов, являющихся, по-видимому, молниями (рис. 3), показывает, что разделение зарядов может происходить при участии твердых частиц в атмосферных процессах, таких, как столкновения твердых частиц с газами или между собой, даже если полностью отсутствуют жидкие или замерзающие компоненты [11]. Вулканологи рассматривают две возможности образования положительного заряда: появление в воздухе частиц соли при вытекании расплавленной лавы в море или при попадании лавы в водоносные слои (лабораторные эксперименты подтверждают возможность возгонки соли с водяными парами в таких условиях); еще одна возможность — трение вырывающихся наружу частиц о стенки кратера. Возникновение электрического поля над вулканами, находящимися на суше, показывает, что роль морской воды незначительна. Экспериментально было продемонстрировано разделение зарядов в газовом потоке на твердых частицах с размерами порядка микрона [264, 289].

Таким образом, во всех теориях, объясняющих образование в грозовых облаках электрических зарядов, необходимых для возникновения молний, главная роль отводится процессам, в которых участвуют разнородные частицы.

Различные разряды молний сильно отличаются друг от друга не только по внешнему виду, но и по указанным выше электрическим параметрам. В некоторых районах земного шара разряды молний обладают особыми свойствами [255]. Имеются сообщения о грозах, при которых число необычных форм молний было особенно велико. Необычные разряды действительно происходят время от времени, но, как уже более 75 лет назад отметил один видный ученый, занимавшийся этими вопросами, очень

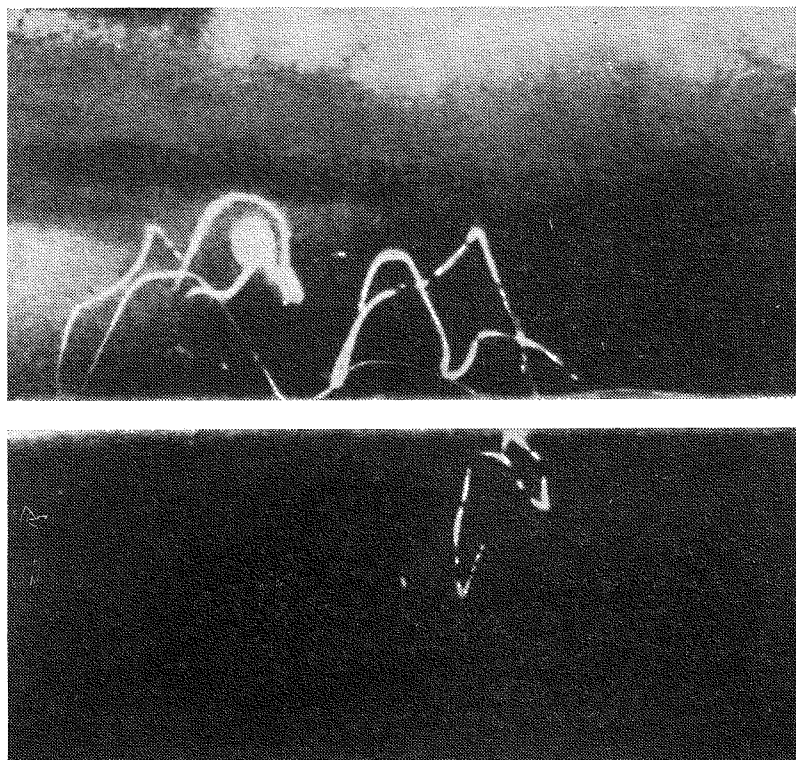


Рис 4 Сложный след молнии вблизи земли, снятый на движущуюся пленку

часто оказывается, что описываемая необычная вспышка была уже давно известна специалистам [519]. Отмечались спиральные молнии [347] и разряды, следующие по крайне извилистым и сложным путям [112], иногда вблизи от поверхности земли [219] (рис 4). Имеется сообщение о прямом, плоском участке молнии, имевшем длину примерно 7,5 м, ширину 40 см и толщину 5 см, который двигался горизонтально над самой землей [409]

Глава 4

СУЩЕСТВУЕТ ЛИ В ДЕЙСТВИТЕЛЬНОСТИ ШАРОВАЯ МОЛНИЯ?

За долгую историю изучения шаровой молнии самыми частыми вопросами были отнюдь не вопросы о том, как образуется этот шар или каковы его свойства, хотя проблемы эти достаточно сложны. Нет, чаще всего ставился вопрос: а существует ли шаровая молния в действительности? С тех пор, как Араго впервые рассмотрел этот вопрос в 1838 г., и до настоящего времени по этому поводу вновь и вновь выражается весьма скептическая точка зрения. Этот постоянный скептицизм в значительной степени объясняется трудностями, возникающими при попытках экспериментального изучения шаровой молнии посредством существующих методов, а также отсутствием теории, которая дала бы достаточно полное или хотя бы удовлетворительное объяснение этого явления.

Подобное отношение к проблеме шаровой молнии — не единственный случай в истории науки. Очень долго считалось, что падение метеоритов — это выдумки суеверных и невежественных крестьян. Несмотря на неоднократные наблюдения полетов метеоритов в атмосфере, существующие сомнения привели к тому, что из музейных коллекций были выброшены и уничтожены редкие образцы метеоритов на том основании, что это подделки, питающие суеверие. Исчерпывающий анализ этой проблемы дал в 1794 г. Хладни — физик, работавший главным образом в области акустики. Он пришел к выводу, что эти предметы не являются по своему происхождению земными и что они действительно падают с неба. Вывод Хладни опирался на наблюдения заслуживающих доверие очевидцев и на данные, полученные при изучении метеоритов, многие из которых по своему составу не имели ничего общего с породами тех мест, где их находили. Однако

его выводы не получили широкого признания. Реальность этого явления была окончательно установлена только в 1803 г., когда в Легле (Франция) выпало множество каменных метеоритов. Физик Био в докладе, представленном Французской академии наук, привел показания многих надежных очевидцев и сведения о большом числе метеоритов, найденных на земле.

Те, кто отрицает существование шаровой молнии, объясняют сообщения о ней оптическими иллюзиями или ошибочным отождествлением с ней других естественных светящихся тел [224]. Часто случаи возможного появления шаровой молнии приписываются метеорам. В некоторых случаях явления, описанные в литературе как шаровые молнии, по-видимому, действительно были метеорами [65]. Однако следы метеоров почти неизменно наблюдаются как прямые линии, тогда как характерный для шаровой молнии путь, напротив, чаще всего искривлен. Далее, шаровая молния появляется, за очень редкими исключениями, во время гроз, метеоры же наблюдались в подобных условиях лишь случайно. Обычный разряд молнии, направление канала которого совпадает с лучом зрения наблюдателя, может показаться шаром. В результате может возникнуть оптическая иллюзия — ослепительный свет вспышки сохраняется в глазу как изображение, даже когда наблюдатель меняет направление луча зрения (последовательный образ.— *Ред.*). Именно поэтому высказывались предположения, что ложное изображение шара кажется перемещающимся по сложной траектории.

В первом подробном обсуждении проблемы шаровой молнии Араго коснулся и этого вопроса [16]. В дополнение к ряду, по-видимому, надежных наблюдений он отметил, что у наблюдателя, видящего опускание шара под некоторым углом со стороны, оптическая иллюзия, подобная описанной выше, возникнуть не может. Доводы Араго, видимо, показались достаточно убедительными Фарадею: отвергая теории, согласно которым шаровая молния представляет собой электрический разряд, он подчеркнул, что отнюдь не отрицает существования этих сфер [147]. Однако немецкий издатель полного собрания трудов Араго не постеснялся снабдить главу об этой форме молнии следую-

щим категорическим примечанием: «Шаровая молния представляет собой результат воздействия на сетчатку глаза интенсивного света обычной молнии».

Через 50 лет после выхода в свет обзора проблемы шаровой молнии, сделанного Араго, вновь было высказано предположение о длительном сохранении образа обычной молнии, двигавшейся прямо на наблюдателя [541], и лорд Кельвин в 1888 г. на заседании Британской ассоциации развития науки утверждал, что шаровая молния — это оптическая иллюзия, порождаемая ярким светом [511]. Тот факт, что во многих сообщениях назывались одни и те же размеры шаровой молнии, был приписан тому, что иллюзия эта связана со слепым пятном в глазу [455].

Дискуссия между сторонниками и противниками этих точек зрения произошла на заседании Французской академии наук в 1890 г. Темой одного из докладов, представленных в Академию, были многочисленные светящиеся сферы, появившиеся в торнадо и напоминающие шаровые молнии [148]. Эти светящиеся сферы влетали в дома через дымоходы, пробивали круглые дыры в окнах и вообще проявляли весьма необычные свойства, приписываемые шаровой молнии. После доклада один из членов Академии заметил, что к удивительным свойствам шаровой молнии, о которых шла речь, следует отнестись критически, поскольку наблюдатели, по-видимому, стали жертвами оптических иллюзий [306]. Во вспыхнувшей бурной дискуссии наблюдения, сделанные необразованными крестьянами, были объявлены не заслуживающими внимания, после чего присутствовавший на заседании бывший император Бразилии — иностранный член Академии — заявил, что он тоже видел шаровую молнию [5, 453].

Многие сообщения о естественных светящихся сферах объясняли тем, что наблюдатели ошибочно принимали за шаровую молнию огни св. Эльма. Огни св. Эльма — это сравнительно часто наблюдаемые светящиеся области, образуемые коронным разрядом на конце заземленного предмета, скажем столба. Они возникают, когда напряженность атмосферного электрического поля значительно возрастает, например во время грозы. При особенно силь-

ных полях, которые часто бывают близ горных вершин, эта форма разряда может наблюдаться на любом предмете, возвышающемся над землей, и даже на руках и головах людей. Однако если считать движущиеся сферы огнями св. Эльма, то надо предположить, что электрическое поле непрерывно перемещается от одного предмета, играющего роль разрядного электрода, к другому аналогичному предмету. Сообщение о том, что такой шар двигался над рядом елей, пытались объяснить тем, что над этими деревьями проходила туча со связанным с ней полем [197, 268]. Сторонники этой теории считали огнями св. Эльма и все другие светящиеся шары, отделявшиеся от первоначального места прикрепления и летавшие по воздуху [224]. Поскольку коронный разряд обязательно требует наличия электрода, отделение подобных шаров от заземленного острия указывает, что речь идет о каком-то другом явлении, возможно, о другой форме разряда. Существует несколько сообщений об огненных шарах, которые вначале находились на остриях, играющих роль электродов, а затем свободно передвигались описанным выше способом [204, 326, 468].

В природе наблюдались и другие светящиеся объекты, которые иногда принимали за шаровую молнию. Например, козодой — ночная насекомоядная птица, к перьям которой порой прилипают светящиеся гнилушки от дупла, в котором она гнездится, летает зигзагами над землей, заглатывая насекомых; с некоторого расстояния его можно принять за шаровую молнию [224].

Тот факт, что в каждом конкретном случае шаровая молния может оказаться чем-то иным, является весьма веским доводом против ее существования. Крупный исследователь токов высоких напряжений однажды заметил, что, в течение многих лет занимаясь наблюдениями гроз и их панорамным фотографированием, он ни разу не видел шаровой молнии [43]. Кроме того, беседуя с предполагаемыми очевидцами шаровой молнии, этот исследователь всегда убеждался, что их наблюдения могут иметь иное и вполне обоснованное толкование. Постоянное возрождение таких доводов подчеркивает важность подробных и надежных наблюдений шаровой молнии.

В течение долгого времени изучение шаровой молнии в основном сводилось к сбору и оценке правильности наблюдений. Такой сбор сведений призван сыграть в этой трудной области ту роль, которая в обычных научных исследованиях принадлежит лабораторным экспериментам. В некоторых случаях наблюдения заслуживающих доверия очевидцев опровергали сомнение в реальности существования шаровой молнии, возникшее из-за спорных сообщений и отсутствия убедительных теоретических объяснений [460, 461, 510].¹ Примечательное исключение составляет Хамфрейс — крупный американский метеоролог. В первом издании своей книги, посвященной физике атмосферы [223], Хамфрейс утверждал, что многочисленность и надежность наблюдений шаровой молнии с несомненностью опровергают предположение об оптической иллюзии. Однако критически изучив 280 сообщений, которые он собрал лично, Хамфрейс полностью изменил свое прежнее мнение [224] и в последнем издании своего труда с большой убежденностью излагает традиционную негативную точку зрения. Хамфрейс пришел к выводу, что каждое наблюдение может быть полностью объяснено одним из упомянутых выше явлений или же «фиксированными и движущимися кистевыми разрядами».

Хамфрейс не опубликовал полностью все собранные им сообщения. И хотя среди них, несомненно, имеется немало сомнительных случаев, последние обзоры, охватывающие сотни наблюдений, содержат многочисленные примеры шаровой молнии, обладавшей характерными чертами, присущими только ей, но не другим явлениям [321, 430]. Хамфрейс, обращаясь к широкой публике, недостаточно четко объяснил, сведения о каком именно явлении его интересуют. Его определение «стационарный кистевой разряд» явно включает и огни св. Эльма. Но «движущийся кистевой разряд», если под ним не подразумевается только перемещающийся огонь св. Эльма, вполне может быть именно той формой электрического разряда, которая использовалась для объяснения шаровой молнии (речь идет о теории, выдвинутой Сноу Гаррисом уже более ста лет назад, но в той или иной форме сохраняющей сторонников по сей день). Некоторые наблюдения Хамфрейс слишком категорично относил к оптическим

иллюзиям, связанным с последовательными зрительными образами, — например, сообщение Лёба о типичной шаровой молнии, которая опустилась на землю, подпрыгнула и исчезла, когда блеснула молния и загремел гром [224]. Через 30 лет после выхода книги Хамфрейса Лёб вновь подтвердил свои наблюдения шаровой молнии [291]. В некоторых случаях очевидцы специально подчеркивали, что речь идет не об огнях св. Эльма и не о последовательных образах в глазу [461].

Надежность наблюдений шаровой молнии ставилась под сомнение еще и потому, что очевидцы, естественно, должны были находиться в состоянии сильного возбуждения, особенно после удара обыкновенной молнии, с которой часто тесно связывается появление шаровой молнии. Однако, с другой стороны, в одном необычном случае очевидец спокойно наблюдал светящийся шар, не увидев и не услышав замеченной другими обыкновенной молнии, которая ударила вне поля его зрения, но всего лишь в 14 м от него [546]. Наблюдатели, оказавшиеся недалеко от места удара обычной молнии, иногда сообщали о необычном отсутствии грома или слабых звуках, тогда как люди, находившиеся на некотором расстоянии, слышали оглушительный грохот.

Чаще всего наблюдения, на которые опираются наши знания о шаровой молнии, подвергались сомнению потому, что эти таинственные шары видели только люди, не имевшие никакой научной подготовки, и, более того, ни один профессиональный метеоролог или исследователь грозового электричества никогда не видел шаровой молнии [296, 461]. Это мнение, заставляющее вспомнить дебаты во Французской академии наук свыше 75 лет назад, совершенно неверно. Если не считать сообщения Лёба (которого безусловно можно назвать квалифицированным «электриком», используя термин франклиновской эпохи), появление шаровой молнии наблюдал с расстояния всего в 30 м ученый [131], сотрудник одной немецкой лаборатории, изучающей атмосферное электричество; молнию наблюдал также работник токийской Центральной метеорологической обсерватории [504]. Очевидцами шаровой молнии были также метеоролог [1], физики [124, 127], химик [128], палеонтолог [305], директор метеороло-

гической обсерватории [441] и несколько геологов [499]. Среди ученых разных специальностей чаще видели шаровые молнии и сообщали о них астрономы [48, 445].

В очень редких случаях при появлении шаровой молнии очевидцу удавалось получить снимки. Этим фотографиям, как и другим сведениям, касающимся шаровой молнии, часто уделялось недостаточное внимание. Ниже будет дано подробное обсуждение имеющихся снимков.

Собранные сведения убедили большинство метеорологов [546] в необоснованности скептицизма Хамфрейса [223], Малана [296] и Шонланда [461]. С другой стороны, нет сомнений в том, что многие, если не большинство ученых, работающих в других областях, придерживаются негативной точки зрения как из-за интуитивного скептицизма, так и из-за недоступности данных о шаровой молнии. Между тем, именно материалы наблюдений имеют первостепенную важность для научного анализа, на основе которого можно понять суть этого явления.

Глава 5

НАБЛЮДЕНИЯ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Длительное время сбор и анализ сообщений очевидцев шаровой молнии были основными методами ее изучения. Хотя число упоминаемых в литературе наблюдений — как в форме индивидуальных сообщений, так и в обзорах — составляет примерно тысячу, а просьбы присылать добавочные сообщения неизменно вызывают многочисленные ответы, это явление природы возникает столь нерегулярно, что методы, с помощью которых удалось получить подробные данные о зигзагообразной молнии, не дали здесь никакой информации. Даже обычные фотографии шаровой молнии — большая редкость. Большую ценность имеет любое надежное сообщение, сделанное несколькими заслуживающими доверия очевидцами при хороших условиях наблюдения. Многие сообщения неоднократно перепечатывались, а так как источник их не всегда указывается точно, некоторые из них фигурировали по нескольку раз в одном в том же обзоре как разные случаи.

В настоящей книге сделана попытка выявить случаи повторных публикаций, указав при этом отдельно все источники. Каждое наблюдение требует тщательной проверки, поскольку, как обнаружили Бранд и Хамфрейс, во многих случаях речь шла об оптической иллюзии или за шаровую молнию были приняты другие метеорологические явления; конечно, считается, что очевидцы правдиво описывали то, что они видели. Весьма существенны повторные указания на одни и те же особенности явления (при всей важности индивидуального поведения молнии), а также наличие фотографий, подтверждающих отмеченные особенности.

А. Сферические формы, связанные с разрядами

Появление почти всех шаровых молний во время гроз и часто в тесной связи с обычной молнией (либо непосредственно перед вспышкой, либо после нее) указывает на неоднократно предполагавшуюся возможность того, что мы имеем дело с двумя разными состояниями одного и того же вещества, которые, быть может, легко переходят друг в друга. Имеются сообщения о нескольких случаях необычно длительных разрядов молний, которые превращались в цепь огненных шаров, расположенных вдоль канала молнии. Распад линейной молнии на яркие фрагменты, обычно называемые четочной молнией, отмечалось уже с эпохи Араго [16, 314, 341, 426]. Несколько раз четочная молния наблюдалась исследователями грозового электричества, в частности Планте [230, 389]. Существует подробное описание четочной молнии, возникшей из вспышки, наблюдавшейся на близком расстоянии [40]. Во время особенно сильной грозы в Иоганнесбурге очень яркая молния ударила в землю примерно в 100 м от наблюдателя. По его оценке, она сохранялась минимум секунду и была шириной около 30 см. После того как вспышка угасла, на ее пути осталась цепочка из 20—30 ярких светящихся шариков диаметром примерно 8 см (четверть ширины самой молнии) с расстоянием между шариками в 60 см. Цепочка была неподвижна и оставалась видимой примерно 0,5 с.

Благодаря счастливой случайности точно такой же процесс был зафиксирован на уникальных кинокадрах, на которых запечатлена молния, возникшая, когда взрыв глубинной бомбы выбросил над поверхностью моря столб воды высотой 70 м [68]. Отдельные кадры этой пленки приведены на рис. 5. Фильм показывает, как канал первоначальной молнии — по-видимому, зигзагообразной — медленно распадается на отдельные яркие четки, расположенные вдоль первоначального канала и затем постепенно гаснущие. В противоположность обычной длительности разряда молнии, измеряемой миллисекундами, свечение в этом случае длилось несколько десятых секунды, причем по одному и тому же каналу прошли три

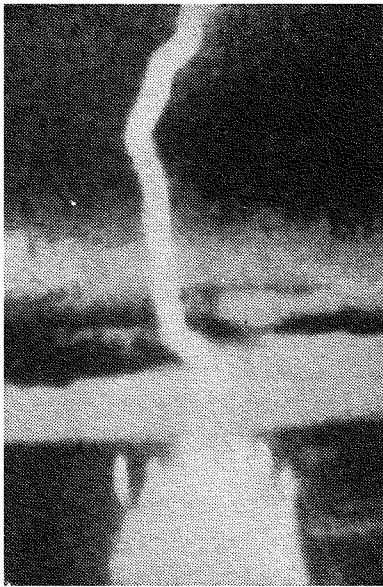


Рис 5 Четочная молния, оставшаяся после линейного разряда

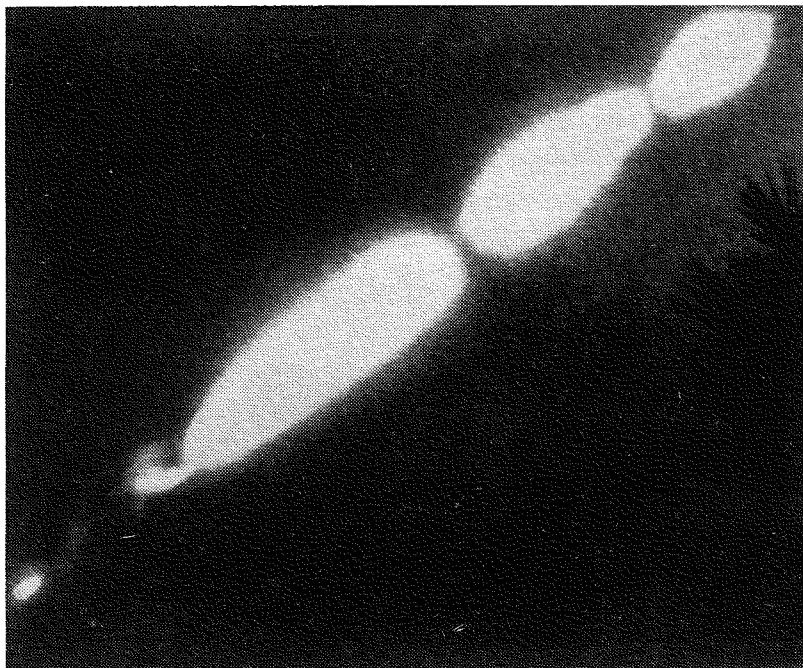


Рис 6 Разряд молнии, пережатый в нескольких местах.

отдельных разряда, каждый из которых распался на ясные, отделенные друг от друга гранулы.

Распад непрерывного столба молнии на отдельные светящиеся части был объяснен пинч-эффектом и радикальной неустойчивостью типа «перетяжек» [529] — процессами, обнаруженными при изучении высокотемпературной плазмы. На рис. 6 показана фотография [281, 313], на которой, по-видимому, заснята именно эта форма молнии. Фотографы не видели явления, зарегистрированного на пленке. Они экспонировали пленку во время грозы с очень большими выдержками, а позже исследовали проявленную пленку, как это обычно делается при фотографировании гроз. Необычно прямая линия, вдоль которой расположены примыкающие друг к другу светящиеся шары, показывает, что зигзагообразного разряда молнии тут не было.

Ни разу не сообщалось о превращении четочной формы молнии в типичную шаровую (например, путем исчезновения всех четок, кроме одной, которая затем начинает перемещаться по относительно сложному пути). По-видимому, несмотря на сходство между этими двумя формами, появление одной из них исключает другую, хотя число наблюдений четочной молнии, на которые опирается этот вывод, невелико. Имеется единственное сообщение [51] о появлении одиночного шара через несколько секунд после исчезновения четочной молнии и в том же канале. Наблюдатель отметил сначала только разряды облако — облако, происходившие с большой частотой — 200 и больше ударов в минуту. Затем произошел разряд облако — земля с несколькими последовательными ударами в том же канале. В последнем ударе, казавшемся особенно интенсивным, канал распался на цепочку четок. Через несколько секунд после исчезновения четок по тому же пути прошел еще один разряд, и почти сразу на верхнем конце канала, под слоем облаков, образовался светящийся шар, который медленно поплыл к земле. Последовал еще один сильный разряд, и возникла яркая светящаяся масса, но она спустилась на землю с такой быстротой, что ее не удалось идентифицировать как еще один шар. В другом случае во время грозы с частыми разрядами молний несколько раз наблюдалось

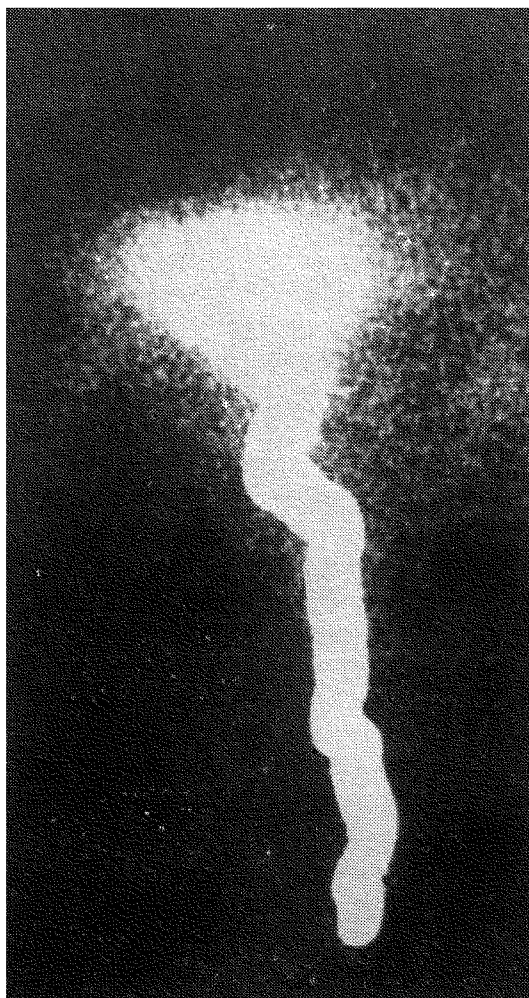


Рис 7 Молния с закругленным концом

медленное движение светящейся сферы по каналу молнии сразу вслед за исчезновением сплошного разряда [103].

В отдельных случаях сообщалось об образовании светящегося шара у головки разряда [103, 245, 591]. Фотографии тех разрядов молний, в которых, как можно предполагать, протекал описываемый процесс [38, 361], не выявляют скручивания в указанных местах (рис. 7), хотя в одном случае несколько свидетелей сообщили

о превращении обычной молнии в шаровую [38]. Имеются два сходных сообщения о случаях, когда наблюдатели видели полный процесс образования шара из линейного разряда. В одном случае очевидец во время сильного ливня наблюдал змеевидный разряд, который чрезвычайно медленно опускался на телеграфный столб [245]. Он остановился примерно в метре над столбом, и из него образовался шар диаметром в треть метра, который взорвался с таким грохотом, что несколько человек выскочило из дверей посмотреть, что случилось. Ни столб, ни провода не пострадали. Во втором случае наблюдатель во время грозы следил за одной определенной тучей [256]. Внезапно он заметил белую искривленную молнию, спускающуюся из этой тучи. По мере приближения к земле диаметр молнии увеличивался, и она превратилась в большой огненный шар. Шар медленно двигался к земле и, оказавшись примерно в 2 м от нее и в 50 м от наблюдателя, взорвался с оглушительным шумом. Наблюдения ярких разрядов молнии подобного рода с близких расстояний считаются особенно благоприятными для возникновения описанных выше оптических иллюзий. Тем не менее эти сообщения подтверждают появление сферических форм разрядов, связанных с обычными разрядами молнии во время грозы.

Б. Отдельные сообщения о шаровой молнии

Изучение имеющихся в литературе сообщений о шаровой молнии выявляет большое разнообразие в деталях каждого описанного случая, что может объясняться меняющимися и неодинаковыми условиями, в которых образуется шар. Однако некоторые характерные особенности отмечаются неизменно, и этого единообразия достаточно, чтобы попытаться выявить группу типичных свойств шаровой молнии. Поскольку общепринятого объяснения этого явления не имеется, некоторые исследователи высказывают ту точку зрения, что необходимо указывать характерные детали каждого случая, иначе могут быть упущены ключевые данные для будущей теории. В современных трудах, посвященных этой проблеме, полные описания наблюдений, которые прежние

исследователи считали чрезвычайно важными, заменяются статистическими данными и таблицами. В то же самое время эти данные и таблицы весьма отличаются друг от друга. Многие из полных описаний появления шаровой молнии с редкой ясностью излагают характерные черты этого явления, а наиболее выдающиеся неоднократно воспроизводились в многочисленных обзорах. Ниже приводится ряд таких описаний, выбранных ввиду ценности сведений, которые они дают.

1. Имеется значительное число наблюдений, точность которых гарантируется присутствием нескольких свидетелей или обстоятельствами, при которых наблюдалась молния.

Бутти, художник-маринист, состоявший при дворе австрийской императрицы, прислал Араго следующее сообщение о появлении шаровой молнии [81]. Летом 1841 г. Бутти жил в миланском отеле на третьем этаже. Однажды во время сильного ливня, который сопровождался яркими вспышками молнии, художник сидел у открытого окна и смотрел на дождь, струи которого в проблесках солнца казались золотыми нитями. Внезапно с улицы, опустевшей во время ливня, до него донеслись крики: «Смотрите, смотрите!» Он высунулся, чтобы узнать, в чем дело, и увидел на улице, на уровне его окна, огненный шар. Кричало полдюжины человек, которые бежали вслед за шаром, поднимавшимся все выше. Шар спокойно проплыл мимо окна художника, который следил за ним, поворачивая голову. Не желая терять из вида необычное явление, Бутти выскочил на улицу и присоединился к бегущим. Еще через несколько минут продолжавший подниматься шар ударился о крест колокольни и лопнул со звуком, напоминавшим выстрел из 36-фунтового орудия (такой выстрел можно услышать с расстояния в 20 км при благоприятном ветре). По размерам и цвету этот шар напоминал зимнюю луну в Альпах. Он был красновато-желтым, причем красный цвет в некоторых местах был ярче; шар окружал ореол, из-за которого нельзя было четко различить его границы.

Согласно другому сообщению [319], в 1888 г. в Висконсине огненный шар диаметром около 30 см влетел в окно второго этажа бревенчатого дома. Он проплыл мимо

молодой девушки, находившейся в комнате, затем через коридор и вылетел наружу через окно комнаты в противоположном конце коридора, где от него с визгом бросилась прочь служанка.

В 1889 г. в пригороде Калькутты наблюдатель, находившийся на улице, увидел рядом с домом ослепительную молнию, которая разбила кирпичи и причинила зданию значительные повреждения. Восемь человек, находившиеся в комнате в этом доме, увидели ярко-желтый огненный шар диаметром 15—18 см [320]. Достигнув примерно середины комнаты, шар остановился и взорвался с оглушительным грохотом. Образовался удушливый газ оранжевого цвета, смешанный с клубами пыли. Очевидцы не отметили никаких предшествующих явлений — ни звуков, характерных для электрического разряда, ни запаха озона. Однако позже очевидцы сравнивали запах оранжевого газа с запахом двуокиси азота высокой концентрации. Ввиду тесной связи между вспышкой обычной молнии и наблюдавшимся огненным шаром некоторые исследователи могли бы отнести описанный случай к оптической иллюзии.

В Швеции в 1896 г. очень сильная гроза уже начинала утихать и удалялась, о чем свидетельствовал возрастающий интервал между вспышками молнии и громом, когда шесть человек, сидевшие за завтраком, внезапно увидели, что над центром стола плавает светящийся белый шар [211]. Они хором воскликнули: «Смотрите-ка!» В ту же секунду шар взорвался с ослепительной вспышкой, и всех присутствующих отбросило на спинки стульев. Одному из них слегка опалило волосы и одежду, но серьезно никто не пострадал. Все очевидцы описывали случившееся одинаково. В комнате было открыто окно, а также дверь на застекленную веранду. Всем присутствующим некоторое время казалось, что у них отнялись ноги — симптом, не раз замечавшийся у многих жертв обычной молнии. Слуги, находившиеся в других комнатах, ощутили различные электрические эффекты. Один из них упал на пол, но света не видел, а другой видел вспышку света. Через мгновение после того, как шар взорвался, обычная молния ударила в два дерева, росшие перед домом.

Трое свидетелей видели огненный шар во время грозы в Карачи в 1895 г. [447]. Все трое сидели в закрытой комнате, и один из них подошел к двери, чтобы открыть ее. Вернувшись к своему месту, он увидел, что между его друзьями висит огненный шар величиной с полную луну. Почти немедленно раздался удар грома, напоминающий пушечный выстрел. Двое из присутствующих немного пострадали — один почувствовал резкую боль в лице, у второго начала дергаться рука. В комнате стоял сильный запах серы. В соседней комнате ружье в чехле было разбито, а в том месте стены, которого касалось ружье, появилась дыра. В той же стене на верхнем этаже были обнаружены еще две дыры.

Летом 1943 г. в США один инженер мылся под душем на втором этаже деревянного дома во время короткой грозы с дождем [542]. Он услышал гром и увидел, что в конце коридора сквозь жалюзи окна прошел голубоватый шар диаметром от 30 до 45 см. Шар пронесся через 9-метровый коридор за 3—4 с и вылетел наружу сквозь жалюзи окна в противоположном конце коридора. Когда шар проходил мимо инженера на высоте его талии, он не почувствовал никакого тепла, но ощутил запах озона.

2. Некоторые шаровые молнии наблюдались учеными, профессиональные навыки которых обеспечили особую надежность наблюдений подобных событий.

Астроном, выходя из обсерватории, увидел прямой, ослепительно белый разряд, очевидно, вырвавшийся из земли [48]. На его вершине находился темно-красный светящийся шар, окруженный подвижным ореолом, простиравшимся далеко за четко очерченные границы самого шара. Шар испустил «брызги», тоже белого цвета, которые были примерно в 10 раз тоньше первоначального столба разряда. Эти брызги вернулись к земле, дважды входя и выходя из первоначального вертикального столба, прежде чем ударить в почву. Все явление заняло от 3 до 3,5 с.

Директор Американской метеорологической обсерватории в Блу-Хилл в 1903 г. во время сильнейшей грозы увидел, как с вершины Эйфелевой башни одновременно со вспышкой белой молнии упал огненный шар [441].

Шар, чуть менее яркий, чем первоначальная молния, падал внутри башни от вершины к третьей площадке. Это перемещение примерно на 100 м заняло около 2 с. Затем шар, имевший в диаметре около метра, исчез. Посетив башню на следующий день, очевидец установил, что в нее дважды ударяла молния, когда наверху никого не было, и что шара никто не видел. Сторож сказал, что такие шары во время гроз появлялись не раз.

Сотрудник Научно-исследовательского института атмосферного электричества в ФРГ наблюдал в 1951 г. шаровую молнию с расстояния примерно 30 м [131]. Шар появился на улице после нескольких вспышек молний во время грозы средней силы. Он опускался под углом к земле со скоростью примерно 50—100 м/с и был похож на зажженную фару автомобиля. Одновременно второй наблюдатель, находившийся в той же комнате, что и первый, увидел на стене напротив окна четырехугольное пятно света, словно мимо проезжал автомобиль с очень яркими фарами, свет которых попал на окно. Шар скрылся за купой деревьев, и тут же раздался громкий треск, словно от взорвавшейся гранаты. Над деревьями поднялся голубой клуб дыма, сразу же развеянный ветром. В момент взрыва шар видели из другого здания. Внимание к нему было привлечено чрезвычайно ярким светом. Были замечены яркие лучи, которые разошлись веером от шара примерно на 10 м, а следом за ними синий дым. По-видимому, шар появился вслед за ударом молнии в находившуюся поблизости мачту линии высокого напряжения (5 кВ). В траве примерно в 5 м от железной мачты было обнаружено выжженное пятно около 50 см в диаметре. На мачте было повреждено несколько изоляторов и вырван кусок дерева; однако на траве не было золы, которая показала бы, что тут действительно горело дерево.

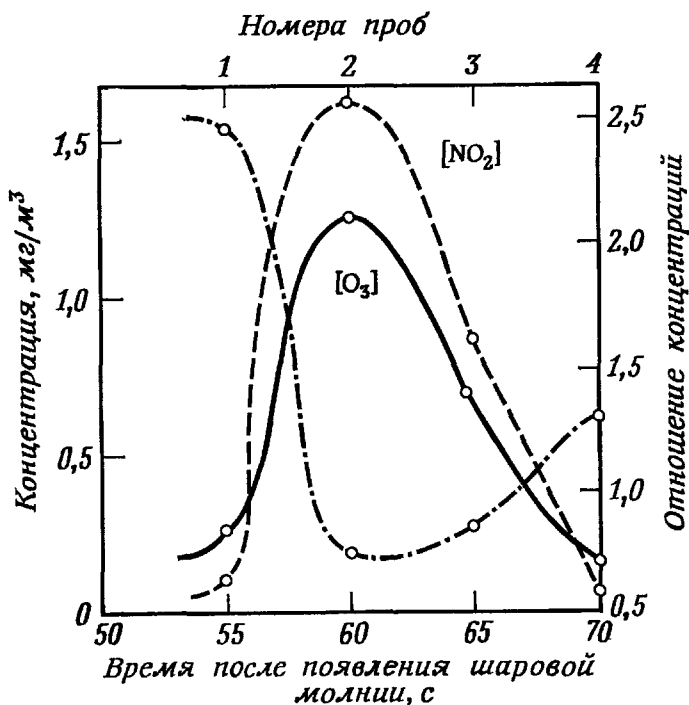
Дмитриев — химик, занимавшийся изучением плазмы, — сообщил в 1967 г. о своих наблюдениях, содержащих уникальные подробности [128]. Огненный шар возник после мощного разряда обычной молнии и пролетел над наблюдателем, находившимся в палатке на берегу р. Онеги. Шар был замечен, когда он двигался примерно в 1,5 м над водой, напоминая большую электрическую



Рис. 8. Наблюдавшийся путь шаровой молнии.

лампу. (Таковую же шаровую молнию над рекой наблюдали в Канаде в 1918 г. три члена геологической экспедиции [499]) Светящаяся масса имела яркий бело-желтый центр 6—8 см в диаметре, окруженный двумя оболочками. Непосредственно вокруг яркого центра находился темно-фиолетовый слой толщиной 1—2 см, а вокруг него располагалась ярко-голубая оболочка толщиной 2 см, образующая внешнюю границу шара. Вся масса имела слегка овальную форму, и длина ее превышала ширину на несколько сантиметров.

Шар сначала равномерно перемещался вдоль связи плотов на реке, которые выступали над водой на 10—15 см. Таким образом, он двигался к наблюдателю на берегу под углом к направлению ветра (рис. 8). Шар перемещался со скоростью 1,5 м/с или чуть быстрее, с каждым пройденным метром поднимаясь на несколько сантиметров. Огненный шар пролетел над головой наблюдателя к лесу, находившемуся позади него. Над сушей



Р и с. 9. Результаты анализа проб воздуха вдоль траектории шаровой молнии. Штрихпунктирной кривой дано отношение концентраций $[O_3]/[NO_2]$.

его скорость уменьшилась примерно до 0,4 м/с, но подниматься он стал круче — на 0,5 м или больше на каждый пройденный метр. Над небольшим пригорком он застыл в неподвижности на 30 с.

По сообщению наблюдателя, вскоре после того, как шар пролетел над ним, он взял четыре пробы воздуха в вакуумные колбы для образцов газа, которые были подготовлены для других экспериментов. При взятии проб наблюдатель поднимал колбы над головой как можно ближе к пути, пройденному молнией. Анализ собранного таким образом газа показал присутствие как озона, так и двуокиси азота в количествах, заметно превышающих их нормальные концентрации в воздухе (рис. 9). Концентрации других газов, обычно присутствующих в воздухе, не изменились. Наблюдатель заметил также сильный запах, напоминающий тот, кото-

рый возникает в воздухе под действием радиации высокой энергии. В транзисторном приемнике в палатке сначала резко усилились помехи, которые вскоре превратились в непрерывный рокот, становившийся все громче. На близком расстоянии очевидец слышал, как сам шар громко потрескивал. Шар оставлял за собой след голубоватого едкого дыма, который медленно рассеивался. На опушке шар несколько раз наталкивался на деревья, и все эти 6—7 раз испускал сильные искры. После столкновений он начал двигаться зигзагами, а его цвет из белого превратился в ярко-красный. Шар исчез, пробыв в поле зрения наблюдателя 60—65 с.

Исходя из сделанных им наблюдений и измерений, наблюдатель попытался установить дополнительные свойства огненного шара. Он предположил, что шар образовался из короткого отрезка первоначального разряда обычной молнии. Этот отрезок отделился, когда неустойчивость канала (неустойчивость плазмы типа «перетяжек») вызвала полное пережатие молнии в двух местах; затем из короткого отрезка сформировался шар. Если вещество огненного шара возникло при предшествующем разряде молнии, то полное время его существования составило примерно 80 с, из которых под непосредственным наблюдением он находился 60—65 с. На основании своего знакомства с характеристиками плазмы наблюдатель сравнил интенсивность свечения желто-белого центрального шара с факелом плазмотрона при температуре от 13 000 до 16 000° С. Согласно его оценке, излучение, которое вызвало в воздухе оставшийся после шара запах озона и окислов азота, составило от 1000 до 30 000 Р. Хотя огненный шар, по-видимому, прошел очень близко от наблюдателя, тот не сообщил ни о каких ощущениях тепла, которых можно было бы ожидать от шара с такой высокой температурой, а пленочный детектор для измерения радиации не показал ничего, хотя находился в 2 м от шара около 6 с. Счетчик гамма-лучей показал уровень радиации 1,2 мР/ч, однако наблюдатель подчеркивает, что радиочастотное излучение, зарегистрированное при помощи транзисторного приемника, могло воздействовать на фотоумножитель и исказить измерения. Образование озона и двуокиси азо-

та при экспериментальных электрических разрядах в воздухе сравнивалось с количеством этих газов, обнаруженных вблизи пути шаровой молнии. Отношение количества озона к двуокиси азота вблизи экспериментальных разрядов уменьшалось с повышением напряжения разряда. Из рис. 9 следует, что самое высокое отношение, измеренное в следе шаровой молнии, составляет $2,5 : 1$, что соответствует потенциалу по отношению к земле от 300 до 400 кВ, если только шаровую молнию можно приравнять к тихому разряду. Отношение водорода и кислорода в пробах воздуха, взятых в естественных условиях, было ниже того, который требуется для образования взрывающейся смеси, примерно на три порядка. Стабильность и относительно долгое время жизни светящегося шара были приписаны наличию холодной внешней оболочки из отрицательных ионов молекулярного кислорода, образовавшихся благодаря прилипанию электронов к молекулам атмосферного кислорода. Предполагалось, что этот слой должен замедлять диффузию заряженных частиц и теплоотвод от шара в окружающую атмосферу. Эти попытки истолкования наблюдений, произведенных во время появления огненного шара, и предположения о структуре шаровой молнии будут рассмотрены ниже, в главах, посвященных плазменным характеристикам шаровой молнии и ее теоретическим моделям.

3. Многие появления шаровой молнии тесно связаны с грозowymi явлениями; однако в образовании шаровых молний не наблюдается того единообразия, которого следовало бы ожидать при наличии подобной связи. Согласно сообщениям, некоторые шаровые молнии падали прямо из туч, другие возникали сразу же после разряда обычной молнии, а третьи — спустя несколько мгновений после нее. Отдельные же шаровые молнии, по-видимому, вообще не были связаны с другими явлениями при грозах.

Несколько огненных шаров упало в море из большой черной тучи над Суссексом в 1780 г. Затем очевидец стал жертвой удара зигзагообразной молнии, вызвавшей у него временный паралич; все же остальные люди, находившиеся в доме, были убиты [67].

В 1903 г. во Франции чрезвычайно частые разряды молний во время грозы привлекли наблюдателя к окну [407]. Вслед за очень яркой молнией и оглушительным ударом грома он увидел «метеор», напоминавший фейерверочную ракету и летевший от ряда домов на его улице, в которые, по-видимому, ударил предшествовавший разряд. «Метеор» представлял собой небольшую желтую массу, оставлявшую позади себя светящийся след. Сначала масса двигалась горизонтально, а потом начала постепенно опускаться, словно под действием силы тяжести. Примерно через 0,3 с она исчезла без взрыва. Свидетель был уверен, что видел шаровую молнию.

Во время сильнейшей грозы с дождем во Франции в 1910 г. возник большой огненный шар, когда прямой удар молнии поразил антенну. Антенна была установлена для изучения грозового электричества, и записывающее устройство зафиксировало два предыдущих разряда. Третья молния ударила в антенну и в наблюдательный пункт, превратив в пар 65 м медной проволоки диаметром 2 мм. Возникший огненный шар видели несколько человек с соседней лесопилки, которых разбудил гром [528].

В 1927 г. очевидец [175] с часами в руках наблюдал за ярким желтоватым шаром, который, по-видимому, был выброшен из места резкого изгиба очень яркой ветвистой молнии. Шар появился примерно через 1 с после разряда молнии. Шар двигался по прямому пути еще секунду, и вскоре послышался гром, за которым последовал одиночный громкий звук взрыва. По времени, протекшему между исчезновением шара и звуком взрыва, наблюдатель оценил расстояние до взрыва в 1150 м. Через несколько часов выяснилось, что шар упал на маленький дом в 1100 м от места первоначального наблюдения. Многочисленные очевидцы описали его падение совершенно одинаково. Внутри дома шара не видели, но верхушка находившегося поблизости столба электропроводки была разбита. Во многих домах перегорели пробки, а в доме, в который ударил шар, осыпалась штукатурка. На основании измерений времени скорость шаровой молнии была оценена в 1200 м/с.

Два наблюдателя во время сильнейшей грозы во

Франции в 1901 г. видели серию прямых и почти вертикальных разрядов молнии [544]. Через несколько минут оба увидели, что с неба как камень падает огненный шар — из того же самого места, где вспыхнула линейная молния, и с той же самой высоты. Через некоторое время та же самая область тучи была несколько раз освещена рассеянными разрядами.

В Германии в 1868 г. после грозы с дождем четыре человека возобновили кладку каменной стены. Ярко сияло солнце, и в синем небе виднелось лишь несколько почти прозрачных облачков. Строители собирались поднять на стену квадратный камень со сторонами примерно 80 см. Они стояли вокруг этого камня, когда внезапно вспыхнула молния. Между людьми, примерно в 90 см над камнем, появился желтый прозрачный шар диаметром около 20 см; он равномерно покачивался вверх и вниз с амплитудой около 4 см. В центре шара было голубоватое пламя грушевидной формы длиной около 4 см, обращенное острием вниз. Пламя вращалось по вертикальной окружности диаметром 7 см внутри большого шара. Через несколько секунд послышался резкий треск, и шаровая молния исчезла. Еще один рабочий в закрытом помещении в 10 м от стены не видел шара, но слышал взрыв и выскочил наружу. Вскоре строители узнали, что молния ударила в каменоломню в 100 м от места работ [140].

4. Согласно сообщениям, появление шаровой молнии связано с присутствием сильных электрических полей.

Один путешественник заметил четыре отдельных грозовых центра, в трех из которых с большой частотой появлялись разнообразные разряды молний [163]. В четвертом центре произошло лишь несколько ослепительно белых разрядов на землю через большие интервалы времени. Внезапно из середины тучи, где активность была невелика, тогда как вокруг нее молнии были особенно сильны, появился ослепительно белый шар диаметром ~ 20 см и начал медленно и равномерно опускаться прямо вниз. На полпути к земле он взорвался, и шесть светящихся фрагментов начали двигаться по расходящимся траекториям; затем они исчезли почти одновременно на последней трети пути до земли. Фрагменты, каза-

лось, двигались медленнее и светились слабее, чем первоначальный шар. Весь процесс занял 10 с. Свидетель не услышал никакого звука взрыва,—возможно, потому, что в момент распада шара вблизи него шипели и потрескивали телеграфные провода.

В другом случае, имевшем место в 1927 г. в Швейцарии [325], человек, работавший за письменным столом, со стороны открытого окна вдруг услышал шипение. Подняв голову, он заметил в полутора метрах над собой красное сверкающее пламя.

Оно пролетело мимо него, как ракета, и с громким треском разорвалось посреди комнаты в 2,5 м от пола. Другой очевидец, находившийся в 4 м, наблюдал происходящее через открытую дверь. В доме перегорела пробка, но никаких других следов шар не оставил, если не считать запаха серы. Небо было затянуто тучами, и примерно через четверть часа начался дождь. Прибор, находившийся в обсерватории в 600 м от дома, показал в тот момент сильные электрические возмущения. Напряженность электрического поля в атмосфере сильно колебалась, вплоть до таких низких значений, как —290 В/м. Хотя подобная величина была бы обычной для грозы, проводимость воздуха при этом не изменялась и не наблюдались обычные при грозе изменения температуры, давления или влажности. Не наблюдалось также никаких специфических для грозы разрядов.

Во Франции в 1904 г. в конце короткой и очень сильной грозы взорвалась шаровая молния [438]. Шар, который наблюдался из трех различных мест, находящихся в 500 м друг от друга и расположенных на одной прямой, взорвался с громким шумом. На его пути были повреждены три большие дымовые трубы, и вообще были замечены сильные электрические эффекты. Несколько человек почувствовали удары током, дверные звонки начали звонить, а внутри домов наблюдались разряды, напоминающие языки пламени. В стене городской префектуры, всего в 30 м от места, где шар начал свое движение, были обнаружены большие повреждения, несмотря на наличие громоотвода, который при осмотре оказался совершенно исправным. Казалось, громоотвод не оказал на шаровую молнию никакого влияния.

Образование небольшого огненного шара при необычных обстоятельствах во время грозы наблюдалось с близкого расстояния [224]. Женщина стояла на коврике, положив руку на талию и слегка отставив палец. Свидетель, находившийся в 1,5 м от нее, заметил, что воздух между ее пальцем и полом колеблется, словно от тепла. Что-то медленно поднялось с пола к пальцу женщины, и на мгновение к пальцу прилип продолговатый огненный шар величиной с грецкий орех. Казалось, что он светит сквозь дымку. Шар исчез, когда снаружи вспыхнула молния. Подобное же явление наблюдалось на мухобойке во время слабой грозы [336].

5. У шаровой молнии отмечали движения нескольких типов. Так, светящаяся масса часто катится или подпрыгивает, нередко сообщалось, что она вращается, а некоторые шаровые молнии устремляются вверх.

В 1956 г. во время тихого морозящего дождя шаровая молния диаметром 15—20 см была замечена после того, как она скатилась по дереву [384]. Разрядов обычной молнии в это время не было. На дереве остался очень слабый след, совсем не похожий на следы, нередко оставляемые зигзагообразной молнией. Когда шар находился в 300 м от наблюдателя, он казался ему голубовато-белым, а на расстоянии в 2 м стал красным. Сначала шар медленно падал под углом 30° , затем отскочил от мокрого луга на 4 м вверх и начал медленно перемещаться вдоль сарая. Обогнув дерево, шар ударился о столб забора, и раздался громкий взрыв. Хотя от столба отскочила щепка длиной 10 см и толщиной в палец, листья на деревьях неподалеку от него остались неподвижными, и вблизи этого места не удалось обнаружить никаких обгоревших участков. После того как шар исчез, в сарай ударила зигзагообразная молния, вызвавшая пожар.

В 1905 г. в Германии, во время короткой и очень сильной грозы образовалась яркая шаровая молния около 20 см в диаметре [265]. Мгновение она сохраняла неподвижность, а затем начала опускаться по прямой линии, что сопровождалось легким шумом, напоминающим электрический разряд. С левой стороны шара имелись небольшие выступы, тени которых двигались по его поверхности, указывая на вращательное движение. Через

5—6 с молния взорвалась, осветив все вокруг красным светом.

В 1877 г. на французском побережье Средиземного моря после града, сопровождавшегося громом, пошел небольшой дождь, вперемежку с полурастаявшими градинами; затем снова стало очень жарко, и к закату небо очистилось [49]. Затем в ясном небе появились многочисленные вспышки молнии, но грома слышно не было. На востоке появились черные тучи, одна из которых двигалась особенно быстро. Откуда-то из ее центра во все стороны, словно фейерверк, летели огненные шары. Шары эти были красными, а некоторые желтыми. Удалившись от тучи на 6—10°, они становились белыми и бесшумно распадались с огненными вспышками. Диаметр шаров на расстоянии 18 км составлял 1°. Они напоминали большие, очень светлые мыльные пузыри и двигались медленно в горизонтальном направлении, параллельно слою туч. Ни один из них не опускался. За 2 мин шары появлялись 3—4 раза. Затем начался сильный град с частыми обычными молниями. Жители этой местности сообщили о подобном же явлении, которое произошло несколько лет назад.

Желтый огненный шар размером примерно с большой крикетный мяч поднялся из-за домов вблизи Лондон-Филдс, в 1,5 км от наблюдателя, во время сильнейшей бури с ветром, дождем, градом и молниями, разразившейся там в 1874 г. [526]. Сначала шар поднимался медленно, но это движение вверх непрерывно ускорялось. Увеличение скорости было таким, что, когда на высоте 45° он резко повернул, это произвело впечатление вспыхнувшей молнии. За то время, пока шар поднимался к черной туче, в которой были видны вспышки молний, он сделал три зигзага. Примерно через 10 мин точно таким же образом поднялся еще один шар, хотя не с того же самого места.

6. Изредка появлялись сообщения о двух соединенных шарах. В Германии в 1912 г. четыре очевидца наблюдали две оранжевые сферы, соединенные вертикальной чуть светящейся зернистой нитью [125]. Все они единодушно утверждали, что в той части неба, где появились эти шары, на протяжении всей грозы молнии ни разу не вспыхивали. Обе массы появились внезапно, примерно в 100 м над землей и в 1 км от очевидцев. Шары находились друг от дру-

га примерно в 1,5 м и двигались на северо-восток со скоростью 1 км/с, причем так, что все время оставались на одной вертикальной линии. Ветер в районе наблюдения дул с севера. Верхний, больший шар двигался горизонтально, а нижний медленно опускался. Расстояние между ними увеличивалось, а упомянутая выше нить, казалось, растягивалась и потом исчезла. Нижний шар скрылся за густой рощей. Судя по расстоянию и видимым размерам, его диаметр не мог превышать 1 м. Нижний шар был виден в течение 0,75 мин, верхний исчез внезапно через 2 мин, в тот момент, когда начал понемногу опускаться.

Два огненных шара, соединенных между собой, наблюдались также во время извержения Везувия в 1794 г. [196]. Они пролетели вблизи дома, из которого их видели, и упали: один — в море с всплеском, который услышал наблюдатель, а другой — на берег.

7. Одна из наиболее интересных загадок шаровой молнии — ее появление в полностью закрытых помещениях. Сообщения об этом поступали в равной мере с равнинной местности, гор и с моря. В 1890 г. была опубликована сводка [323], содержащая 18 сообщений о появлении шаровой молнии в море.

В момент, когда раздался раскат грома, в закрытой комнате возле металлической дверной ручки появился светящийся шар, по величине и цвету напоминавший апельсин [303]. Не сдвинувшись с места, он исчез с громким взрывом. Следов пламени не было, но появился сильный запах, напоминавший запах озона.

Сотрудник обсерватории, возвращаясь домой во время сильной грозы с частыми молниями, подошел к двери, находившейся в конце вестибюля длиной 20 м и шириной 3 м, когда позади него раздался очень громкий треск, за которым последовала ослепительная вспышка [377]. Он оглянулся и увидел шагах в пяти от себя чрезвычайно яркий голубовато-белый светящийся шар, который медленно опускался с потолка вестибюля. Его очертания были неправильными и казались меняющимися, однако очень яркий свет мешал заметить подробности. Шар опускался почти вертикально с небольшой скоростью, не превышающей 2 м/с. Достигнув пола, он бесследно исчез, не производя никакого шума и не оставив запаха. При вниматель-

ном осмотре потолка удалось обнаружить, что белая краска в одном месте почернела, но под нигде не был обожжен. Через несколько секунд поблизости произошел чрезвычайно мощный разряд молнии — с электрических проводов посыпались искры, лампы и выключатели сгорели. По утверждению очевидца, этот разряд никак не был связан с огненным шаром. Он не мог сказать, каким образом шар оказался в вестибюле, так как увидел его уже спускающимся с потолка на пол, но высказал предположение, что шар, вероятнее всего, проник в вестибюль через разбитое стекло в одном из многочисленных окон у входа.

Тускло-красный грушевидный огненный шар медленно выплыл из закрытого помещения со стенами толщиной 60 см, которое использовалось в качестве сушилки [297]. Из него во все стороны вырывались короткие языки красного пламени. Шар проплыл над деревянной площадкой, над кабиной грузовика и взорвался в 1 м от земли. Примерно в это же время начался дождь. Очевидец этого события, происшедшего в 1937 г., обнаружил, что выключатель освещения замкнулся накоротко, и начался пожар в том месте, где провода проходили сантиметрах в 10 от громоотвода фабричной трубы, проходившего близ одной из толстых стен сушилки. Не было замечено никаких признаков пробоя стены в том месте, где возник огненный шар.

Два альпиниста, путешествовавшие по Швейцарии в 1885 г. и находившиеся на высоте 2504 м, видели многочисленные огненные шары. Шел сильный дождь, смешанный со снегом, и молнии вспыхивали почти непрерывно. Внезапно они увидели на уступе скалы горизонтальный ряд маленьких желтых шаров; шары слились, образовав большую светящуюся массу, которая в свою очередь начала испускать красные и голубые шары. Падая вниз, эти шары взрывались. Вскоре появился одиночный огненный шар, который двигался взад и вперед по параболической кривой со скоростью брошенного мяча. Затем он на несколько мгновений исчез, появился снова и продолжал свое движение еще несколько минут.

Имеется несколько сообщений о необычных случаях появления шаровой молнии в море — возможно, это объясняется благоприятными условиями наблюдения за ме-

теорологическими явлениями и широким полем зрения. В трудах Роберта Бойля [63] приведено описание происшествия на корабле в 1681 г., которое впоследствии нередко приписывали шаровой молнии. Во время бури в корабль «Албемарл», находившийся в 300 милях от Кейп-Кода, ударила молния. Грот сгорел, а окованная железом грот-мачта раскололась. После сильнейшего раската грома из туч на корабельную шлюпку упала пылающая масса, разбив ее на несколько частей. Масса горела, пока полностью не выгорела, испуская запах, походивший на запах пороха. Морякам не удалось ни затушить горящую массу водой, ни сбросить ее в море баграми. Возможно, появление этой массы указывает на случайно совпавшее с бурей падение метеорита. Не исключено также, что просто загорелся обломок мачты, однако в сообщении особо подчеркивалось, что «горящая» масса упала из туч.

Когда «Эолус» в 1881 г. плыл в Вальпараисо во время сильной снежной бури, прямо из зенита в воду в 2,5 м от корабля упал светящийся шар около 0,5 м в диаметре [427]. Сразу же раздался сильнейший взрыв, за которым последовал приглушенный удар грома. Два человека за штурвалом на несколько минут ослепли. Два матроса на баке рассказали, что их отбросила назад ударившая в них молния. Через две минуты после взрыва на всех трех клотиках наблюдались огни св. Эльма.

Американский палеонтолог Марш наблюдал в 1878 г. шаровую молнию грушевидной формы [305]. Марш находился на палубе большой яхты, стоявшей в Саутгемптоне во время грозы, в течение которой отмечалось несколько вспышек молний. Поглядев в сторону яркого света в верхней части фок-мачты, он увидел примерно на половине ее высоты розовый огненный шар, который медленно опускался вниз на пабулу. Шар имел в диаметре около 10 см и около 15—20 см в длину, причем более широкий конец находился внизу. При ударе о палубу он взорвался, сбив с ног матроса. Удар, по-видимому, частично распространился вниз по вентилятору в камбуз, где из рук повара была выбита кастрюля, а различные кухонные принадлежности сдвинулись со своих мест. Некоторое время там чувствовался резкий запах, напоминающий запах озона. Марш заметил, что носовая часть палубы светится ярким

рассеянным светом, а находившийся там офицер видел, как по палубе змееобразно извивались разряды молнии.

8. Случаи появления шаровой молнии в самолетах образуют большой и непрерывно увеличивающийся список, который в последнее время обретает особое значение. Самолеты часто поражаются разрядами обыкновенной молнии, и в некоторых случаях светящиеся шары оказываются связанными с такими разрядами [358]. Появление шаровой молнии в самолетах нередко сопровождается высокой температурой и взрывами. Ниже дается краткое изложение сообщений, имеющих в литературе.

В 1938 г. командир английского гидросамолета компании БОАК во время полета на высоте 2500 м в густом слоисто-дождевом облаке увидел, что в открытое окно его рубки влетел огненный шар [183]. Его брови и часть волос обгорели. В планшете и привязных ремнях появились дыры. Шар пролетел через самолет в хвостовую кабину, где взорвался с громким треском.

Самолет компании ТВА, летевший в 1948 г. из Парижа в Каир на высоте 3400 м, находясь в густых облаках, испытал сильный удар под фюзеляжем [34]. Пассажир, смотревший в иллюминатор, увидел, что из-под фюзеляжа поднимается огненный шар оранжево-желтого цвета, размером чуть больше теннисного мяча. Яркий центр шара был окружен темным серо-фиолетовым слоем. Шар был поперечником 2—3 см, с коротким хвостом, словно он состоял из вращающейся спирали, и двигался с той же скоростью, что и самолет. Наблюдатель увидел, как шар разорвался примерно в 30 см от борта фюзеляжа, выбросив вперед яркую струю длиной почти 3 м. По словам другого очевидца, сидевшего рядом с первым, этот выброс походил на вспышку магния. Одновременно раздался громкий треск, более громкий, чем револьверный выстрел. Явление длилось 1—2 с.

Предполагается, что именно из-за взрыва большого огненного шара в затянутом тучами небе в 1948 г. погиб истребитель. Сама катастрофа непосредственно не наблюдалась, но многие видели перед этим красный огненный шар [42].

В 1956 г. советский винтовой самолет ЛИ-2 был поражен шаровой молнией, когда он летел на высоте 3300 м в

кучево-дождевых облаках [257]. Самолет только что прошел через холодный грозовой фронт и сильно обледенел. Высота облаков достигала 5,5—6 км, температура воздуха на высоте полета была 2—4° ниже нуля, и самолет сильно болтал. Оранжево-красный огненный шар диаметром 25—30 см быстро приблизился к самолету спереди. В 30—40 см

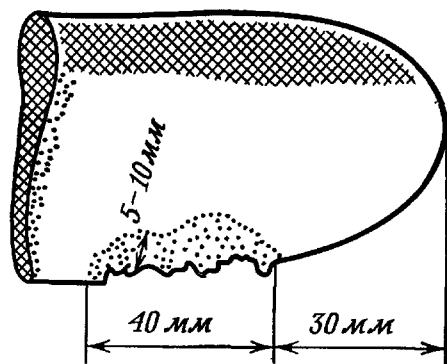


Рис. 10. Лопасть пропеллера, поврежденная шаровой молнией.

от его носа шар свернул влево и пролетел мимо кабины летчика. В этот момент он задел сверху правый пропеллер и взорвался. Вслед за ослепительно белой вспышкой послышался громкий взрыв, заглушивший даже шум мотора. Справа вдоль фюзеляжа пронесся огненный поток, а самолет резко рванулся вверх. Во время полета через грозовую тучу отмечались сильные радиопомехи. Когда радист после разряда молнии хотел отключить антенну, его ударило током. Единственное повреждение, которое получил самолет, было обнаружено на лопасти пропеллера: ее край был оплавлен на участке 40 мм в длину и 5—10 мм в ширину на расстоянии 30 мм от конца лопасти (рис. 10). Оплавленный участок окружал слой сажи, которая легко стиралась рукой.

В том же 1956 г. советский реактивный самолет встретился с шаровой молнией на высоте 2500 м, когда набирал высоту в грозовой туче [257]. Самолет летел над европейской частью СССР, через кучево-дождевые облака с вершинами до 4500—5000 м, во время дождя и грозы. Шар появился спереди справа от самолета и почти немедленно взорвался, разлетевшись на мелкие куски с яркой вспышкой и громким треском. Ближайший к шару мотор заглох, но летчику удалось снова его запустить. Обследование после посадки не выявило никаких видимых повреждений, и остановка мотора была отнесена за счет возникшего при взрыве разрежения воздуха.

Еще один случай произошел в СССР в 1959 г., когда

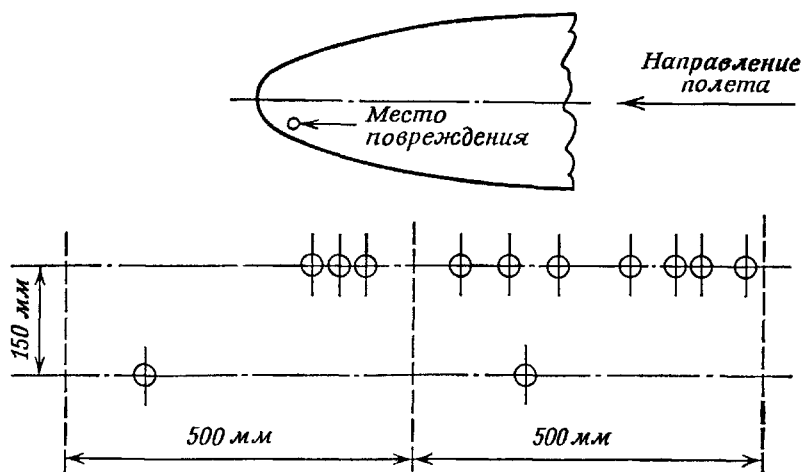


Рис. 11. Заклепки фюзеляжа, оплавленные шаровой молнией.

шар традиционной величины «с кулак» (скорее всего 10 см в диаметре) ударил в самолет над Иркутском [397]. Самолет летел со скоростью 400 км/ч в густых облаках, расположенных двумя слоями на высотах 400—4000 и 8000—10000 м. На высоте 1400 м в бурную погоду концы крыльев не были видны, и воздух был очень неспокоен. Мокрый снег быстро залепил передние окна и крылья. Перед самолетом обычная молния ударила в направлении земли. В тот же момент самолет потряс сильный удар, но он не потерял управления. Одновременно справа от него пронесся огненный шар и появился дождь искр. Летчик поднял самолет из туч на высоту 4000 м. Оборудование кабины сильно намагнитилось, и компас отклонился от правильного направления на 100° . Радио работало, но радиокompас давал неверные показания. Обследование самолета после полета показало, что на правом борту в передней части фюзеляжа оплавилась заклепка, но обшивка разрушена не была (рис. 11).

В 1960 г. шаровая молния появилась в самолете-заправщике ВВС США KC-97, нагруженном топливом [533]. Этот самолет, предназначенный для заправки горючим в воздухе самолетов с малым радиусом полета, выполнял слепой полет в облаках на высоте 5400 м при легких осадках, но при температуре выше нуля. На окантовке пе-

редних окон появились огни св. Эльма — явление довольно обычное. Летчик увидел, как желтовато-белый шар диаметром примерно 45 см проник через лобовое стекло и пронесся между ним и вторым пилотом со скоростью «бегущего человека». Пилот напрягся в ожидании взрыва. Шар пролетел по проходу мимо штурмана и бортмеханика. Примерно через 3 с заправщик доложил по интеркому из хвостового отделения, что огненный шар прокатился через задний грузовой отсек и по правому крылу ушел в облака. Шар не производил никаких звуков. Летчик уже имел опыт с ударами обычной молнии и ждал, что топливо в баках взорвется. Это ожидание было вполне оправданным, если учесть имеющиеся в литературе описания других происшествий с шаровыми молниями на самолетах.

Пассажир самолета наблюдал, как после вспышки обычной молнии через кабину пролетел огненный шар [232]. В 1963 г. рейсовый самолет компании «Истерн эйрлайнз», следовавший из Нью-Йорка в Вашингтон, проходя через грозу, внезапно был со всех сторон окружен яркой вспышкой, которая сопровождалась громким шумом. Через несколько секунд голубовато-белая сфера диаметром около 22 см пролетела от кабины летчиков по проходу примерно в 50 см от очевидца. Она оставалась на одной и той же высоте — около 75 см от пола — и, насколько он мог судить, двигалась совершенно прямолинейно. Наблюдая шар на столь близком расстоянии, очевидец заметил некоторые детали. По-видимому, шар двигался со скоростью 1,5 м/с по отношению к самолету. Он представлял собой правильную сферу с чуть более темными краями и без каких-либо следов тороидальной структуры. Сила света от него соответствовала лампочке в 5—10 Вт, и он не излучал никакого тепла. Не было заметно следов вращения, и шар казался очень устойчивым.

Подобные не причиняющие вреда появления шаровых молний в самолетах, по-видимому, относительно редки, хотя появления шаровых молний вблизи земли, возможно, бывают безобидными в большинстве случаев. Однако не исключено, что о многих таких происшествиях с самолетами, если они не сопровождалась повреждениями, просто не сообщается.

Еще в одном случае встречи самолета с шаровой молнией советский самолет ЛИ-2 столкнулся с шаром заметно больших размеров, 60—80 см в диаметре. Дело было в 1965 г., при полете над Кольским п-вом в густых слоисто-дождевых облаках [578]. Видимость была такой, что концы крыльев не были видны. Самолет проходил в северной части циклона. Температура на высоте полета была -5°C . Когда шар ударился в носовую часть самолета, раздался звук, напоминающий ружейный выстрел. Пассажиры и экипаж увидели красные полосы разрядов, скользившие по обшивке самолета. Подобный же эффект наблюдался и в 1956 г. в происшествии с самолетом того же типа [257], а также при падении шаровой молнии на корабль в 1878 г., когда, согласно сообщению, вслед за взрывом небольшого шара на палубе наблюдались змеевидные полосы [305]. После столкновения самолета с шаром радиокompас начал поворачиваться, а стрелка магнитного компаса в течение 3—5 мин беспорядочно металась из стороны в сторону. Когда, наконец, она остановилась, ее показания оказались неверными. Вся радиоаппаратура также вышла из строя. Обследование самолета после приземления выявило несколько поврежденных заклепок в передней части фюзеляжа и два отверстия диаметром 1,5—2 см, проплавленных в задней кромке руля высоты.

Появления шаровой молнии в самолетах — события хотя и относительно редкие, но несомненно реальные, что убедительно доказывается приведенными сообщениями, в которых также подчеркивается и связанная с ними потенциальная опасность — взрывы, высокая температура, при которой оплавляется металл, мощные электрические эффекты и динамические воздействия, достаточные для отклонения самолета от курса. Как будет видно из дальнейшего, возникновение огненных шаров в закрытых объемах происходит и в сооружениях, почти полностью окруженных металлом.

9. Сообщалось также о появлениях шаровых молний в связи с вулканическими извержениями и тропическими циклонами.

В Гватемале в 1902 г. на подветренной стороне одного из вулканов разразилась гроза с множеством интен-

сивных разрядов и сильными электрическими эффектами. Повсюду — и на людях и на домах — наблюдались коронные разряды, и появилось много шаровых молний, которые взрывались с приглушенным звуком, но не причиняли вреда. Из вулканических туч слышались частые раскаты грома, нередко без видимой связи с разрядами молний. Были замечены многочисленные вспышки и несколько шаровых молний, но не наблюдалось ни одного нормального зигзагообразного разряда [286].

Большая электрическая активность с непрерывными вспышками молний наблюдалась во время урагана на Мартинике в 1891 г. В течение грозы шаровые молнии появлялись во всех направлениях. Потрескивающие шары несколько минут плавали в воздухе и разрывались примерно в полуметре от земли [513].

Некоторые очевидцы сообщали о появлении огненных шаров в воронках торнадо [550]. В одном случае было специально отмечено отсутствие обычной молнии: разряды приняли форму огненного потока, который истекал из клубящейся, насыщенной пылью тучи, и, опускаясь, распадался на отдельные светящиеся объемы. Об огненных шарах сообщалось также в связи с тремя недавними смерчами во Франции между 1961 и 1965 гг. [126].

10. Согласно некоторым сообщениям, светящееся вещество шаровой молнии само может быть источником искр или лучей, а в редких случаях и разрядов, напоминающих обычную молнию.

В 1849 г. в Париже в очень жаркий день при ясном небе наблюдались частые молнии [142]. Из окна третьего этажа был замечен большой красный шар, который сначала приняли за воздушный. Пока наблюдатель ломал голову, что это за предмет, в нижней части шара, находившегося в 5—6 м над деревом, вспыхнуло пламя. Сначала это были маленькие искры и огненные языки, казалось, вырывавшиеся из отверстия в шаре. Когда отверстие стало раза в три шире ладони, сильный взрыв уничтожил всю массу. Во все стороны были выброшены зигзагообразные разряды. Одна из этих молний ударила в дом и пробила в стене дыру, точно пушечное ядро. Взрыв сбил с ног трех прохожих. По-видимому, часть

первоначального вещества все же сохранилась, так как некоторое время еще пылало яркое белое пламя, похожее на огонь фейерверка. Все явление длилось около минуты.

В 1889 г. в Англии после сильнейшего дождя наблюдатель увидел, как с прояснившегося неба примерно в 100 м от него спустился желтый, светящийся, как раскаленное железо, продолговатый предмет около 13 см в поперечнике и 38 см в длину [199]. Этот предмет опускался медленно, так что за ним можно было следить. Когда предмет оказался в 12 м от земли, вблизи дымовой трубы, он выбросил горизонтальную струю. Выброс был белым в середине и красным по краям. Раздался оглушительный треск, и вскоре после этого наблюдатели ощутили сильный запах, напоминавший запах горячей серы. Снаружи труба осталась совершенно невредимой, но кухню и столовую заполнили дым и зола. Хозяин дома, как раз входивший в столовую, услышал взрыв и одновременно увидел яркую вспышку. Внутри комнаты несколько кирпичей были отброшены на 2 м, а штука-турка — на 5 м.

В 1949 г. в ФРГ во время бури, достигавшей, судя по описанию, силы урагана и длившейся всего 30 мин, супружеская чета была разбужена ярким светом, осветившим их спальню [171]. Муж вскочил с кровати и увидел за окном, в 10—12 м от дома, ослепительно белый шар, плывший по воздуху на высоте 3—4 м. Через несколько секунд шар распался, но часть его сохранилась — она напоминала по форме молодой месяц, повернутый рогами вниз. Последовал сильный разряд в землю, сопровождающийся яркой искрой в воздухе. Остатки шара, все еще плававшие на первоначальной высоте, выбросили в разные стороны многочисленные красновато-желтые искры длиной ~ 30 см, которые угасали, не достигнув земли. Все это длилось не меньше 4 с. Жена очевидца заметила светящийся комок размером с ладонь, который ударился о землю, выбросив красные искры.

11. В немногих случаях светящиеся сферические разряды на остриях проводников, которые можно было бы отнести к огням св. Эльма, превращались в движущиеся

объекты, поведение которых было типично для шаровой молнии. Кроме того, во время гроз не раз наблюдались шары, двигавшиеся вдоль проводов высоковольтных передач.

В 1895 г. во Франции во время бури, при которой не было ни молний, ни грома, на вершине железной мачты, установленной на крыше дома для поддержки телеграфных проводов, был замечен большой огненный шар [326]. Он имел в диаметре около 30 см, ярко светился и с расстояния 100 м казался наблюдателю резко очерченным. От него во все стороны летели большие искры. Через 40—50 с шар внезапно распался на три маленькие сферы величиной с детский воздушный шарик. Искрение прекратилось, и все три шара покатались по крыше, словно под действием силы тяжести. Затем они исчезли в водосточном желобе без какого-либо взрыва. Другой наблюдатель сообщал о появлении одиночного огненного шара на том же самом месте. Позже было обнаружено, что мачта утратила прежнее вертикальное положение и заметно наклонилась.

В 1899 г. в почтовом отделении на о. Мартиника, где клиент ожидал телефонного разговора, послышался скрежещущий звук, исходивший от громоотвода [270]. Такой звук нередко бывал слышен во время сезона гроз, и клиент хотел уже положить трубку на рычаг, когда увидел, что вдоль телефонного провода движется огненный шар диаметром 20 см. Он светился с яркостью 20-свечевой лампочки. Когда шар приблизился к телефонной трубке, между ним и заземленным проводом, который, к счастью, оказался близко от трубки, проскочил сильный разряд. Раздался треск, напоминавший выстрел из небольшой пушки и сопровождавшийся ослепительной вспышкой. Наблюдатель на мгновение был оглушен; придя в себя, он обнаружил, что телефонный аппарат полностью сторел. Телеграфный же аппарат пострадал мало — оплавилась обмотка индукционной катушки. Пластины молниеприемника оплавилась, а в нескольких местах даже спаялись.

В 1906 г. в Швейцарии начальник железнодорожной станции и еще 5—6 человек наблюдали во время сильнейшей грозы, как по электрическим проводам по на-

правлению к вершинам гор катились, испуская искры, голубые шары величиной с куриное яйцо [180]. Они исчезли вдалеке, но вскоре снова появились, медленно двигаясь в том же направлении. В течение четверти часа это явление повторилось несколько раз. Во время той же грозы внутри одного дома после интенсивного разряда молнии на электрических проводах наблюдался огненный шар. Еще один шар появился на телефонном проводе в монастыре. Этот последний шар исчез почти немедленно, разбив окно и отопительный радиатор.

В 1947 г. в Шотландии в чрезвычайно душный день, однако без дождя и грома, наблюдатель заметил, что по наружному электрическому проводу катится огненный шар [89]. Ударившись о большой дуб, он оглушительно взорвался и разнес дерево в щепки. В соседнем доме сгорели пробки, радиоприемник и телефонный аппарат, однако взрыв не разбил окон и не причинил никаких других повреждений.

12. Несмотря на многочисленные примеры, когда появляющиеся во время грозы светящиеся шары взрывались и причиняли повреждения, это явление часто объявлялось безвредным, потому что нередко шары прикасались к людям, не причиняя им вреда, и исчезали бесшумно; это явление можно назвать «безопасной» шаровой молнией. В некоторых описаниях [465, 518] она характеризовалась как совершенно безопасная, а потенциальную опасность приписывали обычной линейной молнии, которая, согласно сообщениям, часто предшествует появлению огненного шара или следует немедленно за его исчезновением.

В 1904 г. немецкий инженер, за 10 лет до этого видевший издали шаровую молнию, шел вместе с женой во время бури, сопровождавшейся дождем, градом и снегом при чрезвычайно сильном ветре [50]. Примерно в 30 м от дороги и в 6 м над поверхностью льда они увидели большой яркий шар метра 4 в диаметре. Шар опустился сквозь телеграфные провода, которые начали светиться, а затем окутал супружескую пару. Они стояли в плотной массе белого света, не ощущая ни запаха, ни тепла. Перемещение шара не вызывало ни малейшего движения воздуха; они даже не ощущали наруж-

ного ветра и видели только булыжник под ногами. С зажженной сигарой мужа ничего не случилось. Затем шар перекатился через дорогу. Он как будто начал подниматься и через 10 м, по ту сторону дороги, исчез за плотной стеной града. Сила света, испускаемого шаром, составляла примерно 34 свечи; он двигался, как бы скользя. За 4 с, в течение которых шар был виден, он прошел 50 м. После наведения справок выяснилось, что телеграфный аппарат на почте в этот момент бездействовал и никаких нарушений замечено не было. Однако сторож, сидевший перед дверью почты, сказал, что он видел шар, пролетавший над зданием примерно в это же время.

Одиннадцать гостей, сидевших в салоне одного французского барона во время сильной грозы, внезапно увидели, что между ними появился голубой шар величиной с голову ребенка [79]. Шар медленно проплыл по комнате, задев четырех человек, но не причинив им никакого вреда. Вылетев на парадную лестницу, он взорвался.

13. В других сообщениях недвусмысленно указывается на опасности, связанные с шаровой молнией, включая взрывы, вызывающие человеческие жертвы или серьезные повреждения, и приводятся данные, свидетельствующие о высвобождении большой энергии.

В 1865 г. в Германии погиб ребенок, прикоснувшийся ногой к шаровой молнии. Взрыв разбросал во все стороны его игрушки [193].

В 1907 г. в Австрии во время сильной грозы зигзагообразная молния ударила в дерево [229]. Разряд по спирали спустился на землю. Двое мужчин, сидевших у соседнего дома, были отброшены в сторону на 3 м. Они ощутили сильный жар, но не пострадали. Гроза пронеслась, и небо очистилось. Через 2 ч после разряда молнии, когда начали растапливать кухонную плиту, раздался сильный взрыв, разбросавший кирпичи. Перед глазами насмерть перепуганной экономки появился огненный шар величиной с яблоко, который с треском унесся через дымоход.

Путник, захваченный в дороге сильной грозой, укрылся около конюшни [154]. Он увидел, что в дверях конюшни, в которой находилось 25 лошадей, прячутся

от грозы двое детей лет 12—13. Прямо перед конюшной был откос, тянувшийся метров на 20 до большого пруда, близ которого рос тополь. Внезапно на вершине тополя появился огненный шар и покатился вниз, сначала с ветки на ветку, а потом по стволу. По земле он двигался очень медленно, словно выбирая дорогу между лужами, и наконец достиг двери, где стояли дети. Один из мальчиков храбро пнул его ногой — и тут же стены строения потряс сильный взрыв. Дети были сбиты с ног, но остались целы и невредимы, однако в конюшне были убиты 11 лошадей.

Это происшествие и подобные ему, встречающиеся в литературе, показывают, что, пожалуй, страх, перед неизвестным, проявленный в описываемом ниже случае, предпочтительнее академической любознательности. Во время грозы после сильного удара молнии в доме появилось желтое пламя 12 см в диаметре, вертевшееся как волчок [583]. Огненный шар испускал сильный запах — но не серы, а скорее окислов азота, однако он не взорвался. Шар появился в 1 м от кухарки, которая тотчас же бросилась бежать. Профессор Университета Джона Гопкинса Роберт Вуд заметил по этому поводу: «Кухарка находилась так близко от шара, что могла бы его потрогать, и очень жаль, что она пренебрегла такой возможностью внести ценный вклад в наши представления об этом таинственном электрическом явлении». Немного подумав, он добавил: «Мне кажется, я бы обязательно протянул к нему руку. Но наверняка утверждать не берусь».

В одном из наиболее часто приводимых в литературе случаев появления шаровой молнии, позволившем сделать оценку ее энергии, огненный шар упал в бочку с водой [184, 345]. Наблюдатель заметил, что с неба спускается маленький, докрасна раскаленный шар. Он ударился о дом, где находился наблюдатель, оборвал телефонный провод, сжег оконную раму и упал в бочку с водой, стоявшую под окном. Вода кипела в течение нескольких минут. Когда она остыла, очевидец исследовал бочку, но никаких остатков шара не нашел.

14. Неоднократно выдвигалось предположение, что описания, сделанные очевидцами шаровой молнии, объ-

ясняются оптическими иллюзиями. Однако сообщения, которые можно было бы объяснить подобными иллюзиями, крайне редки.

В одном случае появления шаровой молнии сам очевидец пришел к выводу, что это была оптическая иллюзия [287]. Дело происходило в Англии в 1877 г. Перед наблюдателем, который шел по улице, одновременно со вспышкой молнии и ударом грома появился светящийся шар. Этот шар, величиной примерно с зонтик, упал перед ним и покатился по мостовой в том же направлении, в каком он шел. Затем шар исчез; казалось, что он свернул в ворота одного из домов. Согласно сообщению очевидца, он почти немедленно пришел к выводу, что это была оптическая иллюзия — результат воздействия разряда на сетчатку глаза; именно поэтому «шар» двигался в направлении его взгляда и исчез, когда пропал последовательный образ в глазу очевидца.

Чаще всего иллюзию считают возникающей в том случае, когда наблюдатель видит обычную молнию, находясь прямо на пути разряда. Поскольку наблюдатель видит только поперечное сечение разряда, он представляется ему круглой массой, движущейся прямо на него, при условии, конечно, что разряд не меняет направления, как это бывает при обычной зигзагообразной молнии. Араго указывает, что подобная иллюзия не может объяснить сообщения о шаровых молниях, двигавшихся поперек поля зрения очевидца.

Имеется сообщение, которое, по-видимому, относится именно к каналу молнии, располагавшемуся вдоль луча зрения, хотя очевидец счел этот феномен шаровой молнией [114]. Обедая летом 1900 г. в норвежском отеле, он любовался яркими вспышками молний во время грозы. Внезапно прямо на него с неба метнулась полоса желтого света шириной около 3 см, нацеленная, как ему показалось, прямо в лоб. Он окаменел от неожиданности и не успел окликнуть кого-либо из сидевших за столом. В тот момент, когда этот объект приблизился к окну, он превратился в ослепительный желтый шар размером с крикетный мяч. Шар взорвался с ужасным треском, выбросив во все стороны длинные языки лилового пламени. На следующий день очевидец обнаружил

след от этого разряда в земле, начинавшийся в 20 м от окна, через которое он наблюдал это явление. Кругом валялись комья земли и ветки, а два — три молодых деревца были вывернуты с корнем. Найденный им след представлял собой борозду в 44 м длиной и от 7 до 24 см шириной при глубине от 4 до 12 см. Борозда огибала большой гранитный валун, от которого были отколоты два больших куска. Один из них свидетель с трудом поднял, другой же мог только пошевелить, однако этот кусок был отброшен от валуна метров на 5. В нескольких местах след исчезал под землей, но затем снова выходил на поверхность. Описание светового явления, а также следа на земле очень легко отнести к обычной зигзагообразной молнии,⁴ хотя еще в одном сообщении о шаровой молнии указывалось, что она провела по земле борозду.

Наблюдения, сделанные надежными очевидцами при точно описанных условиях, убедили многих в существовании шаровой молнии, как, несомненно, убедило бы их и зрелище самого явления. Однако во время одного необычного случая сам очевидец, Д. Суитенбенк, преподаватель факультета топлива и инженерной химии Шеффилдского университета, пришел к противоположному выводу. Обычная молния ударила в дерево примерно в 100 м от дома, в котором в этот момент находилось около 25 человек. Дерево расколосось, и в радиусе 3 м от его комля на земле остались расходящиеся опаленные следы. Провод имевшегося в доме телефона проходил поблизости от этого дерева, и аппарат вышел из строя. Все люди в доме видели белый шар 30 см в диаметре, который в один и тот же момент оказался в гостиной, в ванной и в кухне — т. е. там, где находились данные свидетели в момент вспышки. Шар оставался в доме несколько секунд и, по мнению некоторых, исчез через окно или дверь. К этому присоединился оглушительный звук, похожий на взрыв, — в ушах очевидцев звенело около получаса. Суитенбенк находился в компании, беседовавшей на кухне, и шар появился в центре их группы. Он счел случившееся оптической иллюзией, так как шар одновременно видели в нескольких комнатах очень большого дома, и высказал предположение,

что чрезвычайно мощный электромагнитный импульс мог воздействовать на мозг именно таким образом. В качестве другого возможного источника подобных иллюзий указывалось также кажущееся ощущение света при надавливании на глаз.

В. Сводки и обзоры наблюдений шаровой молнии

Чрезвычайный интерес и важность наблюдений необычного поведения шаровой молнии заставляли ученых вновь и вновь рассматривать быстро умножающееся число случаев в надежде обнаружить систематически повторяющиеся особенности, которые могли бы послужить основой для объяснения этого явления. Самое раннее исчерпывающее рассмотрение этой проблемы было опубликовано Араго в 1838 г. [16]. Работа эта вызвала общий интерес, к нему начали поступать новые сообщения, и при включении этого обзора в собрание своих трудов Араго добавил еще 30 случаев наблюдения шаровой молнии. После Араго в нескольких книгах о грозах и молниях появились главы, посвященные шаровой молнии. В специальных журналах было напечатано несколько обширных обзоров, включавших сотни подробно изложенных наблюдений. Были изданы также две книги, посвященные исключительно шаровой молнии.

Всего лишь через пять лет после выхода в свет статьи Араго ведущий английский «электрик» Сноу Гаррис коротко рассмотрел шаровую молнию в своем труде, посвященном грозам [200], и предположил, что она образуется благодаря электрическим разрядам определенного типа. Гипотеза эта остается в силе и по сей день. Гаррис изложил весьма ограниченное число лабораторных экспериментов того времени, которые как-то могли объяснить это явление. Число собранных наблюдений заметно увеличил в 1866 г. Сестье в своей книге о видах и действии молнии [471]. Фламарион, астроном и автор многих научно-популярных произведений, привел в своей книге об атмосфере, пользовавшейся большой популярностью и впервые изданной в 1872 г. [153], около 50 случаев наблюдения шаровой молнии, часть которых была почерпнута из литературы, а часть собрана им

самим. 18 сообщений о шаровой молнии в море были собраны в 1890 г. [323]. В более поздних немецких [181] и русских [488] трудах о грозах и молнии число полностью излагаемых случаев стало резко сокращаться ввиду того, что в литературе их накопилось слишком много, и на смену им все шире стал приходиться статистический метод изложения информации. В русскую [260], шведскую [361] и чехословацкую [433] книги о молниях были включены краткие обзоры, посвященные главным образом возможным источникам формирования шаровой молнии. Теории, которых придерживается каждый из авторов, в общем представляются логичными, но все они разные. Наблюдения, проводившиеся в Голландии с 1916 по 1943 г., были собраны и, обсуждены вместе с имеющимися теориями [45]. Недавно опубликованная научно-популярная книга, посвященная атмосферным и геофизическим явлениям [272], включает краткий обзор нынешнего состояния проблемы шаровой молнии, который в большей своей части весьма точен и подкреплён авторитетными свидетельствами.

В 1937 г. [184] и в 1965 г. [108, 479] были опубликованы доклады, сделанные на научных конференциях, а также последовавшая за ними дискуссия. Собраны наблюдения шаровой молнии в СССР [101]. Специальные публикации, касающиеся шаровой молнии, включают библиографию с выдержками из 43 докладов за период 1950—1960 гг. из библиотеки Конгресса США [282], а также сборник советских статей, переведенных на английский язык [434] и в основном посвященных плазменным моделям, предложенным для шаровой молнии, с аннотированной библиографией, содержащей 83 названия.

Несколько авторитетных и достаточно полных источников, которые могут считаться наиболее существенными для полного обзора проблемы шаровой молнии, содержат наибольшее число собранных наблюдений, а также краткий критический разбор свойств, выведенных на основе этих сообщений, и теорий, предложенных для их объяснения. Таким источником является труд Заутера [452], опубликованный в двух частях (одна излагает теории шаровой молнии, а другая — сообщения о ней)

Ульмским реальным училищем в 1890 и 1892 гг и кратко аннотированный в *Meteorologische Zeitschrift* [453]. В этом обзоре приведены сообщения о 213 появлениях шаровой молнии, причем некоторые из них дублируют друг друга [65] — возможно, из-за неоднократных публикаций одного и того же сообщения в различных журналах. Заутер пришел к выводу, что шаровая молния возникает гораздо чаще, чем принято считать, и настойчиво рекомендовал имеющим соответствующую подготовку лицам вести внимательные наблюдения во время грозы, чтобы получить сведения, которые помогут разобраться в противоречивых свойствах, приписываемых шаровой молнии согласно имеющимся сообщениям.

Через 20 лет после работы Заутера бельгийский журнал *Ciel et terre* опубликовал в шести номерах «Ретроспективный взгляд на попытки объяснения шаровой молнии» де Янса [230]. Этот труд примечателен строгой логичностью изложения и весьма точным цитированием источников. Конкретные наблюдения приводятся для того, чтобы обосновать характерные черты, приписываемые шаровой молнии, и связать эти свойства с выдвигаемыми теориями. Однако эти наблюдения не излагаются полностью и в хронологическом порядке, как делается обычно в других работах такого же объема, посвященных шаровой молнии. Де Янс пришел к выводу, что имевшиеся в то время теории объясняли лишь некоторые, а не все свойства шаровой молнии. В тот же период, когда появился обзор де Янса (с 1910 по 1912 г.), в *Atti* и в *Memorie* Ватиканской академии из номера в номер публиковался свод наблюдений, который собрал по литературным источникам Галли [164, 165]. Позже было отмечено [65], что Галли включил в свой свод случаи, когда сам наблюдатель вовсе не упоминал о шаровых образованиях.

По мере того как число наблюдений, сообщавшихся в литературе, и число сводок таких наблюдений все увеличивались, в исследования, опирающиеся на показания очевидцев, начали включать полностью лишь избранные случаи; остальные же описания, содержавшие все подробности, какие только мог припомнить очевидец, заменялись собственными выводами исследователя или ста-

тистическими данными о выбранных им характеристиках. Упомянувшееся выше исследование Хамфрейса [224] опиралось на 280 неопубликованных случаев, собранных им самим. Эти сообщения показались ему весьма неубедительными, и он пришел к выводу, что во всех случаях появление шаровой молнии объяснялось либо иллюзией, либо неправильной идентификацией какого-либо иного естественного явления. Мак-Налли [321] собрал 515 сообщений. Хотя в их число были включены неподвижные светящиеся шары, которые первоначально отождествлялись с огнями св. Эльма, у многих из них наблюдались характерные черты шаровой молнии — например, перемещение по воздуху. Еще 112 наблюдений рассматриваются в другой недавней работе того же типа, опубликованной Рейлом [420]. Барри [36] сделал обзор сообщений о шаровой молнии, приводимых в литературе. На основании 400 с лишним наблюдений (Барри добавил к тем, которые уже включались в предыдущие обзоры, сообщения, собранные за последние 50 лет) он, в частности, попытался отделить другие светящиеся объекты (например, огни св. Эльма) от шаровой молнии.

Лучшим из известных источников сведений о шаровой молнии является книга Бранда «Der Kugelblitz», опубликованная в 1923 г., в которой наблюдения воспроизведены полностью, а свойства, о которых сообщали очевидцы, рассматриваются статистически с учетом их частоты [65, 481]. В университетских библиотеках Марбурга, Берлина и Геттингена и в военно-морской обсерватории в Гамбурге Бранд нашел примерно 600 сообщений. Он перечислил 215 из наиболее тщательно проверенных случаев за столетие (1820—1920) и точно воспроизвел оригинальный текст 108 из них. Треть работы посвящена оценке свойств, выведенных из этих сообщений, и обсуждению теорий, выдвинутых для объяснения этого явления — в частности, разбору недостатков наиболее распространенных теорий той эпохи. Недавно была опубликована несколько более краткая советская работа «Загадка шаровой молнии» Леонова [277]. В этом труде, по стилю научно-популярном, но достаточно строгом, перечисляются произведенные в СССР наблюдения шаровой молнии, из которых в литературе прежде были известны лишь немногие.

В этом труде излагаются и рассматриваются некоторые из наиболее рациональных теорий шаровой молнии и подчеркивается отсутствие надежной теории. Указываются и трудности, отчасти объясняющие такое положение вещей.

Само поведение шаровой молнии — как обычное, так и наблюдавшееся в единичных случаях — чрезвычайно затрудняет создание ее теории. Для полноценного же рассмотрения выдвинутых теорий совершенно необходимо исчерпывающее изучение свойств шаровой молнии.

ФОТОГРАФИИ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Количество фотографий шаровой молнии весьма незначительно. Их существование укрепляет уверенность в реальности этого явления и в целом подтверждает особенности, отмеченные при визуальных наблюдениях. Фотографический метод, оказавшийся весьма эффективным для исследования других форм грозового разряда, не принес успеха при изучении шаровой молнии — в основном, без сомнения, потому, что ее появления редки и нерегулярны. Имеющиеся снимки можно разбить на две категории. Одни фиксируют светящийся след, очевидно, оставленный движущимся огненным шаром. Вторая и более редкая категория — это фотографии неподвижной светящейся массы, которая имеет лишь приблизительно сферические очертания и может испускать искры.

Обычно для фотографирования молний пленка длительно экспонируется во время грозы. Периодически ее меняют. Затем ее проявляют и просматривают, отбирая наиболее интересные кадры. Напротив, наиболее ценные снимки шаровой молнии были получены путем фотографирования с короткими выдержками, когда у наблюдателя в руках, к счастью, оказывался заряженный фотоаппарат и он видел объект, который снимал.

Самые ранние изображения шаровой молнии — это, разумеется, рисунки, сделанные очевидцами. Первый из них, опубликованный в научном журнале в 1868 г. [192], воспроизведен на рис. 12. Согласно описанию, шар, 2—3 с висевший в воздухе прямо перед окном, через которое его наблюдали, был в основном ярко-желтым справа и более красным слева. Вправо вырывались длинные лучи

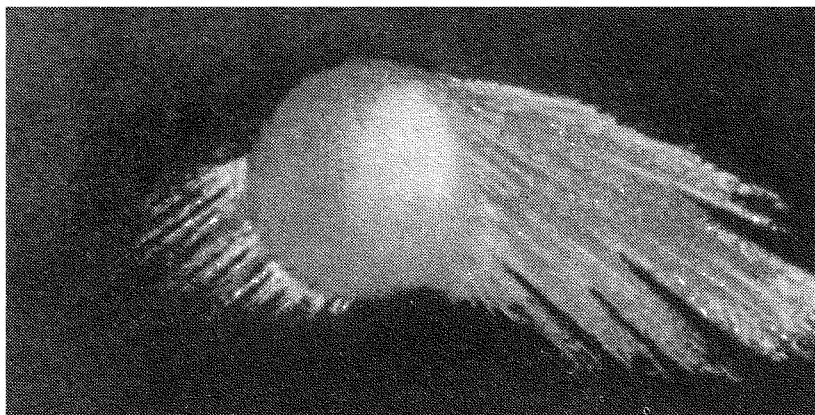


Рис 12 Рисунок шаровой молнии, наблюдавшейся в 1868 г

красновато-желтого цвета, постепенно становящиеся ослепительно белыми. Влево же выбрасывались более короткие лучи, изгибавшиеся по направлению к земле. Аналогичные рисунки были сделаны во время недавних случаев наблюдения шаровой молнии [112], в том числе описанных в предыдущей главе [34, 48, 171]

Первая фотография была опубликована в 1894 г. [135] и, по утверждению наблюдателя [230], представляла собой изображение виденной им молнии — в основном округлой формы и усеянной светящимися пятнами. Позади нее тянулось светящееся продолжение, а вперед выступал зубчатый гребень. На следующий год была опубликована еще одна фотография [521], якобы изображавшая шаровую молнию, без каких-либо сведений об обстоятельствах события. Снимок, опубликованный многими берлинскими газетами в 1902 г. и якобы запечатлевший движущуюся шаровую молнию, удалось воспроизвести, сдвигая камеру при фотографировании уличных фонарей с длительной выдержкой [593]. В отчетах Французской академии наук за 1908 г. были коротко упомянуты еще две фотографии; однако ни сами снимки, ни их описание в отчеты не вошли [312]. Затем в течение 20 лет никаких фотографий больше не публиковалось, и сомнения, вызванные демонстрацией ненадежности фотографического метода вместе с ошибками фотографа, заста-

вили Бранда отметить, что фотографий шаровой молнии не существует [65].

Подобные же снимки светящихся следов, предположительно оставленных движущейся шаровой молнией, были воспроизведены в 1928 г. в сборнике фотографий, изображающих различные явления природы [411]. Немедленно появилась критическая статья [558], объявившая их результатом перемещения камеры с открытым затвором во время съемки и ссылавшаяся на более ранние поддельные фотографии. Одна из опубликованных фотографий представляла собой изображение уличных фонарей вблизи Рейна, полученное при движении камеры взад и вперед (как то было и в более раннем случае), причем отмечались даже вероятные блики в речной воде. Две другие фотографии были объявлены изображением ламп внутри помещения и бликами от них, возникшими благодаря движению камеры.

Однако несмотря на критику автор продолжал утверждать [412], что все три фотографии являются снимками шаровой молнии. По его утверждению, в момент съемки уличные фонари не горели (что не исключает возможности попадания на снимок света автомобильных фар). Относительно снимков, сделанных внутри помещения, он заявил, что свет там зажжен не был и отсутствовали другие условия, на основании которых критики сделали вывод о поддельности снимков. Высокая плотность потемнения, резкость и четкость ярких следов, различная ширина следов и синусоидальная форма одного из них приводились в качестве неопровержимого доказательства того, что изображения эти действительно созданы шаровой молнией. Образование же изображений такой плотности при воздействии искусственных источников света невозможно ввиду их относительно меньшей яркости (по сравнению с шаровой молнией). Получение высокой плотности изображения путем длительной экспозиции также было отброшено на том основании, что блики на воде, снятые на фотографии вне помещения, были резкими, а не смазанными.

Однако в этих ответах на критику не было обращено внимание на то, что плотность изображения определяется не только временем экспозиции, но и временем проявле-

ния, а также на то, что поверхность воды могла быть относительно спокойной. Еще одно возражение против гипотезы о движущейся камере заключается в том, что светлые следы от двух неподвижных фонарей должны были бы оказаться абсолютно параллельными; однако тут упущен эффект возможного нерегулярного вращательного движения в комбинации с перемещением камеры взад и вперед. Возможность получения подобных фотографий посредством движущейся камеры допускалась всеми раньше и была вновь подтверждена следующим случаем.

В 1937 г. в Германии некий геофизик фотографировал грозу через открытое окно [302]. После ослепительной вспышки молнии ему показалось, что через палисадник дома движется бледное пламя. Он попытался снять его, быстро наведя камеру. На проявленной пленке появилась светящаяся дорожка с петлями и зигзагами, а также второй, более слабый след, частично параллельный первому. Вскоре была опубликована критическая заметка об этой фотографии [37] с выводом, что на ней вообще отсутствует молния. Полученное изображение объяснялось тем, что на фотографии сняты два неподвижных источника света сначала в одном положении, а потом в другом, после некоторого смещения аппарата. Это объяснение находилось в согласии со сделанным позднее самим фотографом описанием, что произошло на самом деле (хотя камера находилась на подоконнике и фотограф не учел ее смещения, которое могло быть вызвано слухом затвора). Критический разбор был снабжен специально сделанным снимком уличных фонарей, чтобы проиллюстрировать, каким образом движение камеры позволяет создать изображение, типичное для тех фотографий шаровой молнии, когда сам фотограф шаровой молнии не видел (рис. 13). Таким образом, все подобные фотографии, когда сама шаровая молния визуально не наблюдалась, являются сомнительными, если только не будет надежно доказано, что камера во время съемки была неподвижна. При оценке типичной картины движущейся шаровой молнии, которой фотограф сам не видел и которая напоминает изображение, получающееся от движущегося фонаря, было подчеркнуто, что для подтвержде-



Рис. 13. Снимок уличных фонарей, сделанный движущейся камерой и похожий на изображение следов шаровой молнии.

дения подлинности каждой фотографии молнии крайне желательны тщательные наблюдения очевидцев [227, 580].

Прерывистый светящийся след на рис. 13 (в центральной части снимка) представляет дополнительный интерес. Он напоминает фотографии, считавшиеся снимками

четочной молнии [454, 457], у которой, однако «бусины» не имеют круговой или сферической формы, показанной на рис. 5. Таким образом, сомнению подвергаются и эти снимки, если сам фотограф не видел четочной молнии. Так, снимок, изображающий яркую дорожку с двумя регулярно прерывающимися частями, словно строчка тире, был опубликован [231] как пример следа молнии, по-видимому оставшейся незамеченной. В другом случае фотограф видел нечто, похожее на молнию, но не был убежден, что видел именно прерывистый светящийся след, зафиксированный на его снимке [457]. С другой стороны, имеется одно сообщение о вертикальной молнии, столб которой был разбит на темные и светлые секции, но округлая форма ярких четок не упоминалась [2].

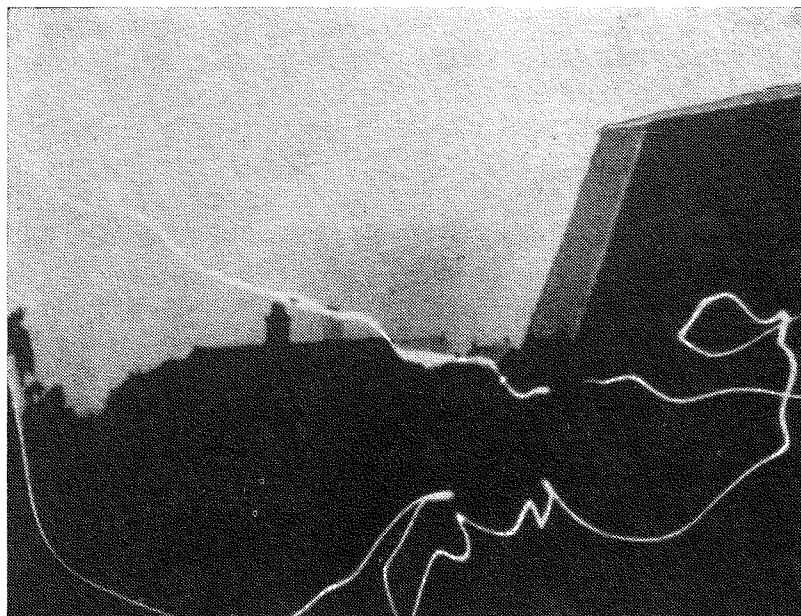
Исследование одного негатива [295], с которого был сделан отпечаток, якобы демонстрировавший отличное изображение четочной молнии, показало, что эмульсия на пленке была испорчена насекомыми и на ней сохранилась лишь часть негативного изображения обычной молнии. На одной фотографии, опубликованной в качестве снимка четочной молнии [470], нельзя было различить ни сегментов, ни бусообразных секций. К счастью, кинолента, с которой был получен рис. 5, совершенно отчетливо зафиксировала образование четочной молнии в канале первоначальной линейной вспышки — именно так, как об этом сообщалось в более ранних свидетельствах очевидцев.

В некоторых случаях снимки светящихся следов были получены, когда фотограф сам видел шаровую молнию [380, 418]. Достоверность одного из таких снимков считалась настолько несомненной [418], что объекты на последующих фотографиях опознавались как шаровые молнии по их сходству с этим изображением, даже когда прямые наблюдения отсутствовали [580]. Еще одну такую фотографию (рис. 14), полученную, когда шаровую молнию наблюдали в том же месте два очевидца, критики объявили результатом движения камеры, в поле зрения которой находились уличные фонари, на основании ее сходства с прежними образчиками подобных фотографий [401, 402, 501]. Однако очевидцы заявили, что снимок был сделан днем, когда уличные фонари не горели [381]. Про-

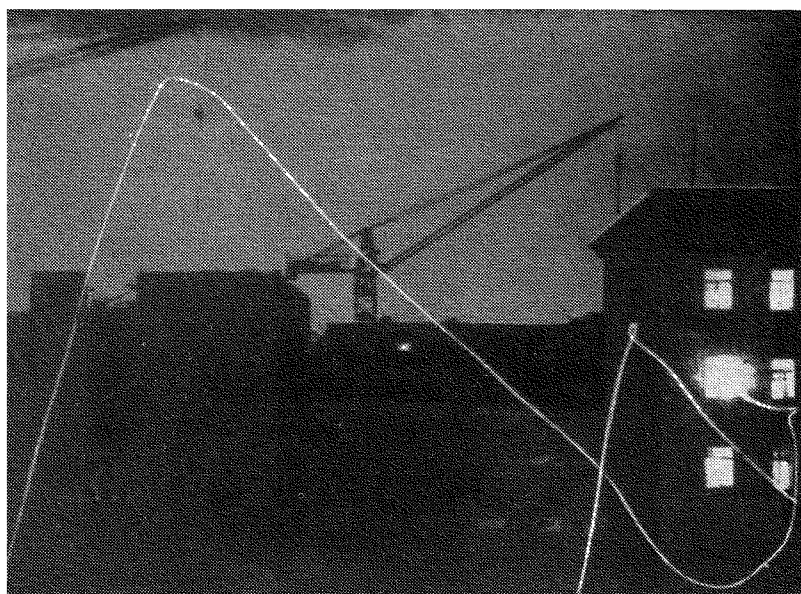
хождение светящегося шара за окном наблюдалось как раз в то время, когда экспонировалась пленка. Шар двигался медленно и скрылся в дымоходе, после чего, согласно сообщениям, взорвался внизу, в камине. Примерный диаметр шара был определен в 5 см, исходя из того, что он был примерно в 10 м от камеры, а ширина светящегося следа на негативе составила почти 0,5 мм. В течение всего времени экспозиции камера стояла на подоконнике; поэтому было высказано предположение, что ее сдвинул сам наблюдатель, высовываясь из окна, чтобы проследить за движением шара.

Тот, кто первым изучал эту фотографию, указал как свидетельство ее подлинности, что при перемещении камеры можно было бы ожидать разрывов в следе шаровой молнии, соответствующих смещению изображения на светочувствительном слое [381]. Кроме того, при фотографировании неподвижного источника света движущейся камерой сам источник обычно оказывается передержанным по сравнению со следом (как на рис. 13), а в рассматриваемой фотографии этого не наблюдается. Несмотря на дополнительную информацию, сообщенную свидетелями, один из которых был преподавателем Копенгагенского политехнического института, критики утверждали, что эти фотографии подделаны [127, 402, 467], ссылаясь на то, что снимок, сделанный при дневном свете, должен дать абсолютно темный негатив, на котором не будут видны никакие световые следы, а также на легкость, с какой были сознательно созданы искусственные изображения этого рода, и на то, что прежние фотографии, похожие на данную, оказались фальшивыми.

Был опубликован еще один снимок того же типа, показывавший яркий след шаровой молнии, двигавшейся в некотором отдалении (рис 15) [123, 277] Эта фотография была получена обычным методом длительного экспонирования пленки при открытом затворе во время грозы. Фотограф, находившийся не в той комнате, где была установлена камера, заметил вспышку молнии и услышал треск. Тогда он закрыл затвор. Он сообщил, что на пленке имелись характерные зигзагообразные линии обычной молнии, а также несколько кривых следов, которые он приписал появлению шаровой молнии.



Р и с 14 Наблюдавшееся движение шаровой молнии



Р и с 15 След, предположительно оставленный шаровой молнией.

На рис. 15 плохо воспроизведены те участки пленки, на которых видна зигзагообразная вспышка. Изогнутый светлый след, считающийся следом шаровой молнии, заканчивается у окна 4-го этажа соседнего дома. При обследовании выяснилось, что 3,5—4 см деревянной рамы обуглились, а на стекле остались веерообразно расходящиеся мазки сажи и легко ломающейся замазки длиной в 1—1,5 см. Фотограф приписал слышанный им треск шаровой молнии.

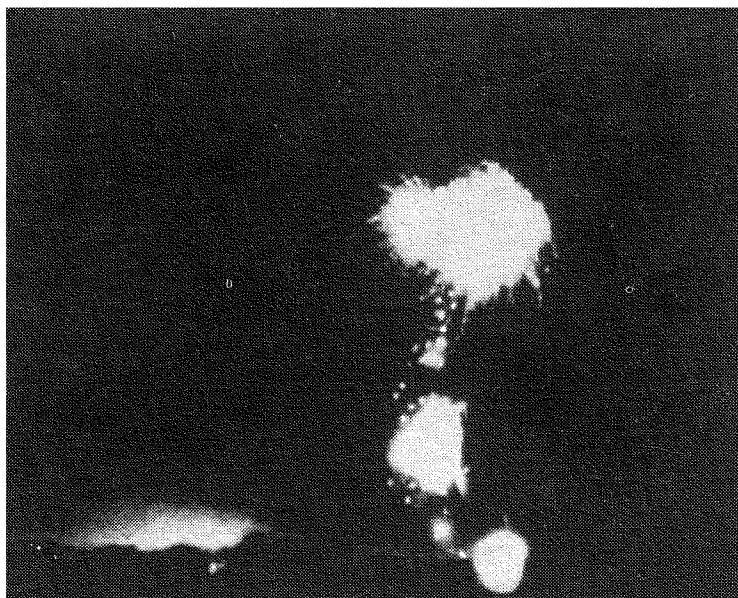
Советский специалист по молниям Стекольников с надлежащей осторожностью указал, что и из сообщения, и из фотографии трудно сделать вывод, какое именно явление запечатлено на этом снимке [489].

Сложный след, приписываемый разряду над самой землей, вроде того, который показан на рис. 4, был сфотографирован с близкого расстояния в местности, где не имелось никаких искусственных источников света [350, 351]. Фотограф в 1955 г. в Швейцарии наблюдал из открытого окна за сильнейшей грозой. Одновременно с разрядом молнии прямо перед ним появилось «пламя». Фотограф вздрогнул от неожиданности и сдвинул камеру. В результате получился очень сложный светящийся след со множеством переплетающихся петель. Подробный анализ этого следа [351] выявил три группы разрядов; интервалы между ними были оценены в 100 мс между первым и вторым и 40—50 мс между вторым и третьим разрядами. В литературе опубликованы сходные замечания относительно фотографий, полученных в 1908 г. и изображающих сложные петли светящихся следов, хотя одна из них была сделана хорошо известным способом покачивания камеры рукой, а другая — камерой, стоявшей, как утверждалось, неподвижно на коленях снимавшего [2]. На второй из этих фотографий видны также отдельные «четки», которые уже описывались раньше в связи с фотографиями, сделанными движущейся камерой. Движение камеры опять не было принято во внимание — по-видимому, на том основании, что оно не могло оказать влияния на изображение ввиду кратковременности разряда. Кроме того, автор второй фотографии не сообщил, что он видел четочную молнию. Поскольку движение камеры никак не учитывалось, а

дополнительные сведения о наблюдавшемся явлении отсутствуют, никаких выводов на основе этих фотографий сделать нельзя.

Нередко фотографии странных грозовых разрядов, которые непохожи на типичные молнии, классифицировались как шаровые молнии. Например, рис. 6 был опубликован в обзоре [281] как возможный снимок шаровой молнии. Однако сами авторы снимка опубликовали его [313] как «перетянутую молнию», и он не похож на другие фотографии шаровой молнии. Сложный разряд близ поверхности земли, изображенный на рис. 4, похож на несколько фотографий, опубликованных в качестве снимков шаровой молнии, и ряд исследователей также считает его снимком шаровой молнии. Однако сами авторы не сочли сфотографированные ими разряды шаровой молнией, хотя в одном случае на снимке ясно видно, что разряды двигались в двух направлениях от одного круглого светящегося источника. Как показал анализ пленки, светящиеся выбросы, оставившие следы, двигались со скоростью порядка 10^7 см/с, т. е. с гораздо большей скоростью, чем обычно приписывается шаровой молнии. Изображение было получено на пленке, которая перемещалась в камере с большой скоростью, так что видимое движение разряда, перпендикулярное лучу зрения, было искажено.

В связи с этим интересно возвратиться к фотографии обычной молнии на рис. 2. У второго слева разряда на рис. 2 чуть выше середины между вершиной разряда и землей виден яркий, круто изогнутый участок, напоминающий фотографии, которые считаются изображениями перемещающейся шаровой молнии. На верхнем конце соседнего разряда, третьего слева, имеется чуть изогнутый хвост, напоминающий разряды вблизи земли, о которых только что шла речь. Повторное изучение таких фотографий при попытках установить свойства шаровой молнии заставляет вспомнить сделанное более 75 лет назад замечание, что так называемые «новые эффекты» молнии часто оказываются явлениями, уже давно известными специалистам по молниям [519]. Поэтому исследовать такие фотографии можно, только опираясь на критическую оценку подтверждающих наблюдений или



Р и с. 16. Шаровая молния, похожая на фейерверк.

на полные сведения об условиях, при которых была получена фотография.

Было сделано несколько снимков, изображающих неподвижную шаровую молнию. Серия подобных снимков была получена Йенсеном, который фотографировал грозные разряды во время бури, одновременно фиксируя изменения электрического поля и давления [233]. Он заметил бесформенную желтовато-зеленоватую массу, которая появилась вслед за вспышкой молнии и, казалось, медленно опускалась на землю (рис. 16). Йенсен был занят приборами и почти не вел прямых наблюдений, однако отметил, что этот огненный шар напоминал гигантский фейерверк. Примерно в 600 м от наблюдателя появились 2—3 новых шара, которые, казалось, покатались по двум проводам линии высокого напряжения, а затем соскочили на землю и исчезли со взрывом. На первых пяти фотографиях, которые Йенсен сделал примерно за 3 мин, видны огненные шары. Размеры двух шаров, исходя из размеров изображения и известного расстояния

от линии высокого напряжения до камеры, были оценены в 8,5 и 12,8 м, а высота шаров над горизонтом — в 28 м.

На отношение к фотографиям Йенсена повлияла странная история, согласно которой шутники-студенты, желая обеспечить профессору Йенсену интересующее его явление, пустили во время грозы фейерверочные ракеты [450, 580]. Происхождение этой истории неизвестно. Возможно, она опирается на собственное замечание профессора Йенсена, сказавшего, что снятые им огненные шары напоминали фейерверк. Недавно была предпринята попытка повторить эти фотографии во время настоящего фейерверка; по мнению исследователя, который внимательно рассмотрел первоначальные негативы, сходство изображений отсутствовало [272, 450].

Однако не исключена возможность, что наблюдавшиеся огненные массы образовались в результате какого-то процесса, в котором участвовали обычные разряды молний и линия высокого напряжения — возможность, не исключенная и для ряда других появлений шаровой молнии, о которых говорилось выше. Более поздние наблюдения связаны с фотографией, очень напоминающей фотографии Йенсена [324]. Большая масса, напоминающая пламя, появилась сразу после разрядов линейной молнии близ линии высокого напряжения. По фотографии, снятой с расстояния 5000 м, диаметр этой массы был оценен в 10 м. Два очевидца, находившиеся гораздо ближе к тому месту, где появился светящийся шар, независимо друг от друга сообщили, что вслед за ударом молнии в линию высокого напряжения из трансформатора вырвалось большое яркое пламя — по-видимому, именно оно и было объектом, который зафиксирован на фотографии. При обычных обстоятельствах подобный разряд не мог бы свободно перемещаться, как это характерно для шаровой молнии. Однако в обоих случаях фотографы наблюдали, как огненный шар падал по направлению к земле и, по-видимому, взрывался. Начальная высота огненного шара, полученная по оценке Йенсена, показывает, что наблюдавшиеся им огненные массы возникли выше проводов линии высокого напряжения.

Были опубликованы две фотографии шаровой молнии, сделанные с расстояния примерно 200 м и особенно хо-

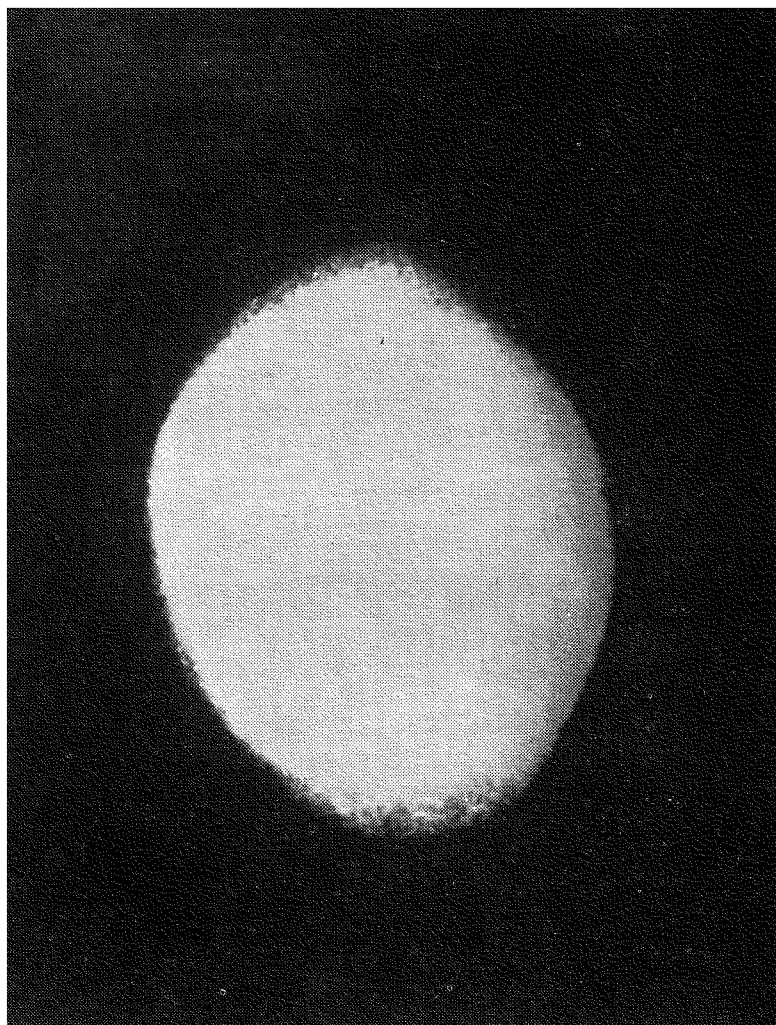


Рис 17. Овальная шаровая молния.

рошо подтвержденные визуальными наблюдениями. В 1933 г. перед фотографом, снимавшим грозовые разряды, внезапно появилась овальная масса (рис. 17). Ослепительный шар, который видели еще несколько человек, медленно опустился к земле [350, 361, 362, 459]. Фотограф оценил его диаметр в 35 см. Шар сохранялся секунд 10, а может быть, согласно некоторым очевидцам, и на не-

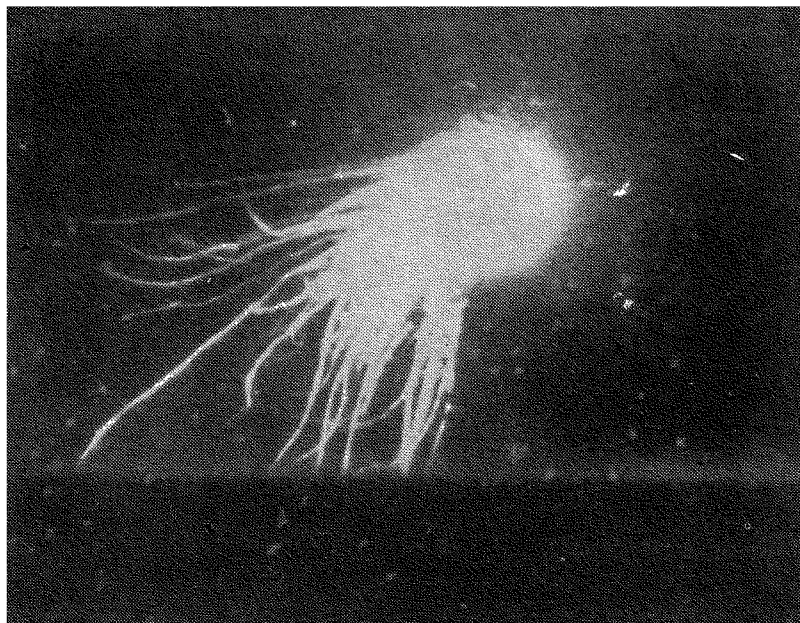


Рис 18 «Фейерверочная» шаровая молния.

сколько секунд дольше. Через 2 мин появилась вторая шаровая молния, но у фотографа уже кончилась пленка. Была снята также шаровая молния, напоминающая фейерверк и заставляющая вспомнить набросок с натуры (рис. 12) и фотографии Йенсена (рис. 18). Шар диаметром примерно 50 см появился перед фотографом при обстоятельствах, сходных с предыдущим случаем [248, 263]. Шар устремился вниз и в нескольких метрах над землей разлетелся в разные стороны, как фейерверк. Фотограф сообщил, что он отчетливо видел светящееся тело на расстоянии 200 м и что в поле его зрения не было других источников света.

Внешний вид шаровой молнии на этой фотографии, полученной, когда фотограф видел само явление, согласуется с характерными чертами, которые постоянно повторяются в большом числе описаний о наблюдениях шаровой молнии.

ХАРАКТЕРНЫЕ ЧЕРТЫ ШАРОВОЙ МОЛНИИ, ВЫВЕДЕННЫЕ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ

Чем больше накапливается наблюдений шаровой молнии, тем яснее становится, что сообщения очевидцев указывают на совершенно необычную и даже взаимоисключающую комбинацию ее свойств. Один из ранних исследователей [278] следующим образом суммировал пять основных трудностей, возникающих из противоречащих друг другу наблюдений:

1) Шаровая молния появляется и при ясном небе, и во время проливного дождя.

2) Цвет шаровой молнии бывает красным или голубым, а иногда и тем и другим вместе.

3) Иногда шаровая молния неподвижна, иногда она движется очень быстро. Часто ее перемещение прямо противоположно направлению ветра, а иногда самый легкий ветер может изменить направление ее движения.

4) Хотя место, где возникает молния, обычно остается неизвестным, шаровая молния чаще всего движется близко от земли. Она может исчезнуть бесшумно или взорваться с громким треском, испуская светящиеся искры.

5) Шаровая молния может двигаться вдоль проводов или вдоль краев различных предметов, но в многочисленных случаях ее путь никак не связан с какими-либо опорами — она свободно парит в воздухе и даже появляется в закрытых помещениях.

Другими словами, любой из этих пунктов содержит явные противоречия. Имея в виду эти несоответствия, другой исследователь [453] заметил, что существует много явлений природы, еще не понятых человеком, но мало найдется таких, когда наблюдения только затрудняют объяснение.

Тщательно изучив литературу о наблюдениях шаровой молнии, Бранд [65] следующим образом суммировал ее свойства:

1. Шаровая молния представляет собой редко наблюдаемый и длительно существующий электрический разряд, имеющий сферическую (реже грушевидную) форму, относительно более частый во время зимних гроз и появляющийся преимущественно в конце грозы. Действие его более слабое, чем действие линейной молнии.

2. Шаровая молния обычно появляется в виде красного светящегося шара или полого шара с нечеткими границами диаметром 10—20 см, окруженного синеватой оболочкой. Она может быть также ослепительно белой и иметь четкие очертания.

3. Иногда шаровая молния издает шипение, жужжание или прерывистый звук.

4. После ее исчезновения часто остается резко пахнущая дымка, которая кажется бурой в проходящем свете, голубой в отраженном свете и белой во влажном воздухе.

5. Время жизни ее колеблется от ничтожных долей секунды до нескольких минут; чаще всего оно составляет 3—5 с.

6. Шаровая молния может появиться из нижней части облака, свободно парить в воздухе или быть связанной с каким-нибудь предметом. Часто ей непосредственно предшествует обычная молния, и шар возникает в месте поражения или на небольшом расстоянии от него. Во многих случаях такой разряд-предшественник может отсутствовать.

7. Шаровая молния или исчезает бесшумно, или с громким треском, или с оглушительным взрывом, при котором из нее во все стороны вырывается множество коротких выбросов. Иногда ее исчезновение сопровождается ударом линейного разряда в шар.

8. Скорость шаровой молнии, которая появляется из нижней части облаков и падает на землю, бывает значительной (превращение в линейную молнию). Вблизи поверхности земли и в закрытых помещениях она движется со скоростью примерно 2 м/с, а иногда может сохранять полную неподвижность. Особенно часто это бывает

с прикрепленными шаровыми молниями, которые исчезают как бы кипя и выбрасывая искры (переход в огни св. Эльма). Иногда характер ее движения определяется ветром, но чаще всего на путь шаровой молнии ветер не влияет.

9. Иногда вблизи места, пораженного линейным разрядом, появляется несколько светящихся шаров. Один большой шар может разорваться и выбросить несколько мелких шаров. В редчайших случаях возникают два огненных шара один над другим, соединенных цепью маленьких светящихся бусин, или же вместе с одиночным светящимся шаром появляется короткая цепь «четок» (переход в истинную четочную молнию).

10. Свободно парящие и прикрепленные шаровые молнии, по-видимому, ведут себя совершенно различно, но могут переходить одна в другую. Парящий тип напоминает разряды слабого тока очень высокого напряжения, сравнимые с разрядами от трансформатора Тесла. Для прикрепленной шаровой молнии, вероятно, характерно более низкое напряжение, но более сильный ток.

11. Парящие шары имеют красный цвет. Они избегают хороших проводников и обычно движутся по воздуху. Закрытые пространства их как будто притягивают, и они проникают туда через открытые окна, двери и даже через маленькие щели. Особенно предпочтительными оказываются различные дымоходы (возможно, присутствие дыма обеспечивает лучшую проводимость); поэтому эти шары часто появляются на кухне из плиты. Облетев помещение несколько раз, шаровая молния может его покинуть, часто прежним путем, а иногда новым. Шаровая молния безопасна, даже когда она оказывается в середине группы людей, ибо она держится на некотором расстоянии от человеческого тела, являющегося хорошим проводником. Иногда молния 2—3 раза поднимается и опускается на несколько сантиметров или даже метров, что в комбинации с горизонтальным перемещением создает впечатление прыжков. Часто она вертикально спускается из тучи почти до самой земли, а затем снова поднимается вверх.

12. Прикрепленные шаровые молнии бывают ослепительно яркими, либо белыми, либо голубыми. Они за-

держиваются на хороших проводниках и особенно на высоких заостренных предметах или же катятся вдоль таких проводников (например, по водосточным трубам). Они нагревают предметы, с которыми соприкасаются, в том числе человеческое тело. В последнем случае такой контакт может вызвать тяжелые ожоги; иногда они проходят под одежду, часто принося смерть.

13. Переход парящей молнии в прикрепленную происходит после короткой паузы, когда шар внезапно устремляется к находящемуся поблизости проводнику (в частности, к воде). При соприкосновении с водой он может исчезнуть бесшумно или со взрывом либо продолжать существовать в виде неподвижной шаровой молнии. Шаровые молнии, падающие из туч, как правило, продолжают свое движение, пока не ударятся о землю, после чего взрываются.

14. Превращение прикрепленного шара в свободно парящий происходит чрезвычайно просто — он взмывает вверх, после чего обычно по наклонной траектории поднимается к облакам. Однако такой шар, как правило, исчезает почти сразу после начала движения.

Так Бранд суммировал чрезвычайно разнообразные формы поведения шаровой молнии, о которых сообщали очевидцы, и составил одну из наиболее полных и авторитетных сводок замеченных особенностей этого явления. Необходимость получения более систематизированных данных об этих свойствах привела к созданию анкет, многие из которых были опубликованы для руководства будущим исследователям. Нижеследующий перечень включает типичные вопросы и те свойства, которые считались наиболее важными в опубликованных до сих пор анкетах [ср. 65, 181, 230, 321, 420, 453, 516].

Анкета

1. Размеры
2. Форма. Сведения этой категории включают наличие выбросов, лучей, а также ореолов и короны
3. Цвет
4. Длительность существования

5. Свидетельства высокой температуры
6. Движение. В этот пункт включаются сведения о скорости, пройденном пути, вращении и направлении перемещения (с учетом ветра)
7. Запах
8. Звук
9. Выбрасывание искр или молний из шара
10. Обстоятельства исчезновения шара (со взрывом или бесшумно)
11. Следы, оставленные шаром. Ожоги, повреждения и т. д.
12. Изменения внешнего вида шара; изменения размеров или цвета
13. Время суток
14. Появление во время грозы
15. Связь со вспышками линейной молнии

В анкетах нередко содержались дополнительные вопросы, которые в приведенном перечне опущены. Некоторые исследователи считают, что на образование или поведение шаровой молнии влияют топографические особенности той местности, где она появилась [420, 453]. Другие считают существенными интенсивность испускаемого молнией света и его распределение по поверхности шара, а также четкость или смазанность границ [65, 420]. Особый интерес вызывают сведения о магнитных или электрических эффектах шаровой молнии [65, 321]. Более новые обзоры наблюдений шаровой молнии составлялись из ответов на анкеты, приспособленные для статистической обработки, в том числе с применением вычислительных машин [321, 420]. Этот метод более удобен и надежен, нежели простое изложение очевидцами всех тех свойств, которые они заметили. Однако следует принимать во внимание и состав самой анкеты. В двух обзорах, основанных на прямых ответах на вопросы анкеты, оказался обойденным вопрос о направлении движения шаровой молнии по отношению в ветру. Между тем некоторые исследователи считают эту проблему одной из главных причин отсутствия полноценной модели шаровой молнии.

Сводки Бранда [65], Мак-Налли [321] и Рейла [420] содержат сведения более чем о 800 наблюдениях, кото-

рые вместе с отдельными сообщениями, и особенно с теми, которые публиковались после 1919 г. (самый поздний случай, учтенный Брандом), дают богатый материал о свойствах шаровой молнии. Обзор Бранда включает 215 сообщений о шаровой молнии, выбранных из 600 с лишним; они охватывают достаточно большую географическую область (главным образом в Европе) примерно за столетие, предшествовавшее публикации. Два более поздних обзора опирались на наблюдения, собранные двумя научными центрами. Надежность этих сообщений критически никем не рассматривалась. В одном из обзоров [321] только 45% светящихся масс описывались как двигавшиеся по воздуху все время или хотя бы частично. Таким образом, остальные случаи, составляющие большинство, вообще не относились к свободно двигавшимся в воздухе светящимся массам, а потому их нельзя определять как шаровые молнии в общепринятом смысле слова. В обзоре Барри [36] содержатся выводы, сделанные на основе 400 с лишним случаев, описанных в литературе, включая материал из монографии Бранда и более поздние сообщения, вплоть до 1966 г. Ниже свойства шаровой молнии рассматриваются в порядке вопросов приведенной выше анкеты.

Размеры шаровой молнии, т. е. средний диаметр неправильной сферы, согласно сообщениям, колеблется от размера поперечника горошины до 12,8 м. Кроме того, имеются сообщения о чрезвычайно больших шарах — 27 и 260 м в диаметре [42, 279]. Шарам, наблюдаемым на близком расстоянии, обычно приписывались меньшие диаметры; при наблюдениях издали сообщалось, как правило, о более крупных размерах. Очевидно, оценка размеров зависела от расстояния до объекта, которое в свою очередь определялось лишь приблизительно. Бранд пришел к выводу, что средний диаметр шаров, для которых были получены надежные оценки, составляет около 20 см. Диаметр большей части молний, которые, согласно Бранду, наблюдались с близкого расстояния, может быть, даже не превышает 15 см. В 156 наблюдениях, собранных Нориндером [361], чаще всего указывается диаметр 25 см, а в 400 сообщениях, собранных Барри [36], — 30 см, что в общем согласуется

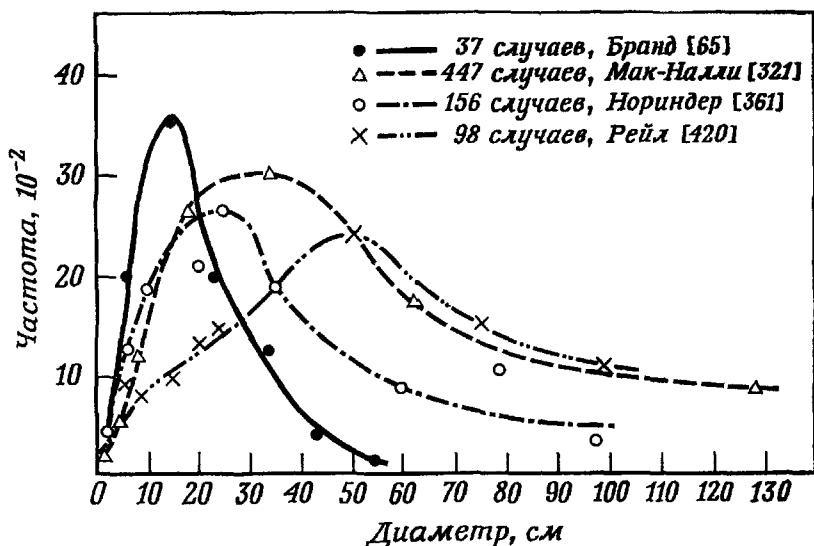


Рис. 19. Диаметры шаровой молнии

с результатами сводки Мак-Налли [321]. Рейл [420] дает несколько больший средний диаметр — примерно 35 см.

Распределение диаметров шаровой молнии по материалам четырех основных обзоров показано на рис. 19. Для каждой из четырех групп даны сглаженные кривые. В каждом обзоре были выведены средние значения и указаны числа случаев в выбранных интервалах значений диаметров. Однако эти интервалы во всех обзорах выбраны по-разному; их величина соответствует расстояниям между отметками на каждой кривой рис. 19. По двум последним обзорам можно сделать вывод, что функция распределения (относительное число появлений шаровых молний, диаметр которых не превышает некоторого определенного значения) экспоненциально приближается к единице с ростом диаметра [321, 420]. Это может служить основой для предположения о взаимосвязи этих характеристик с другими параметрами, описывающими грозу, которые также имеют логарифмическую функцию распределения, например: напряженность электрического поля в атмосфере, а также заряд, ток и скорость нарастания тока при разрядах молнии

Форма светящихся масс обычно описывается как сферическая или близкая к ней. Такие указания имеются в 83% случаев у Бранда и в 87% у Рейла. Некоторые из этих масс казались полыми. Наблюдалось также несколько овальных или яйцевидных образований. В последних наблюдениях все чаще упоминается тор: в обзоре Мак-Налли сообщается о 62 светящихся кольцеобразных формах. В отдельных случаях отмечаются иные формы: миндалевидные, сердцевидные, стержневидные и грушевидные. В нескольких сообщениях о пламевидных образованиях указывалось на неправильную форму молнии. В ряде случаев были замечены ореолы или короны, исходящие из самой массы [88, 259, 424].

Из цветов молнии в пяти основных обзорах, в которых отмечался этот параметр [36, 65, 164, 321, 420], чаще всего упоминаются красный и оранжевый. У Бранда и Галли красный цвет указывался несравненно чаще всех остальных, этот же цвет наиболее частый и у Мак-Налли, однако, согласно Рейлу, оранжевая окраска отмечалась чаще, чем красная. Красный или красно-желтый цвет указывается в 60% случаев, рассмотренных Барри. Нередко сообщалось также о желтом, белом, голубом и бело-голубом (по порядку уменьшающейся частоты указаний) — всего в 200 с лишним случаях. Хотя в других обзорах упоминается о значительном числе голубых шаров, Барри в своих исследованиях обнаружил, что голубых и бело-голубых шаров было менее 2%, и пришел к выводу, что все это были случаи коронного разряда или огней св. Эльма, ошибочно принятые за шаровую молнию [36]. Однако он включил лиловый и фиолетовый цвета как характерные для шаровой молнии продолговатой формы. Зеленый цвет отмечается относительно редко; имеются также упоминания о необычных черных сферах, которые не излучают света [164, 310]. Наблюдались также многоцветность и смеси цветов.

Подавляющее большинство наблюдений шаровой молнии показывает, что время жизни ее составляет чаще всего от 1 до 5 с. Довольно значительное число молний исчезает менее чем за 1 с, а случаи существования, превышающие 5 с, встречаются заметно реже. Некоторые шаровые молнии существовали около 1 мин, и име-

ются отдельные сообщения о 9 мин [230, 258] и 15 мин [65]. При оценке времени жизни шаровой молнии обычно возникают следующие трудности: появление или исчезновение шара остается незамеченным из-за его движения, а к тому же оценка времени очевидцами, внезапно столкнувшимися с необычным явлением, может быть лишь весьма приблизительной. Длительные времена жизни, достигающие минуты, в обзоре Барри оказались характерными для неподвижных голубых или бело-голубых сфер, а потому он пришел к выводу, что на самом деле эти явления были огнями св. Эльма [36].

Во многих сообщениях специально отмечалось, что шаровая молния не выделяет тепла, как следовало бы ожидать от тела, испускающего интенсивный свет. Об этом свойстве, которое привлекает внимание только при наблюдении молнии с близких расстояний, сообщается в подавляющем большинстве случаев. Кроме приводившихся выше примеров, только в четырех сообщениях из обзора Рейла (в котором перечислено 55 случаев, когда светящиеся шары наблюдались с расстояния менее 15 м), указывается на ощущение тепла. Барри высказал предположение, что светящиеся сферы, не излучающие тепла, были отождествлены с шаровой молнией неправильно и скорее всего были огнями св. Эльма. При этом он, по-видимому, исходит из того, что электрический разряд (или сходное с ним явление) всегда связан с высокой температурой. Однако в гл. 5 (стр. 68—69) приведены примеры случаев, при которых такая ошибочная классификация невероятна, но какие-либо тепловые явления все же отсутствуют. С другой стороны, в ряде сообщений описываются несомненные тепловые эффекты, включая воспламенение горючих материалов и причиненные шаром ожоги.

Бранд пришел к выводу, что обычно тепловые эффекты не наблюдаются у молнии, свободно парящей в воздухе, тогда как шары, прикасающиеся к проводникам (или к человеческому телу), действительно обжигают. Кроме того, высокие температуры могут быть связаны только с шарами белого и бело-голубого цвета [321]. Температуру яркой желто-белой шаровой молнии, о которой сообщал в 1967 г. советский наблюдатель, хорошо зна-

комый с высокотемпературной плазмой, он оценил в 14 000 К [128], сравнив внешний вид этой светящейся сферы с факелом плазмотрона именно такой температуры. Еще одну возможность оценить температуру молнии дает измерение отношения озона и двуокиси азота в пробах газа из следа, оставленного молнией. Согласно имеющимся данным, это отношение уменьшается с ростом температуры дуговых разрядов в воздухе. Обычно оно бывает меньше единицы и при температурах 2000—4000 К составляет примерно 0,9 : 1. Самое низкое отношение, обнаруженное в пробах газов, близко к 0,8 : 1, что указывает на температуру несколько выше 4000 К. Это значение согласуется с температурой излучения 4000—5000° С, определяемой по закону смещения Вина в соответствии с теми красными и красно-желтыми цветами, которые обычно наблюдаются у шаровой молнии [35]. Но если считать, что светящиеся сферы — это шарообразное негорячее пламя, возникающее при низких концентрациях горючих газов в воздухе, то для них можно предположить и гораздо более низкую температуру — порядка 200—300° С [35, 36, 280, 354]. Столь высокая температура, как 14 000 К, оцененная для шара, который наблюдатель сравнил с плазменным разрядом, не согласуется с отношением озона и двуокиси азота, измеренным в том же случае. Для других проб газа были обнаружены еще более низкие отношения, вплоть до 2,45 : 1. Кроме того, можно отметить, что очевидец совершенно не упоминает об ощущении тепла, хотя шар, несомненно, прошел очень близко от него — может быть, не далее 2 м.

Мнение Бранда об относительно большей энергии, заключенной в бело-голубой шаровой молнии, противоречит одному из наиболее часто упоминаемых наблюдений, послужившему основой для оценки энергии шаровой молнии. В этом случае, описанном выше, маленький красный шар упал с неба во время грозы [345] и попал в чан с водой, которая кипела в продолжение нескольких минут. При обследовании выяснилось, что в чане было около 13,6 л воды, которая через 20 мин после падения шара была еще настолько горяча, что наблюдатель не мог опустить в нее руку. Энергия этого шара, оцененная

по количеству тепла, необходимого для доведения до кипения такого количества воды, составляет ~ 1360 ккал. В предположении, что 1,8 л воды испарилось, общая оценка составила 11 000 кВт·с. Эта величина (40% которой определяется предположением о количестве испарившейся воды) точно совпадает с неверной оценкой [512], полученной на 25 лет раньше для энергии озонового шара с диаметром 50 см (см. раздел, посвященный химическим теориям шаровой молнии).

Сделанное в СССР наблюдение шаровой молнии в 1967 г., когда были взяты пробы газа вдоль пути шаровой молнии, дает другую оценку энергии [128]. Концентрация двуокиси азота в различных пробах составляет от 34,7 до 1645 мкг/м³, ее концентрация при дуговом разряде в воздухе описывается соотношением

$$[\text{NO}_2] = 6,8E,$$

где концентрация в мкг/м³ прямо пропорциональна плотности энергии разряда E в Дж/м³. Наибольшая концентрация двуокиси азота, которая, согласно сообщению, была создана этой молнией, соответствует выходу энергии в атмосферу 240 Дж/м³.

Движению шаровой молнии (хотя оно в разных случаях оказывалось крайне разнообразным) придавалось большое значение для определения природы этого явления. Например, различались два типа шаровой молнии — светящиеся шары, которые падают на землю из туч, и шары, которые движутся вблизи поверхности земли и образуются после удара молнии в почву или в какое-либо строение [213]. Две аналогичные группы выявляются и при анализе обзора Рейла [420]. Наблюдавшиеся виды движения включают прямой спуск от облаков на землю (часто почти вертикальное падение), горизонтальный полет вблизи земли по ветру, а иногда против ветра [94, 125, 203, 259], колебания вверх и вниз, отскоки от земли. В обзоре Рейла в 54% случаев наблюдался преимущественно горизонтальный полет, а в 19% замечено вертикальное движение. Еще в 19% случаев наблюдались более сложные траектории. В некоторых случаях шар катился по земле, причем иногда выбирая влажные участки почвы [23, 168, 295, 369, 371, 384, 398, 453, 469, 522].

В одном редчайшем примере соприкосновения шаровой молнии с водой светящаяся сфера упала в море и несколько раз всплывала, по-прежнему испуская свет в промежутках между повторными погружениями [230, 566]. Многократно наблюдалось прохождение шаровой молнии через узкие ходы и через маленькие отверстия. В обзоре Бранда упомянуто 15 случаев, когда шаровая молния попадала в здание через дымоход. Об этом сообщали очевидцы, находившиеся в помещении и видевшие, как из камина или печи появляется яркая масса, а также свидетели, находившиеся снаружи. В одном случае шаровая молния влетела в холодный дымоход и была сфотографирована (рис. 14) [380, 402]; правда, этот снимок подвергся суровой критике. Сообщалось и о прохождении шаровой молнии через куда меньшие отверстия, например через замочную скважину [453, 471]. В обзоре Рейла имеется несколько сообщений такого типа. Очевидцы часто сообщали о вращении шара; у Бранда имеется 15 таких сообщений, у Мак-Налли — 46, у Рейла — 35. В нескольких сообщениях описываются светящиеся сферы, которые некоторое время оставались неподвижными [258]. Восемь таких случаев перечислено в обзоре Мак-Налли и 10 у Рейла.

В сообщениях очевидцев приводится много оценок скорости перемещения шаровой молнии путем сравнения, например, со скоростью движения медленно идущего человека. В отдельных случаях оценивались расстояния, пройденные за определенное время. Наименьшая из сообщенных скоростей составляет примерно 1—2 м/с, и в то же время приводились значения, заключенные между 30 и 240 м/сек [230, 279, 452]. В общем более значительные скорости наблюдались, когда оценивалось угловое перемещение молнии, а потому эти оценки, как и оценки размеров молнии, сильно зависят от точности определения расстояния до молнии. В обзоре Рейла для группы из 12 случаев указаны скорости больше 30 м/с. Из изложенного следует, что скорость шаровой молнии очень мала по сравнению с обычной молнией. Следующее сообщение о шаровой молнии подчеркивает эту отличительную черту.

Двое путников в 1886 г. были застигнуты в гористом районе Германии грозой, охватившей большую область.

Из тучи появился светящийся шар и за 5—7 с опустился до высоты примерно 1 м от земли. На этой высоте шар полетел по ветру прямо на путников и приблизился к одному из них вплотную, так что он невольно отпрыгнул в сторону. В тот момент, когда шар появился из тучи, он казался величиной с голову ребенка, но на близком расстоянии его диаметр был определен в 0,5 м. Шар был ярко-красным с голубоватой оболочкой толщиной в ладонь и интенсивно светился, так что все окружающие предметы были словно освещены электрическим светом. Шар исчез за домом, откуда вскоре раздался громкий взрыв [424]. Имеется сообщение об очень быстром перемещении светящейся массы, что создало впечатление вспышки, напоминающей обычную молнию [78].

Отнюдь не необычно движение светящихся шаров вдоль проводов линий высокого напряжения или сходных проводников. Помимо наблюдений, приведенных выше, в обзоре Мак-Налли отмечено 103 случая этого типа движения, у Рейла — 12. С другой стороны, наблюдения плывущих по воздуху сфер многократно подтверждали, что проводники никак не влияют на их путь. В имеющейся литературе неоднократно подчеркивалось, что молниеотводы не обеспечивают защиты от шаровых молний [18, 495]. Выше был описан случай, указывающий на отсутствие защиты (см. стр. 54): стена префектуры в 30 м от начала пути шаровой молнии была повреждена, хотя на здании имелся молниеотвод, который, как показал последующий осмотр, был вполне исправен [438].

На первых этапах поисков защиты от огненных шаров было выдвинуто предположение, что эффективной может оказаться густая сетка из толстой медной проволоки [495]. Использование металлических решеток в целях защиты от шаровой молнии было недавно подробно описано в советской литературе [488]. Этот метод предусматривает закрытие во время грозы всех окон и вентиляционных отверстий, хотя имеются сообщения о проникновении шаровой молнии сквозь стекло. Над всеми вентиляционными и иными отверстиями, которые невозможно закрыть, должны помещаться заземленные металлические решетки из проволоки толщиной 2—2,5 мм с ячейками не более 4 см².

Куньяр — конструктор деионизатора, приспособления для защиты линий высокого напряжения от молнии, — утверждал, что его устройство предохраняет и от шаровой молнии [139]. Основой этой системы защиты являются добавочные проводники для скругления резких изгибов проводов высокого напряжения. Сам деионизатор состоит из двух стальных дисков диаметром 60 см, расположенных параллельно друг другу на расстоянии 25 см. Это приспособление, в частности, предназначалось для защиты от той формы шаровой молнии, которая движется вдоль проводов высокого напряжения. Такие светящиеся массы нередко определялись как шаровые молнии, но в последнее время их чаще считают особой формой коронных разрядов, вызываемых увеличением напряженности электрического поля атмосферы вокруг линии передачи при взаимодействии его с нормальным полем, создаваемым электрическим током. Таким образом, подобные разряды правильнее было бы рассматривать как огни св. Эльма. Никаких наблюдений о взаимодействии шаровой молнии с описанными выше защитными приспособлениями не имеется.

Появление шаровой молнии связывалось у свидетелей с отчетливо ощутимыми запахами. Чаще всего запахи эти определялись как запах серы [28, 77, 188, 199, 212, 325, 438, 444, 447] и озона [39, 117, 138, 228, 299, 303, 305, 307, 542, 555]. В нескольких случаях запах сравнивался с запахом двуокиси азота [320, 583]. Один свидетель пришел к выводу, что запах от шаровой молнии совпадал с запахом специально приготовленной смеси воздуха с двуокисью азота при высокой концентрации последней [320]. Кроме того, сообщалось о запахе гари [304, 555]. Примерно в четверти сообщений обзора Рейла упоминается какой-либо запах. Обычные молнии тоже вызывают эти запахи, как и другие электрические разряды в воздухе. Таким образом, в отдельных случаях возникновение запаха может объясняться обычной молнией, с которой часто бывает связано появление шаровой молнии [36]. Однако запахи замечались и при наблюдении шаровой молнии, которая уже отошла на некоторое расстояние от места своего возникновения или же вообще не была связана с разрядом обычной молнии. Обзор Рейла

содержит несколько примеров шаровой молнии, обладавшей запахом, которая никак не была связана с обычной молнией. Анализ проб воздуха, взятых поблизости от пути шаровой молнии, как это было подробно описано выше, показал присутствие двуокиси азота и озона [128].

Шаровая молния производит различные звуки [30, 104, 190, 216, 247, 325, 420, 425, 498, 545, 546, 571, 576]. Об этом свойстве шаровой молнии упоминается в 25 сообщениях из обзора Рейла, но никаких более подробных сведений о характере этих звуков в них не содержится. Чаще всего сообщается о шипении или потрескивании [216, 415, 423]; звук также сравнивается с шумом флага, бьющегося на ветру [423]. Все это указывает на большое сходство со звуками, возникающими при электрическом разряде [65]. В некоторых случаях сообщается об абсолютно беззвучной шаровой молнии. Барри сделал из своего обзора вывод, что в сообщениях непосредственных очевидцев шипящий звук упоминается редко; в то же время подобный звук явно связан с огнями св. Эльма [36]. Однако известны наблюдения, когда речь, несомненно, идет не об огнях св. Эльма, и тем не менее внимание наблюдателя было привлечено к огненной массе именно производимым ею звуком [325]. В частности, сообщение о свободном проникновении через окно в здание отчетливо указывает, что эта была шаровая молния, а не огонь св. Эльма.

В нескольких случаях было отмечено испускание шаровой молнией искр или длинных огненных выбросов, что нередко приводило к сравнению светящейся массы с фейерверком [34, 327]. Эта особенность запечатлена на некоторых рисунках, а также на фотографиях, которые вполне соответствуют описанию этого типа шаровой молнии очевидцами (см. рис. 12, 16 и 18).

Исчезновение шаровой молнии часто происходит бесшумно, но во многих случаях сопровождается оглушительным взрывом. В опубликованной в 1867 г. работе, посвященной грому и молнии, указывалось, что 19 из 20 случаев шаровой молнии сопровождались разрушениями [157]. Согласно обзору Барри, большая часть шаров взрывалась — 80% красных и 90% желтых [36]. Среди случаев, собранных Брандом, содержатся 62 наблюдения о взорвавшихся шарах, а Рейл сообщает о 24.

При многих взрывах единственным эффектом был громкий звук, иногда сравниваемый с залпом из многих пушек. В других случаях шар разлетался на части, что приводило к повреждениям и разрушениям. Для оценки энергии, высвобождаемой шаровой молнией, было использовано сообщение в советской прессе о взрыве, который, по-видимому, причинил наибольшие повреждения [32]. Масса примерно 30 см диаметром проникла в дом через крышу и потолок и вылетела наружу через окно. Она удалилась от дома на 50 м и, коснувшись земли, взорвалась с такой силой, что дом рухнул. Плотность высвобожденной при взрыве энергии, равная 68 ккал/см^3 , была рассчитана исходя из того, что для разрушения глиняной стены подобного типа требуется взрывная волна с импульсом $190 \text{ кгс} \cdot \text{с}$ на 1 м^2 . Это количество энергии в 7 раз превышает то, которое высвобождается при взрыве равного объема тринитротолуола. Общее количество энергии, высвобожденной шаром при взрыве, составляло $9,62 \cdot 10^5 \text{ ккал}$, т. е. было примерно в 375 раз больше, чем в том случае, когда шаровая молния нагрела до кипения воду в чане [184].

Столь большая энергия, высвободившаяся при взрыве шаровой молнии в данном случае, указывает на важность проблемы защиты самолетов. Хотя число наблюдений шаровой молнии внутри или вблизи самолетов в полете очень невелико [34, 183, 257, 397], совершенно очевидно, что в подобных случаях взрывы и различные повреждения гораздо более вероятны. Шаровая молния, проникшая в английскую летающую лодку на высоте 2500 м через открытое окно кабины летчика, опалила ему брови и волосы, прожгла привязные ремни и планшет, а затем перелетела в хвостовой отсек, где взорвалась [183]. Две светящиеся сферы, замеченные рядом с летящим самолетом, несомненно, вызвали заметное отклонение его от курса в результате столкновения с самолетом или взрыва [34, 257], хотя при осмотре на земле никаких повреждений у самолета обнаружено не было, исключая небольшое оплавление конца лопасти пропеллера в одном из этих случаев. В качестве защиты предлагалось уменьшение энергии шаровой молнии с помощью распыляемой под давлением струи жидкости,

хотя это связано с некоторым риском, если шар окажется слишком большим или будет находиться чересчур близко [309]. Аналогичный метод защиты самолетов, в котором предлагалось использование водных растворов солей металлов, был предложен снова через 40 лет [32].

Во многих случаях шаровая молния после исчезновения не оставляла никаких следов. Повреждения, о которых упоминается в ряде сообщений, могут быть последствиями обычных разрядов молнии, которые часто бывают связаны с шаровой молнией. В обзоре Рейла приводится 40 случаев, когда шаровая молния оказывала какие-то воздействия на металлические объекты, здания, поверхность почвы и т. д. Описание этих эффектов в отчетах варьирует от сильно пахнущих газов и пыли, поднятой шаровой молнией [320], а также выжженных пятен на предметах, которых коснулся шар [131], и отверстий, пробитых в стенах [447], до обрушения здания, вызванного взрывом огненного шара [32].

В подавляющем большинстве случаев внешний вид шаровой молнии за время ее жизни не меняется, однако иногда отмечались несомненные изменения размеров, формы или цвета. В обзоре Рейла в 82 случаях никаких изменений не отмечено, в 11 указывается на некоторые изменения. Возможно, часть видимых изменений объясняется переменой условий наблюдения — например, в тех случаях, когда летящий шар приближался к наблюдателю. Изменения размеров могут быть как в сторону уменьшения, так и увеличения. Бранд описывает 3 случая уменьшения шаров и 5 — увеличения, тогда как у Рейла уменьшение отмечено для 9 шаров, а увеличение — для 5. В 8 случаях у Бранда указывается изменение формы, а именно удлинение. Интенсивность испускаемого света в обзоре Рейла уменьшалась в 12 случаях и увеличивалась в двух. Кроме того, Бранд [65] и Матиас [311] специально обращали внимание на изменения цвета. Была сделана попытка связать изменение цвета из красного в белый с приближением момента взрыва [311d]. Однако тот же автор относит белый цвет за счет высокой температуры [311c] и загрязнения шаровой молнии железом [311g]. По крайней мере в одном

сообщении указывается на изменение цвета из красного в белый перед взрывом молнии [49]. Согласно Барри, на изменение цвета указывается менее чем в 1% всех наблюдений, и во всех этих случаях шары становились ярко или ослепительно белыми, хотя вначале были красными, фиолетовыми или желтыми [36]. После изменения цвета шар с шумом исчезал. Однако изменение цвета перед взрывом наблюдалось далеко не всегда. В случаях, описываемых Брандом, столь же часто происходит и переход к красному цвету, что опять-таки связывается со взрывом.

Почти в половине случаев наблюдения шаровой молнии в Центральной Европе, подробно рассмотренные Брандом, были сделаны в период между 16 и 20 ч и почти в 90% случаев шаровые молнии наблюдались в промежутки времени между полуднем и полночью. Наибольшая частота появления шаров приходится на время примерно через 2 ч после пика грозы, но в остальные часы распределение шаровых молний по времени суток примерно совпадало с распределением самих гроз [65]. Наибольшее количество появлений огненных шаров попадает на летние месяцы: 63% случаев, рассмотренных Брандом с этой точки зрения, приходится на лето, и 80% — на период от мая до конца сентября, что опять-таки близко к годовому распределению гроз. Данные сводки Рейла, материал которой в основном ограничивается наблюдениями в центральной части США, также показывают, что летом имели место 83% всех появлений шаровых молний. Таким образом, частота появления шаровой молнии, несомненно, находится в прямой связи с частотой гроз, хотя тут могут играть роль дополнительные факторы, например время суток и года, наиболее благоприятное для наблюдения редких явлений природы в условиях современной жизни.

Число появлений шаровой молнии, непосредственно не связанных с грозой, чрезвычайно мало. По оценке Барри, 90% появлений наблюдались во время грозы. В 3 случаях, описанных достаточно полно, можно предположить, что шаровая молния была каким-то запоздалым результатом грозовой активности, хотя она появлялась, когда ярко сияло солнце и небо было ясным или

же в нем было лишь несколько облаков [140, 229, 244]. Такие шаровые молнии наблюдались после окончания грозы, но не сразу, а спустя некоторое время, которое в одном случае составило 2 ч [229]. Еще в одном случае, согласно сообщению, огненный шар размером с апельсин упал из ясного неба на линию высокого напряжения, а затем влетел в здание подстанции через окно [82]. Среди сообщений, собранных Мак-Налли, в 3 говорится об образовании шаровой молнии в ясную погоду, а Рейл сообщает о 5 появлениях молнии вне гроз. В 79 случаях, из описываемых Брандом, имела место сильная или бурная гроза, тогда как в случаях, описанных Рейлом, шаровая молния появлялась примерно одинаково часто во время гроз и со средней и с исключительной силой. Нередко сообщается о появлении шаровой молнии или похожих на нее сферических тел из воронок торнадо, ураганов и водяных смерчей [90, 143, 197, 376, 442, 513, 550, 554, 594]. Огненные шары были отмечены в 3 из 11 смерчей, происшедших во Франции между 1961 и 1965 гг. [126].

Неоднократно отмечалось появление шаровой молнии — как и других, более обычных форм молнии — во время землетрясений [166, 504]. Многочисленность таких сообщений, включая сообщение сотрудника Центральной метеорологической обсерватории Токио, возможно, указывает на какую-то пока не объясненную взаимозависимость между этими явлениями.

Большинство появлений шаровых молний, по-видимому, связано с разрядами обычных молний, происходящими как до, так и после ее появления. Согласно обзору Мак-Налли, 378 огненных шаров появились вслед за таким разрядом, а у Рейла сообщается о 69 появлениях шаровой молнии вслед за обычной. Значительное, но гораздо меньшее число шаровых молний (65 у Мак-Налли и 26 у Рейла) не было связано с другими молниями. Частота появления шаровой молнии по сравнению с обычной, если учитывать только те обычные молнии, которые ударяют в какие-нибудь предметы, была оценена Брандом примерно в 3%. Эта частота, вычисленная по метеорологическим сводкам северной Германии с 1884 по 1899 г., согласуется с данными, приводимыми Нориндером [361] для Швеции с 1928 по 1938 г. С другой стороны,

в обзоре Рейла упоминаются 180 человек, наблюдавших шаровую молнию, и 409, которые видели, как обычная молния ударяет в какой-то предмет, что дает гораздо большую частоту наблюдений шаровой молнии — 44 %.

Рейл пришел к выводу, что шаровая молния, возможно, далеко не такое редкое явление, как принято считать. Подобное же мнение за 50 лет до него высказал Заутер [453]. Из относительной частоты, указанной Рейлом, была выведена оценка [405], согласно которой на всей Земле ежедневно возникает около 10 млн. шаровых молний. Этот вывод позволил внести предложение о возможности систематического изучения свойств шаровой молнии, потребность в котором ощущается уже давно, поскольку, вопреки утвердившемуся мнению, будто это крайне редкое явление, вероятность наблюдать ее мало отличается от вероятности наблюдать разряд обычной молнии на близком расстоянии. Были разработаны методы наблюдения и регистрации, предназначенные для систематического и исчерпывающего обследования неба, с целью обнаружить любое подобное явление [31]. Однако попытки осуществления этой программы, хотя и в небольших масштабах, не были вознаграждены ни одним наблюдением.

П. Л. Капица снова вернулся к общепринятому мнению, что шаровая молния возникает крайне редко, и высказал предположение, что вероятность появления шаровой молнии вблизи заданного места наблюдения практически равна нулю [243]. Швейцарский физик Карл Бергер, занимающийся изучением различных атмосферных явлений, также указывает, что за 16 лет, которые он посвятил наблюдениям молний, он ни разу не видел шаровой молнии и не нашел ее признаков ни на одной из своих фотографий, хотя в программу его исследований входило панорамное фотографирование гроз [272].

Рейл предпринял попытку обнаружить попарную корреляцию между теми 45 параметрами шаровой молнии, которые охватывались его анкетой. Между такими факторами, как размеры, время жизни или яркость, не выявилось никакой значимой связи. Число молний, особенности которых указывают на большую внутреннюю энергию

(разрушительное действие, сильный шум или большая яркость света), оказалось очень малым.

Отсутствие корреляции между различными свойствами шаровой молнии Рейл объяснил включением в ответы на его вопросы ряда других явлений, которые, однако, были отождествлены с шаровыми молниями. Учитывая такую возможность, более ранние исследователи пытались дифференцировать шаровые молнии по месту их возникновения, характеру пути или типу исчезновения. Хотя подобные характеристики делают удобной классификацию различных появлений шаровой молнии, все это не дало никакой добавочной информации о природе шаровой молнии.

В отличие от прежних исследователей, Барри вывел из своего обзора заключение, что светящиеся шары, обладающие определенными свойствами, — это не шаровые молнии, а огни св. Эльма. К таким свойствам он отнес голубой и бело-голубой цвет, прикрепление к неподвижным заземленным проводникам, передвижение по земле или по электрическим проводам, шипящий звук, время жизни, исчисляемое скорее минутами, чем секундами, и отсутствие тепловых эффектов. Имеется достаточно оснований для того, чтобы отнести эти свойства к огням св. Эльма, и проблема шаровой молнии станет, безусловно, несколько проще, если мы исключим из совокупности наблюдений все случаи, при которых огненный шар обладал каким-либо из перечисленных выше свойств. С другой стороны, описывались случаи, когда голубовато-белый свет был связан с высокой температурой, а один шар, свободно плывший в воздухе, шипел, когда проник в помещение. Если среди свойств, рассмотренных Рейлом, и не удалось заметить четкой корреляции, можно сделать один вывод: свойства, описанные в его обзоре — это, бесспорно, те же свойства, которые уже давно приписывались шаровой молнии в многочисленных случаях наблюдений, зарегистрированных в литературе, и вместе взятые, они представляют собой характерные черты этого особого природного явления.

Глава 8

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Чрезвычайное разнообразие свойств шаровой молнии, отраженное в информации, постепенно накопившейся в литературе за последние 130 лет, ставит перед учеными трудную задачу отбора материала. Несмотря на необычное обилие теорий, не существует исчерпывающего объяснения, охватывающего все описанные очевидцами свойства. Эффективность некоторых теорий для объяснения ограниченного числа свойств породила в прошлом надежду, что продолжающиеся исследования в конце концов позволят понять и более трудные для объяснения особенности. Многочисленные теории редко строились таким образом, чтобы объяснить отдельные разновидности шаровой молнии [479], хотя анализ наблюдений постоянно приводил к заключению, что действительно существуют ее разные виды. Согласно противоположной точке зрения, выдвигавшейся, пожалуй, столь же часто, большое число чрезвычайно различных свойств, которые не поддаются объяснению на основе общепринятых принципов, прямо указывает, что шаровая молния не является реальным физическим явлением. На этот довод Араго ответил: «Что бы с нами было, если бы мы отрицали все, что не можем объяснить?»

Важнейшие обзоры литературы, показывающие, как менялись взгляды на проблему шаровой молнии, были сделаны Вебером в 1885 г., Заутером в 1890 и 1895 гг., де Янсом в 1910 г., Брандом в 1924 г., Аньолем в 1954 г., Силбергом в 1963 г. и Леоновым в 1965 г. Большинство теорий, касающихся шаровой молнии, можно подразделить на два основных типа: согласно одним, шаровая молния возникает и поддерживается за счет энергии, поступающей от какого-то внешнего источника, который необ-

ходим для объяснения большой длительности существования или высокой энергии шара; согласно вторым, шаровая молния уже в момент своего образования содержит весь запас своей энергии и вещества [230]. Здесь мы к этому разделению не прибегнем. Вместо этого будут обсуждаться теории, рассматривающие свойства вещества, образующего шар, и характер его строения. Таким образом, получается дробная классификация, рассмотрение которой несколько затруднительно. Она дает, однако, возможность более детально сравнивать основные аспекты и выводы теории с результатами наблюдений.

А. Теории агломерации. Шаровая молния как результат процесса агломерации

Начиная с самых ранних работ и вплоть до современных, всюду мы можем встретить постоянно повторяющиеся описания нерешенных проблем шаровой молнии и основных аспектов ее теоретических исследований.

Таковыми проблемами являются проблемы формирования и внутреннего строения шаровой молнии, а также исследования вещества, из которого она состоит. Самая первая теория, рассматривавшая шаровую молнию как особое явление, была выдвинута Мушенброком, которому часто приписывают изобретение лейденской банки [352]. Он выделил шаровую молнию из ряда других огненных тел, наблюдаемых в атмосфере, — таких, как метеориты. Хотя более поздние исследователи описывали распределение электрических зарядов в шаровой молнии подобно аналогичной структуре в лейденской банке, сам Мушенброк считал шаровую молнию не электрическим явлением, а скоплением горючих веществ, опускающимся из верхних слоев атмосферы. Вещества эти, по его мнению, испарялись из недр земли и поднимались на большую высоту, где они конденсировались и вновь собирались в единую массу. Опускаясь на землю, конденсированная масса все сильнее разогревалась и в конце концов воспламенялась или взрывалась.

Примерно через 100 лет была выдвинута подобная же теория, включавшая, однако, воздействие электричества

[383]. Согласно этой теории, космическая пыль, проходя через солнечные протуберанцы, насыщается горючими газами. Получившееся вещество, смешанное с ледяными кристаллами, опускается на землю сквозь верхние слои атмосферы, содержащие водород, и образует маленькие, сильно наэлектризованные облака. Вблизи поверхности земли облака эти начинают гореть подобно огням св. Эльма, постепенно уменьшаясь в размерах. Они могут гореть спокойно, потому что содержащиеся в смеси инертные вещества замедляют горение, но возникновение электрической искры, если сфера приблизится к хорошему проводнику, может заставить ее взорваться.

Некоторые характерные черты этих теорий вновь появляются в более поздних моделях шаровой молнии и будут рассмотрены ниже. Но теперь эти интересные с исторической точки зрения объяснения можно отвергнуть, поскольку нет никаких причин для того, чтобы рассеянное вещество начало конденсироваться в верхних слоях атмосферы в концентрированную массу малой протяженности; кроме того, шаровая молния, возникшая таким образом, не была бы специфически связана с грозами.

Б. Шаровая молния как сферический конденсатор

Связь появления шаровой молнии с мощными электрическими явлениями при грозах привела вскоре к возникновению теорий, в которых распределение зарядов в шаровой молнии уподоблялось их распределению на обкладках лейденской банки — первого конденсатора, в котором удавалось удерживать большие электрические заряды в ограниченном объеме, что, как предполагали, свойственно и для шаровой молнии. Первое такое предположение опиралось на физическую концепцию, согласно которой вещество, вступающее лишь в слабое взаимодействие с окружающей средой, принимает со временем характерную, в общем случае сфероидную форму [7, 392]. Согласно этим представлениям, шаровая молния есть сфера, образовавшаяся в результате сгущения электрической материи. Сфера окружена очень тонкой упругой оболочкой и

наполнена легкими газами. Наблюдаемый цвет появляется в результате отражения дневного света в тонкой пленке оболочки, порождающей интерференционные цвета.

Впервые модель шаровой молнии, прямо сопоставляющая структуру распределения в ней зарядов с их распределением в лейденской банке [506], была предложена в 1859 г. Сферический слой сухого воздуха, сжимаемого силой притяжения между зарядами противоположного знака, которые аккумулируются по обеим его сторонам, играет в ней роль изолирующего стекла лейденской банки.

Этот заряженный сосуд с газовыми стенками находится в состоянии устойчивого равновесия, поддерживаемого равными радиально направленными силами — атмосферным давлением, силой притяжения между зарядами противоположного знака по обеим сторонам изолирующей газовой оболочки, давлением внутри этой стенки, возникающим в основном под действием сжимающих электростатических сил, пониженным давлением внутри шара и силой отталкивания между зарядами, расположенными как вне, так и внутри оболочки. Свечение шара вызывается постепенной рекомбинацией зарядов противоположного знака, проникающих через слой сжатого газа, который не является абсолютным изолятором. При рекомбинации образуется озон. Вся система не разрушается от соприкосновения с почвой, при котором только снимается небольшая часть свободного заряда на ее внешней поверхности. Но если изолирующий слой будет пробит проводником, произойдет взрыв из-за разряда, проходящего между противоположно заряженными сторонами внешней оболочки. Равновесие радиальных сил в этом шаре устойчиво к небольшим возмущениям, причем существует много различных вариантов таких равновесных распределений зарядов, а следовательно, и способов, какими может быть образована шаровая молния.

Необычный результат, наблюдавшийся в XVIII в. в эксперименте с лейденской банкой, в какой-то мере подкрепил эту точку зрения, хотя первоначально его связали со свойствами болидов, которые в ту эпоху считались электрическим явлением [46, 158]. В лейденской банке при

ее зарядке возник огненный шарик, похожий на раскаленное железо. Диаметр его составлял примерно 2 см, и он быстро вращался. Внезапно раздался громкий взрыв, сопровождавшийся яркой вспышкой, и в стеклянной стенке появилось круглое отверстие.

Теория конденсаторного распределения зарядов в шаровой молнии получила широкое распространение. Некоторые исследователи считали, что шаровая молния не притягивается к проводникам, в частности к молниеотводам, именно благодаря одновременному присутствию положительных и отрицательных зарядов [495, 506]. Было выдвинуто предположение, что твердые пылевые частицы, например, частицы штукатурки, дополнительно способствуют образованию непроводящей стенки такого шара [369]. Утверждалось также, что заряженная сфера образуется благодаря отделению части облака с электрическим зарядом, и это приводит к образованию шара, содержащего некоторое количество воды [7, 363].

Было выдвинуто предположение, что существует два типа шаровой молнии: с конденсаторным распределением зарядов и настоящая молния шаровой формы [93]. Первая из этих молний, хотя она и содержит в себе изолирующую оболочку, все еще соединена с тучей, в которой она возникла, и гром исходит из тучи, а не из этой светящейся сферы.

Однако против этой теории говорит отсутствие достаточно веской причины для того, чтобы электрические заряды противоположного знака разделялись в атмосфере некоторой оболочкой сферической формы вместо того, чтобы прямо рекомбинировать, а также для того, чтобы тонкий слой атмосферных газов (как бы сильно сжаты они ни были), или водяных капель, или пылевых частиц мог помешать движению таких зарядов под действием электростатических сил. Равновесие радикально направленных электростатических сил, создаваемых зарядами противоположного знака, собранными в концентрические сферические оболочки, непременно нарушится ввиду очень быстрой рекомбинации зарядов в атмосфере, возможно, за несколько миллисекунд, если исходить из экспериментальных данных о свойствах ионов и электронов.

В. Превращение линейной молнии в шаровую

В истории изучения шаровой молнии довольно часты случаи, когда старые теории вновь возрождаются через многие годы, иногда даже через столетие. Так произошло, в частности, с предположением, что шаровая молния состоит из вещества обычной молнии и образуется в результате отделения какой-то части канала обычной молнии. Тесная, бросающаяся в глаза взаимосвязь между ними, возможно, послужила основанием для аристотелева рассмотрения типов молнии [17]; определение шаровой молнии как неподвижной молнии, а линейной молнии как шаровой молнии в быстром движении и четочной молнии как множественной шаровой молнии [240, 348, 375] встречается не так уж редко. Многочисленные случаи возникновения шаровой молнии сразу же вслед за вспышкой обычной молнии в какой-то мере дают основание для таких определений [238, 522]. Еще в 1850 г. были опубликованы сообщения, указывающие на тесную взаимосвязь между этими типами молний, когда наблюдалось движение светящихся сфер по пути непосредственно предшествовавшего им линейного разряда и появление их на нижнем конце обычной молнии [103]. Полный процесс образования отдельного шара из нижнего конца необычной молнии также непосредственно наблюдался очевидцами [256, 361].

Прямое наблюдение возникновения шаровой молнии из линейной является сильным свидетельством в пользу этой теории; однако она оставляет без ответа несколько сложных вопросов, например, какой процесс может объяснить образование шаровой молнии в закрытых помещениях? Возникновение огненного шара внутри комнаты сразу же после того, как около дома ударила молния, привело в 1892 г. к предположению, что шар в комнате образовался за счет электрической индукции от внешнего разряда молнии [301]. Наблюдатель находился во время грозы у окна. Менее чем через полсекунды после вспышки линейной молнии он заметил огненный шар перед тем моментом, когда тот взорвался и распался на мелкие искры почти над самой его головой.

В ряде статей 1924—1934 гг. предполагалось, что образование шаровой молнии из линейной и некоторые ее свойства можно объяснить сильным поверхностным натяжением вещества в канале молнии, которое из-за его, по-видимому, взрывчатых свойств называли «громовым веществом» [309—311].

Считалось, что «громовое вещество» состоит исключительно из газов, входящих в состав воздуха, и обладает огромной энергией и температурой около 2500°C [311]. Образование шаровой молнии из канала обычной молнии рисовалось как процесс охлаждения, сопровождающийся увеличением поверхностного натяжения, что приводит к отделению шара. Внешний слой шара представляет собой остывший упругий газ. Внутренняя часть раскалена. Устойчивость сферы, на которую указывали сообщения о подскоках шаровой молнии, относилась за счет поверхностного натяжения. Распад огненного шара на несколько меньших шаров мог объясняться уменьшением поверхностного натяжения в результате абсорбции примесей раскаленным шаром — например, железа при соприкосновении с металлом и серы при соприкосновении с органическими веществами.

Эти примеси могли понизить поверхностное натяжение и вызвать разрушение шара, хотя по мере падения температуры поверхностное натяжение чистого «громового вещества» при нормальных обстоятельствах увеличивалось бы. Возникновение других форм молний, наблюдаемых относительно редко, — например, змеевидной — также объяснялось уменьшением поверхностного натяжения.

Продолжительность свечения обычной молнии много короче времени жизни шаровой молнии, за исключением некоторых редких вспышек, в том числе и той, которая, по утверждению очевидца, образовала шаровую молнию и длилась, по-видимому, несколько секунд. Условия, вызывавшие округление переднего конца молнии и заметно большую длительность существования вещества в шаре, если оно было тем же, что и в обычной молнии, объяснены не были.

Г. Возникновение шаровой молнии при химических реакциях

В самом раннем и полном обзоре по проблеме шаровой молнии Араго [16] выдвинул предположение, что она может содержать химическое соединение, возникающее в воздухе в результате разряда молнии. Эта гипотеза, по всей вероятности, имела основой эксперименты Кавендиша, в которых была получена азотная кислота с помощью электрических разрядов в воздухе. Предполагалось, что в шаровой молнии такие химические вещества должны быть полностью перемешаны с веществом молнии. Араго поставил трудные вопросы: как, где и из каких веществ образуется шаровая молния, как определить, куда она будет двигаться? — вопросы, на которые и по сей день не найдено сколько-нибудь исчерпывающего ответа.

Согласно раннему предположению взрывчатый характер шаровой молнии в первую очередь объяснялся тем, что при грозовых электрических разрядах из атмосферного азота и следов иода или иодистых соединений образуется трехиодистый азот [47].

Гораздо чаще в химических теориях шаровой молнии рассматривались соединения, возникающие благодаря окислению азота, и в частности двуокись азота. Прямое сравнение запаха газа, возникающего при появлении шаровой молнии, с запахом двуокиси азота [320] и образование двуокиси азота при электрических разрядах в воздухе [113] в какой-то мере свидетельствуют в пользу этой теории, которая прямо следует первоначальным предположениям Араго. В довольно плохо обоснованных попытках объяснить с помощью этой теории некоторые из наиболее непонятных черт шаровой молнии (сильные взрывы приписывались мгновенной нитрации органического вещества — например, стволов деревьев или стогов сена — концентрированными окислами азота [466]). В одной статье двуокиси азота приписывалась устойчивость вплоть до температуры 3000° С [184].

В этом случае скорость нитрации должна была бы намного превосходить обычную, особенно для плотного твердого тела вроде дерева, но взрывы шаровой молнии

в воздухе или от краткого соприкосновения с веществами, которые не были и не могли быть нитрованы, с таким объяснением не согласуются. К тому же оказалось, что двуокись азота должна, по-видимому, почти полностью распасться уже при 1000°C [372]. Выдвигалось предположение об экзотермической реакции закиси азота с водородом, в результате которой возникают азот и вода [100]. Очень высокие оценки энергии шаровой молнии, полученные на основании последствий ее взрыва [32] и нагревания такой молнией бочки с водой [184], свидетельствуют о том, что в формировании шаровой молнии обладающие относительно низкой энергией окислы азота не участвуют. Анализ состава воздуха после очень продолжительной и сильной грозы выявил не повышение количества окислов азота, а значительную концентрацию озона [428], однако определенного заключения о возможном эффекте шаровой молнии из этого сделать нельзя, так как на протяжении этой грозы ни одной шаровой молнии зарегистрировано не было.

В некоторых теориях вместо окислов азота предпочитают рассматривать озон. В доказательство того, что основным веществом шаровой молнии является озон, приводятся следующие моменты: запах озона, ощущавшийся после исчезновения огненного шара; плотность опускавшихся шаров, явно превосходящая плотность воздуха; отклонение их от вертикального направления у поверхности земли и последующее горизонтальное движение; действие сил отталкивания между отрицательным зарядом земли и отрицательным зарядом, которым предположительно обладает озон, а также тот факт, что при получении озона электрическим путем наблюдается голубая окраска в отличие от обычного желтого азотного пламени [512]. Известно, что озон образуется вокруг интенсивно заряженных острий, особенно если они несут отрицательный заряд. Окислы же азота отсутствуют или появляются, только когда с острия начинают срываться искры.

Необычно высокая плотность газов в шаре, на которую указывает его быстрый спуск, и предполагаемая высокая температура — около 1000°C — породили гипотезу об участии в его образовании многоатомных моле-

кул кислорода и азота, содержащих до 12 атомов: O_{12} и N_{12} [309]. Если бы шары с высокой температурой (до 3500 К), состоящие на $7/8$ из углерода, содержали многоатомные молекулы углерода (до 17 атомов в молекуле), их плотность была бы ниже плотности воздуха при стандартных условиях [293]. Энергия, высвобождаемая сферой озона диаметром 50 см, была оценена в 11 000 кВт·с, и та же цифра была позже получена в расчетах энергии для шаровой молнии, нагретшей до кипения бочку с водой [184]. Пересчет этих результатов в соответствии с последними значениями энергии образования озона [372] дает лишь $\sim 4\%$ указанной энергии для этой сферы чистого озона, разлагающегося на кислород. Надо сказать, что все доводы, выдвигаемые в доказательство присутствия озона, не исключают и присутствия двуокиси азота; по меньшей мере в одном случае запах газа весьма уместного оранжевого цвета, появившегося в доме в связи с шаровой молнией, был сопоставлен с запахом двуокиси азота [320]. Запах этот наблюдатель сравнил с запахом смеси относительно высоко концентрированной двуокиси азота с воздухом, которую ему предъявили позже. К тому же плотность двуокиси азота почти равна плотности озона, а в сообщениях о шаровой молнии желтый и красный цвета фигурируют гораздо чаще голубого.

В сообщении о наблюдении шаровой молнии в 1967 г. в Советском Союзе [128], о чем упоминалось выше, отмечалось появление и озона и двуокиси азота в качестве газов, образованных шаровой молнией (хотя это вовсе не обязательно означает, что они входят в ее состав или определяют ее свойства). Обычно наблюдаемые взрывы шаровой молнии (в данном случае, правда, взрыва не произошло) объяснялись в этих работах цепным окислением азота, при котором в реакцию вступают ионы. Образцы газов были собраны в вакуумные колбы, поднятые к следу огненного шара примерно через 1 мин после его прохождения. Наличие двуокиси азота было определено с помощью масс-спектрометра, а озона — по его реакции с находившимися в колбах поглотителями, содержащими тритий. Концентрация в воздухе остальных газов была обычной. Концентрация же двух первых газов оказалась наиболее высокой в пробах, взятых ближе всего к следу

огненного шара: в 52 раза выше обычной для озона и в 110 раз двуокиси азота. Отношение количества озона и двуокиси азота колебалось в разных пробах от 0,78 : 1 до 2,45 : 1, как это видно из рис. 9. Отношение это было самым высоким в первой пробе и самым низким во второй, которая показала наибольшую концентрацию обоих газов.

Образование озона и двуокиси азота с помощью электрических разрядов было исследовано экспериментально. Отношение концентрации озона к концентрации двуокиси азота уменьшалось с повышением напряжения разряда. Согласно этим опытам, отношение 2,5 : 1 должно соответствовать потенциалу молнии в 300—400 кВ, если только естественные разряды сопоставимы с изучавшимися тихими разрядами. В серии экспериментов наблюдались колебания этого отношения от 1 : 1 до 6 : 1. При увеличении температуры оно уменьшалось, а для дуговых разрядов обычно было ниже единицы. Величина этого отношения примерно 0,9 : 1 была получена при 2000—4000 К. Самые низкие величины, порядка 0,8, должны, видимо, означать, что температура шаровой молнии превышала 4000 К. Однако наблюдатель заметил, что свечение шара было сравнимо со свечением разряда плазмотрона при 14 000 К.

Образование при электролизе воды водорода и кислорода — газов, дающих взрывчатую смесь, — уже давно породило предположение, что обычный разряд линейной молнии, очень часто наблюдавшийся перед появлением шаровой молнии, создает взрывчатый газ, обладающий также и электрическим зарядом [209—211, 436]. Этот газ, возможно, заключен в водяную оболочку, а электрическая искра может вызвать его взрыв. Спустя почти сто лет после появления первой теории [436], снова выдвигались подобные же идеи о роли кислорода и водорода, образованных при термической диссоциации воды [42] во время мощной вспышки молнии или при обычном электролизе [461]. В пробах воздуха, взятых вблизи следа шаровой молнии, согласно сообщению, присутствовал водород [128]. Средняя плотность составляла 1,2 мг/м³, а отношение плотностей водорода и кислорода было равно $4,3 \cdot 10^{-6}$. Это отношение много меньше низ-

шего предела отношения плотностей во взрывчатой смеси указанных газов, возникающей при весовом соотношении в 0,0026 : 1 (или объемном 0,04 : 1) [280]. Концентрации, указанные в сообщении, не подтверждают теории, что шаровая молния — это взрывчатая смесь водорода и кислорода. Но, с другой стороны, эту теорию нельзя считать и опровергнутой, поскольку газы для анализа были взяты на траектории огненного шара или вблизи нее, а не внутри самого шара. Таким образом, речь идет только о веществах, оставшихся после каких-то химических реакций, а не о тех, что существовали в этом месте до того, как шар его миновал.

Многие из свойств шаровой молнии удалось воспроизвести в опытах, где светящиеся сферы были получены при поджигании в воздухе горючих веществ с низкой концентрацией [354]. Водород, метан, пропан и бензин воспламенялись кратковременными электрическими разрядами в вертикальных стеклянных колбах. Водород, который при концентрациях в воздухе от 3,8 до 9% легче всего давал желаемый эффект, излучал слабый голубой свет, видимый в затемненном помещении. Для пропана минимальная концентрация составляла 1,24%. Минимальная концентрация бензина, при которой возникала сфера, была настолько низка, что не поддавалась измерению, и если в колбе испарялось несколько капель бензина, светящаяся сфера возникала только после того, как концентрация паров бензина снижалась с помощью многократного откачивания воздуха из камеры. Пропан и бензин давали более яркие, хорошо видимые облака, обычно цветные — голубые, зеленые или фиолетовые. Верхний и нижний пределы концентраций, при которых образовывались сферы, были близки к минимальным концентрациям, при которых возможно воспламенение газов, и эти светящиеся облака были описаны как диффузное пламя, вызванное электрическим разрядом. При концентрациях горючего газа выше предельной может начаться обычное горение, как у пропана в воздухе.

Образования, возникающие при соответствующих условиях, больше напоминают коронный разряд или полую массу со светящейся поверхностью, чем горящий газ

Возникали сферические, каплевидные и грушевидные образования, которые поднимались по цилиндру со скоростью от 0,3 до 10 м/с. Эти облака проявляли еще некоторые из свойств, упоминавшихся в сообщениях о шаровой молнии. Как правило, они не производили шума, но при высоких концентрациях горючего газа иногда все же издавали шипящий звук. В нескольких экспериментах, когда сфера исчезала, достигнув верхней крышки колбы, раздавался громкий треск. Магнитное и электрическое поля на ее движение не влияли. Сферы выделяли лишь умеренное количество тепла. Иногда в экспериментальной камере сохранялся очень резкий удушливый запах, который исследователь объяснял образованием при искровом разряде окиси азота. Такой запах может объясняться и частичным окислением газообразных углеводородов в этих условиях; этим же может объясняться и светло-коричневый туман, наблюдаемый обычно при образовании перекисей, например, в смесях, выбрасываемых в атмосферу из автомобильных глушителей. Наблюдалось разделение одного шара на мелкие части, которые затем вновь слились, а в нескольких экспериментах светящаяся масса проходила сквозь отверстие диаметром 7 мм, сделанное в медном диске, преграждавшем ей путь, и появлялась с другой его стороны, сохраняя прежние размеры.

В дальнейших опытах было повторено образование светящихся сфер с помощью воспламенения смесей газообразных углеводородов с воздухом при концентрациях ниже предела воспламенения [36, 150]. При использовании пропана воспламеняющая искра не давала видимых результатов, если его концентрация была ниже предела горючести (около 2,8%), пока не был достигнут более низкий уровень (от 1,4 до 1,8%). При искровом разряде длительностью в 1 мс выделялась энергия 250 Дж. При низких концентрациях возникал желто-зеленый огненный шар диаметром в несколько сантиметров. Шар этот был довольно ярким и быстро двигался по камере в течение примерно двух секунд, после чего бесшумно исчезал. Такой эксперимент потребовал решения еще двух вопросов: каким образом в естественных условиях образуются необходимые концентрации горючих газов и как зависит

размер сферы от характера смеси газообразных углеводородов с воздухом? Было выдвинуто предположение, что простые углеводороды, первоначально присутствующие в воздухе, образуют в атмосферных электрических разрядах сложные органические молекулы [396]. Далее предположили, что сложные молекулы слипаются в крупные заряженные частицы, подобные аэрозолям [92], в поле атмосферного разряда, который, возможно, воспламеняет смесь. Однако необходимо существование каких-то процессов повышения концентрации метана, рассеянного в атмосфере (она составляет $\sim 10^{-4}\%$), чтобы это объяснение годилось для других местностей, кроме болотистых, где концентрация горючего газа и в естественных условиях может оказаться достаточной. Необходимо, видимо, увеличение концентрации газа до нормального предела возгорания.

Для оценки [280] размеров возникающего огненного шара можно использовать простую формулу для сферического пламени:

$$H = \frac{d^3 c \rho \pi}{6} (T_b - T_a),$$

где H — теплота, полученная шаром диаметра d при горении, которое повышает первоначальную температуру газа T_a до температуры T_b , c — удельная теплоемкость смеси горючего газа с воздухом, а ρ — плотность газа при T_b . Введя в уравнение характерные значения параметров, можно рассчитать диаметр сферы. Первоначальная концентрация углеводорода принималась ниже минимального предела возгорания, который для метана в воздухе составляет 5,4% (по объему) и для пропана — 2,8%. При полном сгорании таких смесей подходящего объема выделяется энергия от 10^2 до 10^6 Дж. Смесь газов должна иметь удельную теплоемкость [280] примерно 0,28 кал/(г·град) и плотность $2 \cdot 10^{-4}$ г/см³. Красный или красно-желтый цвет, чаще всего наблюдаемый у шаровой молнии, согласно закону Вина, соответствует излучению с температурой 4000—5000°С. Диаметр сфер, полученный при таких параметрах, оказывается в пределах 6—130 см, что согласуется с наблюдениями шаровой молнии [35].

Процесс горения этого огненного шара можно подвергнуть более детальному критическому рассмотрению, отнюдь не снижая ценности этой модели для объяснения некоторых непонятных свойств, приписываемых шаровой молнии. Образование из метана более сложных углеводородов с помощью электрических разрядов было продемонстрировано экспериментально для концентраций, на порядок превосходящих те величины, которые рассматривались в связи с естественными шаровыми молниями [396]. При более низких концентрациях этот процесс может оказаться неэффективным. Было продемонстрировано, что под воздействием электрического поля мельчайшие частицы кристаллических веществ [92] собираются в большие видимые простым глазом заряженные комки, находящиеся в воздухе во взвешенном состоянии под действием электростатических сил. Образование аналогичных жидких аэрозольных капель и их поведение в естественном электрическом поле вовсе не обязательно должно быть таким, как оно описывается в этой модели шаровой молнии. Температура огненных шаров, оцененная на основе закона Вина, вдвое превышает нормальную температуру пламени в оптимальных условиях [280], которая как для метана, так и для пропана, горящих в воздухе, составляет примерно 2000°C . При низких концентрациях, о которых речь шла выше, температура горения будет еще меньше.

Возникновение огненного шара при очень низких концентрациях бензина, обладающего относительно сложной молекулой, указывает на какую-то реакцию, отличающуюся от обычного горения. Известно низкотемпературное окисление углеводородов при концентрациях ниже нормального предела воспламеняемости. Например, пентан при нагревании в воздухе окисляется и испускает голубое свечение все время, пока держится это «холодное пламя» с температурой около 220°C . Голубое свечение приписывалось образующемуся в этой реакции формальдегиду, находящемуся в возбужденном состоянии. Концентрация горючих газов, при которых наблюдались огненные шары [35, 354], примерно соответствует концентрациям, необходимым для возникновения холодного пламени. Следовательно, для объяснения наб-

людавшихся в экспериментах фактов нет необходимости привлекать предположение об образовании крупных частиц или сложных углеводородов для нормального горения. С другой стороны, явление холодного пламени не наблюдалось ни у метана, ни у бензина, а последний в экспериментальных условиях давал хорошо видимые огненные шары. Далее, образование яркого желто-зеленого шара в смеси пропана с воздухом не согласуется со слабым голубым свечением, обычно свойственным холодному пламени. Возможным источником указанного света может быть излучение ионов молекулярного кислорода O_2^+ с длинами волн 5586 и 5632 Å. Образование этих ионов требует очень высокой энергии (12,5 эВ или 288 ккал/моль), и образование этих ионов в продолжающейся реакции горючего газа с воздухом, после того как первоначально они были созданы разрядом, возможно лишь тогда, когда ионы не участвуют в специфических химических реакциях. Для образования ионов кислорода потребовалось бы больше половины тепла, выделяющегося при полном сгорании пропана. Другие реакции медленного горения — окисления — могут развиваться при концентрациях горючего газа, даже более низких, чем те, которые нужны для холодного пламени.

В этой теории не была рассмотрена в должной мере структура огненного шара. Шаровая молния невелика, сохраняет постоянные размеры и находится в непрерывном движении, значительно удаляясь от места возникновения. Обычное же сферическое пламя только радиально расширяется от места возгорания и, возможно, движется вверх по вертикали.

Выдвигалось предположение, что в природе этот процесс возникает при выделении болотного газа (метана) или же при образовании водорода и кислорода, а также возбужденных азота или закиси азота под воздействием тепла, выделяемого при ударе молнии в землю возле горных ручьев [460, 461]. Согласно этой теории, шаровая молния представляет собой вторичное явление, вызванное обычной молнией и, по-видимому, поддерживаемое химическими реакциями между веществами, которые также были порождены предыдущей вспышкой молнии.

Эта точка зрения была принята некоторыми специалистами [433, 488]. Бесспорно, внешний вид и многие из свойств шаровой молнии, на которые указывается в значительном числе сообщений о ней, были воспроизведены экспериментально путем воспламенения электрической искрой горючих газов, содержащихся в воздухе в низких концентрациях.

С другой стороны, попытки объяснить на основе этой теории и другие свойства указанного естественного явления сталкиваются с рядом трудностей. Легкое движение воздуха сразу же унесет или даже рассеет образовавшиеся таким путем светящиеся облака. Полет шаровой молнии по ветру, на который указывается в некоторых сообщениях, вполне согласуется с этой теорией, чего нельзя сказать о движении других молний прямо против ветра. Большинство экспериментально полученных шаров поднималось вертикально вверх в камерах, где они возникали, чего и следовало ожидать от нагретых газов, и особенно тех, которые скорее всего можно встретить в естественных условиях — от водорода и метана, которые легче воздуха. В нескольких экспериментах (число их не указано) использовались горизонтальные трубки, и светящиеся массы как будто двигались вдоль этих трубок. Воспламенение производилось с помощью двух заостренных электродов, впаянных у одного конца трубки; при этом вполне могла возникнуть направленная сила. Хотя горючие газы, необходимые для подобного возникновения шаровой молнии, могут образоваться естественным путем в определенных местах, в частности над болотами, объяснить возникновение огненных масс внутри закрытых помещений (и при этом не возле газовых труб и приборов) оказывается трудно. Возникновение шаров близко от земли вслед за вспышкой молнии или в достаточно сильном электрическом поле, где возникают коронные разряды, в целом вполне может быть объяснено этой теорией, если такие шары характеризуются умеренной температурой, низкой энергией и восходящим движением. Локальное образование химически активной газовой смеси и ее воспламенение при первоначальной вспышке молнии, поражающей указанный участок, — это вполне правдоподобный процесс. Другие же химиче-

ские теории, согласно которым требуемые вещества должны быть получены в относительно меньшем объеме, ничего подобного не предлагают.

Д. Ядерные теории

Возникновение во время гроз электрических полей с огромной разностью потенциалов, способных разгонять заряженные частицы, например альфа-частицы, до скорости порядка наблюдаемых при атомном распаде, привело к предположению, что возможно появление еще больших локальных полей, способных вызвать в атомах атмосферных газов ядерные реакции [61]. Согласно этой теории, шаровая молния должна была бы проявлять радиоактивные свойства. После того как в термоядерных экспериментах были получены нейтроны, возникла гипотеза, что разряды молний порождают тепловые нейтроны, и эти нейтроны, реагируя с атмосферным азотом, создают радиоактивный изотоп углерод-14, из которого и образуется шаровая молния [121]. Предполагалось также, что ядерную реакцию могут вызывать протоны, возникающие в разряде молнии из атмосферной воды и ускоряемые до 1 МэВ грозовым электрическим полем [7a]. При этом из обычного азота ^{14}N и кислорода воздуха ^{16}O должны образоваться радиоактивные изотопы кислорода ^{15}O и фтора ^{17}F . Благодаря короткому периоду полураспада этих изотопов (124 и 66 с соответственно) они создали бы огненный шар с очень высокой радиоактивностью в отличие от ^{14}C , обладающего периодом полураспада 5730 лет.

Свойства шаровой молнии приписывались эффектам, связанным с появлением высокоэнергичных позитронов, возникающих при распаде этих изотопов. Для проверки этой теории предлагалось измерить количество продуктов распада ^{15}N и ^{17}F после смерчей, сильных гроз или шаровой молнии.

Предполагалось также, что грозовые электрические поля фокусируют более тяжелые частицы, как, например, космические лучи, в шаровую молнию, и это влечет за собой самоподдерживающуюся ядерную реакцию [15, 97, 277]. Однако тогда во время солнечных вспышек,

при которых увеличивается интенсивность космических лучей, случаи появления шаровых молний должны были бы учащаться, и в основном огненные шары должны были бы появляться в высокогорных областях [277].

Не говоря уже о других затруднениях, связанных с этой теорией, потери энергии в атмосфере препятствуют тому, чтобы заряженные частицы разгонялись в электрических грозовых полях до скоростей, при которых возможны ядерные реакции. Максимальная температура, наблюдавшаяся при разрядах молнии, на несколько порядков ниже той, при которой могла бы начаться термоядерная реакция. Хотя космические лучи, достигающие Земли, обладают достаточно высокой энергией для ядерных реакций, они слишком рассеяны и не могут обеспечить необходимой энергией малую область, занятую огненным шаром. А для предполагаемого фокусирования таких частиц требуются мощные поля, соответствующие высоким энергиям этих частиц и образующие электростатические линзы огромных масштабов.

Е. Модели с заряженными пылевыми частицами и каплями

Очень трудно поддается объяснению длительное и непрерывное свечение шаровой молнии, а потому была выдвинута гипотеза, в которой это свечение сравнивалось с излучением, возникающим при биохимических процессах, таких, как ферментация [500]. Согласно этой теории, вещества, которые вызывают реакции, сопровождающиеся свечением, — это имеющаяся в атмосфере пыль, а также пыльца цветущих растений. Идея, что шаровая молния образуется из содержащихся в облаках электрически заряженных капель и пылевых частиц, выдвигалась гораздо раньше, еще в 1855 г., когда шаровая молния считалась примером, показывающим, что вещество стремится принять форму сфероидов [392]. Между пластинами изолирующих материалов, таких, как резина или стекло, в присутствии воды или пыли наблюдались маленькие электрические искры шаровидной формы и голубовато-красного цвета [278]. Из-за небольшой величины этих шаров (около 0,5 мм в диаметре) и неустой-

чивого, легко поддающегося внешним воздействиям движения эти эксперименты мало способствовали подтверждению теории шаровой молнии как совокупности заряженных частиц. Сам исследователь указал и на дополнительные несоответствия: в частности, естественные огненные сферы, в отличие от этих экспериментальных шариков, не исчезали при соприкосновении с проводниками; не объяснялось также, каким образом подобные образования могли бы проникать внутрь закрытых помещений.

Появление мелких твердых частиц часто считалось необходимым для возникновения шаровой молнии [233]. Один исследователь утверждал, что большинство огненных шаров возникает потому, что грозы заряжают пылевые частицы и, в частности, облака вулканической пыли [465]. Советский физик Френкель высказал предположение, что молния порождает в атмосфере химически активные вещества, которые конденсируются на пылевых частицах в воздухе [162, 277, 278]. Разряд молнии нагревает пылевые частицы до свечения. Конденсированные возбужденные газы образуют тонкую оболочку, так что шаровая молния напоминает своим строением пузырь. Эта модель имеет сходство с моделями типа сферического конденсатора, о которых говорилось выше. Позднее Френкель отказался от гипотезы сферической оболочки и предположил, что шаровая молния имеет вихревую структуру и состоит из смеси заряженных частиц дыма и возбужденных газов. Для объяснения движения шаровой молнии предлагалась сходная идея о вращающейся смеси заряженного града, снежной крупы или пыли [440]. Частое проникновение светящихся шаров в здания через дымоходы, согласно теории сгустка заряженной пыли, объясняется тем, что первоначальная вспышка линейной молнии заряжала золу в дымоходе и создавала небольшой вихрь [465].

Равномерно распределяя с помощью вентилятора тонкую пыль по стеклянной камере с одним электродом, несущим электростатический заряд, удалось создать аэрозоль из заряженных твердых частиц [92]. Когда вентилятор был выключен, в центре камеры постепенно образовалось почти сферическое скопление частиц диа-

метром 20 см. Заряженная проволока, опущенная в камеру, отталкивала или притягивала сферу в зависимости от заряда самой проволоки, а когда проволока была удалена, сфера вернулась в центр камеры. При использовании красителя *p*-ксилолазо- β -нафтола образовалась ярко-красная сфера, хотя равномерно распыленные частицы в проходящем свете даже после заряжения были зеленовато-голубыми. Скопление, образовавшееся в камере, содержало, однако, более крупные частицы, имевшие красный цвет. При исследовании некоторых из них под микроскопом оказалось, что они имеют форму длинных нитей или цепей, которая часто наблюдается у мелких заряженных частиц около электродов. Образование сферы было объяснено тем, что стенка стеклянной камеры отталкивала частицы, поскольку и стенка и частицы получили от электрода заряды одного знака. Было выдвинуто предположение, что шаровая молния образуется благодаря сходному процессу.

Одно из наблюдений в обзоре Заутера, когда 25—30 голубых шаров катились по одному и тому же пути во время сильнейшей грозы [452, 453], дало толчок повторным исследованиям поведения заряженных масс воды для проверки теории, утверждавшей, что шаровая молния представляет собой заряженный водяной пузырь [557]. В 1874 г. некий немецкий лесничий наблюдал эти шары, прячась от грозы в заброшенной сторожке, которая оказалась прямо на их пути. Вокруг сверкали молнии, и сферы, напомилавшие по величине кегельные шары, быстро катились в одном направлении, часто одна вплотную за другой, и исчезали недалеко от него с громким треском, выбрасывая ослепительные искры, но не взрываясь. Светящиеся шары описывались в данном случае не как шаровые молнии, а как заряженные водяные пузыри [557]. Предполагалось, что они могли образоваться, когда большой заряд на поверхности земли при грозе передавался каплям падающего дождя, движение которых после этого определялось и ветром, и электрическим полем. Разрушение пузырей могло быть следствием испарения воды или нейтрализации заряда на поверхности земли близкой вспышкой молнии. Предполагалось также, что появление электрических зарядов

на зданиях во время грозы может объяснить проникновение заряженных пузырей в дома.

Была проведена и экспериментальная проверка этой теории, для чего через трубку из изоляционного материала, окруженную металлической проволокой, выдувались водяные пузыри. Проволока служила одним из электродов; другим служил металлический диск, находившийся на расстоянии 50 см от трубки. После того как из конца трубки выдувались водяные пузыри, к электродам прикладывалось напряжение.

Пузыри срывались с трубки и летели прямо к диску, разбиваясь о него с четко слышным шлепком. Никакого свечения у этих пузырей заметить не удалось даже в затемненном помещении [577]. В дальнейшем условия эксперимента были приближены к тем естественным условиям, которые фигурировали в этой теории, — к покрытой водой поверхности земли в электрическом поле [354]. Смесь гравия и песка на металлическом листе была залита водой, и через нее продувался воздух. Была создана разность потенциалов между металлической пластиной под песком (которая выполняла роль смоченной дождем почвы) и пластиной, помещенной на некотором расстоянии над нею. Поле вызвало заметное изменение в движении пузырей, которые вначале медленно поднимались прямо вверх. Их пути становились очень различны: одни поднимались, но с разными скоростями, другие неподвижно повисали между пластинами, а третьи поворачивали обратно вниз. Свечения замечено не было, и исследователь пришел к выводу, что сходства с шаровой молнией эти пузыри не имеют, возможно, потому, что пузыри не собрались в какую-то определенную фигуру. Кроме того, для опровержения этой теории ссылались на появление шаровых молний во время гроз, не сопровождавшихся дождем, или при истечении зарядов на линиях высокого напряжения [358].

Более поздняя теория строения шаровой молнии предполагала, что сфера состоит из положительно и отрицательно заряженных капель воды, причем все частицы с одинаковым зарядом образуют ядро сферы, которое окружено оболочкой из капель с зарядом противоположного знака [416, 417]. Рекомбинация противоположных за-

рядов в этой модели замедляется благодаря образованию пара при высокой температуре молнии. Водяные пары образуют изолирующий слой между областями, содержащими заряды противоположного знака. Такая модель очень напоминает рассмотренные выше модели типа сферического конденсатора. Вопрос о причине образования такой сферической структуры остается в этой теории нерешенным; несопоставима также длительность существования шара, упоминавшаяся в ряде сообщений, с малым временем рекомбинации.

Наблюдалось свечение у водяных капель с положительными и отрицательными зарядами, падающих в воздухе [331]. Капельки радиусом примерно 50 мкм и зарядом $5 \cdot 10^{-11}$ Кл при скорости столкновений 400 раз в 1 с давали свет, который различался адаптировавшимся в темноте глазом. В действительности свет испускался довольно интенсивными вспышками, которые казались слабыми только из-за их краткости. Излучение, несомненно, создавалось молекулами азота — оно приходилось на диапазон длин волн от 3371 до 4288 Å, т. е. располагалось в фиолетовой и синей областях спектра. Капельки, падавшие в углекислом газе, свечения не давали. Появление света объяснялось распадом молекул газа в полях, создаваемых капельками. Ранее наблюдалось свечение воды под действием высоких звуковых частот, которое приписывалось механическим колебаниям на границе газ — жидкость в пузырьках, образуемых в жидкости растворенными газами. В экспериментах с капельками использовались потенциалы, достаточные для их разрушения при получении заряда, хотя рекомбинация зарядов при других параметрах может произойти и без разрушения. Эти эксперименты [557] в известной степени подтверждают гипотезу первого исследователя, что свечение может порождаться заряженными скоплениями воды, которые образуются естественным путем в мощнейших грозových полях, хотя в ранних экспериментах никакого свечения не отмечалось. Чрезвычайно слабое свечение, наблюдавшееся в экспериментах при взаимодействии противоположно заряженных водяных капелек, по-видимому, должно становиться интенсивнее при боль-

шем числе столкновений капель, которые происходят в течение продолжительного периода времени.

Разряды между электрически заряженными каплями рассматривались также в качестве возможного источника ультракоротковолнового радиоизлучения, которое, согласно некоторым новейшим теориям, создает шаровую молнию [8, 9, 291]. Этот процесс будет рассмотрен ниже, в разделе, посвященном теориям возникновения шаровой молнии в естественном высокочастотном электромагнитном поле.

В теориях, рассматривающих электрические процессы в грозах, главная роль отводится водяным каплям и частицам льда, точно так же, как и в ряде других теорий шаровой молнии, от самых ранних до новейших. Ни в одной из рассмотренных выше моделей не показано, каким образом такие частицы могут естественным путем достигать достаточных концентраций и группироваться в образования, подобные шаровой молнии.

Ж. Облака молекулярных ионов

Непосредственно после экспериментального изучения заряженных твердых частиц в 1931 г. было выдвинуто предположение, что шаровая молния создается не из крупных частиц пыли, а из ионизованных молекул газов [430]. Согласно этой гипотезе, внутренняя часть шара состоит из разреженного заряженного газа. Для объяснения взрывов с сильным звуком внутри помещений, которые, однако, не вызывают никаких разрушений, шаровая молния сравнивалась с пустотной электролампой. Ионные теории шаровой молнии рассматривают состояние вещества, подобное тем, что рассматриваются в теории плазмы, хотя теоретические методы их совершенно различны. В последних ионных теориях [213] сделана попытка рассмотреть возможные отличия вещества, из которого состоит шаровая молния, от плазмы; причем в качестве отличий указана низкая температура первого, низкая концентрация в нем заряженных частиц и отсутствие свободных электронов. Теория, объясняющая возникновение шаровой молнии тем, что обычный линейный разряд образует вещество, состоящее из поло-

жительных ионов и свободных электронов и обладающее плотностью газа при стандартных условиях [338, 339], в свете новейших данных означала бы образование плазмы, которую вряд ли удалось создать даже в экспериментах по проблеме термоядерного синтеза. Ионизованный газ обычно считается плазмой, если расстояние, на котором заметно поле отдельно взятой частицы (дебаевский радиус экранирования [285]), мало по сравнению с размерами области, занятой плазмой. Плазма нейтральна. Под этим подразумевается, что в области, размер которой значительно превышает дебаевский радиус, полный заряд близок к нулю. Общие положения, справедливые для плазмы (такие, например, как представление об ее нейтральности), должны быть перенесены и на газы из молекулярных ионов, поскольку последние рассматриваются в моделях как особое вещество. Это позволит выйти за пределы качественных описаний.

Выдвигалось предположение [374], что шаровая молния — это сфера, образованная слоем ионов озона или азота, возникших благодаря разряду молнии или какому-либо другому кистевому разряду. Как и в более ранней модели того же типа, рассматривавшейся выше, давление внутри этого шара предполагается пониженным, что в данном случае удерживало бы ионы от электростатического расталкивания. Неустойчивость этой системы, которая должна была бы разрушиться при малейшем отклонении от сферичности, компенсируется, согласно этой теории, неким электромагнитным полем, которое автор подробно не рассматривает, хотя и предполагает, что оно в состоянии сразу же восстановить пограничный слой. Взрыв шара опять-таки объясняется заполнением зоны низкого давления.

В некоторых теориях предполагалось, что шаровая молния состоит из более сложных разнородных смесей. Так, например, одна из теорий утверждала, что шаровая молния состоит из положительно и отрицательно заряженных частиц газа, возникающих при грозовых разрядах, а также из капель воды и твердых частиц [546]. Считалось, что смесь остается стабильной, пока сохраняет высокую температуру, при которой она образовалась, а последующее ее поведение — в частности, взрыв — относи-

лось за счет изменений ее химического состава при остывании. При дальнейшем развитии этой теории было выдвинуто предположение о накоплении энергии в шаровой молнии благодаря ионизации [32, 213]. Если бы все молекулы воздуха были диссоциированы и затем ионизованы, то затраченная на это энергия составляла бы до 150 Дж/см^3 , но в работе предполагалось, что температура шара невысока (последнее допущение было вызвано многочисленными сообщениями о шарах, которые как будто не излучали никакого тепла).

Существование только таких заряженных частиц, как ионизованные молекулы, ионные скопления и заряженные частицы пыли, считалось причиной чрезвычайно медленной рекомбинации, чем и объяснялась длительность свечения шаровой молнии. Свет, исходящий от огненных шаров, приписывался коронным разрядам между неоднородно заряженными частями шара, рекомбинации молекулярных ионов и горению газов внутри него. Длительность свечения шаровой молнии исключала, по мнению автора, вероятность ее образования из плазмы. Если бы тут участвовала плазма, свечение исчезло бы через несколько миллисекунд, как это бывает в обычной молнии. Прилипание свободных электронов с низкими энергиями к молекулам атмосферного кислорода должно резко уменьшить электронную концентрацию. Вещество, из которого состоит шаровая молния, не может считаться плазмой [213] (если понимать под этим электронно-ионный газ), так как в нем после такого прилипания отсутствуют электроны. Таким образом этой теории удалось избежать трудности, которая связана с быстрой рекомбинацией за счет свободных электронов в плазме.

Плазма в атмосферных условиях действительно подвергается быстрой рекомбинации, однако экспериментально полученные оценки коэффициентов рекомбинации не согласуются с выдвинутым в этой теории предположением, что превращение электрона в отрицательный ион замедляет рекомбинацию. На самом деле электронно-ионная рекомбинация газов воздуха может протекать даже несколько медленнее, чем рекомбинация ионов с противоположными зарядами. Следовательно, для объяснения долгого свечения в подобной модели все же пришлось бы

признать значительную роль водяных или твердых частиц. Когда концентрация зарядов уже уменьшилась и имеется значительное число нейтральных молекул, более высокая подвижность электронов действительно может увеличить число рекомбинаций. Накопление большого количества энергии в шаре в виде энергии ионизации означает высокую плотность заряженных частиц, которая обычно связана с высокими температурами.

Постоянство внешнего вида почти всех светящихся сфер, описанных в обзоре Рейла [420], у которых не отмечалось никакого регулярного уменьшения размеров или яркости, а также изменений цвета, было сочтено доказательством того, что никакого расходования первоначального запаса энергии, поддерживающего шар в течение его существования, не происходит. Все эти теории не объясняют возникновения масс приблизительно сферической формы с высокой плотностью заряженных частиц, в которых разделение зарядов сохраняется гораздо дольше, чем можно было бы ожидать, учитывая скорости диффузии и рекомбинации в обычных условиях, и в этом отношении они ничем не лучше более старых теорий газообразного сферического конденсатора.

3. Вихревые структуры

Сложности описанных выше теорий, рассматривающих шаровую молнию как коронный разряд или полую сферу, находящуюся в быстром вращении, привели к появлению теорий шаровой молнии как различного рода вихрей. Подобного рода теория выдвигалась еще в 1859 г., когда образование шаровой молнии было приписано столкновению двух обычных молний, имеющих противоположное направление [109, 337]. Это объяснение неоднократно предлагалось разными исследователями вплоть до настоящего времени, особенно в связи с сообщениями о быстром вращении некоторых шаровых молний [164, 216, 244, 260, 379]. Резкое изменение направления канала молнии, в результате чего на коротком отрезке образуются параллельные, но противоположно направленные токи в разрядах, также выдвигалось в качестве причины возникновения противоположно направленных потоков газа,

порождающих быстрое вращательное вихревое движение [322]. Возникающее в результате образование описывалось как вращающийся слой воздуха нормальной плотности, окружающий разреженный центр, причем центробежная сила вращающегося слоя полностью уравновешивается атмосферным давлением. Рассматривалась также возможность возникновения шаровой молнии при образовании канала обычной молнии. Движущийся вниз лидер, несущий отрицательный заряд, сталкивается с положительно заряженным стримером, поднимающимся от земли, что вызывает аналогичный процесс образования вихря за счет противоположно направленных потоков электронов и ионов [156, 183].

Предполагалось, что источником шаровой молнии может являться также горячая струя газа из канала обычной молнии [73—75]. Магнитное поле, окружающее канал во время мощного разряда молнии, должно быть слабее вблизи выпуклой стенки на изгибе канала, что приводит к выбросу заряженной струи под высоким давлением, как через небольшое отверстие. Проходя через магнитное поле, струя свертывается в кольцо или в шар, содержащий азот и кислород в возбужденных состояниях. Они будут медленно переходить в нормальное состояние, создавая длительное наблюдаемое свечение, если не произойдет какого-либо нарушения, вроде добавления кислорода, которое может вызывать взрыв, резко ускорив этот процесс. Скорость струи диссоциированного и ионизованного газа при температуре в канале молнии примерно 30 000 К была оценена в 10^6 см/с, т. е. как сверхзвуковая. За те несколько миллисекунд, пока по каналу течет ток большой силы, из отверстия в 1 см² может вырваться несколько литров газа. Этого достаточно для возникновения относительно большого шара с диаметром от 10 до 20 см. Такой шар может заключать в себе 10^{11} эрг энергии, учитывая, что энергия возбуждения может достигать 2—12 эВ. Снимки молний, сделанные камерой Бойса [74], показывают яркие области у изгибов канала молнии, сохраняющиеся 10^2 — 10^3 мкс; обычное же время свечения составляет примерно 10 мкс. С этой теорией согласуется и сообщение о том, что шаровая молния как будто возникла в крутом изгибе зигзагообразной молнии [175].

Во время исследования изогнутых искровых разрядов с большой силой тока (100—2000 А) в газах при атмосферном давлении наблюдалось послесвечение, но слишком краткое и недостаточное для объяснения длительного свечения шаровой молнии [110, 111]. Изучение искровых каналов показало, что остаточное свечение не обязательно локализовалось на изгибах. Хотя такое свечение, будь оно более длительным, могло бы использоваться в качестве одного из механизмов излучения шаровой молнии, гипотеза, согласно которой изгибы канала молнии (возможно, содержащие устойчивые скопления заряженных частиц) имеют большую яркость, должна быть, по-видимому, отброшена. Послесвечение разрядов относилось за счет возбужденных нейтральных молекул, вероятность появления которых считалась более высокой, чем вероятность появления ионов и электронов [111]. Наблюдающиеся более яркие области молнии могут появиться в результате того, что данные отрезки канала молнии располагаются вдоль линии зрения. Такие отрезки могут находиться на изгибах, которые наблюдатель видит в следе молнии, движущейся поперек его поля зрения. Позднейшее изучение каналов молнии показало, однако, что яркие области существуют в изгибах в 10—100 раз дольше, чем на прямых отрезках [74].

После того как многочисленные огненные шары наблюдались во время ночного торнадо во Франции в 1890 г., было выдвинуто предположение, что небольшие вихри, представляющие собой шаровые молнии, возникают в атмосфере под воздействием смерчей, циклонов и торнадо [148, 149]. Наблюдатели сообщали о маленьких сферах величиной с бильярдный шар, которые быстро двигались вместе со смерчем. Один из них ударился о землю и взорвался. Ярко-красный шар величиной с человеческую голову медленно вплыл в сарай, зажег сено и исчез. Несколько человек видели, как к ним в комнаты через дымоходы влетали светящиеся сферы. На многих окнах, обращенных в сторону урагана, были обнаружены отверстия с гладкими краями около 8 см в диаметре, словно выплавленные в стекле.

Согласно этой точке зрения, шаровая молния представляет собой вращающуюся сферу, несущую большой

заряд, которая отделяется от нижнего конца смерча [149]. Возникновение электрического заряда объяснялось трением, которое испытывают во время бури стремительно летящие капли воды, градины, ледяные и другие твердые частицы. Самумы — пылевые смерчи, представляющие собой быстро вращающиеся столбы теплого воздуха, которые засасывают песок, — чаще всего возникают в пустынях. Большой смерч такого типа [161], около 8 м в диаметре и 100—200 м высотой, создавал поля напряженностью от -450 до $+300$ В/м. Таким образом, свет шара, согласно этой теории, может быть близок к синевioletовому свечению, испускавшемуся заряженными водяными капельками в рассмотренных выше экспериментах [331]. Было предложено, что изолирующую стенку, которой не хватало старым теориям, рассматривавшим шаровую молнию как сферический конденсатор, образует быстро вращающийся газ. Однако в более поздней попытке опровергнуть существование шаровой молнии несколько сообщений о светящихся шарах были объяснены тем, что свет исходил от смерчей, никак не связанных с шаровой молнией [197, 268].

Первоначальная теория в качестве доказательства образования шаровой молнии смерчем указывала на предполагаемую разницу частоты появления шаровой молнии в зависимости от высоты [149]. Утверждалось, что, несмотря на значительную грозовую активность на больших высотах, шаровая молния там очень редка — это приписывалось отсутствию в высокогорных областях пылевых смерчей. Этот вывод согласуется с наблюдениями, проведенными в южноамериканских Кордильерах, где обычны несколько особых форм грозовых разрядов, но шаровая молния неизвестна [255], а также недавно в Швейцарии, где исследователь-метеоролог за 16 лет систематических наблюдений за грозами ни разу не заметил никаких признаков этого явления [43]. Тем не менее шаровая молния наблюдалась на горных пиках достаточно часто [117, 308, 413, 429, 490], и распространено мнение, что в таких местностях шаровая молния, наоборот, появляется чаще [461].

Появление светящихся шаров во время больших быстро вращающихся смерчей было, по-видимому, известно очень давно [145], и вполне возможно, что шары возника-

ют вообще в смерче, а не только у нижнего его конца [551]. Выдвигалось предположение о тесной связи между образованием шаровой молнии и торнадо [53, 60, 551]. В 1905 г. специально доказывалось в общетеоретической форме [85] объединенное действие электрических и гидродинамических сил, создающих шаровую молнию в виде вихря сильно ионизованных частиц. Френкель описал сферический вихрь как смесь облачных капель или пыли с газом, которая под воздействием предшествовавшей вспышки молнии слагается в структуру, напоминающую гидродинамический вихрь Хилла [166, 277]. Однако обычная циркуляция вещества внутри вихря в этой теории была заменена чередующимися слоями разделенных электрических зарядов равной величины, так что вихрь в целом оказывался нейтральным. Быстрое движение заряженных слоев связывалось с магнитными полями, которые сжимают промежуточные воздушные оболочки. Эта структура, таким образом, является также и магнитогидродинамической моделью, другие примеры которой будут рассмотрены в плазменных моделях шаровой молнии. Энергия такого шара невелика, примерно 0,03 кВт·ч; химически активные газы, образующие шар, вступают в реакции, передавая энергию аэрозольным частицам и нагревая их до свечения.

При попытке объяснить действие деионизатора Куньяра — устройства для защиты от молнии линий высокого напряжения — шаровая молния была описана как облако ионизованного воздуха, представляющее собой «вихревую молнию» [139]. Светящиеся сферы, которые, как сообщалось, движутся по таким линиям, образуются, согласно этой теории, в результате стягивания ионного облака, которое ветер гонит затем по проводу. Приспособление, созданное на основе этой теории, оказалось очень эффективным против различных грозовых повреждений и воздействий, однако никаких конкретных данных об участии в этих явлениях шаровой молнии не имеется. Существует и другое объяснение движущихся по проводам светящихся масс, согласно которому они представляют собой коронный или тлеющий разряд, вызванный крайней перегрузкой, возникающей на линии вслед за обычным разрядом молнии, и сходный с шаровыми разрядами, об-

разующимся при прохождении тока между двумя электродами через плохо проводящую среду [273]. Увеличение напряженности внешнего поля вокруг линии во время грозы также может вызвать этот эффект при почти нормальной форме тока в нагруженной линии.

Недавно один исследователь, прежде склонявшийся к теории ядерных реакций [121], выдвинул предположение, что шаровая молния возникает исключительно как результат динамического воздействия воздушного вихря и не имеет связи с обычной молнией [122]. Сообщения о шарах, отскакивавших от почвы, он приписывал гироскопической жесткости и упругости, возникающим благодаря чрезвычайно высокой скорости вращения, достаточной для ионизации воздуха вследствие столкновения молекул. Предполагалось, что сфера остается стабильной до тех пор, пока сохраняются скорости выше порога ионизации. По мнению этого исследователя, такой вихрь можно воссоздать в лабораторных условиях при помощи ультрацентрифугирования или газовых струй со сверхзвуковыми скоростями. В качестве низкоэнергетических аналогов шаровой молнии он указал вращающиеся массы воздуха, которые возникают при залпах орудий крупного калибра — движется такой вихрь медленно, но вращается настолько быстро, что срывает с деревьев листья и ветки [292].

Несравненно большую энергию, демонстрируемую иногда шаровой молнией, о чем свидетельствует гибель животных, расплавление стекла, испарение металлов и смещение предметов, эта теория объясняет тем, что в молнии удерживаются заряженные частицы (видимо, только одного знака), вращающиеся в кольце. Удержанию их способствует магнитное поле, возникающее благодаря вращению заряженных частиц не только по тороидальным орбитам вдоль кольца, но и по полоидальным орбитам по окружности сечения [292]. Чтобы создать такой вихрь искусственно, предлагалось пропустить разряд тока большой силы через кольцо из тонкой проволоки. Возникновение шаровой молнии при вихревом движении электронов обосновывалось фактом ее образования на носу самолета после удара линейной молнии [33]. Согласно этой теории шаровая молния возникла в резуль-

тате деформации слоя заряженных газовых частиц на поверхности самолета. Поток плазмы, направленный перпендикулярно параболической поверхности носа самолета, вызвал некоторые изменения в этом поверхностном слое, и от него, возможно, отделились плазменные образования с малым временем жизни.

Теории вихревого движения дают прямое объяснение многочисленным наблюдениям, указывающим на вращение шаровой молнии. Образование светящихся сфер этого типа можно отнести и за счет предшествующей вспышки линейной молнии, и за счет гидродинамического воздействия смерча. Таким образом, подобные теории предлагают довольно широкий диапазон решений, и шаровая молния, согласно им, может представлять собой в первую очередь электрическое, но, возможно, и чисто гидродинамическое образование, в котором электрические заряды, если они вообще присутствуют, являются побочным результатом механических процессов. Подобные теории вихря можно с равным успехом отнести к разделу теорий электрического разряда или — особенно в новейших случаях — теории плазмы. Но ни одно из исследований шаровой молнии как вихря не нашло пути к преодолению тех серьезных трудностей, на объяснении которых терпели крушение другие теории — например, непрерывного свечения шаров в течение долгого времени, пока они движутся внутри зданий. Если вихрь — изолированная автономная сфера, его энергия в самое короткое время будет израсходована на преодоление вязкого сопротивления и на возмущения. Лишь очень немногие наблюдения, произведенные со значительного расстояния и касавшиеся слабо светящихся объектов, связанных с такими характерными механическими эффектами, как смещение небольших предметов, могут быть объяснены действием мелких смерчей.

И. Шаровая молния как электрический разряд

В большинстве достаточно полных теоретических исследований шаровой молнии она рассматривается как особая форма электрического разряда, подходящие условия для которого осуществляются в природе весьма ред-

ко. В отличие от химических теорий, теории облака молекулярных ионов и теории плазменного сгустка, согласно которым шаровая молния в определенном смысле слова представляется явлением вторичным, так как состоит из веществ, возникающих благодаря предшествующей вспышке обычной молнии, здесь шаровая молния сама рассматривается как электрический разряд или особая область такого разряда. Фарадей в свое время отнесся к такой концепции с сомнением, поскольку поведение этих светящихся сфер совершенно не согласовывалось со свойствами известных ему электрических разрядов [147]. Он утверждал, что шары эти не могут быть отнесены к молниям или другим атмосферным электрическим разрядам, поскольку в таком случае они должны были бы двигаться с большой скоростью и существовать очень недолго. Позже другие исследователи также высказывали это мнение, опираясь в своих выводах на отсутствие сходства между электрическими разрядами и шаровой молнией [480], а также на сообщения о том, что светящиеся массы катились по сырой земле и не воспламеняли горючие вещества, тем самым опровергая любую возможность считать их электрическими разрядами какого бы то ни было типа [164].

Однако вскоре после того, как Фарадей опубликовал свое мнение, ведущий английский специалист по молниям Сноу Гаррис указал, что шаровая молния сопоставима с другими типами молний: она, по-видимому, возникает из электрического разряда, но не из искрового, а из кистевого или тлеющего, т. е. разряда того типа, который изучал Фарадей [200]. В следующие 125 лет это предположение неоднократно выдвигалось вновь в многочисленных экспериментальных и теоретических исследованиях таких разрядов, предпринимаемых нередко специально для выяснения природы шаровой молнии, причем в таких исследованиях рассматривались разряды и переменного тока. В дальнейшем на какие-то периоды времени большинство исследователей придерживалось точки зрения Гарриса, но нередко в иных и более развернутых формах повторялось и мнение Фарадея.

В ранних опытах дю Монселя [340] с индукционной катушкой, в разрыве электрической цепи которой поме-

щались изоляторы вроде стекла или лакированной доски, смоченные водой, возникали красноватые сферы; сам исследователь и те, кто повторял его опыты, рассматривали их в качестве небольших моделей шаровой молнии [340].

Дю Монсель полагал, что шаровая молния — это видимая область, образованная в электрическом разряде из облака при проникновении слоя сухого воздуха в насыщенную влагой атмосферу. Такой разряд, считал он, происходит, когда не хватает энергии для линейной молнии, аналогично тому, что наблюдается в экспериментах, когда напряжение недостаточно для искрового пробоя широкого промежутка. В сухом воздухе может наблюдаться послесвечение, но если воздух влажен, светящаяся масса движется. Дю Монсель считал, что сферическая форма является следствием аэродинамических процессов, связанных с тем, что разряд происходит в среде, обладающей большим сопротивлением. Он создал такой разряд в середине пламени свечи. Шипение, о котором часто сообщается в связи с шаровой молнией, он сопоставил со звуком от коронного разряда. Дю Монсель высказал предположение, что электрические заряды, участвующие в образовании шаровой молнии, могут разрядиться в виде обычной молнии, отчего шар исчезнет.

Механизм образования шаровой молнии, рассматриваемый в другой теории, предполагает тесную взаимосвязь между шаровой и линейной молниями. Согласно этой теории тлеющий или кистевой разряд, обладающий очень яркой передней частью, которая и представляет собой шаровую молнию, порождается выступом грозового облака [385]. Наблюдаемое движение светящейся сферы рассматривается как распространение разряда в среде, а не как реальное передвижение какого-либо объекта. Передаче заряда от облака к движущемуся огненному шару способствует присутствие капель воды. Достигая земли, шаровая молния создает проводящий канал, в котором может сразу же наблюдаться вспышка обычной молнии. Если использовать более позднюю терминологию, эта теория считает шаровую молнию аномально ярко светящимся фронтом продвигающегося вперед лидера.

При экспериментальном изучении электрических раз-

рядов в газах при пониженном давлении, а также в воздухе, продолжались попытки искусственно воссоздать величественные явления, наблюдаемые во время гроз. С помощью индукционной катушки в трубке, наполненной разреженным газом, были получены сферические образования [588]. Создание длинной искры в воздухе с помощью электрических машин, способных создавать значительные напряжения, обычно сравнивалось с возникновением линейной молнии; однако при исследовании разрядов, создававшихся с помощью такой машины в различных условиях, моделью шаровой молнии сочли не кистевой разряд, а свечение, возникавшее на положительном электроде [539]. Тонкую полоску древесины укрепляли на отрицательном электроде так, что оба ее конца были несколько отогнуты в сторону положительного электрода — латунного шарика диаметром 2,5 см. При создании разности потенциалов на положительном электроде появлялись два ярких пятна, которые при вращении этого электрода оставались неподвижными. Если же вращали отрицательный электрод с укрепленной на нем полоской, положение пятен соответственно менялось. Исследователь сравнил это явление с образованием шаровой молнии, причем провел аналогию между выступающими концами полоски и выступом отрицательно заряженного облака. Предполагалось, что движение облачного выступа во время грозы заставляет светящееся яркое пятно на земле двигаться подобно тому, как это происходит с шаровой молнией. Разряды с заземленных проводников, например водопроводных кранов, напоминающие коронные разряды и возникающие вслед за вспышкой обычной молнии, нередко принимались за шаровую молнию, и подобные сообщения послужили основой для распространенного мнения, что шаровая молния представляет собой именно эту переходную форму между тлеющим и искровым разрядами [519, 548].

Исследования, которые с 1875 г. вел Планте, изучая электрический пробой между пластинами конденсаторов при увеличении числа элементов подключенных к ним свинцовых аккумуляторных батарей, первоначально были направлены на решение проблемы шаровой молнии. С помощью батарей из 40 элементов, а позже из 1600,

обеспечивавшей напряжение в 4000 В, создавались небольшие светящиеся сферы. Наименьших напряжений требовало возникновение маленьких сфер между электродами из платиновой проволоки, помещенными в соленую воду [387]. Светящиеся сферы находились в постоянном движении и испускали потрескивание, которое часто завершалось взрывом. На такие эксперименты ссылались при объяснении шумов в [тропическом] циклоне и образовании огненных шаров на конце смерча. При еще больших батареях разряд, в котором образовывалась сферическая поверхность, возникал между проволочным электродом и поверхностью воды или металлическим диском, покрытым увлажненной фильтровальной бумагой [390]. Разряд медленно двигался в плоскости, следуя за движением электрода. Сходные сферические разряды возникали, когда батарея подсоединялась к конденсаторам со слюдяными дисковыми прокладками или прокладками из мокрой бумаги. Эти сферы имели до 1 см в диаметре и существовали 1—2 мин. Разряд иногда пробивал отверстия в тонких слоях слюды или в эбонитовых изолирующих прокладках конденсаторов [390, 391].

Разряды постоянного тока, изучавшиеся в этих исследованиях, во многих отношениях напоминали те, которые наблюдались в ранних экспериментах дю Монсея [340], а также в более поздних исследованиях фон Лепеля [278]. Планте высказал предположение, что изучение гальванических токов в конце концов поможет определить заряд шаровой молнии, который, как он думал, окажется положительным [387]. Его точка зрения относительно природы шаровой молнии сильно менялась от публикации к публикации на протяжении 10 лет. Вслед за первым предположением, что естественные шары — это просто некоторое электрически заряженное вещество, образуемое грозowymi разрядами во влажном воздухе, он принял, что конденсация положительно заряженного вещества происходит в сферической оболочке из разреженного воздуха, паров металлов и подвергшихся разложению водяных паров. Однако эксперименты с влажными конденсаторными прокладками уже указывали, что пары металлов не являются необходимым компонентом. Планте предположил, что шаровая молния возникает в результате замедлен-

ного и неполного разряда из грозового облака, в котором накоплен большой электрический заряд, если нижняя часть такого облака есть насыщенный водой и потому хорошо проводящий столб воздуха, приближающийся к земле [391]. Этот столб играет ту же роль, что и платиновый электрод в лабораторных экспериментах, а необходимость в сильно заряженном облаке обосновывалась тем, что более эффективно образование долгоживущих шаровидных разрядов происходит при использовании батарей с большим напряжением. Электрический разряд, образующийся при тех же условиях, что и в лабораторных экспериментах, рассматривался как «своего рода электрическое яйцо без стеклянной оболочки» — это опять-таки напоминает модели распределения зарядов типа сферического конденсатора, рассмотренные выше [391]. Светящаяся масса сама по себе неопасна, в доказательство чего приводилось значительное воздействие легчайшего движения воздуха на полученные в лаборатории шарики и о чем свидетельствовало поведение шаровой молнии в тех случаях, когда ее появление не имело вредных последствий. Однако само ее появление служит сигналом большой опасности, так как шар указывает наиболее удобный путь разряду из грозового облака, часть заряда которого, вообще говоря, уже разрядилась через этот шар. Роль, приписанная теорией Планте проводящему каналу, по которому проходит электрический ток от облака к огненному шару, предвосхищает использование этого механизма в последующих более широко принятых теориях, вроде теории Теплера, которая в других отношениях вовсе не сходна с теорией Планте.

Эксперименты Планте считались существеннейшим вкладом в решение проблемы шаровой молнии [453, 565], хотя и признавалось, что остаются нерешенными основные вопросы: форма шаровой молнии, ее проникновение в закрытые помещения и идентификация естественных объектов, играющих в природных условиях роль проводящих электродов лабораторных экспериментов. В случае когда шипящий огненный шар появился вслед за ударом молнии, предполагалось, что роль электрода сложной формы могли сыграть железная решетка на окне и дверь [545]. В дальнейших исследованиях подобных разрядов,

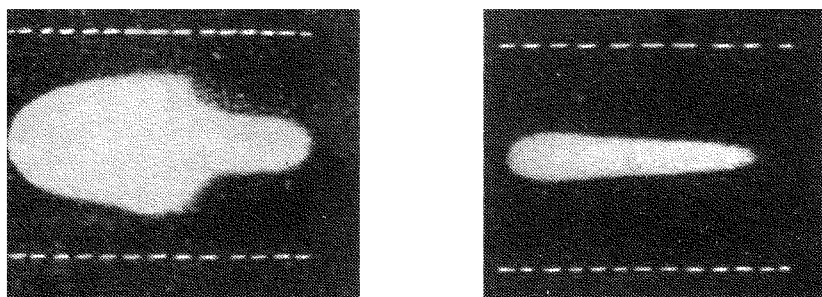


Рис. 20. Светящиеся массы, возникшие в экспериментах с электрическими разрядами.

проводившихся Риги и др. [368, 432], были получены большие светящиеся массы, обладавшие малыми скоростями и большими временами жизни, что обычно приписывается шаровой молнии. Изображение светящейся массы на рис. 20 — единственная фотография, опубликованная именно как фотография искусственной шаровой молнии [527], — было получено при повторении экспериментов Риги. На изображении большего разряда виден туманный ореол, частично окружающий центральную светящуюся массу. Такие ореолы нередко упоминались в сообщениях о естественной шаровой молнии.

В дальнейших опытах с электрическими разрядами, когда положительный электрод, как и в опытах дю Монсея, представлял собой пластину, покрытую изолирующим материалом, были получены подобные красные сферы [386]. Взяв за основу эксперименты Крукса по разряду в воздухе между электродами вторичной обмотки индукционной катушки переменного тока [113], Гезехус изучал [207, 208] характер разряда переменного тока при напряжении 10 000 В и электродах разной формы из различных материалов. В качестве электродов использовались металлические пластины, поверхность воды, водяные столбы и влажные губки. Между медной пластиной и поверхностью воды, разделенными расстоянием 2—4 см, возникал очень подвижный разряд постоянно изменяющейся формы. Иногда пламя было коническим, иногда возникали овальные и шаровидные формы. Цвет в зависимости от напряжения менялся от красного и желтого до

синего, фиолетового и белого. Огненный шар ни на мгновение не оставался неподвижным, он двигался взад и вперед по пластине, издавая потрескивание. Часто он разделялся на отдельные части, которые затем опять сливались. В нескольких дюймах от разряда не ощущалось никакого тепла. В стеклянном колоколе, помещенном над прибором, собрались пары двуокиси азота. Особенно легко шаровидный разряд возникал между заостренным электродом и поверхностью воды, разделенными небольшим расстоянием.

Согласно сообщению Гезехуса, при медленном уменьшении расстояния после возникновения шара тот бесшумно исчезал; но если расстояние увеличивалось, шар превращался в обычную искру, издавая громкий треск, напоминающий взрыв. Воспроизведя в этих экспериментах многие свойства, проявляемые шаровой молнией, Гезехус пришел к выводу, что шаровая молния представляет собой частный вид атмосферного разряда при переменном токе, при котором «сгорает» азот и образуются его окислы. С водяными столбами образовывались разряды, похожие на четочную молнию. Разряды, исследовавшиеся в этих экспериментах, по-видимому, заметно не отличались от тех, которые получали более ранние исследователи, из чего следует, что переменный ток создает светящиеся сферы, очень похожие на те, о которых сообщал Планте, пользовавшийся такими же электродами, но работавший с постоянным током. Де Янс [230] считал маловероятным, чтобы естественная шаровая молния создавалась как разряд переменного тока.

Светящиеся сферы возникали на отрицательном электроде и в том случае, если два тонких металлических острия, соединенных с электростатической машиной, помещались на светочувствительную эмульсию фотографической пластинки [226, 273]. После отделения такого шара от ярко светящегося отрицательного электрода острие оставалось темным, а маленький шарик двигался к положительному электроду и медленно пересекал пластинку крайне сложным путем, иногда на мгновение останавливаясь. Чтобы покрыть расстояние 5—10 см, разделявшее электроды, шару требовалось от 1 до 4 мин. Иногда шарик разделялся на две-три также светившиеся части, пос-

ле чего каждая часть продолжала двигаться к положительному электроду. Когда шарик достигал этого электрода, свечение исчезало, а источник тока начинал вести себя так, словно его полюсы были соединены проводником. После проявления пластинки на ней был виден путь шарика. Эксперимент был проведен с пластинкой, имеющей вуаль от экспонирования в свете, который не создавал проводимости в светочувствительном слое. Проводимость появилась только после того, как по эмульсии прошли светящиеся шарики.

Теплер провел несколько серий весьма детальных экспериментов с электрическими разрядами постоянного тока и значительно расширил достижения Планте в разработке основ теории шаровой молнии [514]. По мере увеличения силы тока между электродами в воздухе возникали разряды пяти следующих типов: темный разряд, тлеющий разряд, кистевой разряд, кистевая дуга Теплера (слоистый разряд, в котором светящиеся области чередуются с темными слоями) и вольтова дуга, т. е. пламеобразный разряд. Теплер пришел к выводу, что все формы молнии представляют собой кистевые разряды, различающиеся лишь силой тока [517]), и что шаровую молнию больше всего напоминает слоистый разряд — переходный между кистевым разрядом и вольтовой дугой. Положение возникшей между электродами светящейся области можно менять, варьируя ток. Перемещаясь между электродами, эта область огибает пластины, помещенные на прямой линии между электродами, и проникает сквозь небольшие отверстия в этих пластинах [515]. Теплер ставил эксперименты для изучения зависимости свечения разряда от силы тока и пришел к выводу, что даже ток силой 0,01 А может дать очень слабое свечение в области размером с голову ребенка [514].

Исходя из этих наблюдений, Теплер предположил, что естественная шаровая молния возникает в канале, оставшемся после предшествовавшей вспышки обычной молнии. Если во все еще проводящий канал начинает поступать дополнительный ток из других частей грозового облака, то может возникнуть сегментированный разряд, который образует либо четочную, либо шаровую молнию. Согласно описанным экспериментам, для создания хоро-

шо видимого разряда требуется сила тока всего в несколько ампер. Отсюда следует, что энергия шаровой молнии должна быть очень невелика, а причиняемые ею повреждения могут объясняться или первоначальной линейной молнией, или тем, что в канале тут же происходит еще одна ее вспышка. Цвет шаровой молнии должен зависеть от силы тока в канале, так как в экспериментах слабый ток давал голубое свечение, при постепенном его усилении переходившее в темно-красное, кирпично-красное, оранжево-красное и, наконец, в белое.

Движение шаровой молнии было объяснено взаимодействием двух причин: спуск с неба на землю происходит в канале в результате изменения тока, а смещение канала под воздействием ветра создает горизонтальное перемещение. Если поверхность земли, играющая роль катода, является лучшим проводником [65], светящаяся сфера ведет себя спокойно и остается стабильной до момента исчезновения, которое может сопровождаться взрывом. Если же лучший проводник — облако, то шар очень неустойчив и легко изменяет свою форму, он подпрыгивает и испускает искры. Светящийся шар исчезает, когда ток уменьшается, например, из-за вспышки обычной молнии в той же части облака. Наблюдения говорят в пользу такого процесса [452]. О важности той роли, которую приписывала теория Теплера каналу молнии, свидетельствует уже упоминавшееся выше наблюдение: шар, образовавшийся прямо под облаком, медленно опустился к земле по каналу, по которому перед этим прошло несколько разрядов молнии, причем один из них распался в четочную молнию [51]. Отмечавшееся в нескольких случаях удлинение шаровой молнии, когда в верхней или нижней ее части появились выступы, придававшие ей сердцевидную или грушевидную форму, также согласуется с идеей вертикального проводящего канала. Теория Теплера, как и теория Планте, утверждает, что сама по себе шаровая молния опасности не представляет, хотя является индикатором положения потенциально опасного пути, по которому может затем пройти разряд обычной молнии [518].

Предположения, что шаровая молния — это кистевой разряд, можно проследить по меньшей мере до Сноу Гар-

риса; со сходным утверждением выступал и Лодж, указывавший, что источником таких разрядов в присутствии грозовых потенциалов могут быть подземные металлические проводники [288]. После экспериментов с конденсаторами в разреженных газах в качестве модификации теории Теплера была выдвинута идея ионизации без свечения в разреженных каналах в воздухе [527]. Светящаяся область в этом случае возникала бы при увеличении давления в канале.

Хотя вначале казалось, что теория Теплера объясняет ряд свойств шаровой молнии, вскоре выяснилось, что многие наблюдения уложить в ее рамки невозможно. В нескольких случаях шаровая молния появлялась без предшествующей вспышки линейной молнии или же в стороне от места этой вспышки [181, 229, 357, 360, 413]. В подобных случаях приходилось предполагать присутствие несветящегося канала или невидимого разряда, о чем упоминалось выше. Как указали де Янс и Бранд [65, 230], в отличие от экспериментальных разрядов, в которых образуется несколько ярких областей, в проводящем канале должна возникать только одна светящаяся область. Для длительного существования шаровой молнии требуется, чтобы канал, созданный первоначальной молнией, сохранял проводимость столь же долго. Это означает гораздо более длительное время, чем обычно полагают, однако уже упоминавшиеся [512] наблюдения многократных вспышек молний в одном канале [51] показывают, что такое длительное сохранение проводимости возможно.

Эксперименты свидетельствуют, что для поддержания так называемого огненного шара, возникающего при дуговом разряде в парах ртути, достаточно даже очень слабого непрерывного тока, тогда как полное прекращение тока приводит к распаду шара за микросекунды [205]. Этот тип разряда возникает при низком давлении и использовании металлических электродов с низкой точкой кипения и обычно считается самоподдерживающимся газовым разрядом. Разность потенциалов между электродами при этом примерно равна потенциалу ионизации газа. При появлении огненного шара эмиссия электронов с катода, по-видимому, не определяется разогревом его

тепловыми ионами, а является результатом либо туннельного эффекта, например из-за высокой напряженности поля у катода, либо уменьшения рабочей поверхности катода при накоплении вблизи него паров или плазмы высокой плотности. В плазме разряда электроны обладают только тепловой энергией. В дуге же электронный ток более чем в 50 раз превышает ионный. Сходную форму разряда дают низковольтные дуги при подогревном катоде. В этом случае разность потенциалов электродов может быть ниже потенциала ионизации газа [234, 300]. Разряд поддерживается тепловой энергией, получаемой от катода. Потенциал достигает максимума [в области положительного столба, отшнуровавшегося от стенок и имеющего шаровидную конфигурацию. — *Перев.*]. Здесь и происходят возбуждение и ионизация. Типичный шар диаметром 1 мм с голубой сердцевинкой и бледно-розовой оболочкой [300] образуется в аргоне при давлении 6 мм рт. ст. и расстоянии между электродами около 1 см. Однако при более высоких давлениях, и в частности при атмосферном, такого образования шара, по-видимому, не произойдет, на что указывает полученное в экспериментах почти постоянное произведение давления на критическое расстояние между электродами для данного газа при давлении вплоть до 13 мм рт. ст. Изучение вспышек молний с особенно длительным свечением (0,04—0,27 с) показало, что непрерывное свечение происходило в случае, когда имелся непрерывный слабый ток, поддерживавший проводимость канала в разрядах с многократными импульсами [253].

Если, как утверждает теория Теплера, шаровая молния образуется как разряд в проводящем канале молнии, тогда ее размеры должны быть сравнимы с диаметром этого канала [65, 230]. Хотя размеры многих наблюдавшихся шаровых молний хорошо согласуются с типичными диаметрами каналов молнии в 3—12 см, некоторые из них не укладываются в эти пределы. Например, в той же грозе с высокой частотой вспышек, когда наблюдалась шаровая молния, двигавшаяся по каналу предыдущего разряда, при ослаблении грозы у нижнего конца разряда образовались яркие сферы, диаметр которых втрое превосходил диаметр канала молнии [51]. Че-

точная молния как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении перемещается очень мало, и четки сохраняют свое относительное положение. По теории Теплера это означало бы полное отсутствие ветра или же одинаковое движение воздуха вдоль всей линии четок [458]. Шаровая же молния способна совершать значительные передвижения. Один исследователь [354] сделал на этом основании следующий вывод: теория Теплера приложима к четочной молнии, но не к шаровой, которая представляет собой совсем другое явление. Согласно теории Теплера, внутрь помещений шаровая молния попадает потому, что ее несет туда ветер. Упомянутое в некоторых сообщениях движение против ветра этой теорией не объясняется. Не рассматриваются ни вращение сфер, ни их качение по земле.

В числе моментов, не укладывающихся в это объяснение, часто указывается также на появление шаровой молнии в ясную погоду [579] и в закрытых помещениях. Теплер считал появление огней св. Эльма внутри зданий свидетельством в пользу гипотезы, что таким же способом может возникнуть и кистевой разряд [514]. Пятьдесят лет спустя шаровая молния вновь была описана [440] как электрический разряд, стекающий с острия подобно огню св. Эльма, но образующийся в исключительно сильном поле. Сообщения [468] о том, что огонь св. Эльма превращался в движущуюся сферу, срываясь с неподвижного острия, которое абсолютно необходимо для возникновения первоначальной формы — коронного разряда, — дают интересное подтверждение этой теории. Возражения против теории Теплера натолкнули некоторых исследователей на мысль, что представление о кистевом разряде не приложимо к проблеме шаровой молнии, и в поисках других возможностей [480] они обратились к работам Релея о возникновении при разрядах возбужденного азота. Возбужденный азот создает светящуюся массу, которая продолжает светиться и после исчезновения электрического разряда. Следует, однако, заметить, что сам Релей не принял такого объяснения шаровой молнии.

Через 50 лет после исследований Теплера шаровую молнию вновь стали связывать с разрядом постоянного тока, отчасти из-за того, что вопрос об удержании плаз-

мы был весьма труден для исследования даже в теоретических моделях. Велось дальнейшее экспериментальное изучение разряда между положительно заряженным острием и плоским или кольцевым электродом [483]. Кроме обычного коронного разряда, удалось получить только один стабильный разряд — линейный. Со смоченными водой или изолированными электродами, с которыми работал Планте, эксперименты не проводились и никаких шаровидных разрядов отмечено не было.

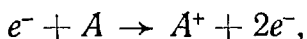
В дальнейшем теоретическом исследовании шаровой молнии рассматривались разряды постоянного тока, имеющие сферическую форму и существующие при малой величине тока в электрическом поле после разряда линейной молнии [151]. Такая сфера представляет собой область с высокой проводимостью, что обуславливает большую плотность в ней токовых линий и силовых линий электрического поля, которые сходятся сюда из обширных близлежащих областей. Проводимость зависит от квадрата напряженности поля. Быстро убывающее с расстоянием дипольное поле в этой модели не может определить какую-либо силу, способную уравновесить архимедову силу, действующую на шар, более нагретый, чем окружающий воздух, и удержать его тем самым на определенной высоте.

Светящиеся сферы, возникавшие при высокочастотном разряде и рассматривавшиеся как возможные экспериментальные модели шаровой молнии [405], обладали температурой 2000—2500 К. Действие таких температур исследовалось на мыльных пузырях, наполненных гелием, плотность которого при 2200° К приближается к плотности воздуха. Собственный вес пузырей крайне мал — наполненные воздухом, они опускаются очень медленно; наполненные же гелием, пузыри диаметром 20—35 см поднимались в воздухе, достигая максимальной скорости 120 см/с. Пузыри большего размера становились близки по форме сжатым сфероидам, что приводило к большему их торможению в воздухе и не позволяло достичь более высоких скоростей. В этих условиях шару диаметром 20 см для компенсации потери энергии горячим газом требуется мощность примерно 10 000 Вт.

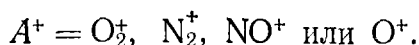
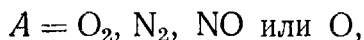
Для получения модели, в которой подъемная сила бы-

ла бы уравновешена и тлеющий разряд удерживался на постоянной высоте, Пауэлл и Финклстайн переработали теорию дипольной области тлеющего разряда в теорию положительно заряженной сферы [405]. В ней принимается, что огненный шар возникает как остаток вспышки обычной молнии или в результате преобразования огня св. Эльма. Сама теория рассматривает процессы, благодаря которым сфера сохраняется на отмечаемый очевидцами долгий срок. Электроны, обладая по сравнению с ионами большей скоростью, покидают шар, в результате чего он заряжается положительно. Приземное электрическое поле после удара молнии меняет знак на противоположный и действует в направлении, обратном подъемной силе.

Сферы, полученные с помощью высокочастотных разрядов в резонаторах, оставались видимыми в течение 0,5—1 с после отключения тока [404]. Для таких же разрядов постоянного тока столь долгое свечение после отключения тока экспериментально показано не было. Это время было сочтено длительностью жизни шаровой молнии за счет внутренней энергии, полученной ею в момент образования, а в течение более долгого периода разряд предположительно удерживается за счет энергии изменившего направление электростатического поля земли с градиентом 2000 В/см [405]. Это поле, которое может сохраняться несколько секунд после удара молнии, обеспечивает дополнительную ионизацию. Основным механизмом ионизации является обычный процесс размножения электронов, предложенный Таунсендом и заключающийся в том, что электрон, обладающий в электрическом поле достаточной энергией, может ионизовать нейтральную частицу, порождая добавочный электрон и ион:



где



Эксперименты показали, что для получения одного дополнительного электрона в поле 2000 В/см с помощью этого процесса необходимо, чтобы пробег электрона в

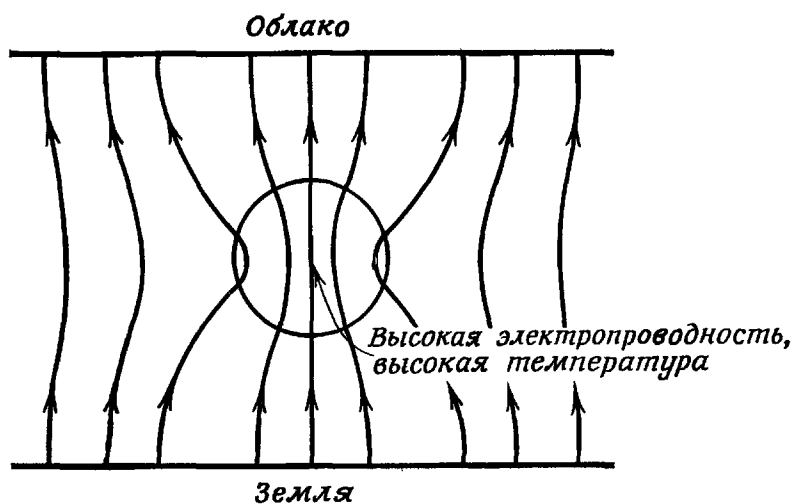


Рис 21 Модель шаровой молнии, полученная в результате прямого электрического разряда

воздухе составлял примерно 7 см. В воздухе при равновесном состоянии, соответствующем температуре 3500 К, для получения добавочного электрона достаточно пути менее 1 см, если имеют место процессы начальной ионизации. Предполагается, что предварительный разряд молнии (который эта теория считает необходимым) способен создать условия в атмосфере, благоприятные для таунсендовского размножения электронов. Достаточно интенсивно размножение происходит при температуре выше 2000 К.

Электроны вводятся в светящийся шар с обширного участка ниже него, как показывает направленное вверх движение тока на рис 21. Положительные ионы оставляют шар, стекая вниз, в поле, которое поддерживает положительно заряженный шар. На движение такой сферы должно воздействовать притяжение проводников. Это объяснение поведения шаровой молнии сходно с тем, которое выдвигается в плазменной теории — а именно что истечение электронов из естественных огненных шаров в форме коронного разряда создает положительный заряд [128]. Взрыв может произойти при контакте с проводником из-за быстрого нагревания в результате резкого увеличения потока электронов, увеличение ионизации при

этом может способствовать разряду молнии, или же метастабильные молекулы шара могут внезапно высвободить свою энергию.

Был проведен расчет одномерной модели развития разряда, для чего использовались уравнения, описывающие изменение во времени: концентрации положительных ионов

$$\frac{\partial n^+}{\partial t} = \alpha_x |I_v^-| - \frac{\partial I_x^+}{\partial x}$$

и концентрации электронов

$$\frac{\partial n^-}{\partial t} = \sigma_x |I_v^-| - \frac{\partial I_x^-}{\partial x},$$

уравнение Пуассона для электрического поля

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} = l(n^+ - n^-)/\epsilon_0,$$

уравнение для потока электронов

$$\Gamma_v^- = -\mu^- n^- E_x$$

и потока положительных ионов

$$I_x^+ = \mu^+ n^+ + E_x.$$

Здесь n — концентрация ионов или электронов (верхние индексы «+» или «-» показывают, что величины относятся к ионам или электронам соответственно), I_x — поток ионов или электронов, E_x — электрическое поле, μ — подвижность (~ 26 см²/В в 1 с для положительных ионов, $4 \cdot 10^3$ для электронов); ϵ_0 — диэлектрическая постоянная среды; α_x — коэффициент Таунсенда, который определяется как число свободных электронов, образуемых при соударении с частицами газа одним электроном на 1 см своего пути; этот коэффициент связан с напряженностью электрического поля соотношением

$$\alpha_x = A \exp(-B/E_x),$$

где A и B — эмпирические константы. Числовые решения были получены при следующих граничных и начальных условиях:

$$\begin{aligned} I_v^-(x=0) &= 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \\ I_x^+(x=R_0) &= 0, \\ n^+(t=0) &= n^-(t=0) = 0 \end{aligned}$$

и внешнем поле

$$E_0 \equiv [E(0) + E(R_0)]/2,$$

которое также является полем в центре заряда слоя толщиной R_0 . Учет того, что полный заряд шара отличен от нуля, имеет следствием в этой модели отличное от нуля поле на бесконечности. Расчеты были проведены для разряда при 1 атм и 3000 К во внешнем поле 1750 В/см и при входящем в слой электронном токе 10^{-8} А/см². Устойчивое решение получалось уже для времени, большего $\sim 10^{-4}$ с, что соответствует времени, за которое один ион проходит область разряда. В результате накопления положительных ионов происходит резкое уменьшение электрического поля с 3400 В/см до 60 В/см и увеличение толщины разрядного слоя от 0 до 4 см. При толщине более 4 см концентрации электронов и положительных ионов почти равны, и влияние объемного заряда на поле крайне мало. При этой толщине токи из шара также становятся постоянными, причем ток положительных ионов, направленный вниз, к земле, чуть меньше 10^{-7} А/см², а ток электронов, направленный вверх, равен 10^{-5} А/см².

Равновесный размер сферы с учетом потерь энергии устойчив в отличие от температуры, которая заметно меняется, причем потери на излучение пропорциональны четвертой степени температуры, а потери за счет теплопроводности прямо пропорциональны ей, в то время как прирост энергии при увеличении температуры в основном определяется линейным увеличением подвижности заряженных частиц. Стабилизация в этом случае обеспечивается за счет излучения. Важнейшими процессами, определяющими радиус шара, являются поступление энергии, потери на излучение, конвективные потери и перемешивание. Подобно тому как потери на излучение стабилизируют

ют температуру, так и размер стабилизируется за счет конвективных потерь, причем и радиус и температура определяются конкретными условиями, наиболее важным из которых является внешнее поле.

Свечение шаровых молний приписывалось электролюминесценции воздуха — его частицы, перешедшие после соударений с электронами в метастабильные состояния с большими временами существования, должны постепенно передать накопленную ими энергию частицам, быстро переизлучающим ее в видимой области спектра, например молекулам углекислого газа.

В качестве наиболее вероятных из долгоживущих метастабильных молекул были названы молекулы кислорода $O_2(a^1\Delta_g^+)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$, времена жизни которых составляют соответственно 45 мин и 8 с. Обе молекулы сохраняют относительную устойчивость до 2000 К. Первая из них наблюдается в количестве свыше 10% в микроволновых разрядах, а вторая является источником сильного излучения при взрывах окиси углерода и кислорода под давлением в несколько атмосфер. Однако, согласно оценкам, потеря энергии в этих состояниях при соударениях с частицами воздуха при давлении 1 атм и температуре 2000 К должна была бы произойти уже через секунду или малую долю секунды для каждого соответствующего состояния, и тот же процесс заведомо исключает из рассмотрения возбужденные молекулы азота $N_2(A^3\Sigma_u^+)$.

Высокочастотные разряды давали особенно яркое излучение при 2000—2500 К, которое у газа в тепловом равновесии могло бы появиться только при более высоких температурах — порядка 4000 К. Согласно этой теории неравновесная концентрация частиц в возбужденном состоянии обуславливается процессами столкновений в электрическом поле после вспышки. Световое излучение высокочастотного разряда мощностью в 50 Вт было уже весьма ярким. Значительно больший приток энергии требуется для поддержания температуры и процессов возбуждения, особенно если происходит смешивание с внешними газами. Видимое излучение высокочастотных разрядов в воздухе представляет собой в основном континуум двуокиси углерода. Были зарегистрированы также кислородные полосы Шумана — Рунге, а также полосы

гидроксила OH и молекулы CO . Возможно также, что и органические загрязнения в экспериментальной установке являются источниками света, переизлучаемого их возбужденными молекулами, которые, согласно этой теории, получают энергию от молекул кислорода в метастабильном состоянии. Сами эти молекулы кислорода не дают видимого излучения в высокочастотных разрядах, возможно потому, что устойчивы они более длительное время, чем период видимого свечения разрядов после отключения тока, или потому, что условия для передачи энергии быстро переизлучающим молекулам более благоприятны.

Долго державшийся свет линейной молнии, которая перешла затем в четочную [68], также был приписан присутствию метастабильных возбужденных частиц, на чем строится теория, развитая в работе [405]. Однако изучение долгосветящихся вспышек молний показывает, что между импульсами в канале сохранялся ток, из чего следует, что длительное свечение может объясняться и прямым возбуждением быстро высвечивающихся частиц [253]. Прямое их возбуждение может произойти также и без посредства метастабильных молекул [с большим временем жизни]: для этого достаточно электрического поля с обратной полярностью, возникающего вслед за обычной молнией и существующего достаточно долго. О светящихся сферах, длительно существующих после отключения источника разрядов постоянного тока, сообщений не имеется.

Тот факт, что шаровая молния существовала в самолетах на протяжении времени, которое превышало период распада, полученный в экспериментальных разрядах высокой частоты, был отнесен за счет резонансного возбуждения СВЧ-колебаний в фюзеляже внешним разрядом постоянного тока.

В такой же модели шаровой молнии сделан вывод: теплопроводность и электропроводность — нелинейные функции, причем зависят они не только от тока и напряженности поля, а и от температуры [532]. В тепловом балансе такой модели предполагается, что температура поддерживается за счет энергии внешнего электрического поля, а в качестве механизма потери энергии рассматри-

вается только теплопроводность. Условие, необходимое для возникновения подобного разряда, — это существование некоторого объема нагретого воздуха, например в остывшем проводящем канале, оставшемся после вспышки молнии, как и в теории Теплера. Сформированный таким образом шар диаметром 20 см и температурой в центре 5000 К имеет запас энергии 2000 Дж и излучает 100 Вт в видимой области спектра, создавая свечение приблизительно такое же, как и 1000-ваттная лампа. Время, требуемое для остывания шара таких размеров, содержащего воздух с первоначальной температурой в несколько тысяч градусов, при прекращении дальнейшего поступления энергии составляет несколько секунд [535]. При этом учитывались только потери энергии за счет теплопроводности при обычных условиях баланса энергии и импульса, а также при сохранении массы шара. Давление в шаре было принято равным атмосферному и никакие изменения давления не рассматривались. Свечение шара должно уменьшаться при остывании от 5000 К на порядок и более на каждую тысячу градусов, причем падение до 3000 К должно происходить примерно за 1,5 с. Однако автор указывает, что во многих наблюдениях яркость огненных шаров была, по-видимому, постоянной, а не уменьшалась, как это должно происходить согласно модели. Кроме того, горячая сфера должна была бы быстро подниматься при отсутствии силы, которая смогла бы удерживать шар в одном положении, противодействуя всплыванию. Ни в одном случае нет объяснений, каким образом удерживаются в области шара нагретые газы, поскольку даже при отсутствии давления, превышающего давление окружающей атмосферы, обладающие большой скоростью молекулы быстро диффундировали бы из области шара.

В этих более поздних теориях шаровой молнии были сделаны попытки аналитического описания электрических разрядов, относительно которых уже давно предполагалось, что они могли бы служить в качестве возможных моделей шаровой молнии. Этим исследованиям пока еще не удалось преодолеть тех трудностей, с которыми сталкиваются теории разряда при попытке объяснить отмечавшиеся в наблюдениях свойства шаровой молнии. Общая энергия, предполагаемая для таких сфер, в 10^3 раз мень-

ше той, которой, согласно оценке, обладала шаровая молния, вскипятившая бочку воды; с другой стороны, названные выше величины температур показывают, что это и не абсолютно холодные шары, от которых совсем не исходит тепло [184, 345].

Теории, рассматривающие шаровую молнию как некоторый вид электрического разряда (что позволяет связать ее с другими видами разрядов при грозах), разработаны шире и детальнее всех остальных теорий шаровой молнии. Эта модель обладает тем преимуществом, что позволяет принять во внимание в расчетах мощные источники энергии, которые, несомненно, имеются в грозах. Однако некоторые из наиболее своеобразных свойств шаровой молнии — движение, появление в закрытых помещениях, а также в отдельных случаях полное безразличие к проводникам — остаются необъясненными, что составляет частные трудности для этой теории.

К. Светящиеся сферы из испаренных веществ

В ранней работе о вспышках молнии, в которой было высказано предположение о том, что шаровая молния может быть тлеющим или кистевым разрядом, Сноу Гаррис, кроме того, описал образование раскаленных металлических шариков при помощи электрического разряда, пропущенного через проволоку [200]. В экспериментах Ван-Марума [538], описанных им в 1800 г., из железных, медных и свинцовых проволок неоднократно возникали подвижные сферы, которые отскакивали от холодной поверхности. Предположения, что шаровая молния — это не электрический разряд, а светящееся раскаленное вещество [524] или, в частности, раскаленный металл, прямо были высказаны гораздо позднее [355]. Планте сравнивал четочную молнию, возникшую из обычной, с сегментированной раскаленной цепочкой, которую электрический разряд создает из металлической проволоки [389].

Некоторые из наблюдений шаровой молнии указывают на возможность того, что первоначальная линейная молния может породить светящуюся сферу, ударив в какое-то твердое вещество и испарив его. Появление огненного шара, который катится от дерева, пораженного мол-

нией, достаточно типично [469]. В одних случаях он может представлять собой движущийся фронт свечения коронного или тлеющего разряда, как это, видимо, имело место в экспериментах со свечением, распространявшимся между электродами по фотопластинке [273]. В других это, вероятно, раскаленная масса, возникшая благодаря интенсивному нагреванию током. С таким процессом согласуется факт обнаружения смолы в фульгурите от шаровой молнии, возникшей после удара линейной молнии в дерево [328], хотя сообщение не позволяет ясно установить роль шаровой молнии в этом событии. В другом сообщении о горящем шаре на земле, который взорвался через полминуты [564], говорится о дегтеобразных остатках. Эта молния возникла во время чрезвычайно интенсивной грозы. Остаток имел запах серы и был настолько горячим, что обжег руку очевидца через 10 мин после исчезновения шара. От прикосновения к этому веществу его пальцы пожелтели.

Светящиеся шары наблюдались и после ударов молний в металлические сооружения, а в некоторых случаях испарение участков телефонной или антенной проволоки было явно теснейшим образом связано с возникновением шара. Свидетель видел, как после чрезвычайно сильного удара молнии в телефонный столб по улице катилась яркая масса диаметром почти 1 м, а следом за ней еще несколько шаров поменьше [398]. Позже было обнаружено, что провод между двумя столбами оборван и не хватает значительного его куска. Еще в одном случае очень сильный удар молнии уничтожил медную антенну вскоре после того, как она была установлена для изучения грозового электричества [528]. Свидетель, наблюдавший грозу, заметил большой огненный шар, по-видимому образовавшийся благодаря превращению в пар 65 м двухмиллиметровой проволоки.

Случайный разряд в медную проволоку в студенческой лаборатории создал светящийся шар, похожий на те, о которых сообщал Ван-Марум. Этот шар, казалось, медленно катился по столу, пока не исчез [237]. На пути шара осталась линия опаленных пятен, которая кончалась у трещины в столе шириной 1—2 мм. В ящике прямо под щелью был найден медный шарик диаметром око-

ло 1 мм. Светящаяся сфера, по-видимому, состояла из раскаленной до свечения меди. Свидетель сообщил, что цвет ее был желто-белым, а не зеленым, характерным для паров меди.

Бранд [65] описал возникновение таких же светящихся масс в результате короткого замыкания в силовых цепях. В одном случае возник шар диаметром 5 см, который двигался по ветру около 50 м. В мощных разрядах — при мощности $4 \cdot 10^7$ Вт в цепи — между медными и серебряными электродами возникали зеленые раскаленные до свечения шары диаметром 10—15 см [477, 479]. Продолжительность жизни этих шаров, согласно сообщению, была порядка секунды. Первоначальная энергия шара была оценена в $0,02—0,4 \cdot 10^6$ Дж, исходя из того, что в разряд, длящийся 0,01—0,1 с, переходит 5—10% мощности. Ионизация всех молекул газа, содержащихся в сфере диаметром 10 см при нормальном давлении и температуре, потребовала бы чуть больше энергии, чем рассчитанный таким образом нижний предел запаса энергии, если учесть, что для образования каждой пары ион — электрон требуется ~ 15 эВ. Исследователь предположил, что шар обладает некоторой потенциальной энергией, связанной с его структурой, что может объяснить также замедление рекомбинационных процессов, которые в ином случае должны были бы протекать очень быстро. Концентрация заряженных частиц при этой оценке составила бы примерно 10^{19} ионов и электронов на 1 см^3 , что близко к значению $4,3 \cdot 10^{18}$ электронов на 1 см^3 , полученному для концентрации в разряде молнии [513]. В этом случае следовало бы ожидать чрезвычайно быстрого исчезновения ионизированного шара, исходя как из краткости жизни обычной молнии, так и из большой скорости рекомбинации, наблюдаемой в плазме при высокой концентрации ионов и электронов.

Сообщалось о свободно передвигающихся сферах, образовавшихся из огней св. Эльма или из светящихся шаров, перемещавшихся по проводам линий высокого напряжения. Согласно теории Теплера [180], это явление было бы описано как переход первоначального коронного разряда в кистевой, но вполне вероятно, что при этом возникало также и испарение части проводника, обычно

металлического, как это происходило в описанных выше экспериментах со светящимися массами.

Де Янс полагал, что неверно было бы считать шаровую молнию раскаленным шаром металлических паров; с этой точки зрения возникновение подобной сферы, когда молния превратила в пар телефонный провод, было лишь особым случаем, не имеющим никакого отношения к обычной шаровой молнии [230]. С другой стороны, светящиеся шары, получаемые экспериментально с помощью пропускания через металл интенсивных электрических разрядов, обладают той свободой движения и длительностью существования, о которых упоминается в сообщениях о шаровой молнии и которые являются камнем преткновения для других теорий.

Изучение сфер из газообразного или жидкого металла требует выяснения дальнейших вопросов об их составе и физической структуре. Предварительное рассмотрение сильно нагретых сфер из углеродных паров показывает, что только конденсированные фазы могут обладать плотностью, достаточно близкой к плотности воздуха, чтобы образовавшийся шар не поднимался [293]. Расчет излучения таких сфер, связанного либо с паром, либо с суспензией конденсированных частиц, показывает, что и интенсивность, и длительность его много меньше соответствующих экспериментальных величин. Пока еще не было предложено удовлетворительного механизма, объясняющего замедление рекомбинации ионных компонент. Заряженные частицы, имеющиеся первоначально в таких сферах, не могут сохраниться в достаточном количестве за время порядка длительности существования светящейся массы. Оценка скорости остывания горячих сфер показывает, что для остывания сферы диаметром 20 см только за счет теплопроводности требуется всего несколько секунд [535]. Поскольку же время остывания при уменьшении размеров сферы падает по экспоненте, время существования описанного выше небольшого случайно возникшего шарика из меди составило бы, согласно этому расчету, лишь несколько сотых долей секунды. Таким образом, уже за счет одной теплопроводности температура шарика должна была бы упасть гораздо быстрее, чем это наблюдалось в действительности.

Поскольку сферы из металлических паров, полученные в лаборатории, существовали более длительное время, то следует вывод, что упомянутые процессы потери энергии не определяют времени существования этих экспериментальных тел и что необходимо принять во внимание еще какие-то процессы [482]. Если мы примем, что энергия шаровой молнии невелика, как чаще всего вытекает из наблюдений [420], то излучаемый свет может приписываться переходам из долгоживущих возбужденных состояний с относительно малой энергией возбуждения, например в молекуле азота, как полагал Релей. В таких сферах может происходить передача энергии возбуждения атомам металла. Постоянство геометрической формы светящегося образования указывает на то, что здесь, как и при возникновении, например, дымового кольца или вихря, образуется устойчивая структура [332]. Пока еще не предложено убедительного объяснения ни большой длительности свечения, ни устойчивости формы таких сфер.

Л. Плазменные теории и плазменные сгустки

Странные свойства шаровой молнии и неудачи, которыми завершались неоднократные попытки связать ее с другими, более изученными явлениями, постепенно привели к убеждению, что шаровая молния состоит из какого-то необычного вещества, которому разные исследователи давали различные наименования. Среди типичных названий, придуманных для этого предположительно обладающего высокой энергией электрически заряженного светящегося вещества, можно упомянуть «весомую материю» (из-за высокой плотности, на которую указывает быстрый спуск раскаленного шара) [524], «энергию в форме шара» [130] и «громовое вещество» [310].

В теоретических исследованиях о шаровой молнии речь шла обычно об образованиях сферической формы с высокими концентрациями электронов и ионов. С другой стороны, в связи с проблемами ядерной физики в последние годы была получена и накоплена значительная информация о подобном состоянии вещества, обладающего большой концентрацией заряженных частиц при высокой

температуре. Такое вещество получило название плазмы, а состоящие из плотной плазмы образования называются обычно плазменными сгустками. Экспериментальные наблюдения и теоретические работы в области физики плазмы очень ценны для проблемы шаровой молнии, особенно в связи с новейшими теориями, которые обычно рассматривают шаровую молнию как плазменный сгусток.

Процессы, при которых происходит образование плазмы, свойства вещества в таком состоянии и условия образования плазменных сгустков — вот те основные вопросы, ответы на которые нам следует извлечь из обширной информации, накопленной физикой плазмы. Конечно, не все эти вопросы решены. Свойства плазменных моделей в конечном счете должны оказаться сопоставимыми со свойствами, обычно фигурирующими в сообщениях о шаровой молнии. Именно с этой точки зрения и был отобран материал, который мы сейчас рассмотрим. Теория и эксперименты с плазмой, специально посвященные только шаровой молнии, рассмотрены в следующем разделе.

В некоторых теориях шаровой молнии для объяснения заключенного в ней запаса энергии, на что указывает длительное свечение и мощный завершающий взрыв относительно небольшой массы, выдвигается предположение о высоких концентрациях электронов и положительных ионов. Плазма — это совокупность большого числа электрически заряженных частиц. Мощные электрические силы препятствуют возникновению в ней заметных отклонений от электрической нейтральности. Например, если происходит накопление зарядов определенного знака в какой-то области пространства, то это вызывает быстрое поступление туда частиц с противоположным зарядом. Наибольшее расстояние, на которое электростатическое поле проникает в плазму, определяется формулой

$$d = \frac{1}{2} \left[\frac{kT}{\pi e^2 (n_i + n_e)} \right]^{1/2},$$

где k — постоянная Больцмана, T — кинетическая температура, e — величина заряда электрона в электростатических единицах, а n_e и n_i — концентрации электронов и ионов соответственно (см^{-3}) (ионы полагаются однократно ионизованными). Это известный дебаевский радиус

экранирования, определяемый из условия равенства кинетической энергии частиц и их потенциальной энергии в электрическом поле. В областях пространства, характерный размер которых порядка или меньше дебаевского радиуса, возможны отклонения от нейтральности при тепловом движении заряженных частиц. Если же характерный размер значительно больше дебаевского радиуса, то газ в целом нейтрален и только тогда, собственно, считается плазмой. Следовательно, размер шаровой молнии должен превышать дебаевский радиус по крайней мере раз в 10, чтобы можно было считать, что она состоит из плазмы. Оценки концентрации заряженных частиц в шаровой молнии, а также предполагаемые давления и температуры показывают, что этот критерий выполняется и вещество шаровой молнии может рассматриваться как плазма даже при частичной его ионизации.

Для образования замкнутой структуры, содержащей ионы и электроны, требуется удержание их в ограниченном объеме. Из исследований плазмы, связанных в основном с проблемой термоядерных реакций, известно несколько основных методов удержания плазмы довольно небольшой плотности при определенных ее конфигурациях. Для этого может быть использовано сильное магнитное поле или же комбинация магнитного и электрического полей. Магнитное поле не влияет на движение заряженных частиц вдоль него, но направление поперечной скорости изменяется. Частицы, движущиеся поперек магнитного поля с постоянной по величине скоростью v , описывают окружности, радиус которых определяется формулой $R = mv/qB$, где m — масса, q — величина заряда частицы, B — напряженность магнитного поля. Если v — скорость теплового движения, то мы можем выразить ее через температуру T , откуда получаем

$$R = \frac{(2mkT)^{1/2}}{qB}.$$

На движение электрона, масса которого много меньше массы положительного иона, магнитное поле влияет сильнее. Если, например, речь идет о молнии, температура которой составляет 10 000 К, то радиусы окружностей, описываемых в геомагнитном поле электронами и иона-

ми, обладающими при такой температуре лишь тепловыми скоростями, весьма различны и составляют соответственно 10 см и 22 м, если речь идет о молекулярном ионе N_2^+ . Движение этих частиц в плазме не следует рассматривать как независимое, поскольку любое разделение зарядов в пространстве в масштабах, превышающих дебаевский радиус, определяет потенциальную энергию в электрическом поле, бóльшую тепловой. При достаточно сильном магнитном поле траектории обеих частиц не выходят из объема, занятого плазмой. Если магнитное поле слабо, удержание тяжелых ионов может дополнительно обеспечиваться электрическим полем. Эти поля могут быть как внутренними, порождаемыми токами и зарядами плазмы, так и внешними. Те или иные комбинации этих полей рассматриваются в большинстве исследований плазмы для решения проблемы термоядерных реакций. Частицы вращаются вокруг магнитных силовых линий, а дрейфовое смещение таких орбит не должно быть большим. С этой целью были весьма полно исследованы несколько конфигураций плазмы типа магнитной «бутылки» и тора [276]. Для удержания высокоэнергичной плазмы даже в течение микросекунд необходимы очень мощные внешние поля и детальный расчет внутривлазменных процессов.

Обеспечить удержание плазмы могут также электромагнитные волны. Переменное электрическое поле волны оказывает влияние на движение любой заряженной частицы. После того как частица проходит короткое расстояние, поле меняет знак, возвращая частицу в исходное положение, если выполняется определенное соотношение между напряженностью и частотой поля, с одной стороны, и зарядом и массой частицы — с другой. Удержание с помощью только электрических полей может быть описано [373] следующими уравнениями, имеющими форму известных уравнений Матье:

$$a_x + \frac{2q}{m} (U + V \cos \omega t) \frac{x}{R^2} = 0,$$

$$a_y - \frac{2q}{m} (U + V \cos \omega t) \frac{y}{R^2} = 0,$$

$$a_z = 0$$

(для удержания пучка квадрупольным полем в пределах цилиндра без изменения скорости частицы по образующей цилиндра).

Такое поле может быть создано четырьмя цилиндрическими стержнями, на которые подается синусоидальное напряжение и которые располагаются в вершинах квадрата по сторонам области, содержащей плазму. Соседние электроды имеют постоянный электрический потенциал одинаковой величины, но противоположного знака $+u$ и $-u$; таким образом электроды, расположенные по диагонали, имеют потенциал одинакового знака. Вместе с переменным потенциалом $V \cos \omega t$ такое поле обеспечивает ускорение с составляющими a_x , a_y частицы с соотношением заряд/масса q/m в точке с координатами x , y в объеме радиуса R . Подбирая соответствующие частоту и потенциал, можно добиться удержания любой заряженной частицы.

Таким способом удерживались твердые частицы железа и алюминия диаметром примерно 20 мкм и с зарядом 0,01 Кл/кг [586, 587]. Удержание с помощью радиочастот изучалось теоретически для плазмы, содержащей избыточные электроны, с учетом добавочной силы, связанной с излучением движущегося электрона в переменном электрическом поле. Оказалось, что для захвата необходима кулоновская сила, определяемая избыточным зарядом, и градиент давления [55, 56].

Приближенные оценки, полученные для изотермической плазмы в сферическом объеме, содержащей электроны с низкой энергией, показали, что добиться удержания нейтральной плазмы можно, если частота электромагнитной волны совпадает с плазменной частотой [116]. Такой расчет был обобщен; при этом удалось учесть влияние столкновений и электромагнитного излучения электрона на движение вдоль магнитной компоненты волны [167, 191]. Сила торможения за счет излучения оказалась незначительной, но обычная сила со стороны электрического поля в условиях плазменного резонанса с электромагнитной волной всегда остается достаточно большой. Плотная плазма искажает поле электромагнитной волны, и обычные уравнения типа приведенного выше оказываются тогда несправедливыми.

В качестве более эффективного средства удержания плазмы было предложено использовать высокочастотное поле в сочетании с постоянным магнитным полем [64, 540], подобно тому, как используется для этого постоянное электрическое поле, о чем шла речь выше. Переменное поле применялось как вспомогательное для фокусирования плазмы в цилиндрической конфигурации. В достаточно плотную плазму поле проникнуть не может и, следовательно, не может сфокусировать плазму вблизи оси цилиндра, как это было осуществлено для небольшого числа частиц. В этом случае следует считать, что электромагнитная волна удерживает плазму за счет своего давления, действующего на тонкий пограничный слой плазмы; это давление уравнивается давлением плазмы, что можно записать как

$$nkT = \frac{E^2 + B^2}{8\pi},$$

где E и B — электрическая и магнитная компоненты высокочастотного поля. Эксперименты продемонстрировали удержание плазмы с концентрацией 10^{13} частиц/см³ при энергии электронов 5 эВ ($T = 5,8 \cdot 10^4$ К) при магнитной составляющей волны 60 Гс [540]. Давление электромагнитного поля составляет ~ 70 дин/см² и равно давлению в плазме.

Было достигнуто удержание в цилиндрической конфигурации водородной плазмы относительно низкой плотности, порядка 10^{10} электронов/см³, с помощью СВЧ-излучения и постоянного поперечного магнитного поля [141]. Слабого СВЧ-поля мощностью 0,2—1 Вт было достаточно для удержания, когда имел место резонанс, при котором соотношение частот было следующим:

$$\omega_p^2 = 2\omega(\omega - \omega_b),$$

где ω_p — плазменная частота, ω — частота СВЧ-поля, а ω_b — циклотронная частота электронов. Объем плазменного сгустка пропорционален мощности СВЧ-излучения.

Теоретически исследовались цилиндрические образования, возникающие при быстром вращении заряженных частиц в однородном магнитном поле [249, 547].

Ограничение перемещения заряженных частиц за счет действия магнитного поля уменьшает эффект убегания частиц из плазмы под действием объемного заряда за счет их собственного теплового движения. Была получена функция распределения частиц плазмы в конфигурации, диаметр которой определялся температурой и плазменной частотой. Исследован эффект однородного вращения (вращения как твердого тела) и неоднородного вращения со скоростью, зависящей от радиуса. При вращении с ларморовой частотой $q/B/2m$ резонанс возникает [249], когда соотношение квадратов ионной плазменной частоты и гирочастоты равно 2, что соответствует резонансу, наблюдавшемуся в упомянутом выше эксперименте [141].

Системы удержания плазмы в тороидальной конфигурации магнитным полем кольцевого тока исследовались очень детально, поскольку такой метод удержания в начале исследований казался наиболее перспективным [276]. Часто высказывалось предположение о том, что шаровая молния может иметь подобную же структуру.

Небольшие плазменные кольца,двигающиеся из области разряда, были образованы с помощью плазменных пушек, в которых короткий и мощный разряд осуществлялся через параллельные проволочные электроды [58, 59]. Для той же цели выбрасывания сформированного плазменного сгустка использовались индукционные катушки с соответствующим образом подобранной конфигурацией магнитного поля [283, 569, 570]. Изучалось движение таких плазменных образований в магнитном поле и взаимодействие их друг с другом. Магнитное поле захватывается плазмой при ее образовании, причем в ней создается также кольцевой ток [283]. Максимальная длительность свечения [59] до исчезновения кольца в результате рекомбинации и диффузии составляет менее миллисекунды при давлении 10^{-6} атм. Даже очень небольшое увеличение давления замедляет движение плазменного образования, уменьшая его скорость от значений 10^5 — 10^7 см/с до нуля.

Удержание в торе плазмы высокой плотности, необходимой для термоядерного синтеза, связано с множест-

вом трудностей [185, 276]. Можно использовать для удержания плазмы кольцевое внешнее магнитное поле, силовые линии которого параллельны кольцевому току. Однако для того, чтобы уменьшить уход частиц за счет их дрейфа поперек магнитного поля, такое поле должно иметь сложную конфигурацию. При небольших давлениях плазмы и небольших токах можно добиться эффективного уменьшения дрейфа частиц на стенки при особых конфигурациях магнитного поля, в которых используется идея так называемого «вращательного преобразования», когда одна силовая линия заполняет целую магнитную поверхность. Это достигается перекручиванием тора в конфигурацию типа восьмерки (идея «стелларатора») или добавлением спиральных обмоток с чередующимся направлением тока в соседних проводках. С другой стороны, для потока электронов низкой плотности возможно устойчивое равновесие во внешнем кольцевом магнитном поле, так как в этом случае, в отличие от нейтральной плазмы, дрейф, определяемый градиентом магнитного поля и центробежными силами, незначителен [120]. В частности, перераспределение зарядов при дрейфе, определяемом градиентом магнитного поля, может создать лишь довольно слабое электрическое поле, если нет зарядов противоположного знака.

Сферические плазменные сгустки относительно малых размеров (порядка тех, что характерны для шаровой молнии или тех, что наблюдались в экспериментах) оказались более трудными для теоретического рассмотрения, и общий анализ таких структур, сравнимый с детальными расчетами цилиндрических и тороидальных конфигураций, еще не сделан. В астрофизике уже давно придается большое значение изучению изотермической газовой сферы, находящейся в гравитационном равновесии. Равновесное радиальное распределение массы определяется следующим уравнением [98]:

$$\frac{1}{R^2} \frac{d}{dR} \left(\frac{R^2}{\rho} \frac{dP}{dR} \right) = -4\pi g \rho,$$

где полное давление P пропорционально плотности ρ при заданной температуре; g — гравитационная постоянная.

Вводя новую переменную ψ , через которую плотность выражается как $a \exp(-\psi)$, это уравнение можно преобразовать к виду

$$\frac{1}{\xi^2} \frac{d}{d\xi} \left(\xi^2 \frac{d\psi}{d\xi} \right) = e^{-\psi},$$

где ξ пропорционально радиусу R .

Теоретически была показана возможность гравитационного равновесия для сферы из проводящей жидкости с замороженным магнитным полем, обращаемым в нуль на ее поверхности и во внешнем пространстве [408]. Силовые линии подобны спирали на поверхности тора; присутствуют полоидальные и тороидальные составляющие.

На основе аналогии между уравнениями магнитогидродинамического и гидродинамического вихревого движения было предположено, что может образоваться плазменный сгусток сферической формы [474]. Магнитное поле \mathbf{B} в плазме сравнивалось с полем вектора скорости \mathbf{v} стационарного гидродинамического вихря, а плотность тока \mathbf{j} — с вектором угловой скорости $\mathbf{\Omega}$. Рассматривались уравнения гидродинамического стационарного вихревого движения в простейшей форме:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{v} &= 0, \\ \operatorname{rot} \mathbf{v} &= \mathbf{\Omega}, \\ \mathbf{\Omega} \times \mathbf{v} &= -\nabla (\rho/\rho + v^2/2) \end{aligned}$$

и сравнивались с подобными по форме уравнениями магнитной гидродинамики:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \\ \operatorname{rot} \mathbf{B} &= \mathbf{j}, \\ \mathbf{j} \times \mathbf{H} &= \nabla p. \end{aligned}$$

Используя аналогию со специфическими гидродинамическими структурами, в частности с вихрем Хилла [332], можно было представить себе картину распределения давления, тока и магнитного поля в предполагаемом равновесном сферическом плазменном сгустке. Такое рас-

пределение токов и полей напоминает подобное распределение в плазменном торе с продольным током (рис. 22).

Возможность существования равновесных сферических образований, рассматриваемых в астрофизике, определяется прежде всего гравитацией. Если эта внутренняя сила отсутствует, ее роль должны выполнять какие-то другие поля, однако они уже не могут обладать столь простой симметрией. Неизбежны, следовательно, сложные комбинации внешних сил, магнитных полей и спиральных и тороидальных токов.

Недостаточно создать просто некоторую равновесную конфигурацию плазмы; для удержания необходимо добиться достаточной устойчивости, что и составляет основную трудность в этой проблеме. Неустойчивости, вызванные внутренними процессами в плазме или внешними полями, приводят к очень быстрому распаду плазменных образований. В частности, именно поэтому при удержании плазменного цилиндра в высокочастотном поле в качестве основного механизма удержания использовалось действие постоянного магнитного поля, а переменное электромагнитное поле было лишь вспомогательным. Неустойчивость, возникающая в электромагнитном поле, уменьшалась при наложении постоянного магнитного поля и минимизации области проникновения волны в плазму [540].

Подвижность вещества плазмы в сочетании с электрическим и магнитным взаимодействием заряженных частиц может обусловить очень сложное движение [276]. Причины его и характер можно иллюстрировать на простых видах типичных неустойчивостей. В плазменном цилиндре, окруженном магнитным полем, параллельным его оси, плазма может выйти за пределы области, занятой ее столбом первоначально кругового сечения, в окружаю-

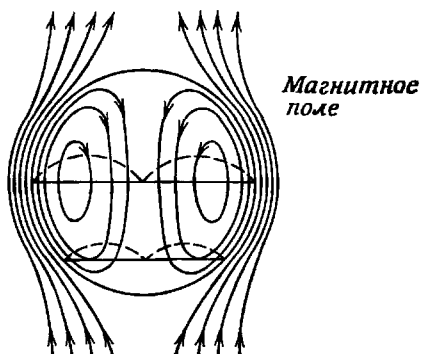


Рис 22 Плазменный сгусток в виде вихря

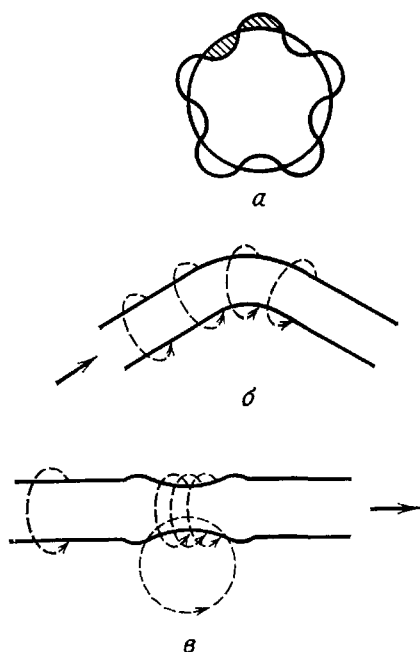


Рис. 23. Простейшие типы неустойчивости плазмы: *а*—желобковая неустойчивость; *б*—неустойчивость типа петли; *в*—сосисочная неустойчивость, или неустойчивость типа перетяжки.

шее пространство, и магнитное поле заполнит образовавшиеся желобки (рис. 23, *а*). Такое взаимодействие между плазмой и магнитным полем (называемое обменной, конвективной или желобковой неустойчивостью) приводит к быстрому нарастанию начального возмущения, если поле имеет простую конфигурацию, а энергия плазмы в этом процессе уменьшается или остается неизменной. Плазменный цилиндр, окруженный только собственным магнитным полем, которое порождается током, текущим вдоль его оси, склонен изгибаться, демонстрируя неустойчивость типа петли [262]. Когда на коротком участке столба плазма смещается и создается изгиб, магнитное давление на внутренней стороне этого изгиба увеличивается, так как

силовые линии сближаются (рис. 23, *б*). На выгнутой же стороне изгиба магнитное давление уменьшается, что приводит к увеличению изгиба и развитию неустойчивости. Цилиндр можно сделать устойчивым по отношению к деформации такого типа, окружив его металлическими стенками. В последних наводятся токи, магнитное поле которых увеличивает магнитное давление на участки плазмы, перемещающиеся к стенкам, уравнивая тем самым магнитное давление на противоположной стороне цилиндра, возросшее при изгибе. В цилиндрическом столбе плазмы может возникнуть еще одна деформация типа перетяжки, при которой происходит сужение столба по всему сечению (рис. 23, *в*).

В месте сужения благодаря сближению магнитных

силовых линий создается большее магнитное давление, а это ведет к дальнейшему сжатию. Быстрое нарастание магнитного поля около места сужения в свою очередь индуцирует сильное электрическое поле, как показано на рис. 23, в, которое может быть значительно сильнее внешних полей. Это поле иногда является причиной появления частиц, обладающих большей энергией, чем предполагалось получить в таких экспериментах с плазмой, нагрев которой мог быть достаточным для возникновения кратковременных термоядерных реакций. В процессе образования плазменного столба магнитное поле, направленное вдоль оси цилиндра, оказывается замороженным в плазму. Оно обеспечивает тогда устойчивость против деформации типа перетяжек, поскольку напряженность поля возрастает в месте наибольшего сужения. Те же неустойчивости (а также некоторые другие), видимо, могут иметь место и в разрядах молний. Предполагается, что, например, подобные процессы играют определенную роль в образовании четочной или шаровой молнии из линейного разряда.

Из всех колебаний и деформаций, типичных для плазменного цилиндра, в кольце чаще всего встречается изгиб [474]. Хотя возможность использования магнитного поля, достаточно сильного для удержания любой высокотемпературной плазмы, породила идею об удержании плазмы в кольце, внутреннее давление в котором превосходит внешнее, стабильность против обменной неустойчивости имеет место только при малых относительных давлениях плазмы [266]. Эксперименты с плазмой в тороидальной камере с сильным внешним магнитным полем показали, что устойчивость к таким деформациям наблюдается лишь в том случае, если радиус тора и ток через плазму достаточно малы, хотя в это время кольцо плазмы смещается в экспериментальной камере в результате обычного дрейфа поперек поля [132]. Обменной неустойчивости можно избежать в случае магнитного поля с отрицательной кривизной силовых линий, если плазма обладает достаточно низкой по сравнению с внешним полем энергией [275]. Сложнее обстоит дело с другими неустойчивостями, такими, например, при которых развиваются электростатические колебания вдоль силовых ли-

ний [276, 559]. Подходящим образом подобранные давление, магнитное поле и радиус кривизны тороидальной оболочки могут препятствовать также развитию неустойчивости, порождаемой компонентой тока вдоль поля [559]; однако более важный вопрос об отсутствии истинного равновесия в тороиде при реально осуществимых условиях остается открытым [185]. При подробном анализе свойств плазмы, связанных с ее удержанием, выявляются многочисленные трудности создания правдоподобной модели плазменного кольца.

Теоретическое исследование свойств проводящей сферы, рассматриваемой как некоторая равновесная структура во внешнем электромагнитном поле, привело к выводу, что можно добиться ее устойчивости к малым деформациям [589]. Внешнее электрическое поле вообще вызывает неустойчивости, и магнитное поле у поверхности должно превосходить его в определенное число раз, зависящее от характера возможной деформации. При возмущении поверхности сферы происходит концентрация внешнего магнитного поля в углублениях и уменьшение его напряженности у выступающих частей, что приводит к изменениям магнитного давления, способствующим развитию деформации.

Однако деформации скручивания, при которых магнитное давление увеличивается, приводят к общей стабилизации. Волновые компоненты препятствуют развитию неустойчивостей, связанных с взаимодействием плазмы и магнитного поля. Вращение поля делает сферу устойчивой к малым деформациям. Эта модель была неполной в смысле описания конкретных характеристик самой плазмы, по сравнению, например, с моделями плазмы в тороидальных трубках. При соответствующих скоростях, давлениях и плотностях плазмы и подходящих соотношениях между полями исследовались электромагнитные и акустические колебания в нейтральной или заряженной плазменной сфере [590].

Были исследованы электростатические ионные колебания в плазме сферической конфигурации, образованной за счет мощного электромагнитного излучения с частотой 15 МГц в стеклянной камере.

Колебания происходили на частотах от 82 до 260 кГц,

а скорость примерно соответствовала формуле $v = (3kT_e/m_i)^{1/2}$, где T_e — температура электронов, m_i — масса иона. Эксперимент проводился с различными газами: кислородом, азотом, водородом, неоном, парами ртути [172].

Образование светящихся сгустков плазмы при разрядах переменного тока уже давно привлекало к себе внимание [582]. Такая высокотемпературная плазма исследуется обычно для газов, находящихся в стеклянных камерах при пониженном давлении, причем разряд возникает в поле индукционной катушки или между электродами без гальванической связи с источниками тока, отчего его называют безэлектродным разрядом [201]. В этих образованиях с низкой концентрацией заряженных частиц внешнее поле может управлять движением электронов, вызывать ионизацию за счет их столкновений с молекулами газа и генерировать тем самым плазму. Этот процесс происходит при самых разных частотах (скажем, от 50 до 10^8 Гц [27]). Сообщались качественные характеристики этих разрядов, полученных при мощностях от 10^{-2} до 10^{-3} Вт/см³ и при давлениях до атмосферного. Были получены холодные разряды с микроамперными токами и разряды типа дуги при токах в сотни ампер и мощностях порядка сотен киловатт. Цвет разрядов в атмосферных газах при частотах порядка мегагерц изменяется с изменением давления от розовато-красного при нескольких мм рт. ст. и желто-белого при 10 мм рт. ст. до огненно-оранжевого при нескольких см рт. ст. При частоте 62 МГц цвет изменялся от розово-красного при 5 мм рт. ст. до фиолетового или красно-бурого, зеленого и, наконец, оранжево-белого при давлении более 400 мм рт. ст. Эти разряды изучались для выяснения характера тока в области свечения, а не для изучения состава, энергии и распределения заряженных частиц, что могло бы представлять интерес с точки зрения физики плазмы.

Разряды в полях с частотами порядка мегагерц использовались как источники в плазменных горелках [106, 421]. Индукционная катушка, окружающая подводную газ трубку, создает плазменный факел, устойчиво горящий и при атмосферном давлении. В плазменных

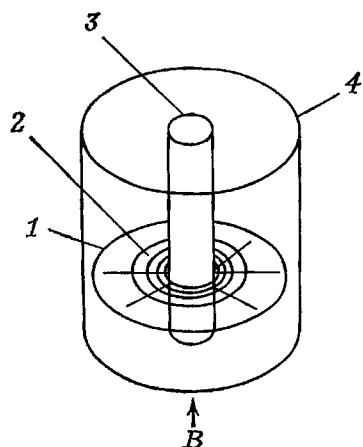


Рис. 24 Сверхзвуковая вращающаяся дуга

1 — анод, 2 — светящийся диск, 3 — катод, 4 — слюдяной цилиндр

горелках достигается температура до 19 000 К при мощности 3,1 кВт.

В цилиндрической установке, показанной на рис. 24, был получен при низком давлении светящийся быстро вращающийся голубой диск. Разряд образовался в электрическом поле 100 В/см при давлении 0,5 мм рт. ст., вращение создавалось за счет действия магнитного поля 6000 Гс, направленного по оси цилиндра. Скорость вращения составляла 17 000 об/с. Скорости газа $1,3\text{--}2 \cdot 10^5$ см/с измерялись с помощью введения в поток газа с характерным свечением

и измерения силы воздействия потока на помещенную в него вольфрамовую пластинку. Разряд происходил при низкой температуре, менее 600°C , хотя подводилась довольно большая мощность — 0,5 кВт/см [136].

Сообщалось об эксперименте, когда подобная вращающаяся плазма в «плазменном конденсаторе» являлась аккумулятором энергии. В этом эксперименте аргон при давлении 0,4 мм рт. ст. в короткой цилиндрической камере с проводящими стенками и центральным электродом был подвергнут воздействию короткого разряда напряжением 6 кВ. В магнитном поле 18 000 Гс, направленном вдоль оси цилиндра, плазма была приведена в быстрое вращение при токе до 200 кА.

Более сложные поля для удержания плазмы, как, например, октупольное магнитное поле, образованное четырьмя большими кольцами в тороидальной камере квадратного сечения, были способны удерживать плазму с энергией ионов 100 эВ и электронов 10 эВ [133]. Плотность плазмы постепенно уменьшалась, предположительно из-за потерь на опорах колец, без видимой неустойчивости. Потерь плазмы можно избежать с помощью магнитного подвешивания колец [437].

Иногда предлагалось использовать сочетание отдельных цепей и таких собственных полей плазмы, при которых возможно самоудержание, в частности в тороидальных конфигурациях. Однако рассмотрение общего содержания энергии в плазме вновь и вновь приводило к выводу, что негравитирующий плазменный сгусток не может существовать как некоторая замкнутая равновесная структура [474]. Таково следствие условий, необходимых для устойчивого равновесия замкнутой плазменной системы, в которой энергия гравитационного, электрического и магнитного полей и внутренняя энергия плазмы должны уравниваться согласно теореме о вириале:

$$G + E + M + U = 0.$$

При отсутствии тяготения ($G=0$) равновесие в замкнутой системе невозможно. Но в работе [174] было вновь указано на возможность самоудержания плазмы, причем возражение было основано на том, что надо рассматривать плазму как совокупность дискретных заряженных частиц, а не как непрерывную жидкость — в таком случае ее электромагнитная энергия может быть отрицательна. В любой нейтральной в целом плазме энергия заряженных частиц в электромагнитном поле положительна. Если бы эта часть общей энергии могла быть отрицательной и достаточной для компенсации кинетической энергии, то было бы возможно существование равновесного плазменного сгустка. Выдвигалось предположение о наличии отрицательной электромагнитной энергии в совокупности заряженных частиц.

Теория плазмы и экспериментальные исследования не в состоянии объяснить образование длительно существующего плазменного сгустка в естественных условиях. По-видимому, обязательными для образования любой структуры из плотной высокотемпературной плазмы являются мощные и сложные внешние поля.

М. Плазменные модели шаровой молнии

Некоторые исследования плазмы предпринимались первоначально для изучения проблемы шаровой молнии. Плазма с высокой плотностью заряженных частиц рас-

смачивается в теориях, которые для объяснения значительной энергии и длительного существования шаровой молнии опираются на предположение, что в ней уже при образовании каким-то образом запасается вся необходимая энергия. В качестве другой возможности предполагается, что энергия непрерывно поступает в светящуюся массу от внешнего источника, например электрического или электромагнитного поля во время грозы. Теории, согласно которым постоянным внешним источником энергии является электромагнитное излучение, будут рассмотрены в заключительном разделе этой главы. В обеих группах теорий вещество шаровой молнии рассматривается как плазма.

Описание шаровой молнии как плазмы было предвосхищено в ранних гипотезах задолго до того, как экспериментальные и теоретические исследования в этой области предоставили в наше распоряжение современные сведения и терминологию. В 1905 г. Карлгейм-Гиленшельд описал шаровую молнию как вращающийся сферический вихрь, состоящий из ионизированного воздуха, отделившегося от цилиндрического канала разряда молнии [65, 85]. В 1915 г. было выдвинуто предположение, что электронное вихревое кольцо образуется при импульсе разряда обычной молнии. Согласно этому описанию, кольцо быстро вращается и электроны при столкновениях ионизируют попавший в их поток воздух, создавая таким образом вакуум внутри некоторого объема [581]. Подобные электронные и плазменные вихревые модели предлагались и 50 лет спустя [33, 584].

Первоначально подобные мнения редко излагались с достаточной ясностью, чтобы их можно было сравнить с современными плазменными теориями, но особое вещество светящейся массы часто описывалось как высокотемпературный ионный газ. Например, «громовому веществу» приписывалась температура 2500°C , а сферическая оболочка объяснялась поверхностными электростатическими силами, которые уравнивают высокое внутреннее давление [310, 311].

Если предположить, что удержание полностью ионизированного газа может происходить только за счет квантовомеханической обменной энергии, то можно оценить

минимальную равновесную температуру [156, 338, 339, 356]. Если для плазмы, состоящей из одинакового числа свободных ионов и электронов (что дает равный нулю полный заряд), можно пренебречь электромагнитными взаимодействиями, то обменная энергия определяется формулой

$$E = - \frac{e^2 n_e h^2}{8\pi m k T},$$

где h — постоянная Планка. Кинетическая тепловая энергия $\frac{3}{2} kT$ может перейти в эту обменную энергию, если температура

$$T = \left(\frac{e^2 n_e h^2}{12\pi m k^2} \right)^{1/2}.$$

Температура, найденная отсюда для концентрации $2,7 \cdot 10^{19}$ электрон/см³, что соответствует концентрации молекул при атмосферном давлении, составляет 632 К. При более высокой температуре обменная энергия окажется меньше необходимой для удержания плазмы. Отсюда был сделан вывод о возможности существования низкотемпературных сфер, которые тем не менее обладают высокой концентрацией заряженных частиц. С другой стороны, показано, что одной обменной энергией можно объяснить лишь удержание плазмы с низкой энергией.

Как видно из предыдущего раздела, свойства предполагаемого плазменного сгустка определяются другими параметрами плазмы, а не обменной энергией. Например, рекомбинация заряженных частиц ограничивает время существования такого шара малыми долями секунды, что, видимо, сравнимо с временем свечения обычной молнии. В первоначальном исследовании [356] предсказывалась медленная рекомбинация при рассчитанной «высокой» температуре. Однако в экспериментальных исследованиях такие плотности зарядов были получены в газовой фазе только при действительно очень высоких температурах, на порядки выше приведенной в этой работе. Для разряда молнии с температурой 24 000 К концентрация электронов была оценена [531] как $4,3 \cdot 10^{18}$ см⁻³; поскольку в рассматриваемой теории не учитывалось никаких других специфических процессов, кроме понижения

температуры, вычисленное время свечения после удара получается в общем таким же, как и у шаровой молнии, состоящей из подобного вещества. Применение к шаровой молнии квантовой теории электронного газа, подобной теории электронного газа в кристаллах [479], имеет определенное сходство с попытками применить к этой задаче квантовую теорию твердого тела, основанными на предположении об очень высокой концентрации заряженных частиц [382].

И кольцевой ток, и сферическая структура типа гидродинамического вихря предлагались в качестве форм шаровой молнии и исследовались при магнитогидродинамическом подходе, для которого характерно отсутствие рассмотрения взаимодействия заряженных частиц [434, 448, 474, 483]. Как указывалось выше, для получения равновесного магнитогидродинамического образования небольшой массы, в котором не существенна гравитация частиц, необходимо приложение внешних сил. В торе, удерживаемом с помощью внешнего магнитного давления, необходимые магнитные поля могут быть созданы замкнутым током I_R и током, текущим вокруг поперечного сечения тора по его поверхности I_s :

$$\frac{I_R^2}{r^2} = \frac{I_s^2}{R^2 (\ln 8R/r - 1/2)} = \frac{2\pi P}{\ln 8R/r - 3/2}.$$

Если внутреннее давление пренебрежимо мало по сравнению с атмосферным, радиус кольца $R = 10$ см, а радиус поперечного сечения $r = 1$ см, то оба тока [474] должны быть порядка 10 000 А. Поверхностный ток считался барьером, препятствующим проникновению внешнего газа в плазму. Внешнее магнитное поле, перпендикулярное плоскости кольца, могло бы компенсировать большее внутреннее давление [266]. Тороидальные токи, рассматриваемые в этой модели, подобны токам, которые наблюдаются в плазменных тороидах, получаемых в экспериментах по проблеме термоядерного синтеза. Однако вопрос о естественном образовании таких специфических потоков заряженных частиц необходимой величины остается открытым, если учитывать, с помощью каких методов удастся создавать эти токи в лабораторных условиях. Поскольку в создании шаровой молнии в качестве посто-

янного внешнего магнитного поля могло бы участвовать лишь слабое магнитное поле Земли (около 0,3 Гс), с подобными же трудностями мы сталкиваемся и при объяснении высокой энергии и длительного существования подобной вихревой структуры сферической молнии.

Отсутствие сильного внешнего магнитного поля, что является основной трудностью получения равновесной плазменной структуры в естественных условиях, привело к возникновению нескольких теорий, рассматривающих возможность самоудержания плазмы. Образование шаровой молнии из сегмента обычной [86, 87] было объяснено как преобразование плазменного стержня в сгусток со структурой типа вихря Хилла. Цилиндрический столб имеет сильное захваченное магнитное поле, но лишен электрического. Заряженные частицы обращаются вокруг оси стержня, и считается, что ионы и электроны движутся вдоль столба в противоположных направлениях. Электрический диполь, созданный разделением зарядов, и магнитное поле заставляют соответствующие частицы образовывать на каждом конце столба зонтообразное расширение. Затем эти расширения с противоположными зарядами приближаются друг к другу, создавая замкнутый проводящий путь через центр столба, по внешней части, где образовались расширения, и опять в центр, образуя сферическую внешнюю поверхность. Это напоминает рассматривавшийся выше плазменный вихрь [473] с той разницей, что тут отсутствует внешнее магнитное поле, использованное в гидродинамической аналогии.

Высказывалось предположение, что структура токов в такой модели подобна структуре токов в торе, где положительные ионы составляют кольцевой, а электроны — поверхностный полоидальный ток, как и в ранее рассмотренных тороидальных образованиях. Рассматривались также тонкие кольца с электронами в очень тонкой внешней оболочке [86] и толстые кольца, приближающиеся по форме к шаровидным образованиям [87]. В этой модели предполагались очень мощные токи порядка 10^7 А и скорости электронов около $1/3$ скорости света. При этом должны возникать потоки энергичных электронов и рентгеновское излучение; это приводит к выводу, что шаровая молния должна быть интенсивным источником такого из-

лучения ($\sim 5 \cdot 10^{11}$ рад/ч), возникающим в атмосфере в естественных условиях. Такой вывод делается на основании предположения о высоких скоростях частиц и из рассмотрения лишь некоторых из большого числа процессов потерь энергии. Параллельная оценка [184] длительности существования шаровой молнии при предполагаемой первоначальной энергии $5 \cdot 10^6$ Дж и потерях, оцененных в $9,7 \cdot 10^5$ Вт, составила 5 с. Рекомбинация как один из основных процессов исключалась и при высоком [86] и при низком [87] внутреннем давлении. В свете имеющихся экспериментальных данных принять это допущение для высокого давления трудно, низкое же давление ($1,8 \cdot 10^{-7}$ атм), используемое в альтернативной модели, также представляется для шаровой молнии нереальным.

Выдвигалось предположение, что тор с током положительных ионов возникает в результате разрыва канала линейной молнии под воздействием ударной волны [187]. Давление в канале молнии было принято равным 200 атм, что примерно в 10 раз превышает обычную оценку. При резком уменьшении тока происходит быстрое уменьшение диаметра канала (коллапс), в результате чего создается сильная ударная волна, на что указывает звуковая волна. Ответвление главного канала, в котором ток прекратится раньше, или еще одна вспышка молнии в непосредственной близости могут, таким образом, создать ударную волну, которая разорвет канал молнии. Когда ударная волна прерывает ток, магнитное поле вокруг канала схлопывается, преобразуя этот отрезок высокотемпературного ионизованного канала в вихрь. Скорость ионов в вихре также высока. Воздействие нескольких ударных волн, разрывающих канал разряда в нескольких местах, могло бы, согласно этому предположению, объяснить возникновение четочного разряда, показанного на рис. 6. Для проверки этой теории было предложено провести опытное изучение воздействия сильных ударных волн на искровые разряды.

Рассматривалась и другая модель шаровой молнии с самоудержанием плазмы — аналогичное вихревое образование, но только с тороидальным магнитным полем и полоидальными электронными и ионными токами, причем в

качестве механизма его возникновения снова рассматривалась эволюция отделившегося участка в разряде обычной молнии [236]. В таком образовании ток и магнитное поле как бы поменялись ролями по сравнению с тем, что мы имели в вихревой гидродинамической структуре, показанной на рис. 22.

Можно предположить, что при быстром схлопывании магнитного поля уменьшение числа ионов и электронов при рекомбинации приведет к появлению ускорения оставшихся частиц и тем самым к поддержанию тока. Частицы нейтрального газа среды будут при соударениях с ионами выталкиваться из токовой области. Это приведет к появлению градиента давления, определяемого напряженностью магнитного поля. Время рекомбинации ионов и электронов, вычисленное по опубликованным значениям коэффициента рекомбинации для концентрации $2 \cdot 10^{18}$ электрон/см³, составило 10^{-8} — 10^{-10} от времени жизни шаровой молнии.

Была выдвинута идея образования шаровой молнии как плазменного вихревого кольца благодаря импульсу молнии, в частности проходящей сквозь отверстие в твердой поверхности, пораженной разрядом [584]. Магнитное поле предполагалось захваченным в кольце, как в сгустках плазмы, создаваемых импульсами сильных токов через тонкие проволоки [58]. Ударная волна канала молнии может создать плотности частиц, в сотни раз превышающие плотность газа при атмосферном давлении. Кинетическая энергия вихревого движения может быть очень велика — до сотен джоулей. Исходя из примерной скорости излучения энергии плазмой, для магнитогиродинамического вихря было оценено время жизни в несколько секунд, однако скорость рекомбинации специально не рассматривалась.

В качестве другой возможности было предложено [118] образование шаровой молнии как плазменного сгустка в конфигурации полей, которую назвали «инвертированным ионным магнетроном». Согласно этой модели, удержание обеспечивается магнитным полем земли и мощным радиальным электрическим полем, которое создается разрядом линейной молнии. Таким образом, соотношение магнитного и электрического полей оказывается здесь об-

ратным тому, которое обычно создают в лабораторных экспериментах с плазмой. Источником значительной энергии в этой вращающейся плазменной структуре считается ионная винтовая неустойчивость. Не было проведено количественного расчета возможных полей и неустойчивостей плазмы; экспериментального подтверждения того, что этот механизм может действовать при атмосферном давлении, также не получено. Шаровая молния рассматривалась как участок линейной молнии, отделенный за счет сжатия тока собственным магнитным полем. Такое описание может создать дополнительную трудность для этой теории.

Хотя сильное радиальное электрическое поле может оказаться для удержания эффективнее, чем собственное магнитное поле, генерируемое сильным током, данные о радиальном электрическом поле, которое могло бы создаваться молнией, в отличие от данных об атмосферном потенциале и изменениях этого потенциала во время разряда, по-видимому, отсутствуют. Высокие радиальные поля пространственного заряда, затрудняющие удержание, представляются возможными ввиду присутствия электронного тока, участвующего в лидерных процессах, которые приводят к разряду молнии. Однако мощный ток главного разряда способствует удержанию плазмы за счет пинч-эффекта, в то время как сам канал становится в целом нейтральным. Радиальное поле зависит в таком случае от конкретного распределения заряда в поперечном сечении канала. Любое поле будет существовать очень недолго, но удержание в результате пинч-эффекта при нейтральности канала может быть довольно длительным. Это согласуется с появлением четочной молнии на конце длительных вспышек молнии как в случае, когда была сделана фотография рис. 5, так и в других, сообщавшихся в литературе.

В связи с наблюдением шаровой молнии в 1967 г. в СССР на р. Онеге [128а] было высказано предположение, что шаровая молния возникает в результате отделения сегмента линейной молнии благодаря неустойчивости плазменного канала типа перетяжек. Этот шар появился вскоре после вспышки обычной молнии, хотя замечен он был над рекой на некотором расстоянии от того места, где

разряд-предшественник ударил в берег (см. рис. 8). Если это наблюдение и подразумевало движение огненного шара от берега к той точке, где он был замечен наблюдателем, расположенной несколько ближе к противоположному берегу в 1,5 м над водой, то все время, пока вели наблюдения, шар двигался от этой точки к тому берегу, куда ударила до этого молния. Наблюдатель сравнил яркую желто-белую центральную часть шара, имевшую в поперечнике 6—8 см, с плазмой, образующейся при разряде с температурой 14 000 К. Температура 13 900 К была рассчитана исходя из периода полураспада за счет рекомбинации ионов в шаре:

$$t = 1,01 \cdot 10^{-20} T^{-1/4} \exp(31,5 + 8,8 \cdot 10^{-4} T + 7,06 \cdot 10^4 T^{-1}),$$

где период полураспада t в минутах является функцией температуры плазмы T . Период полураспада был оценен в 1,35 мин. В действительности эта величина определяет всю продолжительность существования шара, если считать, что он возник в предварительном разряде линейной молнии. Был принят коэффициент рекомбинации 10^{-19} см³/с.

При этих расчетах предполагалось, что плазма шаровой молнии состоит только из положительных ионов и электронов; отрицательные же ионы образуются лишь в малых количествах. За первоначальную концентрацию ионов было принято их равновесное количество для данной температуры, причем считалось, что рекомбинация происходила во время всего существования шара, но без падения температуры. Экспериментальные исследования плазмы неоднократно показывали, что время существования в атмосфере сгустка плазмы указанной температуры без непрерывного его снабжения энергией на несколько порядков меньше 1,35 мин. Поэтому представляется, что использованная в этих расчетах модель рекомбинации явно непригодна. Было высказано предположение о стабилизирующем воздействии рекомбинации на температурные изменения. Уменьшение температуры в центральной области шара привело бы к сопутствующему ускорению рекомбинации, восстанавливающей более высокую стационарную температуру. Повышение температуры в центре замедлило бы рекомбинацию и увеличило бы теп-

лоотдачу с поверхности шара, что опять привело бы к понижению температуры до равновесного значения при некоторой потере энергии. Первоначальная степень ионизации была оценена по температуре в 22%, что соответствует концентрации ионов $1,2 \cdot 10^{17}$ ион/см³ для высокотемпературного газа шаровой молнии с плотностью, предположительно меньшей плотности атмосферы. Исходя из средней энергии ионизации 14,5 эВ, вся энергия ионов составит 530 Дж при объеме молнии 1450 см³.

Теория температурных колебаний, компенсируемых рекомбинацией и сопровождаемых потерей энергии, была расширена, чтобы объяснить повторные пульсации, которые могли бы произойти, поскольку оценка степени ионизации говорит о значительном запасе энергии. Излучение, испускаемое шаром, будет пульсировать вместе с колебаниями температуры и энергии, высвобождаемой при рекомбинации. Подобные отклонения от устойчивой равновесной температуры с последующими возвращениями к ней требуют, чтобы рекомбинация не успевала их компенсировать при относительно больших потерях энергии. Если бы вся энергия первоначальной ионизации была высвобождена за 10^{-4} с, сила взрыва соответствовала бы примерно силе взрыва 100 г нитроглицерина.

Дмитриев предположил, что первоначальные процессы образования шаровой молнии заключаются в исчезновении электронов в центральной высокотемпературной области при их прилипании к молекулам кислорода, в результате чего возникает оболочка из отрицательных ионов кислорода. Оболочка должна быть устойчивой и обеспечивать барьер против диффузии заряженных частиц, так как иначе подвижность ионов может привести к исчезновению плазменного шара менее чем за 0,01 с. Слой низкотемпературных ионов кислорода может захватывать электроны в центре шара, а бомбардировка электронами может вызвать некоторое возбуждение и свечение оболочки. Перемещения сферы частично объясняются меняющимся положительным электрическим зарядом примерно 3 мкКл, возникающим вследствие микроамперного тока коронного разряда.

Согласно этой теории, длительное существование шара, несмотря на множество искр при столкновениях с де-

ревьями, объясняется наличием устойчивой внешней оболочки из отрицательных ионов кислорода (O^{-2} , O^{-}), возникших благодаря прилипанию электронов. Соприкосновение с заземленным металлом нейтрализует стабилизирующую оболочку и может уничтожить всю систему.

Факты появления шаровой молнии внутри строений, экранирующих ее от внешних электрических полей, и проникновения ее сквозь диэлектрики приводились в качестве доказательства того, что огненные шары плазмы не могут поддерживаться внешними источниками энергии. Шаровая молния рассматривалась как замкнутая полость, окруженная сильно ионизованной проводящей сферической оболочкой, по которой текут большие поверхностные токи и внутри которой имеется интенсивное высокочастотное электромагнитное поле [119]. Энергия такой молнии — это не только энергия плазмы, но и энергия самого поля. Такие резонаторы для микроволн могут образоваться маленькой петлей канала молнии или сильным током в молниеотводе.

Длительное существование шаровой молнии свидетельствует о том, что рассеяние энергии невелико. Именно так и должно происходить, если высокочастотное электромагнитное излучение сосредоточено внутри хорошо проводящей и отражающей радиоволны сферической оболочки, а частота этого излучения много больше частоты столкновений электронов с молекулами. Удержание плазмы при незначительном рассеянии энергии может иметь место в этом случае только при пониженном внутреннем давлении, так как атмосферное давление будет дополнительно уравниваться за счет давления электромагнитного излучения. Основная резонансная гармоника электромагнитного поля создает неоднородное давление излучения по поверхности, и, следовательно, для равновесия необходимы несколько гармоник.

В таком образовании высокочастотное поле напряженностью $3 \cdot 10^8$ В/м при частоте $1,6 \cdot 10^{10}$ Гц могло бы обеспечить давление 10^5 Н/м², при котором могла бы поддерживаться плотность $6 \cdot 10^{10}$ электрон/см³. Если принять, что энергия внутреннего поля излучения определяется в основном лишь необходимостью уравновесить атмосферное давление, то для сферы радиусом 10 см по-

лучаем необходимую величину энергии 400 Дж, а для 30 см — 10^4 Дж. Уже имеются сообщения о получении плазмы в высокочастотном электромагнитном поле, причем используются частоты, на порядок более низкие, и напряженности поля, на 5 порядков меньшие, чем указано выше. Об этом будет идти речь в следующем разделе [404, 405].

Сгустки плазмы поддерживались с помощью внешнего радиоизлучения в течение 10—20 с, что указывает на поглощение энергии, проходящей в сгусток сквозь стенки; однако и после прекращения подачи энергии видимое свечение продолжалось 0,5 с или больше. Это время жизни достаточно хорошо согласуется с тем, что можно было ожидать при данном запасе энергии поля излучения, если учесть соответствующие параметры и уменьшение концентрации заряженных частиц во внешней области сгустка. С другой стороны, авторы экспериментальной работы объясняют большую длительность свечения медленными переходами частиц газа из возбужденных метастабильных состояний с выделением энергии в виде светового излучения. В естественных условиях генерация чрезвычайно мощных высокочастотных электромагнитных излучений, как это необходимо по теории, рассматривающей шаровую молнию как сферический резонатор, едва ли возможна даже при самых сильных грозах.

В одной необычной теории шаровой молнии [503] предложена модель, представляющая собой окруженное плазмой небольшое тороидальное сверхпроводящее ядро из атомов кислорода и азота, уплотненных до металлического состояния. Плазму удерживает магнитное поле токов ядра. Ядро создается сжатием канала линейной молнии. Сначала канал сжимается за счет обычного магнитогидродинамического пинч-эффекта. Сопротивление канала в области возникающих при этом узлов возрастает. Ток проходит в основном по внешнему слою канала, что создает сильное сжатие плазмы сверхвысоким давлением магнитного поля, в результате чего достигается сверхвысокая плотность при относительно низкой температуре. Это сжатие за счет пинч-эффекта приводит атомы атмосферных газов в металлическое состояние. Затем этот отрезок разряда молнии изгибается в петлю, которая от-

деляется от остального канала. Содержание энергии в веществе ядра было оценено в 1400 ккал/г. Плазма, окружающая ядро, имеет высокую температуру и излучает тот свет, который упоминается обычно в описаниях шаровой молнии.

Представление о шаровой молнии как о плазменном сгустке порождает некоторые фундаментальные трудности. Во-первых, еще не найдена равновесная структура, которая сохранялась бы достаточное время, несмотря на динамические неустойчивости плазмы. Собственные поля плазмы не могут обеспечить самоудержание в замкнутой системе при сохранении энергии, определяемом условиями, налагаемыми теоремой о вириале. Необходимы еще и внешние силы, например такие, как атмосферное давление. Если же единственной силой, способствующей удержанию плазмы, является атмосферное давление, то возможный верхний предел энергии сгустка оказывается намного ниже высоких оценок [405] энергии шаровой молнии, основанных на сообщениях о выделении ею тепла или о ее взрывах; соотношение

$$PV \geq U + E + M$$

дает верхний предел полной удельной энергии ~ 100 Дж/л. Однако параметры, рассматриваемые в теореме о вириале, не включают добавочной «химической» энергии, которая может присутствовать в форме энергии ионизации, возбуждения или энергии химических реакций в веществе плазмы. Тепловые потери с поверхности шара вплоть до максимума, допустимого теоремой о вириале, слишком велики, и без какой-нибудь изоляции вся масса могла бы существовать не дольше нескольких миллисекунд. Неспособность объяснить достаточно длительное удержание плазмы с большой энергией, будь то любая кинетическая, тепловая или энергия электромагнитного поля, привела к появлению теорий, согласно которым шаровая молния поддерживается за счет внешнего источника [151]. Образование шаровой молнии как сферического разряда постоянного тока уже рассматривалось выше. В следующем разделе в качестве источника ее энергии будут рассмотрены естественные электромагнитные волны.

Для этой проблемы определенный интерес представляет наблюдение светящихся шаров при атмосферном давлении при пропускании мощного импульса тока через металлическую проволоку [237, 477]. Такие огненные шары описывались как сгустки плазмы, и медленная рекомбинация, на которую указывает период существования порядка секунд, относилась к энергии, определяемой особой конфигурацией токов и зарядов [477]. Никакой конкретной конфигурации, способной настолько задержать рекомбинацию, мы, однако, не знаем. Тем не менее сообщения о таких шарах доказывают, что долгоживущие светящиеся сферы (возможно, вихревые образования из раскаленных газов или даже неизвестные плазменные структуры) действительно существуют.

Н. Образование шаровой молнии естественным электромагнитным излучением

Идея образования шаровой молнии электромагнитными волнами как сгустка плазмы в естественных условиях была выдвинута Капицей в 1955 г. в статье, оказавшей большое влияние на дальнейшие исследования в этой области [241]. Капица пришел к выводу, что длительное свечение, наблюдаемое у шаровой молнии, возможно только при наличии какого-то непрерывно действующего внешнего источника энергии. Даже максимальной энергии, которая может быть запасена в шаре в момент его образования, недостаточно для поддержания непрерывного свечения на протяжении всего времени его жизни. Оценка, на которую опирался этот довод, была выведена из времени свечения огненного шара при атомном взрыве. Такое облако должно содержать максимально возможный запас энергии; это позволяет оценить наибольшее время, в течение которого шар может светиться за счет только внутренней энергии. В основу расчета продолжительности существования небольших шаровых молний был положен тот факт, что длительность свечения огненного шара диаметром 150 м от ядерного взрыва составляет примерно 10 с. Количество энергии, содержащееся в таком облаке, прямо пропорционально его объему и, следовательно, кубу его линейных размеров, а излучае-

мый свет пропорционален площади поверхности, т. е. квадрату линейных размеров. Отсюда Капица пришел к выводу, что время свечения шара пропорционально его линейным размерам, т. е. диаметру. Шар диаметром 10 см, если бы он мог быть уподоблен ядерному облаку, должен был бы светиться максимум 0,01 с. Длительность существования шаровой молнии много больше, поэтому в него должна поступать энергия извне.

Образование в лазерном луче очень маленьких плазменных шаров, объемом около 10^{-4} см, предоставляет в наше распоряжение дополнительную информацию о возможной продолжительности жизни такого шара [20]. Продолжительность жизни светящегося шара с начальной энергией 1 Дж, обеспеченной источником света, была порядка 10 мкс, что согласуется с приближенным соотношением $t = kE^{1/2}$, определяющим время жизни t через начальную энергию E . Эта приближенная формула приложима не только к очень маленьким, но и к большим шарам. Излучение светящегося облака от ядерного взрыва мощностью 1 кт длится около 10 с (т. е. $k \sim 10$ с/кт $^{1/2}$). Продолжительность жизни большой шаровой молнии с энергией $11 \cdot 10^6$ Дж ($3,3 \cdot 10^{-6}$ кт) должна быть порядка 0,01 с [184, 512], что совпадает с оценкой Капицы, основанной на размерах шаровой молнии. Время жизни шаровой молнии, по-видимому, много больше времени, которое представляется возможным даже при максимальной начальной энергии.

Капица предположил, что внешним источником энергии, наличием которого можно было бы объяснить неожиданно долгую жизнь шаровой молнии, является какое-то естественное радиоизлучение. Диаметр плазменной сферы, т. е. шаровой молнии, определяется резонансом шара во внешнем переменном электромагнитном поле; при этом поглощение энергии в шаре максимально. Резонанс возникает, когда длина волны внешнего излучения в 3,65 раза больше диаметра сферы.

Первоначально область, в которой возникает шаровая молния, содержит в небольшой концентрации ионизированный газ, образованный предшествующим ударом молнии или каким-либо другим электрическим явлением во время грозы. Сначала возникает резонанс с высокочас-

тотным полем области меньших размеров, где ионизируются частицы, имеющие низкий потенциал ионизации, затем энергия волны поглощается все более и более по мере того, как происходит ионизация и увеличивается объем сферы, пока не будет достигнут, наконец, равновесный размер, который в дальнейшем сохранится. Если же, например, увеличивается энергия внешнего излучения, то повышается температура плазмы, и объем шара соответственно увеличивается. Сфера большого размера уже не будет находиться в резонансе с электромагнитной волной. Это в свою очередь уменьшит поглощение энергии шаром, и размер его уменьшится до равновесного. Наиболее обычные размеры шаровой молнии, отмечавшиеся в наблюдениях, соответствовали бы длинам электромагнитных волн от 35 до 100 см.

При отражении линейно поляризованных радиоволн от поверхности земли могут возникать стоячие волны. Напряженность электрического поля в пучности стоячей волны возрастает вдвое, а высота, на которой находится пучность, остается для стационарной волны постоянной. Оба эти обстоятельства наводят на мысль, что именно стоячие волны могут создать наиболее благоприятные условия для образования ионизированного сгустка, причем постоянная высота стационарной пучности, возможно, как раз и не позволяет ему подниматься вверх подобно облаку раскаленных газов от ядерного взрыва. Согласно этой теории, проникновение шаровой молнии в здания объясняется распространением возникающих радиоволн по имеющимся волноводам, например по дымоходам. Среди проблем, связанных с этой теорией, Капица, в частности, рассматривал вопрос о требуемых электромагнитных волнах, которые должны были бы возникать в результате электрической активности грозы, но до сих пор еще не наблюдались. Он полагал, что источником такого излучения может быть колебание ионизированного газа либо около облака, либо вблизи земли.

Более ранние исследователи также высказывали предположение, что шаровая молния может возникать как электрический разряд, созданный стоячей волной. Де Янс [230] указывал, что, согласно мнению Лоджа [288], стоячая электрическая волна возникает в подземных проводни-

ках, пораженных молнией. Шаровая молния образуется подобно кистевому разряду над земной поверхностью в максимумах напряженности поля такой волны. Термин «стоячая волна» употреблялся только в обзоре де Янса, опубликованном в 1912 г., но не в более ранней работе 1892 г., на которую он ссылался. Подобные же соображения привлекались в 1930 г. для объяснения описанного ранее образования шаровой молнии в закрытом помещении [303]. Сфера величиной с апельсин и такого же цвета возникла на металлической ручке с внутренней стороны двери в момент удара грома. Когда шар исчез, не сдвинувшись с места, раздался громкий взрыв. Наблюдатель предположил, что в телефонном проводе, протянутом по двум стенам, могла возникнуть стоячая волна в результате возбуждения высокочастотного тока в телефонных проводах при разряде молнии.

Капица также особо рассмотрел проблему возникновения шаровой молнии в закрытых помещениях, в частности в самолетах, которые почти полностью окружены металлической оболочкой, и пришел к выводу, что теория электромагнитной волны вполне может объяснить и это явление.

В 1930 г. появление очень ярких разноцветных шаров из печки в здании вблизи горной вершины также было приписано действию стоячей волны [429]. В отдалении была замечена молния, но ни дождя, ни града не было, хотя небо закрывала темная туча. Снова теория стоячей волны была предложена [479] в связи с появлением шаровой молнии в глинобитных хижинах в мексиканской пустыне (позже этой работе незаслуженно приписывался приоритет). Предполагалось, что удар молнии возбуждал внутри глинобитной хижины, игравшей роль электромагнитного резонатора, стоячие электромагнитные волны. Несомненно, однако, что именно работа Капицы послужила основой последовавшего затем интенсивного обсуждения теории, рассматривающей стоячую волну как источник шаровой молнии.

Были экспериментально и теоретически исследованы некоторые свойства плазменных образований в электромагнитных волнах. Результаты подтвердили часть положений этой теории и породили дополнительные проблемы.

Размеры плазменных сгустков, полученных экспериментально в высокочастотных электрических полях, будут возрастать с увеличением мощности, передаваемой сгустку от поля [141, 201]. Постоянство величины и яркости большинства шаровых молний, описанных в обзоре [420], рассматривалось как довод в пользу существования внешнего источника энергии шара, поскольку расходование начального запаса энергии должно было бы сопровождаться заметными изменениями, например уменьшением размеров. С другой стороны, в 15% сообщений этого обзора упоминаются изменения, среди которых наиболее обычны уменьшение шара или изменение цвета.

Исследование удержания заряженных частиц линейнополяризованной стоячей электромагнитной волной, проведенное в развитие теории Капицы с помощью уравнений движения типа уравнений Матье, показало, что частицы могут удерживаться силами, какие фигурируют в этих уравнениях, только вблизи узла электрического поля [562], а не пучности. Тот факт, что подобные решения этих уравнений не имеют места для пучностей электрического поля, свидетельствует о невозможности удержания плазмы. Поле стоячей волны оказывает влияние на движение частиц сгустка по двум направлениям. Вдоль же бегущей волны частицы движутся свободно, но если происходит отражение волны, как предположил Капица, то может осуществляться удержание частиц в плазме в двух поперечных к направлению распространения волны направлениях. Таким образом, обычное горизонтальное движение шаровой молнии требует изменения направления распространения волны. Удержание в узлах стоячей синусоидальной волны отличается от процесса, который имел в виду Капица, рассматривавший усиление электрического поля в пучности, что способствовало образованию частиц высоких энергий и ударной ионизации, а также поддержанию этой области на определенном расстоянии от земли.

Оценка возможности удержания плазмы с помощью приведенных выше уравнений движения отдельных частиц предполагает, что осуществляется лишь взаимодействие частиц с внешним полем. Это может быть справедливо только для малых концентраций заряженных частиц,

поскольку уже при средних величинах концентраций поле внутри сгустка искажается собственным внутренним полем, а поглощение энергии внешнего поля происходит лишь у поверхности сгустка. Добавочная сила, возникающая в поле за счет магнитной составляющей электромагнитной волны при движении заряженных частиц, также может препятствовать удержанию [167], хотя это затруднение исчезает, если плазма находится в резонансе с внешней волной. Эти исследования [167, 520] подтвердили локализацию шара у узлов электрического поля, где напряженность электрического поля минимальна.

Однако, как замечено в работе [520], остается проблема о возможном удержании при сдвиге из области пучности, где наиболее благоприятны условия для ионизации, к узлам, где могут осуществляться условия удержания плазмы с низким импедансом. Остается также проблема искажения поля стоячей волны, особенно для сгустка в ее узле. Имеются также экспериментальные свидетельства образования характерных разрядов как в узлах, так и в пучностях высокочастотного поля [27, 479].

Использование давления излучения внешней электромагнитной волны для того, чтобы помешать шару диаметром 10 см и с температурой в несколько тысяч градусов подняться благодаря силам плавучести ~ 600 дин, представляется затруднительным. Согласно оценке [520], при мощности 40 кВт, половина которой уходит на поддержание шара, максимально возможная сила составляет 20 дин, т. е. менее 10% силы, требуемой для равновесия. Подъемная сила шаровой молнии диаметром примерно 13 см с предполагаемой температурой 14 000 К, наблюдавшейся над р. Онегой, была оценена примерно 1700 дин [128]. Сила, препятствующая подъему шара, была объяснена электростатическим притяжением земли или заземленных предметов из-за избыточного заряда 2,8 мкКл, который возник в шаре и при небольших отклонениях удерживался на нем в результате ухода электронов благодаря коронному разряду.

Общее движение шара также было сочтено результатом неустойчивого электростатического равновесия, в котором он должен был находиться. Вероятно, его положение осталось бы постоянным даже в отсутствие заряда,

так как по расчетам его подъемная сила оказывалась очень малой. Оценка энергии, требующейся для поддержания такого шара, была сделана на основе предположения, что рассеяние энергии у него такое же, как у электрической дуги равной площади. Принимая, что энергия в дуге составляет примерно 60 Вт/см^3 , для шара диаметром 10 см была получена величина энергии рассеяния 18 кВт. На этом основании для возникновения естественной шаровой молнии необходимо излучение приблизительно пятикратной мощности, хорошо сфокусированное и при колебаниях частоты не более 2%; образование в естественных условиях подобной волны длиной 40 см рассматривалось как весьма вероятное [520].

Обсуждение удержания заряженных частиц при гармонических колебаниях в высокочастотном поле было распространено и на трехмерные стоячие волны, создаваемые тремя ортогональными бегущими волнами. В таком поле возможно полное удержание заряженных частиц, в отличие от изучавшихся ранее полей, которые не влияют на движение частиц вдоль одной из пространственных координат [475]. Уравнения трехмерной системы слишком сложны для общего аналитического решения, но были получены численные решения на ЭВМ. Результаты показали, что возможно удержание электронов с энергией порядка 50 кэВ при мощности источника 2,5 МВт и частоте $1,6 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ в облаке, состоящем из одних электронов с концентрацией 10^{16} м^{-3} , если рассматривать область удержания как резонатор с проводимостью стенки $3 \cdot 10^6 \text{ мо/м}$ (коэффициент мощности 50 000). Образование в естественных условиях трех таких волн с необходимой геометрической конфигурацией представляется маловероятным. Рассматривалась и другая модель поля стоячей волны, созданного не непрерывным излучением, как принималось в более ранних теориях, а импульсным поляризованным излучением в узкой полосе частот [476, 479]. Импульсное интерференционное поле образуется при отражении такой волны, подобно тому, что имеет место в радиолокации.

По-видимому, некоторые наблюдения шаровой молнии проще объяснить, исходя из предположения о внешнем источнике энергии в виде высокочастотного радиоиз-

лучения. В частности, отсюда следует, что дымоход действительно мог бы играть роль волновода, на что указал Капица. Имеется сообщение трех очевидцев, одновременно наблюдавших появление светящейся сферы величиной с кегельный шар, возникшей перед камином в тот момент, когда снаружи ударила сильная молния. Шар испускал голубой свет, похожий на цвет спиртового пламени [413]. Шар вращался, а когда он прокатился по камину и упал на пол, очевидцы убежали из комнаты. Один из них в момент появления шара смотрел прямо на камин и был убежден, что шар не спустился через него снаружи. В другом случае потрескивающий огненный шар размером с яблоко появился в плите после сильного взрыва, когда плиту попытались затопить через два часа после того, как сильная молния ударила в дерево рядом с кухней [229]. Гроза давно кончилась и небо было чистым.

В качестве возражения против теории, рассматривающей внешнее высокочастотное излучение как источник энергии [277], приводился случай, когда шаровая молния вскипятила бочку воды, так как излучение подобного типа в воде не распространяется. Распространенная оценка энергии шаровой молнии была сделана именно по описанию этого случая. Однако в 1911 г. было описано наблюдение, которое свидетельствует о присутствии высокочастотного излучения [65, стр. 123]. Согласно этому наблюдению, возникновение шаровой молнии вызвало свечение нити электролампочки. Свет лампочки был очень ярким и погас сразу, едва исчезла шаровая молния. Теории, согласно которым шаровая молния поддерживается внешним радиоизлучением, то отвергались как ненужные для объяснения содержащейся в ней энергии [213], то принимались, поскольку они давали четкое объяснение конкретным случаям вроде возникновения шаровой молнии вблизи носа самолета [33, 257].

В экспериментальных исследованиях было получено образование областей светящихся разрядов в высокочастотном поле в условиях, аналогичных тем, которые были указаны в теории, рассматривающей стоячую волну как источник шаровой молнии. Мощные импульсы радиолокаторов фокусировались с помощью параболических отражателей, чтобы получить светящиеся массы в откачан-

ных стеклянных баллонах, где давление было ниже атмосферного [175, 195, 435]. При волнах длиной 3 см и давлении 10 мм рт. ст. возникал бочкообразный разряд диаметром примерно 4 см [170]. При увеличении давления до 40 мм диаметр уменьшился до 1 см. При более низких давлениях разряд был красно-фиолетовым, при более высоких он стал фиолетовым и более ярким [435]. Форма светящейся области менялась в зависимости от положения баллона и от величины давления. При 3—20 мм рт. ст. в разряде появлялись нерегулярные слои. При более низких и более высоких давлениях в баллоне вдоль оси отражателя возникали один-два разряда с «перетяжкой». Увеличение давления до 50 мм рт. ст. в баллоне погасило эти разряды. Импульсный луч давал мощность в среднем 50 Вт. Стенка камеры оставалась холодной, кроме тех случаев, когда область разряда непосредственно касалась стекла. При контакте с яркой массой стенка за 10 с нагревалась так, что к ней нельзя было прикоснуться.

Высокочастотный генератор, нагруженный на полуволновую линию из двух параллельных проводов, создавал в воздухе при атмосферном давлении яркий пламениподобный разряд [478]. Разряд, как сообщалось, имел место только у пучности электрического поля и отличался по форме от разрядов, наблюдавшихся при более низких давлениях в поле, созданном при отражении волной. Мощность источника 10 кВт мала для создания в шаре поля с разностью потенциалов 10^6 В, что необходимо для ионизации, согласно теории стоячей волны, в случае, когда шар находится у узла поля [562]; однако разряд, казалось, был того же типа, что и при высоких напряжениях.

Очень яркий, почти сферический плазменный сгусток диаметром $\sim 2,5$ см был получен в цилиндрической кварцевой трубке, введенной в индукционную катушку, питаемую источником с частотой 10 МГц [334]. Вопреки общепринятому мнению, что генерация высокочастотных разрядов при атмосферном или более высоком давлении потребует мощности порядка 10 кВт или больше, для поддержания разряда в аргоне и криптоне оказалось достаточно 600 Вт. Разряды образовывались при низком давлении, причем оно постепенно повышалось при увели-

чении энергии излучения. Подстройка частоты генератора во время разряда с целью добиться наибольшей передачи энергии в плазму дала очень эффективный результат. Энергия, использовавшаяся для поддержания плазменных сгустков, определялась по разности между общей мощностью генератора и измерявшейся термоэлементом мощностью, рассеиваемой на анодах его ламп. Линии загрязнений в излучении плазмы были очень слабы. Наиболее интенсивны были линии нейтрального аргона, и при повышении давления интенсивность видимого непрерывного спектра значительно возрастала. Температура аргоновой плазмы высокого давления была оценена в 9000 К при концентрации электронов $\sim 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Вращение газа в разряде с помощью вентилятора, установленного снизу в экспериментальной камере, должно было бы в соответствии с теорией обеспечить устойчивость плазмы, что находится в согласии с наблюдениями шаровых молний [482]; однако такое вращение оказалось неэффективным. В разряде между электродами переменного тока с частотой 60 Гц для его устойчивости оказалось необходимым вращательное движение газа [552]. Эффект небольшого вихревого движения, при котором, кроме того, снижаются высокочастотные шумы разряда, сравнивался с особенностями свечения в воронке торнадо. С другой стороны, в индуцированном безэлектродном разряде плазма при высоком давлении была устойчива без дополнительного движения, а вращение с помощью вентилятора вызывало развитие винтовых неустойчивостей в плазме, которое прекращалось при повышении давления.

В высокочастотном разряде при атмосферном давлении в воздухе также образовывались долгоживущие светящиеся массы [404]. Огненные области, а именно изогнутые или змееобразные шнуры диаметром 5—7 см, продолжали светиться 0,5—1 с после выключения генератора. Разряд с металлических электродов был вызван излучением частотой 75 МГц внутри камеры с алюминиевыми стенками, имевшей форму куба со стороной 2,5 м. Напряженность электрического поля в этом резонаторе при типе резонансных колебаний TM_{110} была оценена в 1000 В/см. Пока подача энергии продолжалась, свободно

всплывающий шар пролетал до стенки за 10—20 с. Иногда он взрывался. Пауэлл и Финклстайн провели спектроскопические исследования светящихся компонент такого разряда в стеклянных трубках диаметром 15 см, для чего использовали источник радиоизлучения мощностью 30 кВт [405]. Разряд создавался между электродами. Когда источник отключался, плазма сама отделялась от электродов и поднималась к верхушке цилиндра, где оставалась до прекращения свечения. В стеклянной камере свечение продолжалось 0,5—1 с после выключения источника.

Такие же разряды создавались и вне стеклянных камер, причем оставались видимыми 0,2—0,4 с. Эти огненные шары образовывались при давлении от 0,5 до 3 атм. При давлении ниже 0,5 атм разряды больше походили на обычные тлеющие разряды и при отключении тока исчезали очень быстро. Долгоживущие светящиеся массы образовывались в азоте, кислороде, смесях азота с кислородом при соотношениях от 20 : 1 до 1 : 2 (включая и смесь, соответствующую по составу воздуху), а также в окиси азота. В аргоне и двуокиси углерода возникали дугообразные разряды, которые после отключения тока светились лишь несколько миллисекунд. Свечение в азоте было голубоватым и относительно слабым, в кислороде — белым и очень ярким, так что на разряд трудно было смотреть. В обычном воздухе (20% кислорода) разряд был желтовато-белым и средней яркости. Огненный шар в воздухе постепенно становился все более желтым по мере того, как в газе разряда накапливалась двуокись азота.

Наиболее крупные шары, иногда более 50 см в диаметре, возникавшие в закиси азота, были ярко оранжевого цвета. Они сохранялись после отключения тока до 2 с. Для образования этих разрядов успешно использовались электроды из разных металлов (платина, золото, серебро, медь, цинк, кадмий, олово, алюминий, вольфрам), а также угольные. Свинцовые электроды и электроды, покрытые ртутью, результатов не дали. Исследователи пришли к выводу, что разряды в среднем сохранялись тем дольше, чем труднее испарялся электрод. Температура огненных шаров была определена в 2000—2500 К по сопротивлению вольфрамовых проволочек толщиной 75 мкм. Эта

температура много ниже той, при которой воздух начинает заметно светиться (~ 4000 К), а потому объяснение наблюдавшегося свечения превратилось в трудную проблему.

Было измерено общее излучение в видимой и инфракрасной областях спектра при длинах волн от 0,4 до 1,1 мкм. При наиболее ярком разряде — в кислороде — излучалась мощность до 160 Вт. Значительно более тусклый разряд в воздухе излучал примерно $1/10$ этой мощности в видимой области спектра между 0,4 и 0,72 мкм и еще меньше в инфракрасной — от 0,72 до 1,1 мкм. Наблюдавшееся свечение могли бы дать возбужденные частицы с концентрацией 10^{15} — 10^{16} в 1 см^3 и энергией возбуждения 3—6 эВ. Согласно расчетам, их требовалось примерно в 10 раз больше, чтобы дать всю энергию, которая рассеивалась к стенкам камеры. В азоте концентрация электронов, измеренная через 100 мс после отключения тока, была равна $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Видимый свет разряда во всех газах оказался излучением примесей и не соответствовал спектру самого газа, находившегося в камере. В экспериментах с плазмой часто наблюдается свечение веществ, попадающих в разряд с электродов или через стенку камеры [132]. В азоте все видимое свечение разряда было обусловлено частицами металла с электродов. Органические примеси в приборе давали также молекулы CN, иногда замечавшиеся в спектрах.

Излучение разряда в воздухе резко отличалось от излучения азота и определялось главным образом излучением чистого кислорода. Видимый свет был в основном непрерывным спектром двуокиси углерода от реакции окиси углерода с атомарным кислородом и включал несколько линий металла электродов. На длинах волн ниже видимой части спектра отмечались полосы Шумана — Рунге умеренной интенсивности (O_2) и полоса гидроксидов $\text{OH}(0,0)$ большой интенсивности, но не игравшая существенной роли в свечении, поскольку длина ее волны равна 3064 Å. Цвет разряда также указывал на образование двуокиси азота, но выделить ее спектр на фоне спектра двуокиси углерода было невозможно. Сильное излучение двуокиси углерода можно объяснить только неравновесным возбуждением ее молекул, так как относи-

тельная концентрация ее, по-видимому, низка ($< 1\%$), а измеренная температура много ниже необходимой для такой интенсивности излучения.

Было выдвинуто предположение [405] о возбуждении метастабильных уровней молекулярного азота или кислорода, энергия которых передается излучающим частицам, создающим видимое свечение. Для объяснения длительного свечения самого азота было выдвинуто предположение о возбуждении состояний $A^3\Sigma_u^+$, $\omega^1\Delta_u$ и $^3\Delta_u$ молекулы азота. Но в воздухе переход молекулы азота в нормальное состояние из возбужденных уровней при столкновениях, по-видимому, должен быть очень быстрым; учитывая большую яркость послеразрядного свечения кислорода, для объяснения длительного свечения в воздухе было принято, что молекула кислорода может находиться в состояниях $b^1\Sigma_g^+$ и $a^1\Delta_g$. Хотя высвечивание в таких состояниях может длиться от 1 до 10 с, снятие возбуждения при столкновениях с частицами воздуха при атмосферном давлении и температуре 2000 К, согласно известным коэффициентам, должно быть настолько быстрым, чтобы оно эффективно уничтожило возбужденные молекулы кислорода менее чем за микросекунду, за исключением, может быть, молекулы в состоянии $a^1\Delta_g$.

Ввиду важнейшей роли, которую играют в этой модели шаровой молнии молекулы двуокиси углерода, атомы металлов и другие частицы с сильным излучением в видимой части спектра, образование огненного шара, согласно этой теории, зависит от возникновения излучающей смеси, содержащей эти вещества. Такая смесь могла бы образовываться при предварительном ударе линейной молнии в металлический или деревянный предмет. Наблюдавшиеся излучающие вещества в целом не характерны для воздуха, за исключением, возможно, двуокиси азота. Вот почему это относительно низкотемпературное свечение отличается от высокотемпературного излучения обычной молнии.

Оценка электрического поля в этих высокочастотных разрядах в 1000 В/см, что на несколько порядков превосходит высокочастотные поля, наблюдавшиеся в природе, заставила исследователей отказаться от мысли о возможности образования шаровой молнии естественным высо-

кочастотным радиоизлучением. С другой стороны, грозовые электростатические поля такой величины вполне вероятны, почему их и предложили взамен в качестве возможного источника шаровой молнии. Светящаяся сфера в этом случае представляла бы собой шар положительных ионов, возникших при разряде постоянного тока. Свечение разрядов, созданных в высокочастотном поле в течение 0,5—1 с после отключения тока, походило на свечение в разряде постоянного тока. Поддержание разряда дольше этого периода — до тех нескольких секунд, которые, согласно многим сообщениям, составляют время жизни шаровой молнии,—связывают с током, возникающим в электрическом поле, которое сменило направление после предварительного разряда молнии. Обратная полярность поля помогает нейтрализовать подъемную силу положительно заряженной сферы. Таким образом, эксперименты с высокочастотными разрядами, показавшие возможность длительного существования светящегося шара после прекращения поступления внешней энергии, легли в основу и другой теории, а именно теории, согласно которой непрерывную энергию для шаровой молнии поставляет грозовое электростатическое поле.

Согласно сообщениям, времена существования поля с обратной полярностью, возникающего после разряда молнии, не превышают времени свечения высокочастотных разрядов после отключения тока. Оценка времени свечения разрядов постоянного тока по времени свечения высокочастотных разрядов представляется возможной, так как и в том и в другом случае, по-видимому, происходит возбуждение метастабильных состояний частиц, которые и обладают запасом долго сохраняющейся энергии. Однако существует большое различие между временем послесвечения высокочастотных разрядов (около 1 с) и временем существования, пересчитанным из экспериментальных данных о продолжительности свечения плазменных сгустков в луче лазера при сгустке диаметром 10 см с максимально возможной плотностью энергии, равной плотности энергии в облаке ядерного взрыва (0,01 с).

Исключением среди объектов с кратким периодом видимого свечения, таких, как высокотемпературная плаз-

ма, молния, высокочастотные разряды или разряды постоянного тока и сгустки плазмы в луче лазера, являются светящиеся объекты, связанные с испарением металлов при разрядах постоянного тока, о чем уже шла речь выше, а также высокочастотные разряды, загрязненные посторонними веществами, включая металл электродов. Метастабильные частицы, существование которых предположили Пауэлл и Финклстайн, хотя и не наблюдались до сих пор в высокочастотных разрядах, могут служить объяснением значительно более длительного видимого свечения. Короткоживущие разряды вполне в состоянии возбуждать более высокие энергетические уровни, что согласуется с большой начальной температурой и энергией, отмечавшихся в конкретных примерах. С другой стороны, возникновение в обычных условиях долгоживущих метастабильных состояний, очевидно, требует особых процессов возбуждения. Имеются сообщения о том, что при низких давлениях в высокочастотных электромагнитных полях возникали плазменные сгустки с темными кольцами вокруг центральной светящейся зоны [525]. В таких образованиях концентрации как нейтральных частиц, так и заряженных были очень низки; электронная концентрация составляла примерно 10^7см^{-3} . Это позволило использовать в экспериментах довольно слабые электрические поля. Изучение таких разрядов в химически чистых газах показало, что для получения плазменных сгустков с темными кольцами необходим кислород, во всяком случае присутствующий хотя бы как примесь. Характерным цветом разряда в кислороде был желто-зеленый цвет линии 5632 \AA молекулярного кислородного иона O_2^+ . Интересно сравнить эти плазменные сгустки с шаровой молнией, которая наблюдалась с близкого расстояния на берегу р. Онеги [128] и имела яркую желто-белую центральную зону, окруженную темно-фиолетовым слоем и светло-голубой внешней короной.

В литературе можно найти лишь крайне скудные сведения о том, может ли существовать в естественных условиях такое высокочастотное поле, которое необходимо, если считать, что шаровая молния должна возникать в стоячих электромагнитных волнах. Если имеет место резонанс плазменной сферы согласно теории, предложен-

ной Капицей, то для создания шаровой молнии диаметром 20 см, часто упоминающемся в сообщениях, нужно излучение с длиной волны 73 см, т. е. с частотой 410 Мгц. Сам Капица предполагал, что такие радиоволны могут генерироваться в грозовых облаках и либо излучаться сфокусированным пучком от облаков к шару, либо распространяться по ионизованному каналу, созданному разрядом молнии [243]. На основании грубых оценок, полученных при изучении характера поражения медных поверхностей молнией, было высказано предположение о наличии в молниевом столбе колебаний с частотами порядка сотен мегагерц [214]. Вокруг поверхностных фульгуритов наблюдались тесно расположенные концентрические кольца. По расстояниям между кольцами, используя характерные параметры для расплавленной меди, образовавшейся при ударе молнии, была рассчитана скорость волн на поверхности — исходя из предположения, что они возникают при резонансных ультразвуковых колебаниях. Ультразвуковые волны рассматривались как возможный источник электромагнитных колебаний с частотами порядка мегагерц.

Были проведены наблюдения микрозарядов в кучевых облаках на частотах 30 и 50 Мгц, хотя в лабораторных экспериментах с заряженными каплями воды не удалось воспроизвести электромагнитного излучения, наблюдавшегося в экспериментах с каплями ртути, которые действуют как четвертьволновые антенны радиоизлучения [451]. Были рассмотрены параметры, необходимые для возникновения высокотемпературной шаровой молнии в мощном электромагнитном излучении, создаваемом дождевыми каплями, причем предполагалось, что вся энергия, освобождаемая при нейтрализации зарядов на каплях, переходит в электромагнитное излучение [8, 9]. Было принято, что необходимая энергия составляет $5 \cdot 10^6$ Дж. При среднем радиусе капель в дожде умеренной силы 0,05 см, заряде в 0,1 электростатической единицы, концентрации 400 капель на 1 м^3 и равном количестве зарядов противоположного знака для получения указанной общей энергии необходимо, чтобы облачность с таким содержанием влаги занимала объем $2,5 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$. Для максимальной оценки в качестве расчетной была приня-

га величина, примерно в 10^7 раз большая, чем это принято для заряда твердых частиц. Считалось, что легко достигим более низкий заряд — 100 электростатических единиц на каплю, при котором потребовалось бы 10^6 м³ дождя. Рассматривался также вопрос о возможной роли молнии в создании высоких концентраций сильно заряженных капель.

В критическом обсуждении [291] было указано, что такое объяснение источника электромагнитной энергии шаровой молнии наталкивается на определенные трудности, после чего автор этой теории изменил свою первоначальную точку зрения [9]. Указывалось, что самый высокий рассматривавшийся заряд 10^6 электростатических единиц для капли радиусом 0,05 см намного больше максимального предела, допускаемого утечкой заряда и поверхностным натяжением капли. При утечке заряд такой капли должен уменьшаться за счет выталкивания заряженных частиц полем капли, или же сама капля должна распасться, поскольку поверхностное натяжение не сможет компенсировать кулоновские силы в таком большом заряде. Водяные капли несколько большего радиуса разрушались при заряде, который составлял всего 1% рассматриваемого. К тому же для передачи энергии огненному шару, видимо, необходимо хорошо сфокусированное излучение при разряде всех капель очень большого участка в попарных столкновениях, происходящих в течение 10^{-8} с. При нормальных обстоятельствах можно лишь ожидать, что энергия будет излучаться облаком равномерно во всех направлениях. Признавая, что эта теория, несомненно, не дает правдоподобного объяснения того, как шаровая молния получает свою энергию, ее автор предположил, что для поддержания высокочастотного разряда в воздухе может оказаться достаточно и очень небольшой плотности энергии, порядка десятков ватт на 1 см³.

В таком случае капельки могут расходовать свою энергию гораздо дольше, чем это утверждалось в возражении, хотя и при таком объяснении вопрос о фокусировании излучаемой облаком энергии остается открытым. Следует отметить, что заряд капли, принятый для средней оценки, был гораздо ниже указанного максимального

предела, но в этом случае для обеспечения необходимой энергии потребуется очень большой объем облака. С другой стороны, тут напрашивается предположение, что источником электромагнитного излучения такого типа могут быть какие-то другие протекающие в облаках процессы, и представляется необходимым, как это ни трудно, установить механизм генерации. До тех пор, пока такой конкретный процесс не будет выявлен, вопрос об изотропности излучения не является основной трудностью этой теории.

Электромагнитное излучение при грозах и, в частности, излучение, связанное с молниями, обладают очень широким спектром частот. Это излучение — атмосферическое — фиксировалось одновременно на частотах от 60 кГц до 450 МГц при многих грозах [221]. Измерения производились на расстояниях 5—20 км от грозы. Амплитуды, обратно пропорциональные частотам, изменялись примерно от 10^4 мкВ/м при 10 кГц до 1 мкВ/м при 10^5 кГц, тогда как поле, требуемое для пробоя воздуха, чтобы возник разряд молнии, должно быть порядка 10^6 В/м.

Во время разрядов молний, происходивших иногда менее чем в 3 км от приемников, наблюдалось вертикально поляризованное электрическое поле с частотами от 100 до 4000 МГц [261]. При некоторых измерениях расстояние до молнии определялось по времени между регистрацией в лаборатории радиочастотного излучения в диапазоне 6 кГц — 2 МГц и звуком грома, причем это высокочастотное электромагнитное излучение появлялось спустя 5 мс после регистрации начала разряда молнии. Фотографии импульсов на осциллографе были получены при трех частотах: 140 снимков для сигналов с частотой 100 МГц, 40 — для 400 МГц и 7 снимков — для 800 МГц. Появление сигналов с частотой 1300 МГц отмечалось по осциллографу около 10 раз. Длительность сигналов с частотой 100 МГц была 0,2—5 мс, а 400 МГц — обычно 0,1—0,2 мс, хотя в нескольких случаях излучение продолжалось 2—2,5 мс в виде последовательности импульсов по 50—100 мкс. Сигналы с частотой 800 и 1300 МГц обычно длились 50—100 мкс. Максимальное напряжение, наводимое в антенне при частоте 100 МГц, уменьшалось при-

мерно обратно пропорционально расстоянию до молнии: от 150 мкВ в 2 км до 40 мкВ на расстоянии, несколько большем. Мощность сигналов с частотой 100 МГц составляла обычно 10^{-11} — 10^{-10} Вт на 100 кГц, а излучение в диапазоне 40—1300 МГц $(1-5) \cdot 10^{-10}$ Вт на 1 МГц. Величина мощности, регистрируемая приемником, приводилась к нормированным значениям с учетом измеренного расстояния до молнии и известной эффективной площади антенны. Изучение сигналов на более низких частотах от 5 до 500 кГц выявило уменьшение мощности приблизительно обратно пропорциональное квадрату частоты [250]. Согласно работе [261], в которой рассматривалось излучение на очень высоких частотах, вплоть до 2000—3000 МГц, мощность не следовала подобной зависимости $1/f^2$. Было выдвинуто предположение о максимуме энергии, излучаемом на более высоких частотах [261]. Капица указал, что эти результаты демонстрируют существование узкополосной полосы вблизи тех длин волн, которые, согласно теории стоячей волны, подходят для создания шаровой молнии, хотя это излучение слабо и очень кратковременно [243]. Он предположил, что в отдельных случаях такое излучение может быть достаточно сильным и длительным, чтобы обеспечить непрерывное поступление энергии, необходимой для возникновения шаровой молнии.

На различных этапах развития обычной молнии наблюдались излучения с частотами от 400 до 1000 МГц [69]. Высокочастотное излучение отмечалось при ступенчатом лидере, при стреловидном лидере и иногда при обратном разряде, у которого наблюдалось запаздывавшее излучение, возникавшее через 60—100 мс. Электромагнитное излучение, несомненно, возникает в связи с процессом пробоя, на что указывают импульсы излучения, наблюдаемые, когда происходит изменение большого электрического поля. Иногда наблюдаемое запаздывающее излучение указывает, что это излучение, возможно, возникает внутри тучи или около нее.

Характерные звуки, упоминавшиеся во многих сообщениях о шаровой молнии, могут быть связаны с плазменным излучением широкого спектра, включающим акустические частоты и слышимый звук, которые иногда

вызываются электромагнитными возмущениями и нередко отмечаются при высокочастотных волнах.

Теория о том, что шаровая молния представляет собой плазмод, создаваемый естественным высокочастотным электромагнитным излучением, в настоящее время активно разрабатывается. Некоторые характерные черты огненных шаров, не объясненные другими теориями, полностью объясняются этой моделью светящихся сфер: образование их в закрытых помещениях, их проникновение в здания через дымоходы, их связь с другими грозовыми рядами и длительность существования. Высокие частоты, необходимые для их образования, наблюдались во время гроз (хотя и при очень низкой интенсивности) вместе с электрическими полями, длительность существования и мощность которых на несколько порядков меньше, чем требуется по теоретическим расчетам. Истинный источник наблюдаемого при грозах излучения неизвестен, так же как и реальные процессы, порождающие свечение естественных шаровых молний. Экспериментальное изучение плазменных сгустков, образуемых электромагнитным излучением, показало, что такие светящиеся сферы могут генерироваться высокочастотными радиоволнами при атмосферном давлении и требуют для своего поддержания умеренной мощности. Таким образом, намечается более благоприятная перспектива для разрешения некоторых из наиболее трудных проблем, стоявших перед этой относительно новой теорией, хотя еще предстоит объяснить ряд свойств, а также процессы излучения света лабораторными плазменными сгустками.

Глава 9

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Несмотря на опубликованные за последние 125 лет тысячу с лишним наблюдений и без малого два десятка подробных и углубленных анализов этой проблемы, включая две монографии, шаровая молния остается одной из величайших загадок грозовой активности. И нельзя сказать, чтобы эксперименты преуспели там, где терпит неудачу теория, и воссоздали нечто более сложное, чем простейшие светящиеся сферы. Выдвигалось множество теорий, охватывающих ошеломляющее разнообразие явлений в самых различных областях науки.

Свойства, множественность которых составляет камень преткновения, неоднократно отмечались в разных сообщениях о шаровой молнии и характерны только для этого явления. Светящиеся сферы возникают во время грозы и обычно в какой-то связи — хотя не обязательно по времени или месту — с обычной молнией. Они представляют собой более или менее шаровидные объекты с диаметром около 25 см и ясно видимым цветом — красным, желтым, а иногда ослепительно белым, и проделывают в воздухе длинный и порой сложный путь вблизи земли, проникают в здания, издают потрескивание, словно электрические разряды, существуют нередко в течение 5 с, а затем внезапно исчезают с громким взрывом или бесшумно. Сообщения об этих свойствах, столь отличных от свойств обычной линейной молнии, встречали значительное недоверие, однако зарегистрировано очень много подробных наблюдений шаровой молнии и сделано несколько ее фотографий.

Упорные исследования шаровой молнии дали правдоподобные объяснения некоторым особенностям этого природного явления. Свойства светящихся сфер сильно ме-

няются от случая к случаю, и предлагаемые объяснения, вполне отвечающие конкретной ситуации, также очень не схожи между собой. Различия во внешнем виде и поведении шаровой молнии в разных случаях привели к выводу, что, возможно, существуют разные виды шаровой молнии. В пользу такого заключения, несомненно, говорят результаты излагавшихся выше исследований и их сопоставление с этим явлением природы.

Поэтому думается, что одна какая-либо теория вообще не может дать полного и исчерпывающего объяснения всем сообщениям об огненных шарах в природе. С другой стороны, во многих сообщениях о них фигурируют некоторые общие характеристики. Представление о шаровой молнии как о плазменном сгустке — несколько расширенное, если иметь в виду более низкую, чем обычно, температуру и малую степень ионизации, — приводит к полезному рассмотрению возможных процессов, связанных со структурой, составом, температурой, концентрациями заряженных частиц в молнии и т. п. Такое представление очень часто оказывается удовлетворительным, хотя вопрос о том, как возникает шар в каждом конкретном случае, выпадает из рассмотрения.

Предположения о некоторых механизмах формирования шаровой молнии в природе получают свое подтверждение из прямых наблюдений и результатов экспериментальных лабораторных исследований. Во время гроз неоднократно наблюдалось, как во вспышках линейных молний возникали и отделялись от них светящиеся сферические массы. По-видимому, между шаровой и четочной молниями прямой связи в этом случае не существует: появление одной из них как будто исключает появление другой. Относительно редкое появление слабо светящихся шаров, напоминающих мыльные пузыри, после вспышки молнии вблизи болот или больших массивов растительности, возможно, объясняется диффузным горением — окислением газов, воспламененных обычной молнией. Светящиеся шары этого типа были получены и в лабораториях. Несколько раз наблюдалось, как испаренный металл образовывал огненный шар в результате вспышки обычной молнии или в результате сильного электрического разряда в лабораторных условиях. Особен-

ности поведения таких сфер хорошо согласуются с некоторыми из наиболее трудно объяснимых свойств шаровой молнии — таких, как движение и длительное существование. С другой стороны, структура самих этих образований из металлических паров еще далеко не выяснена. Не определена плотность заряженных частиц и внутреннее строение таких шаров. Следует отметить, что свечение ярких сфер, вообще говоря, может быть результатом возбуждения нестабильных электронных уровней без обязательной ионизации вещества шара.

Значительное время существования и относительная устойчивость сфер из металлических паров, полученных в лабораторных условиях, показывают, что наши представления об их внутреннем строении еще далеко не достаточны. Теория, которая объясняет образование шаровой молнии действием высокочастотного внешнего электромагнитного излучения, по-прежнему вызывает большой интерес. С тех пор как впервые был рассмотрен такой процесс, получено много новых сведений об образовании плазменных сгустков в условиях, близких к естественным. Для того чтобы поддержать существование таких сгустков в воздухе, оказалось достаточной относительно небольшая мощность излучения (500 Вт), что далеко уступает возможным мощностям процессов при грозовых разрядах; однако это излучение должно быть монохроматическим. Существуют ли в природе высокочастотные стоячие радиоволны с достаточной напряженностью поля? Экспериментальная проверка этой теории была относительно ограниченной, и исследование основных параметров, подставленных в модели, было недостаточным.

Главные процессы, которые, согласно этой теории, приводят к образованию шаровой молнии, несомненно, вполне поддаются лабораторному изучению. Несмотря на многочисленные эксперименты, в которых с помощью описанных общих методов были получены светящиеся сферы, из характерных конкретных свойств шаровой молнии были воспроизведены лишь немногие — например, общий вид. Подробное количественное изучение физических и химических характеристик светящихся шаров, создаваемых описанными выше способами, должно дать очень многое для теории шаровой молнии. Эксперимен-

тальное воспроизведение шаровой молнии должно соответствовать простейшим критериям; прежде всего должны быть созданы светящиеся сферы в воздухе при нормальном давлении; далее, огненный шар должен существовать в течение нескольких секунд на заметном удалении от места своего возникновения или источника энергии и, наконец, он должен перемещаться на значительное расстояние.

БИБЛИОГРАФИЯ

Перечисление нескольких периодических изданий под одним номером означает повторное опубликование того же материала, иногда в виде извлечения. Таким образом, читатель может выбрать наиболее доступное ему издание или лучше известный язык. Перечисление под одним номером работ, обозначенных буквами, указывает на последовательную публикацию их автором с дополнениями и расширениями. Также буквами помечаются серии статей, например обзор де Янса, который печатался в нескольких номерах журнала. Работы данного (первого) автора приводятся в хронологическом порядке независимо от наличия соавторов.

1. *d'Abbadie A.*, Compt. Rend., **34**, 894 (1852).
2. *Abbot C. G.*, Smithsonian Inst. Misc. Collections, **92**, № 12 (1934).
3. *Adamson D. F.*, Electrician, **25**, 445 (1890).
4. *d'Alcantara P.*, Compt. Rend., **109**, 496 (1889).
5. *d'Alcantara P.*, Compt. Rend., **111**, 496 (1890).
6. *Aliverti G.*, *Lovera G.*, Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol., **A3**, 77 (1950).
7. *Alt E.*, Meteorol. Z., **18**, 573 (1901).
- 7a. *Altschuler M. D.*, *House L. L.*, *Hildner E.*, Nature, **228**, 545 (1970).
8. *Andersen W. H.*, J. Geophys. Res., **70**, 1291 (1965).
9. *Andersen W. H.*, J. Geophys. Res., **71**, 680 (1966).
10. *Anderson O.*, *Baker W. R.*, *Bratenahl A.*, *Furth H. P.*, *Kunkel W. B.*, J. Appl. Phys., **30**, 188 (1959).
11. *Anderson R.*, *Bjornsson S.*, *Blanchard D. C.*, *Gathman S.*, *Hughes J.*, *Jónasson S.*, *Moore C. B.*, *Survilas H. J.*, *Vonnegut B.*, Science, **148**, 1179 (1965).
12. Anglo-Saxon Chronicle, Jap., 793 A D.; cp. *Algeo J.*, *Pyles T.*, Problems in the origins and Development of the English Language, Harcourt-Brace and World, Inc., New York, 1966, p. 126.
13. *Angstrom C. A.* Öfversigt Kongl. Vetenskaps-Akad. Förhandl. (Stockholm), **40**, fasc. 7, 87 (1883).
14. *Aniol R.*, Meteorol. Rundschau, **7**, № 11—12, 220 (1954).
15. *Арабаджи В. И.*, Ученые записки Минского Гос. пед. ин-та им. Горького, № 5 (1956).

16. *Arago F.*: a) *Annuaire, Bureau des Longitudes, 1838*; б) *Oeuvres de François Arago, Claye, Paris, Vol. 4, 1854, p. 37*; *Sämtliche Werke, Weibel, Leipzig, Vol. 4, 1854, p. 45*; *Meteorological Essays, Longman, Brown, Green and Longmans, London, 1855*.
17. *Aristotle, Meteorologica, trans. E. W. Webster, Oxford Univ. Press, Oxford, 1923, Book III, I*.
18. *Arrhenius S. A., Lehrbuch der kosmischen Physik. I, S. Hirzel, Leipzig, 1903, p. 772*.
19. *Ashmore S. E., Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 66, 194 (1940)*.
20. *Аскарян Г. А. с comp., ЖЭТФ, 5, 150 (1967)*.
21. *L'Astronomie, 5, 432 (1886)*.
22. *L'Astronomie, 9, 312 (1890)*.
23. *L'Astronomie, 10, 77 (1891)*.
24. *L'Astronomie, 10, 357 (1894)*.
25. *L'Astronomie, 13, 319 (1894)*.
26. *Audoin M., Bull. Soc. Astron. France (L'Astronomie), 26, 436 (1912); Meteorol. Z., 30, 148 (1913)*.
27. *Babat G. I., J. Inst. Electr. Eng., 94, Part III, 27 (1947)*.
28. *Babick, Z. Meteorol., 9, 378 (1955)*.
29. *Babinet, Compt. Rend., 35, 1 (1852)*.
30. *Bagate A., Bull. Soc. Astron. France, 33, 284 (1919)*.
31. *Baker R. M. L., J. Astronaut., 15, 44 (1968)*.
32. *Балыбердин В. В., Самолеты и техн. возд. флота, № 3, 102 (1965)*.
33. *Балыбердин В. В., Самолеты и техн. возд. флота, № 5, 3 (1966)*.
34. *Baratoux M., La Météorologie, 1, № 28, 164 (1952)*.
35. *Barry J. D.*: a) *Wiss. Z. Electrotechn. Hochsch. Ilmenau, 9, 202 (1967)*; б) *J. Atmos. Terr. Phys., 30, 313 (1968)*.
36. *Barry J. D., J. Atmos. Terr. Phys., 29, 1095 (1967)*.
37. *Bauer C., Umschau, 42, 710 (1938)*.
38. *Baumann G., Meteorol. Z., 54, 192 (1937)*.
39. *Bay I., Compt. Rend., 146, 554 (1908); Bull. Soc. Astron. France, 22, 232 (1908); Meteorol. Z., 25, 468 (1908)*.
40. *Beadle D. G., Nature, 137, 112 (1936)*.
41. *Du Bellay, L'Astronomie, 5, 311 (1886)*.
42. *Benedicks C., Arkiv. Geofysik, 2, 1 (1951)*.
43. *Berger K., in Lane F. W., The Elements Rage, Chilton, New York, 1965, p. 134*.
44. *Berger K., J. Franklin Inst., 283, 478 (1967)*.
45. *Berlage H. P., Hemel en Dampkring, 53, 65 (1955)*.
46. *Bertholon P., De l'Electricité des Météores, Croullebois, Paris, 1787, in Landmarks of Sci., 2, 27*.
47. *Besnou, Mem. Soc. Sci. Nat. Cherbourg, 1, 103 (1852)*.
48. *Biji E., Ciel et Terre, 26, 246 (1905)*.
49. *Blanc E., Compt. Rend., 84, 666 (1877); Nature, 15, 539 (1877)*.
50. *Blumhof F., Meteorol. Z., 22, 132 (1905)*.
51. *Boll K., Wetter (Z. angew. Meteorol.), 35, 130 (1918)*.
52. *Boll K., Wetter, 37, 191 (1920)*.
53. *Bonacina L. C. W., Weather, 1, 122 (1946)*.
54. *Bonney A., Amer. Meteorol. J., 4, 148 (1887)*.

55. *Boot H. A. H., Shersby-Harvie R. B. R.*, Nature, **180**, 1187 (1957).
56. *Boot H. A. H., Self S. A., Shersby-Harvie R. B. R.*, J. Electron. Control, **4**, 434 (1958).
57. *Borlase W.*, Phil. Trans. Roy. Soc. London, **48**, 86 (1753); **10**, 335 (1809 abridg.).
58. *Bostick W. H.*, Phys. Rev., **104**, 292 (1956).
59. *Bostick W. H.*, Phys. Rev., **106**, 404 (1957).
60. *Bottley C. M.*, Weather, **21**, 318 (1966).
61. *Bottlinger K. F.*, Naturwiss., **16**, 220 (1928).
62. *Bougon*, Bull. Soc. Astron. France, **16**, 420 (1902).
63. *Boyle R.*, The Philosophical Works of Robert Boyle, Vol. III, 2nd ed., Innys and Manby and Longman, London, 1738, p. 32.
64. *Braams C. M., Schrader W. J., Terlouw J. C.*, Nucl. Instr. Methods, **4**, 327 (1959)
65. *Brand W.*, Der Kugelblitz, Henri Grand, Hamburg, 1923.
66. *Brash A., Lange F., Urban C.*, Naturwiss., **16**, 115 (1928).
67. *Brereton O. S.*, Phil. Trans. Roy. Soc. London, **71**, 42 (1781); **15**, 21 (1809 abridg.).
68. *Brook M., Armstrong G., Winder R. P. H., Vonnegut B., Moore C. B.*, J. Geophys. Res., **66**, 3967 (1961).
69. *Brook M., Kitagawa N.*, J. Geophys. Res., **69**, 2431 (1964).
70. *Broughton S.*, Nature, **7**, 416 (1873).
71. *Brown G. H.*, Meteorol. Mag., **86**, 375 (1957).
72. *Browne T.*, The Miscellaneous Writings of Sir Thomas Browne, Faber and Faber, London, 1946, p. 195.
73. *Bruce C. E. R.*, J. Inst. Electr. Eng., **9**, NS, 357 (1963).
74. *Bruce C. E. R.*, Engineer, **216**, 1047 (1963).
75. *Bruce C. E. R.*, Nature, **202**, 996 (1964).
76. *Bruly-Mosle*, Bull. Soc. Astron. France, **22**, 528 (1908).
77. *Brzak W.*, Meteorol. Z., **9**, 355 (1892).
78. *Budde G.*, Wetter, **37**, 87 (1920).
79. Bull. Soc. Astron. France, **15**, 510 (1900).
80. Bull. Soc. Astron. France, **20**, 100 (1906).
81. *Butti*, Compt. Rend., **35**, 193 (1852).
82. *Caballero E.*, Nature, **41**, 303 (1890); Meteorol. Z., **7**, 158 (1890); Ciel et Terre, **11**, 250 (1890); La Nature, **18**, 167 (1890).
83. *Cabane L.*, L'Astronomie, **6**, 459 (1887).
84. *Cadenat*, Compt. Rend., III, 492 (1890); Wetter, **7**, 285 (1890).
85. *Carlheim-Cylensköld V.*, Ber. Intern. Meteorol. Direktorenkonf. Innsbruck, 1905, App. 23, 1-3; K. Z. Meteorol. Geodyn. Anh. Jahrbuch, 1905, p. 113—115.
86. *Carpenter D. G.*, Plasma Theory Applied to Ball Lightning, Iowa State Univ., 1962; Thesis № 62-4145, Univ. Microfilms, Ann Arbor, Michigan.
87. *Carpenter D. G.*, AIAA Student J., **1**, 25 (1963).
88. *Carré C.*, Lumière électr., **33**, 143 (1889).
89. *Carruthers J.*, Meteorol. Mag., **76**, 210 (1947).
90. *Cartwright*, J. Soc. Tel. Eng. (J. Inst. Electr. Eng.), **1**, 372 (1872).
91. *Cartwright B. W.*, Life, **3**, № 8, 77 (1937).

92. *Cawood W., Patterson H. S.*, Nature, **128**, 150 (1931).
93. *Cecil H.*, Nature, **30**, 289 (1884).
94. *DeCerfz*, Compt. Rend., **25**, 85 (1847).
95. *Cerrillo M.*, Comision Impulsora y Coord. de la Investig. Cient., Mexico, D. F., 151 (1945).
96. *Chalmers*, Phil. Trans. Roy. Soc., **46**, 366 (1750); **10**, 19 (1809 abridg.).
97. *Chalmers J. A.*, Atmospheric Electricity, Pergamon, New York, 1957, p. 255; 2nd ed., 1967, p. 390.
98. *Chandrasekhar S.*, Stellar Structure, Univ. of Chicago, Chicago, 1939; Dover. Publ. Inc., New York, 1957, p. 84—182.
99. *Чирвинский П. Н.*, Климат и погода, **68**, № 5 (1936).
100. *Чирвинский П. Н.*, Метеорология, **7**, 78 (1936).
101. *Чирвинский П. Н.*, Природа, **38**, № 6, 14 (1949).
102. *Чирвинский П. Н.*, Природа, **43**, № 8, 116 (1954)
103. *Clare P.*, Phil. Mag., **37**, 329 (1850).
104. *de Claubry G.*, Compt. Rend., **79**, 137 (1874).
105. *Clavel J.*, Ciel et Terre, **22**, 302 (1901).
106. *Cobine J. D., Wilbur D. A.*, J. Appl. Phys., **22**, 835 (1951).
107. *Cocking A. E.*, Nature, **30**, 269 (1884).
108. *Coroniti S. C.* ed., Problems of Atmospheric and Space Electricity, Elsevier, Amsterdam, 1965.
109. *Coulvoier-Gravier*, Recherches sur les Météores et sur les lois qui les regissent, Paris, 1859, p. 185 et seq.
110. *Craggs J. D., Meek J. M.*, Proc. Roy. Soc. London, **A186**, 241 (1946).
111. *Craggs J. D., Hopwood W., Meek J. M.*, J. Appl. Phys., **18**, 919 (1947).
112. *Craigie H.*, Science, **72**, 344 (1930).
113. *Crookes W.*, Chemical News, **65**, 301 (1892).
114. *Crossley A. W.*, Nature, **114**, 10 (1924).
115. *Cunisset-Carnot*, Bull. Soc. Astron. France (L'Astronomie), **11**, 299 (1897).
116. *Cushing V., Sodha M. S.*, Phys. Fluids, **2**, 494 (1959); **3**, 142, 489 (1960).
117. *Dalloz P.*, La Montagne, № 210, 81 (1928).
118. *Dartlov J.*, Czech. J. Phys., **B15**, 858 (1965).
119. *Dawson G. A., Jones R. C.*, Ball Lightning as a Radiation Bubble, in Planetary Electrodynamics, eds. S. C. Coroniti and J. Hughes, Gordon and Breach, New York, 1969.
120. *Daugherty J. D., Levy R. H.* Phys. Fluids, **10**, 155 (1967).
121. *Dauvillier A.*, Compt. Rend., **245**, 2155 (1957).
122. *Dauvillier A.*, Compt. Rend., **260**, 1707 (1965).
123. *Давидов Б.*, Природа, **47**, № 1, 96 (1958).
124. *Decharme C.*, Compt. Rend., **98**, 606 (1884); Lumière élect., **11**, 551 (1884).
125. *Dember H., Meyer U.*, Meteorol. Z., **29**, 384 (1912).
126. *Dessens J.*, J. Rech. Atmos., **2**, 91 (1965).
127. *Dixon F. E.*, Weather, **10**, 98 (1955).
128. *Дмитриев М. Т.*: а) Природа, **56**, № 6, 98 (1967); б) ЖТФ, **39**, 387 (1969).

129. *Dobelmann V.*, L'Astronomie, **25**, 262 (1911).
130. *Dolbear A. E.*, Science, **11**, 38 (1888).
131. *Dolezalek H.*, Geofisica pura e applicata, **20**, 183 (1951).
132. Долгов-Савельев Г. Г., Мухоматов В. С., Стрелков В. С., Шепелев М. Н., Явлинский Н. А., ЖЭТФ, **38**, 394 (1960).
133. *Dory R. A.*, *Kerst D. W.*, *Meade D. M.*, *Wilson W. E.*, *Erickson C. W.*, Phys. Fluids, **9**, 997 (1966).
134. *Ducros H.*, Bull. Soc. Astron. France, **18**, 476 (1904).
135. *Dunn*, Les Nouveautés photographiques, Libraire Illustré Paris, 1894, p. 253, 259.
136. *Early H. C.*, *Dow W. G.*, Phys. Rev., **79**, 186 (1950).
137. *Eaton H. S.* Amer. Meteorol. J., **4**, 148 (1887).
138. *Edlund*, Öfversigt Kongl. Vetenskaps-Akad. Förhandl. (Stockholm), **40**, fasc. 7, 86 (1883).
139. *Ekvall H. N.*, Electr. World, **147**, 85 (1957).
140. *Emde*, Wetter, **6**, 68 (1889).
141. *Ericson M.*, *Ward C. S.*, *Brown S. C.*, *Buchsbaum S. J.*, J. Appl. Phys., **33**, 2429 (1962).
142. *Mme Espert*, Compt. Rend., **35**, 192 (1852).
143. *Espy J. P.*, Philosophy of Storms, Little and Brown, 1841, p. 266.
144. *Evans W. H.*, *Walker R. L.*, J. Geophys. Res., **68**, 4455 (1963).
145. Библия, Иезекииль I, 1—28.
146. *Falkner M. F.*, Meteorol. Mag., **93**, 95 (1964).
147. *Faraday M.*, Experimental Researches in Electricity, Vol. 1, Bernard Quaritch, London, 1839, p. 523.
148. *Faye H.*, Compt. Rend., **111**, 492 (1890); Wetter (Z. angew. Meteorol.), **7**, 285 (1890).
149. *Faye H.*, L'Astronomie, **10**, 22 (1891).
150. *Fehr U.*, Fire Ball, M. S. Thesis, Hebrew Univ., Jerusalem, 1962.
151. *Finkelstein D.*, *Rubenstein J.*, Phys. Rev., **135**, A390 (1964).
152. *Fitzgerald M.*, Quart. J. Meteorol. Soc., **4**, 160 (1878).
153. *Flammarion C.*, The Atmosphere, Harper and Brothers, New York, 1873, Ch. 6; L'Atmosphere, Libraire Hachette, Paris, 1872, 1888.
154. *Flammarion C.*, Bull. Soc. Astron. France, **13**, 145 (1899).
155. *Flammarion C.*, *Fouche M.*, Bull. Soc. Astron. France, **18**, 378 (1904).
156. *Flint H. T.*, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., **65**, 532 (1939).
157. *de Fonvielle W.*, Eclairs et Tonnerre, Hachette, Paris, 1867; Thunder and Lightning, Sampson, Low, Son, and Marston, London, 1868, p. 32—39.
158. *Forster T.*, Research about Atmospheric Phaenomena, 3rd ed., Harding, Mavor, and Lepard, London, 1823, p. 214—216.
159. *Foster B. D. P.*, Meteorol. Mag., **76**, 210 (1947).
160. *Fougères G.*, Fulmen, in Dictionnaire des Antiquités grecques et romaines, eds. C. Daremberg and E. Saglio, Librairie Hachette, Vol. 2, Part II, Paris, 1896, p. 1352.
161. *Freier G. D.*, J. Geophys. Res., **65**, 3504 (1960).
162. *Френкель Я. И.*, ЖЭТФ, **10**, 1424 (1940).

163. *Galle*, *Wetter*, **7**, 238 (1890).
164. *Galli I.*, *Mem. Pontif. Accad. Rom. Nuovi Lincei*: а) **26**, 43 (1908); б) **28**, 217 (1909); в) **28**, 55 (1910); г) **29**, 251 (1910); д) **29**, 367 (1911); е) **30**, 257 (1911); ж) **31**, 225 (1912).
165. *Galli I.*, *Atti Pontif. Accad. Rom. Nuovi Lincei*: а) **62**, φ, VIII, 2 Mar. (1909); б) **62**, 18 Apr. (1909); в) **63**, 3rd note, 11, 17 Apr. (1910); г) **63**, 12 June (1910); д) **64**, 15 Jan. (1911); е) **65**, 6th note, p. 3 (1912).
166. *Galli I.*, *Boll. Soc. Sismolog. Ital.*, **14**, 221 (1910).
167. *Gollop J. W.*, *Dutt T. L.*, *Gibson H.*, *Nature*, **188**, 397 (1960).
168. *Carreau R.*, *Compt. Rend.*, **209**, 60 (1939).
169. *Gathemann H.*, *Ann. Hydrog.*, **17**, 39 (1889); *Wetter*, **6**, 90 (1889).
170. *Gzerk J.*, *Kleinwachter H.*, *Z. Phys.*, **159**, 378 (1960).
171. *Geist F.*, *Umschau*, **49**, 255 (1949).
172. *Geller R.*, *Lucarain M.*, *Compt. Rend.*, **253**, 1542 (1961).
173. *Герасименко Т. Ф.*, *Природа*, № 7, 109 (1956).
174. *Gerjuoy E.*, *Stabler R. C.*, *Phys. Fluids*, **7**, 920 (1964).
175. *Gerlach W.*, *Naturwiss.*, **15**, 522 (1927).
176. *Gilbert O.*, *Die meteorologischen Theorien des griechischen Altertums*, B. G. Teubner, Leipzig, 1907, p. 635—636.
177. *Gilmore G.*, *Nature*, **103**, 284 (1919).
178. *Göbel P.*, *Wetter*, **6**, 68 (1889).
179. *Göbel P.*, *Wetter*, **6**, 237 (1889).
180. *Gockel A.*, *Meteorol. Z.*, **26**, 458 (1909).
181. *Gockel A.*, *Das Gewitter*, F. Dummlers Verl., Berlin, 1925.
182. *Godwin-Austin W. H.*, *Nature*, **28**, 173 (1883).
183. *Gold E.*, *Nature*, **169**, 561 (1952).
184. *Goodlet B. L.*, *J. Inst. Electr. Eng.*, **81**, 1, (1937).
185. *Grad H.*, *Phys. Fluids*, **10**, 137 (1967).
186. *Grobe*, *Meteorol. Z.*, **44**, 312 (1927).
187. *Губишев В. А.*, *Ульяновский Гос. пед. ин-т, серия техн.*, **20**, 203 (1966).
188. *Guillemin A.*, *Le Monde Phys.*, **3**, 429 (1883).
189. *Gunn R.*, *Science*, **150**, 888 (1965).
190. *Haag*, *Wetter (Z. angew. Meteorol.)*, **31**, 240 (1914).
191. *Haaland C. M.*, *Phys. Rev. Letters*, **4**, 111 (1960).
192. *von Haidinger W.*, *Sitzber. K. Akad. Wiss., Wien, Math.-Naturwiss. Kl.*, **58** (II), 761 (1868).
193. *von Haidinger W.*, *Sitzber. K. Akad. Wiss., Wien, Math.-Naturwiss. Kl.*, **58** (II), 1045 (1868).
194. *Halluitte*, *Bull. Soc. Astron. France*, **23**, 461 (1909).
195. *Hamilton C. W.*, *Nature*, **188**, 1098 (1960).
196. *Hamilton W.*, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, **85**, 73 (1795).
197. *Hands A.*, *Englisch Mech.*, **90**, 40 (1909); *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **35**, 301 (1909); *Ciel et Terre*, **31**, 383 (1910).
198. *Hare C.*, *Nature*, **19**, 5, (1878).
199. *Hare A. T.*, *Nature*, **40**, 415 (1889).
200. *Snow Harris W.*, *On the Nature of Thunderstorms*, J. W. Parker, London, 1843.
201. *Harrison E. R.*, *J. Electron. Control*, **5**, 319 (1958).

202. *Hawkins A. C.*, Bull. Am. Meteorol. Soc., **25**, 364 (1944); **27**, 5 (1946).
203. *Hayden E.*, Science, **10**, 324 (1887)
204. *Hayden E.*, Science, **11**, 110 (1888).
205. *Herrnqvist K. G.*, J. Appl. Phys, **27**, 1226 (1956).
206. *Herrich E.*, Kosmos, **50**, 265 (1954).
207. *Гезехус Н. А.*, Журн. русск. хим.-физ. общ-ва, **8**, 311 (1900).
208. *Гезехус Н. А.*, Научное обозрение, № 7, 1373 (1899)
209. *Hildebrand Hildebrandsson H.*, Ann. Soc. Météor. France (Météorologie), **31**, 364 (1883); Meteorol. Z., **2**, 118 (1885).
210. *Hildebrand Hildebrandsson H.*, La Nature (Paris), **12**, 302 (1884).
211. *Hildebrand Hildebrandsson H.*, Meteorol. Z., **13**, 475 (1896).
212. *Hill E.*, Nature, **56**, 293 (1897).
213. *Hill E. L.*, J. Geophys. Res., **65**, 1947 (1960).
214. *Hill R. D.*, J. Geophys. Res., **68**, 1365 (1963)
215. *Hofmann A.*, Z. angew. Meteorol., **36**, 126 (1919).
216. *Hohn W.*, Wetter u. Leben, **18**, 56 (1966)
217. *Hohr A.*, Meteorol. Z., **20**, 570 (1903).
218. *Holmes M.*, Nature, **133**, 179 (1934).
219. *Holzer R. E.*, *Workman E. J.*, J. Appl. Phys., **10**, 659 (1939).
220. *Homma H.*, Meteorol. Z., **18**, 576 (1901).
221. *Horner F.*, *Bradley P. A.*, J. Atmos. Terr. Phys., **26**, 1155 (1964).
222. *Horner D. W.*, Symons's Meteorol. Mag., **39**, 111 (1904).
223. *Humphreys W. J.*, Physics of the Air, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1929; 3rd ed., 1940, Ch. 17, 18.
224. *Humphreys W. J.*, Proc. Am. Phil. Soc., **76**, 613 (1936).
225. *Hunneman M. E.*, Science, **86**, 244 (1937).
226. *Индриксон Ф.*, Журн. русск. хим.-физ. общ-ва, **32**, 53 (1900).
227. *Israel H.*, Umschau, **58**, 586 (1958).
228. *Jaeger A.*, Meteorol. Rundschau, **14**, 31 (1961).
229. *Janezic E.*, Meteorol. Z., **25**, 42 (1908).
230. *de Jans C.*, Ciel et Terre. а) **31**, 499 (1910); б) **32**, 155 (1911); в) **32**, 255 (1911); г) **32**, 301 (1911); д) **33**, 18 (1912); е) **33**, 143 (1912).
231. *Jennings R. C.*, New Scientist, **13**, 156 (1962)
232. *Jennison R. C.*, Nature, **224**, 895 (1969).
233. *Jensen J. C.*, Physics, **4**, 372 (1933); Sci. Monograph, **37**, 190 (1933); Nature, **133**, 95 (1934).
234. *Johnson E. O.* RCA Rev., **16**, 498 (1955).
235. *Johnson L. H.*, Marine Obs., **28**, 11 (1958).
236. *Johnson P. O.*, Am. J. Phys., **33**, 119 (1965).
237. *Jones A. T.*, Science (New Series), **31**, 144 (1910)
238. *Jones N.*, Nature, **130**, 545 (1932).
239. *Kaiser J.*, Science, **60**, 293 (1924).
240. *Kamtz L. F.*, Lehrbuch der Meteorologie, Bd. 2, Halle, 1832, p. 427.
241. *Каница П. Л.*, Докл. АН СССР, **101**, 245 (1955).
242. *Каница П. Л.*, Успехи физ. наук, **78**, 181 (1962).
243. *Каница П. Л.*, ЖТФ, **88**, 1829 (1968)

244. *Käubler R.*, Phys. Blätter, **19**, 374 (1963).
245. *Kerckhoff T.*, Wetter (Z. angew. Meteorol.), **30**, 286 (1913).
246. *Khalatow S.*, *Khalatow D.*, Bull. Soc. Astron. France, **21**, 452 (1907).
247. *Khan M. A. R.*, Nature, **155**, 53 (1945).
248. *von Kilinski E.*, Lehrbuch der Lufterlektrizität, Akad. Verlag & Geest and Portig K.-G., Leipzig, 1958, p. 30.
249. *Kim N. G.*, J. Appl. Phys., **36**, 1611 (1965).
250. *Kimpara A.*, Electromagnetic Radiation from Lightning, in S. C. Coroniti, ed., Problems of Atmospheric and Space Electricity, Elsevier, Amsterdam, 1965, p. 352—364.
251. *King E.*, Phil. Trans. Roy. Soc. London, **63**, 231 (1773); **13**, 435 (1809 abridg.).
252. *Kingston H. R.*, J. Roy. Astron. Soc. Canada, **25**, 420 (1931).
253. *Kitagawa N.*, *Brook M.*, *Workman E. J.*, J. Geophys. Res., **67**, 637 (1962).
254. *Klose J.*, Z. Meteorol., **4**, 91 (1950).
255. *Knoche W.*, Meteorol. Z., **26**, 355 (1909).
256. *Koehlin J.*, La Nature (Paris), **52**, 12 July, № 2628 (1924).
257. *Коган-Белецкий Г. И.*, Природа, **46**, № 6, 71 (1957).
258. *Köhl T.*, Gaea, **18**, 569 (1882).
259. *Köhl T.*, Klein's Wochenschr., Astron., Meteorol. Geog., **27**, 140 (1884).
260. *Колобков Н. В.*, Грозы и шквалы, Гостехиздат, М.—Л., 1951, стр. 47—50.
261. *Косарев Е. Л. с сопр.*, ЖТФ, **38**, 1831 (1968).
262. *Kruskal M.*, *Schwarzschild M.*, Proc. Roy. Soc. London, **A223**, 348 (1954).
263. *Kuhn E.*, Naturwiss., **38**, 518 (1951).
264. *Kunkel W. B.*, J. Appl. Phys., **21**, 820 (1950).
265. *Kuschewitz*, Elektrotechn. Z., **26**, 829 (1905).
266. *Ладиков Ю. П.*, Изв. АН СССР, отдел. техн. наук, механики и машиностр., № 4, 7 (1960).
267. *Lagrange E.*, Ciel et Terre, **30**, 417 (1909).
268. *Lagrange E.*, Ciel et Terre, **31**, 385 (1910).
269. *De Lalande*, Compt. Rend., **35**, 24 (1852); **35**, 400 (1852).
270. *Lalung A.*, Bull. Soc. Astron. France, **13**, 500 (1899).
271. *Lancaster A.*, Ciel et Terre, **26**, 246 (1905).
272. *Lane F. W.* The Elements Rage, Chilton, New York, 1965, p. 134—141.
273. *Leduc S.*, Compt. Rend., **129**, 37 (1899).
274. *Lehideux C.*, Bull. Soc. Astron. France, **18**, 477 (1904).
275. *Lehnert B.*, Phys. Fluids, **4**, 847 (1961).
276. *Lehnart B.*, Dynamics of Charged Particles, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1964.
277. *Леонов Р. А.*, Загадка шаровой молнии, изд-во «Наука», М., 1965.
278. *von Lepel F.*, Meteorol. Z., **7**, 297 (1890).
279. *Less E.*, Meteorol. Z., **18**, 39 (1901).
280. *Lewis B.*, *von Elbe G.*, Combustion, Flames, and Explosions of Gases, Academic Press, New York, 1961.

281. *Lewis H. D.*, *Sci. Amer.*, **208**, 107 (1963).
282. *Ball Lightning Bibliography: 1950—1960*, Library of Congress, Sci. and Technology Div., Washington, D. C., 1961.
283. *Lindberg L.*, *Witalis E.*, *Jacobsen C. T.*, *Nature*, **185**, 452 (1960).
284. *Lindemann G.*, *Kosmos*, **47**, 380 (1951).
285. *Linhart J. G.*, *Plasma Physics*, Interscience, New York, 1960.
286. *List K.*, *Meteorol. Z.*, **22**, 139 (1905).
287. *Lloyd F. G.*, *English Mech.*, **45**, 159 (1887).
288. *Lodge O. J.*, *Lightning Conductors and Lightning Guards*, Whitaker and Co. and Bell and Sons, London, 1892, p. 138—139.
289. *Loeb L. B.*, *Static Electrification*, Springer-Verlag, Berlin—Göttingen, 1958.
290. *Loeb L. B.*, *J. Geophys. Res.*, **69**, 587 (1964).
291. *Loeb L. B.*, *J. Geophys. Res.*, **71**, 676 (1966).
292. *Logan E. A.*, *Electr. Rev.*, **138**, 381 (1946).
293. *Lowke J. J.*, *Uman M. A.*, *Liebermann R. W.*, *Toward a New Theory of Ball Lightning*, Am. Geophys. Union Meeting, Washington, D. C., April 1969.
294. *Лукреций Кар Тум*, *О природе вещей*, кн. VI, Изд-во АН СССР, М., 1958.
295. *Malan D. J.*, *Ann Geophys.*, **17**, 388 (1961).
296. *Malan D. J.* *Physics of Lightning*, English Univ. Press, London, 1963, p. 7.
297. *Mallinson A. B.*, *J. Inst. Electr. Eng.*, **81**, 46 (1937).
298. *Malsch W.*, *Meteorol. Rundschau*, **9**, 150 (1956).
299. *Malsch W.*, *Meteorol. Rundschau*, **9**, 188 (1956).
300. *Malter L.*, *Johnson E. O.*, *Webster W. M.*, *RCA Rev.*, **12**, 415 (1951).
301. *Mancini E.*, *Atti Reale Accad. Lincei, Ser. V, Rendiconti Sci. Fis.*, **1**, 2nd sem., 308 (1892); *Naturwiss. Rundschau*, **8**, 62 (1893); *Meteorol. Z.*, **10**, 157 (1893).
302. *von Manteuffel P. Z.*, *Umschau*, **42**, 587 (1938).
303. *Marchant E. W.*, *Nature*, **125**, 128 (1930).
304. *Margs B.*, *Meteorol. Rundschau*, **9**, 72 (1956).
305. *Marsh O. C.*, *Nature*, **53**, 152 (1895); *Amer. J. Sci.*, Ser. 4, **1**, 13 (1896); *Meteorol. Z.*, **13**, 189 (1896).
306. *Mascart E.*, *Compt. Rend.*, **111**, 496 (1890).
307. *Mason B. J.*, *Clouds, Rain, and Rainmaking*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, England, 1962, Ch. 7, p. 112—136.
308. *Mathias E.*, *Ann. de Phys.*, 9th Ser., **5**, 365 (1916); *Mon. Weather Rev.*, **44**, 516 (1916); *Compt. Rend.*, **162**, 642 (1916).
309. *Mathias E.*: a) *Traité d'Electricité Atmosphérique et Tellurique*, Univ. de France, Paris, 1924, p. 296—299; б) *Compt. Rend.*, **179**, 136 (1924).
310. *Mathias E.*, *Compt. Rend.*: а) **182**, 32 (1926); б) **189**, 512, 607, 813 (1929); в) **196**, 654 (1933).
311. *Mathias E.*, *Compt. Rend.*: а) **186**, 1334 (1928); б) **189**, 1049 (1929); в) **194**, 413 (1932); г) **194**, 2257 (1933); д) **197**, 962 (1933); е) **199**, 505 (1934); ж) **199**, 1083 (1934).
312. *Mathouillot H.*, *Compt. Rend.*, **146**, 603 (1908).

313. *Matthias B. T., Buchsbaum S. J.*, *Nature*, **194**, 327 (1962).
314. *Maudemain A.*, *Bull. Soc. Astron. France*, **33**, 284 (1919).
315. *Maurain Ch.*, *La Foudre*, Armand Colin, Paris, 1948, p. 100—104.
316. *Mavrogordato*, *L'Astronomie*, **5**, 309 (1886).
317. *Mavrogordato*, *L'Astronomie*, **5**, 310 (1886).
318. *McClelland J. A.*, *Nature*, **103**, 284 (1919).
319. *McDonough T.*, *Science*, **11**, 62 (1888).
320. *McMillan W. G.*, *Nature*, **40**, 295 (1889).
321. *McNally J. R., Jr.*, Paper J-14, Amer. Phys. Soc., Div. Plasma Physics Meeting, Gatlinburg, Tenn., Nov. 2—5, 1960; *Bull. Am. Phys. Soc.*, **6**, 202, *Abstr. J-14* (1961).
322. *Meissner A.*, *Meteorol. Z.*, **47**, 17 (1930).
323. *Mendenhall T. C.*, *Amer. Meteorol. J.*, **6**, 437 (1890).
324. *Merhaut O.*, *Naturwiss.*, **32**, 212 (1944).
325. *Meteorol. Z.*, **44**, 391 (1927).
326. *Mettetal*, *Compt. Rend.*, **121**, 596 (1895); *La Nature (Paris)*, **23**, 2nd sem., 407 (1895).
327. *Meunier A.*, *Compt. Rend.*, **35**, 195 (1852).
328. *Meunier S.*, *Compt. Rend.*, **103**, 837 (1886); *L'Astronomie*, **6**, 104 (1887); *Meteorol. Z.*, **5**, 160 (1888).
329. *Meusberger*, *Meteorol. Z.*, **21**, 283 (1904).
330. *Mey A.*, *Meteorol. Z.*, **44**, 188 (1927).
331. *Miller A. H., Shelden C. E., Atkinson W. R.*, *Phys. Fluids*, **8**, 1921 (1965).
332. *Milne-Thomson L. M.*, *Theoretical Hydrodynamics*, 2nd ed., MacMillan, New York, 1950.
333. *Minchin G. M.*, *Nature*, **53**, 5 (1895).
334. *Митин Р. В., Прядкин К. К.*, *ЖТФ*, **35**, 1205 (1965).
335. *Mohn H.*, *Meteorol. Z.*, **25**, 314 (1908).
336. *Mohr F. B.*, *Science*, **151**, 634 (1966).
337. *Moigno F.*, *Cosmos*, **14**, 672 (1859).
338. *Möller F.*, *Umschau*, **49**, 458 (1949).
339. *Möller F.*, *Kosmos*, **47**, 86 (1951).
340. *du Moncel Th.*, *Mem. Soc. Sci. Nat. Cherbourg*, **2**, 85 (1854); *Compt. Rend.*, **38**, 408 (1854); *Meteorologie. (Ann. Soc. Meteorol. France)*, **2**, 57 (1854).
341. *du Moncel Th.*, *Notice historique et theorique sur la Tonnerre et les Eclairs*, Hachette, Paris, 1857 p. 52, 54.
342. *Monn F. D.*, *Marine Obs.*, **2**, 129 (1925).
343. *Moore C. B., Vonnegut B., Machado J. A., Survilas H. J.*, *J. Geophys. Res.*, **67**, 207 (1962).
344. *Moore J. G.*, *J. Geophys. Res.*, **68**, 1335 (1963).
345. *Morris W.*, *Daily Mail*, 5 Nov. 1936 (letter to the Editor)
346. *Mott F. T.*, *Nature*, **22**, 193 (1880).
347. *Mousette Ch.*, *Compt. Rend.*, **103**, 30 (1886).
348. *Mousette Ch.*, *Compt. Rend.*, **107**, 435 (1888).
349. *Müller*, *La Nature (Paris)*, **16**, 415 (1888).
350. *Müller-Hillebrand D.*, *Elektrie*, **17**, 211 (1963).
351. *Müller-Hillebrand D.*, in *Problems of Atmospheric and Space*

- Electricity, ed S. C. Coroniti, Elsevier, Amsterdam, 1965, p. 457—459.
352. *Van Muschenbroek P.*, Cours de Physique expérimentale et mathématique, trans. Sigaud de la Fond, Leyden, 1769, Vol 3, p. 406.
353. *Naase E.*, Compt. Rend., **74**, 1384 (1872).
354. *Nauer H.*: a) Z. angew. Phys., **5**, 441 (1953); б) Umschau Fortschr. Wiss. Tech., **56**, 75 (1956).
355. *Neesen F.*, Himmel u. Erde, **13**, 145 (1901).
356. *Neugebauer T.*, Z. Phys., **106**, 474 (1937).
357. *Neunteufl J.*, Wetter u. Leben, **3**, 49 (1951).
358. *Newman M. M.*, J. Geophys. Res., **65**, 1966 (1960).
359. *Nicholson*, Phil. Trans. Roy. Soc. London, **64**, 350 (1774); **13**, 538 (1809 abridg.).
360. *Nippoldt*, Meteorol. Z., **33**, 475 (1916).
361. *Norinder H.*, Kgl. Vetenskapssoc. Arsbok, 89—95 (1939).
362. *Norinder H.*, in Problems of Atmospheric and Space Electricity, ed. S. C. Coroniti, Elsevier, Amsterdam, 1965, p. 455.
363. *Oltramare G.*, Compt. Rend., **88**, 1319 (1879).
364. *Oriel A.*, Bull. Soc. Astron. France, **15**, 303 (1901).
365. *Orville R. E.*, Science, **151**, 451 (1966).
366. *Orville R. E.*, J. Atmos. Sci., **25**, 827, 839, 852 (1968).
367. *Oswalt P.*, Bull. Soc. Astron. France, **29**, 437 (1915).
368. *Otto M.*, La Nature (Paris), **29**, № 2, 361 (1901).
369. *Owen R.*, Amer. Meteorol. J., **3**, 383 (1886).
370. *Palazzo L.*, Meteorol. Z., **20**, 188 (1903).
371. *Parent E.*, Compt. Rend., **77**, 370 (1873).
372. *Pascal P. V. H.*, Nouveau traité de chimie minérale, Masson, Paris, 1956: Vol. 10, p. 368; Vol. 13, p. 266.
373. *Paul W.*, *Reinhard H. P.*, *von Zahn U.*, Z. Phys., **152**, 143 (1958).
374. *Peake N. B.*, New Scientist, **13**, 334 (1962).
375. *Pellissier G.*, La Nature (Paris), **22**, № 1, 323 (1894).
376. *Peltier J. C. A.*, Am. J. Sci., **38**, 73 (1840).
377. *Peppler W.*, Wetter (Z. angew. Meteorol.), **36**, 29 (1919).
378. *Péroux E.*, Bull. Soc. Astron. France, **21**, 453 (1907).
379. *Perrin P.*, Etudes sur les Éclairs, Paris, 1873, p. 77—84.
380. *Petersen H.*, Geophysica, **5**, 49 (1952); Weather, **9**, 73 (1954).
381. *Petersen H.*, Weather, **9**, 321 (1954).
382. *Petrzilka V. A.*, Česk. Časopis Fys., **A14**, № 6, 542 (1964)
383. *Pfeil L.*, Der Ursprung der Meteoriten Gão, **22**, 229 (1886).
384. *Pflegel R.*, Z. Meteorol., **10**, 347 (1956).
385. *Phillips R.*: a) On Atmospheric Electricity, Hardwicke, London, 1863, p. 45—47; б) Nature, **41**, 58 (1889).
386. *Pilttschikow N. D.*, Beibl. Ann. Phys., **24**, 691 (1900).
387. *Planté G.*, Compt. Rend., **80**, 1133 (1875); **81**, 185 (1875).
388. *Planté G.*, Compt. Rend., **83**, 321 (1876).
389. *Planté G.*, Compt. Rend., **83**, 484 (1876).
390. *Planté G.*: a) Compt. Rend., **85**, 619 (1877); б) **87**, 325 (1878); в) **99**, 273 (1884); Ciel et Terre, **5**, 365 (1884).

391. *Planté G.*, Phénomènes électriques de l'Atmosphère, Paris, 1888; Elektrische Erscheinungen der Atmosphäre, G. Wallentin, Halle a. S., 1889.
392. *Poey A.*, Compt. Rend., **40**, 1183 (1855).
393. *Pollog C. H.*, Meteorol. Z., **47**, 79 (1930).
394. *Polychronakis C. B.*, Bull. Soc. Astron. France, **18**, 476 (1904).
395. *Polychronakis C. B.*, Bull. Soc. Astron. France, **22**, 479 (1908)
396. *Ponnamperuma C.*, *Woeller F.*, Nature, **203**, 272 (1964).
397. *Понов Я. А.*, Природа, **48**, № 12, 111 (1959).
398. *Potts L. M.*, Science, **31**, 144 (1910).
399. *Pouillet*, Compt. Rend., **35**, 400 (1852).
400. *de Poulpiquet E.*, La Nature (Paris), **17**, sem. I, 39 (1889); Wetter, **6**, 69 (1889); Cosmos, **38**, 142 (1889).
401. *Poulter R. M.*, Meteorol. Mag., **70**, 289 (1936).
402. *Poulter R. M.*: a) Weather, **9**, 121 (1954); 6) Weather, **9**, 321 (1954).
403. *Poumier*, L'Astronomie, **5**, 348 (1886).
404. *Powell J. R.*, *Zucker M. S.*, *Manwaring J. F.*, *Finkelstein D.*, Bull. Am. Phys. Soc., **12**, 751, Abstr. 2C-2 (1967).
405. *Powell J. R.*, *Finkelstein D.*, Structure of Ball Lightning, in Advances in Geophysics, Vol. 13, Academic Press, New York, 1969; Amer. Scientist, **58**, 262 (1970).
406. *Pratt C. E.*, Marine Obs., **31**, 127 (1961).
407. *Préaubert E.*, Ann. Soc. Météor. France, **52**, 270 (1904).
408. *Prendergast K. H.* Astrophys. J., **123**, 498 (1956).
409. *Price S.*, *Carlstead E. M.*, Mon. Weather Rev., **94**, 272 (1966).
410. Природа, **51**, № 5, 71 (1962).
411. *Prochnow O.*, Erdball und Weltall, Bermüller, Berlin, 1928.
412. *Prochnow O.*, Phys. Z., **31**, 335 (1930).
413. *Prohaska K.*, Meteorol. Z., **6**, 472 (1889).
414. *Prohaska K.*, Meteorol. Z., **17**, 331 (1900).
415. *Prohaska K.*, Meteorol. Z., **20**, 315 (1903).
416. *Pühringer A.*, in Problems of Atmospheric and Space Electricity, ed. S. C. Coroniti, Elsevier, Amsterdam, 1965, p. 460.
417. *Pühringer A.*, Wetter u. Leben, **19**, 57 (1967).
418. *Raab O.*, Bildmessg. u. Luftbildwes., **15**, 57 (1940).
419. *Racine E.*, Bull. Soc. Astron. France, **23**, 461 (1909).
420. *Rayle W. D.*, Ball Lightning Characteristics, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D. C., Tech. Note NASA TN D-3188, Jan. 1966.
421. *Reed T. B.*, J. Appl. Phys., **32**, 821 (1961).
422. *Reid W.*, An Attempt to Develop the Law of Storms, etc., John Weale, London, 1838, p. 402, 412.
423. *Reimann E.*, Meteorol. Z., **3**, 510 (1886).
424. *Reimann E.*, Meteorol. Z., **4**, 164 (1887).
425. *Reimann E.*, Meteorol. Z., **13**, 25 (1896).
426. *Reimann E.*, Meteorol. Z., **22**, 360 (1905).
427. *Reiners F.*, Ann. Hydrograph. Marit. Meteorol., **10**, 582 (1882).
428. *Reynolds W. C.*, Nature, **112**, 903 (1923).
429. *Reynolds W. C.*, Nature, **125**, 413 (1930).
430. *Reynolds W. C.*, Nature, **128**, 584 (1931).

431. *Richter P.*, *Z. angew. Meteorol.*, **30**, 21 (1913).
432. *Righi A.*, *Atti R. Acc. Lincei, Rendiconti*, IV, **7**, 330 (1891).
433. *Rihanek L.*, *Postranecky J.*, in *Bourky a Ochrana Pred Ble-skem*, Nakl. Česk. Akad. Věd., Praha, 1957, p. 90—91, 463—478.
434. *Ritchie D. J.*, *Ball Lightning*, Consultants Bureau, New York, 1961.
435. *Ritchie D. J.*, *J. Inst. Electr. Eng.*, **9**, 202 (1963).
436. *de la Rive A.*, *Traité d'Electricité théorique et appliquée*, Vol. 3, Paris, 1858, p. 197.
437. *Roberts M.*, *Alexeff I.*, *Bull. Am. Phys. Soc.*, **12**, 26, Abstr. AJ4 (1967).
438. *Roche*, *Compt. Rend.*, **139**, 465 (1904); *Bull. Soc. Astron. France*, **18**, 509 (1904).
439. *Rodewald M.*, *Z. Meteorol.*, **8**, 27 (1954).
440. *Rossmann F.*, *Wetter u. Klima*, **2**, 75 (1949).
441. *Rotch L.*, *Bull. Soc. Astron. France*, **17**, 483 (1903); *Ciel et Terre*, **24**, 544 (1903).
442. *Roth F.*, *Meteorol. Z.*, **6**, 231 (1889).
443. *Rousselot U.*, *Bull. Soc. Astron. France*, **18**, 527 (1904).
444. *Rozzi N.*, *Bull. Soc. Astron. France*, **25**, 260 (1911).
445. *Rudski M. P.*, *Meteorol. Z.*, **22**, 284 (1905).
446. *Russell S. C.*, *Symon's Meteorol. Mag.*, **39**, 153 (1904); *Bull. Soc. Astron. France*, **18**, 510 (1904).
447. *Ryan G. M.*, *Nature*, **52**, 392 (1895); *Cosmos*, **46**, 95 (1897); *Bull. Soc. Astron. France*, **11**, 300 (1897).
448. *Sacc*, *Compt. Rend.*, **53**, 646 (1861).
449. *St. Grosu*, *Electrotechnica (Rumanian)*, **8**, № 2, 57 (1960).
450. *Salanave L. E.*, in *Problems of Atmospheric and Space Electricity*, ed. S. C. Coroniti, Elsevier, Amsterdam, 1965, p. 464.
451. *Doyné Sartor J.*, *Science*, **143**, 948 (1964).
452. *Sauter F.*, *Über Kugelblitze*, Beilage Programm Kgl. Real-Gymnasiums Ulm., I Teil: Theorie der Kugelblitze, 1890; II Teil: Beispiele von Kugelblitzen, 1892.
453. *Sauter F.*, *Meteorol. Z.*, **12**, 241 (1895).
454. *Scheminzky F.*, *Wolf F.*, *Akad. Wiss. Wien, Sitzber., Abt. IIA*, **156**, 1 (1948).
455. *von Schiödt F.*, *Tidskr. f. Physik og Chemi*, **2**, 242 (1893).
456. *Schlobohm K. A.*, *Meteorol. Rundschau*, **14**, 93 (1961).
457. *Schmauss A.*, *Phys. Z.*, **10**, 968 (1909).
458. *Schmauss A.*, *Meteorol. Z.*, **35**, 184 (1918).
459. *Schneidermann K.*, *Feurwehr-Verbands-Z.*, **44**, 1 (1934).
460. *Schonland B. F. J.*: a) *Adv. Sci.*, **19**, 306 (1962); 6) *Nature*, **195**, 880 (1962).
461. *Schonland B. F. J.*, *The Flight of Thunderbolts*, Clarendon Press, Oxford: 1st ed., 1950; 2nd ed., 1964.
462. *Schoute C.*, *Meteorol. Mag.*, **61**, 238 (1926).
463. *Schrade Z.*, *Meteorol.*, **17**, 61 (1964).
464. *Schrammen M.*, *Ciel et Terre*, **11**, 348 (1890).
465. *Schwegler H.*, *Naturwiss. Rundschau*, **4**, 169 (1951).
466. *Scott E. K.*, *Nature*, **112**, 760 (1923).
467. *Scott J. R.*, *Weather*, **10**, 98 (1955).

468. *Scott R. H.*, Quart. J. Meteorol. Soc., **4**, 166 (1878).
469. *Séguier*, Compt. Rend., **34**, 871 (1852).
470. *Seigner R.*, Wetter u. Leben, **18**, 54 (1966).
471. *Sestier F.*, De la Foudre, de ses formes et de ses effets, Bailière et fils, Paris, 1866.
472. *Seyboth R.*, Sci. Amer., **86**, 36 (1902).
473. *Шафранов В. Д.*, О равновесных магнитогиродинамических конфигурациях; *V. D. Shafranov*, On Equilibrium Magneto-hydrodynamic Configurations, Proc. 3rd Inter. Congress on Ionization Phenomena in Gases, Venice, 11—15 June 1957, pp. 990—997.
474. *Шафранов В. Д.*, а) ЖЭТФ, **33**, 710 (1957); б) ЖЭТФ, **37**, 1088 (1959).
475. *Shapiro A. R.*, *Watson W. K. R.*, Phys. Rev., **131**, 495 (1963).
476. *Silberg P. A.*, J. Appl. Phys., **32**, 30 (1961).
477. *Silberg P. A.*, J. Geophys. Res., **67**, 4941 (1962).
478. *Silberg P. A.*, J. Appl. Phys., **35**, 2264 (1964).
479. *Silberg P. A.*, A Review of Ball Lightning, in Problems of Atmospheric and Space Electricity, ed. S. C. Coroniti, Elsevier, Amsterdam, 1965, p. 436, 464.
480. *Simpson G. C.*, Nature, **112**, 727 (1923); Sci. Am., **130**, 242 (1924).
481. *Simpson G. C.*, Nature, **113**, 677 (1924).
482. *Singer S.*, Nature, **198**, 745 (1963); Naturwiss. Rundschau, **16**, 450 (1963).
483. *Skowronek M.*, Compt. Rend., **250**, 1808 (1960).
484. *Smith W. F.*, Nature, **22**, 267 (1880).
485. *Smith W. G.*, Nature, **30**, 241 (1884).
486. *de Soubbotine N.*, Bull. Soc. Astron. France, **16**, 117 (1902).
487. *Steinheim*, Compt. Rend., **36**, 744 (1853).
488. *Стекольников И. С.*, Изучение молний и грозозащита, Изд-во АН СССР, М., 1955.
489. *Стекольников И. С.*, Природа, **47**, № 1, 96 (1958).
490. *Studer J.*, Ann. Schweizer Met. Cent. Anst., **22**, App. 3 (1885); Meteorol. Z., **5**, 159 (1888); Ann. Soc. Météorol. France, **37**, 167 (1889).
491. *Subramanian A.*, Indian J. Meteorol. Geophys., **14**, 358 (1963).
492. *Swain W.*, J. Roy. Astron. Soc. Canada, **27**, 255 (1933).
493. *Swart C. D.*, Amer. Meteorol. J., **4**, 98 (1887).
494. *Symons G. J.*, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., **4**, 165 (1878).
495. *Tait P. G.*, Nature, **22**, 408 (1880); Thunderstorms, in Life and Scientific Work of Peter Guthrie Tait, by C. G. Knott, Cambridge Univ. Press, 1911, Suppl., p. 312—314.
496. *Tait P. G.*, Nature, **22**, 436 (1880).
497. *Tait P. G.*, Sci. Amer., **73**, 405 (1895).
498. *Talman C. F.*, Am. Mercury, **26**, 69 (1932).
499. *Tanton T. L.*, J. Roy. Astron. Soc. Canada, **12**, 530 (1918).
500. *De Tastes*, Ann. Soc. Météor. France (Météorologie), **32**, 105 (1884); Meteorol. Z., **2**, 115 (1885).
501. *Taylor J. E.*, Weather, **9**, 321 (1954).
502. *Teich M.*, Z. Meteorol., **9**, 379 (1955).

503. *Телетов Г. С.*, Природа, **55**, № 9, 84 (1966).
504. *Terada T.*, Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ., **9**, 225 (1931).
505. *TerGouw J. E.*, Bull. Soc. Astron. France, **21**, 313 (1907).
506. *De Tesson*, Compt. Rend., **49**, 189 (1859).
507. *Thate J. B.*, Hemel en Dampkring, **50**, 134 (1952).
508. *Théron H.*, Bull. Soc. Astron. France (L'Astronomie), **11**, 299 (1897).
509. *Thompson D.*, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **71**, 93 (1945).
510. *Thomson E.*, Science (New Series), **30**, 857 (1909).
511. *Thomson W.* (Lord Kelvin), Report of the 58th Mtg. British Assoc., Adv. Sci., **58**, 604 (1888).
512. *Thornton W. M.*, Phil. Mag., **21**, 630 (1911); Radium, **8**, 397 (1911); Meteorol. Z., **29**, 39 (1912); Cosmos, **18**, semi 1, 142 (1913).
513. *Tissandier G.*, Compt. Rend., **113**, 421 (1891).
514. *Toepler M.*, Ann. Phys., IV, **2**, 560 (1900); Meteorol. Z., **17**, 543 (1900).
515. *Toepler M.*, Ann. Phys., IV, **6**, 339 (1901).
516. *Toepler M.*, Meteorol. Z., **18**, 533 (1901).
517. *Toepler M.*, Z. Techn. Phys., **10**, 73, 113 (1929).
518. *Toepler M.*, Naturwiss. Rundschau, **7**, 326 (1954).
519. *Tomlinson C.*, Phil. Mag. (ser. 5): a) **26**, 114 (1888); б) **26**, 475 (1888).
520. *Tonks L.*, Nature, **187**, 1013 (1960).
521. *Townsend G. F.*, Electr. Rev., **26**, 297 (1895).
522. *Trapp E.*, Wetter u. Leben, **1**, 274 (1948).
523. *Trécul A.*, Compt. Rend., **83**, 478 (1876).
524. *Trécul A.*, Compt. Rend., **92**, 775 (1881); L'Astronomie, **6**, 107 (1887).
525. *Trimmier J. R.*, *Miller A.*, Phys. Fluids, **9**, 1997 (1967).
526. *Tripe J. W.*, Quart. J. Meteorol. Soc., **2**, 431 (1875); Amer. Meteorol. J., **4**, 149 (1887); Electrician, **19**, 179 (1889).
527. *Trowbridge J.*, Sci. Amer., **96**, 489 (1907).
528. *Turpain A.*, J. Phys. théorique appliquée, V, **1**, 372 (1911).
529. *Uman M. A.*, J. Atmos. Terr. Phys., **24**, 43 (1962).
530. *Uman M. A.*, J. Geophys. Res., **69**, 583 (1964).
531. *Uman M. A.*, *Orville R. E.*, *Salanave L. E.*, J. Atmos. Sci., **21**, 306 (1964).
532. *Uman M. A.*, *Helstrom C. W.*, J. Geophys. Res., **71**, 1975 (1966).
533. *Uman M. A.*, J. Atmos. Terr. Phys., **30**, 1245 (1968).
534. *Uman M. A.*, Lightning, McGraw-Hill, New York, 1969. (Русский перевод: *М. Юман*, Молния, изд-во «Мир», М., 1972.)
535. *Uman M. A.*, Decaying Lightning Channels, Bead Lightning, and Ball Lightning, in Planetary Electrodynamics, eds. S. C. Coroniti and J. Hughes, Gordon and Breach, New York, 1969.
536. *Van Dyck F. C.*, Science, **11**, 110 (1888).
537. *Vannesson G.*, L'Astronomie, **5**, 431 (1886).
538. *Van Marum*, Phil. Mag., **8**, 313 (1800).
539. *Varley C. F.*, Proc. Roy. Soc. London, **19**, 236 (1871).
540. *Веденов А. А.*, *Глаголев В. М. и др.*, Proceedings of the Se-

- cond United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, United Nations, Geneva, 1958, vol. 32, p. 239.
541. *Verdet*, *La Nature* (Paris), 18, 303 (1890).
542. *Viemeister P. E.*, *Lightning Book*, Doubleday and Co., Inc., New York, 1961.
543. *de Villemontée G. G.*, *Compt. Rend.*, 155, 1567 (1912).
544. *Violle J.*, *Compt. Rend.*, 132, 1537 (1901); *Ciel et Terre*, 22, 479 (1901); *Naturwiss. Rundschau*, 16, 504 (1901); *Meteorol. Z.*, 19, 335 (1902).
545. *Violle J.*, *Compt. Rend.*, 158, 1542 (1914).
546. *Visser S. W.*, *Hemel en Dampkring*, 55, 45 (1957); *Meteorol. Mag.*, 86, 344 (1957).
547. *Власов А. А.*: а) *Scientia Sinica*, 8, 266 (1959); б) *ЖТФ*, 31, 785 (1961).
548. *Voller A.*, *Elektotechn. Z.*, 9, 473 (1888).
549. *Volmer C. R.*, *Wetter*, 13, 185 (1896); *Meteorol. Z.*, 14, 34 (1897).
550. *Vonnegut B.*, *Moore C. B.*, *Recent Advances in Atmospheric Electricity*, Pergamon Press, New York, 1959, p. 399.
551. *Vonnegut B.*, *J. Geophys. Res.*, 65, 203 (1960).
552. *Vonnegut B.*, *Moore C. B.*, *Harris C. K.*, *J. Meteorol.*, 17, 468 (1960).
553. *Vonnegut B.*, *Thunderstorm Theory*, in *Problems of Atmospheric and Space Electricity*, ed. S. C. Coroniti, Elsevier, Amsterdam, 1965.
554. *Vonnegut B.*, *Weyer J. R.*, *Science*, 153, 1213 (1966).
555. *Wagner A.*, *Meteorol. Z.*, 56, 350 (1939).
556. *Waltz, Z.* *angew. Meteorol. (Wetter)*, 7, 192 (1890).
557. *Walter B.*, *Meteorol. Z.*, 26, 217 (1909).
558. *Walter B.*, *Phys. Z.*, 30, 261 (1929).
559. *Ware A. A.*, *Haas F. A.*, *Phys. Fluids*, 9, 956 (1966).
560. *Wartmann A.*, *Sitz. Genfer Phys. Gesellsch.*, Dec. 20, 1888; *Arch. Sci. Phys. et Nat.*, (3) 21, 75 (1889); *Meteorol. Z.*, 6, 119 (1889); *Wetter*, 6, 90 (1889); *Bull. Soc. Astron. France*, 11, 298 (1897).
561. *Watson W.*, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 48, 765 (1754); 10, 525 1809 (abridg.).
562. *Watson W. K. R.*, *Nature*, 185, 449 (1960).
563. *Waye B. E.*, *Nature*, 155, 752 (1954).
564. *Webber H.*, *J. Roy. Astron. Soc. Canada*, 1, 44 (1907).
565. *Weber L.*, *Meteorol. Z.*, 2, 118 (1885); *Amer. Meteorol. J.*, 2, 142 (1885).
566. *Weber L.*, *Wetter*, 13, 167 (1896).
567. *Weber L.*, *Meteorol. Z.*, 28, 582 (1911).
568. *Weber L.*, *Meteorol. Z.*, 32, 22 (1915).
569. *Wells D. R.*, *Phys. Fluids*, 7, 826 (1964).
570. *Wells D. R.*, *Phys. Fluids*, 9, 1010 (1966).
571. *Westphal W.*, *Naturwiss.*, 19, 19 (1931).
572. *Wetter (Z. angew. Meteorol.)*, 6, 119 (1889).
573. *Wetter*, 7, 212 (1890).
574. *Wetter*, 30, 213 (1913).

575. Wetter, **31**, 215 (1914).
576. *Wilkinson J.*, J. Roy. Astron. Soc. Canada, **25**, 322 (1931).
577. *Winchester G.*, Science, **70**, 501 (1929).
578. Wojskowy Przegląd Lotniczy (Military Aviation Review), № 12, 12 (1966); Foreign Sci. Bull. (Library of Congress), **2**, № 4, 52 (1966).
579. *Wolf F.*, Naturwiss., **31**, 215 (1943).
580. *Wolf F.*, Naturwiss., **43**, 415 (1956).
581. *Wolf K.*, Prometheus, **26**, 229 (1915); Meteorol. Z., **32**, 416 (1915).
582. *Wood R. W.*, Phys. Rev., **35**, 673 (1930).
583. *Wood R. W.*, Nature, **126**, 723 (1930).
584. *Wooding E. R.*, Nature, **199**, 272 (1963).
585. *Workman E. J.*, J. Franklin Inst., **283**, 540 (1967).
586. *Wuerker R. F.*, *Shelton H.*, *Langmuir R. V.*, J. Appl. Phys., **30**, 342 (1959).
587. *Wuerker R. F.*, *Goldenberg H. M.*, *Langmuir R. V.*, J. Appl. Phys., **30**, 441 (1959).
588. *Wüllner A.*, Ann. Phys., Jubelband, 32 (1874).
589. *Янков В. В.*: а) ЖЭТФ, **36**, 560 (1959); б) ЖЭТФ, **37**, 224 (1959).
590. *Yildiz A.*, *Silberg P. A.*, Phys. Fluids: а) **7**, 96 (1964); б) **7**, 1721 (1964).
591. Z. Elektrotechn., **12**, 73 (1894).
592. *Zenger Ch-V.*, Compt. Rend., **109**, 294 (1889).
593. *Zschokke W.*, Prometheus, **14**, 234 (1903).
594. *Zurcher, Margollé*, Trombes et Cyclones, Hachette et Cie, Paris, 1876, p. 101.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию	5
Предисловие	7
Глава 1. Грозовые разряды и загадка шаровой молнии	9
Глава 2. Шаровая молния в предшествующие века	14
Глава 3. Свойства грозовой молнии и протекающие в ней процессы	22
Глава 4. Существует ли в действительности шаровая молния?	31
Глава 5. Наблюдения шаровой молнии	38
Глава 6. Фотографии шаровой молнии	78
Глава 7. Характерные черты шаровой молнии, выведенные из наблюдений	92
Глава 8. Теоретические и экспериментальные исследования шаровой молнии	113
Глава 9. Современное состояние проблемы шаровой молнии	218
Библиография	222

С. СИНГЕР

ПРИРОДА ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Редакторы Самсоненко Л. В., Медушевская Э. А
Художник В. С. Акионов
Художественный редактор И. Шаврова
Технический редактор Т. Б. Алюлина
Корректор Н. А. Гиря

Сдано в набор 4/IV 1973 г. Подписано к печати
18/IX 1973 г. Бум. кн. журн. $84 \times 108^{1/32} = 3,75$ бум. л.
12,60 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 12,57. Изд. № 27/6930
Цена 87 коп. Зак. 259.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграф-
прома при Государственном комитете Совета Ми-
нистров СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли. Ярославль, ул. Свободы, 97