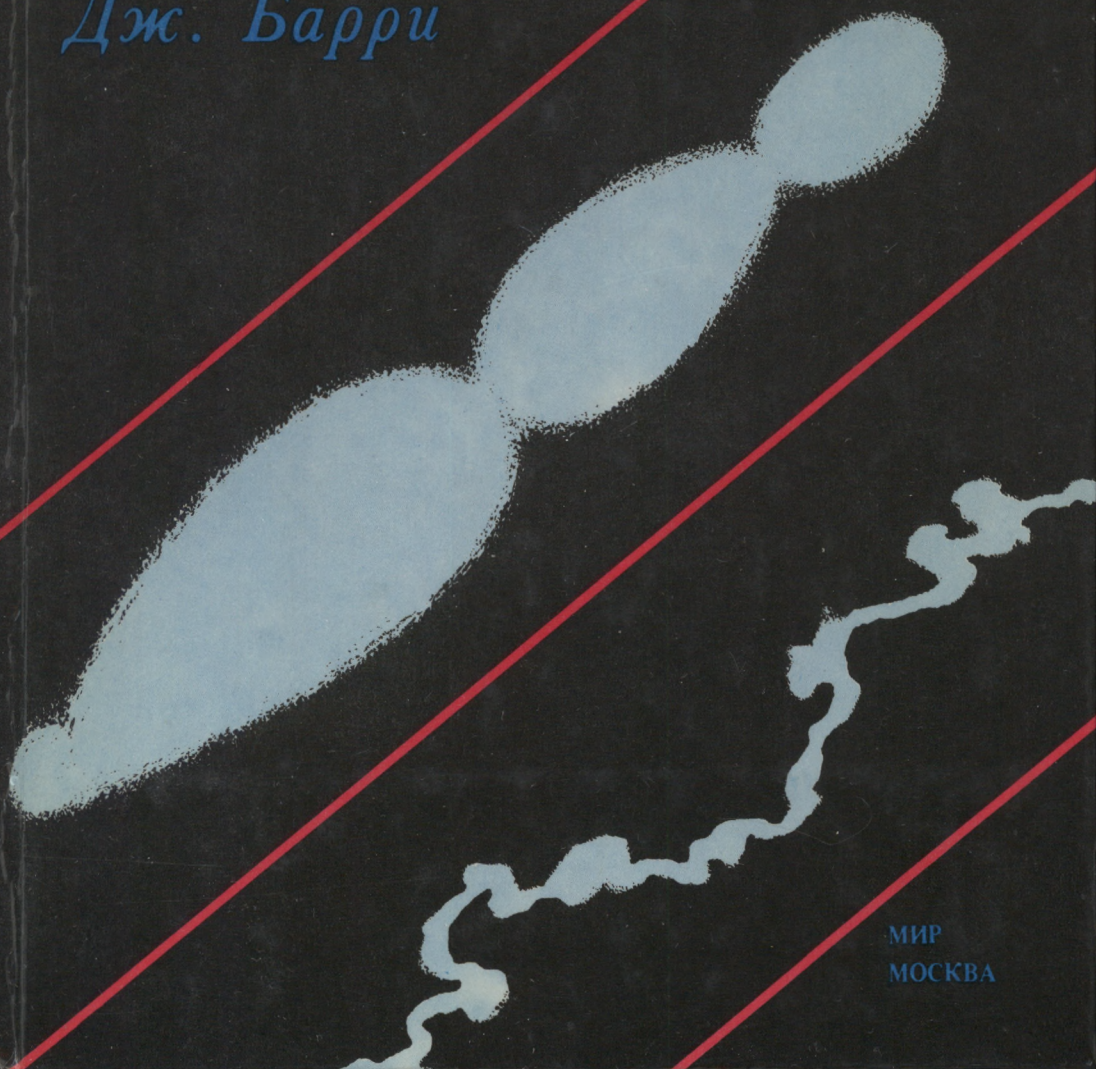


ШАРОВАЯ МОЛНИЯ
И ЧЕТОЧНАЯ МОЛНИЯ

ШАРОВАЯ МОЛНИЯ И ЧЕТОЧНАЯ МОЛНИЯ

Дж. Барри



МИР
МОСКВА



*BALL
LIGHTNING
AND BEAD
LIGHTNING*

*Extreme forms of
Atmospheric Electricity*

James Dale Barry

Plenum Press New York and London

Дж. Барри

*ШАРОВАЯ
МОЛНИЯ
И ЧЕТОЧНАЯ
МОЛНИЯ*

Перевод с английского

Москва "Мир" 1983

Барри Дж.

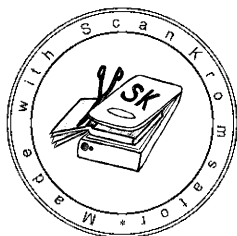
Шаровая молния и четочная молния: Пер. с англ.—под ред. Елецкого А.В. М.: Мир, 1983.—288 с., ил.

Книга видного американского специалиста посвящена редким и во многом загадочным экстремальным формам атмосферного электричества — шаровой молнии и четочной молнии. Неизвестные до сих пор условия возникновения, необычность поведения, длительность существования, серьезная опасность, связанная с этими явлениями, привлекает внимание не только специалистов, но и людей, интересующихся еще не познанными явлениями природы.

Представит большой интерес для физиков, геофизиков, метеорологов, работников энергосетей и грозозащиты. Доступна для лиц с высшим образованием, интересующихся актуальными проблемами науки.

1903050000-388
Б $\frac{041(01)-83}{79-83}$, ч. 1

Редакция литературы по космическим исследованиям, астрономии и геофизике



Scan AAW

Предисловие к русскому изданию

Предлагаемая вниманию читателя книга Дж. Барри – третья книга, опубликованная по вопросам шаровой молнии в течение последнего десятилетия на русском языке. Учитывая, что таким количеством монографий на эту тему вряд ли может похвалиться русская научно-техническая литература за весь предшествующий более чем двухсотлетний период изучения столь интересного явления природы, следует признать, что мы являемся свидетелями заметного повышения интереса к исследованиям в данной области науки.

Сравнивая содержание книги Барри с содержанием ранних монографий по данной тематике (например, книги С. Сингера [1641] и И. П. Стаханова (1980 г.)), мы можем понять причины такого интереса. Основу большинства книг, посвященных шаровой молнии и другим подобным явлениям природы, обычно составляют описание и анализ визуальных наблюдений явления, выполненных непрофессиональными наблюдателями, не имеющими ни профессиональной подготовки, ни специального оборудования. При этом авторы публикаций, специалисты-физики, видят свою основную задачу в создании логически непротиворечивой физической модели явления, которая объясняла бы важнейшие особенности наблюдаемой картины. Такая ситуация характерна для ранней стадии исследования физического явления, когда наибольшую ценность представляет максимально полный и по возможности систематизированный набор данных наблюдений*.

В отличие от ранних монографий на данную тему, в книге Барри ключевое место занимает изложение вопросов, связанных с созданием лабораторных моделей шаровой молнии. Тем самым в книге нашли отражение те качественные изменения в характере изучения явлений атмосферного свечения, которые происходят на наших глазах и знаме-

* Хотя четочная молния занимает в заглавии книги равноправное место рядом с шаровой молнией, лишь малая часть объема книги (менее десятой части) посвящена рассмотрению четочной молнии. Такое соотношение отражает значительное различие в числе публикаций, да и в степени интереса исследователей к этим двум типам атмосферных явлений.

нуют собой новый этап в познании природы шаровой молнии. В книге анализируется широкий круг экспериментов, в результате которых разные исследователи воспроизводили явление, обладающее основными внешними признаками естественной шаровой молнии. Этот анализ привел автора к чрезвычайно важному выводу, согласно которому термин «шаровая молния», возможно, объединяет целый ряд не связанных между собой явлений различной физической природы. Такой вывод способен примирить различные взгляды на природу и происхождение шаровой молнии, и он стимулирует экспериментальные исследования, предпринимаемые в самых различных направлениях.

В книге Барри содержится и еще один новый важный вывод, который несомненно окажет влияние на развитие дальнейших исследований шаровой молнии. Согласно этому выводу, сделанному автором в результате скрупулезного анализа широко известных фотографий шаровой молнии, подавляющее большинство таких фотографий отображает объекты, не имеющие ничего общего с явлением шаровой молнии! И хотя автор, основывая свое сенсационное утверждение, всячески предостерегает читателя от скептицизма по отношению к самому факту реальности существования шаровой молнии, данный вывод может привести к появлению у читателя определенного психологического предубеждения к свидетельствам очевидцев этого явления.

Автор книги Джеймс Дейл Барри, известный специалист в области кинетики газофазных химических реакций,— давний энтузиаст исследований, направленных на воспроизведение явления шаровой молнии в лабораторных условиях. Обнаружив в ходе своих экспериментов, что при горении малой примеси углеводородов в воздухе может возникать небольшой светящийся шар, поведение которого внешне соответствует многочисленным описаниям шаровой молнии, он пришел к одному из вариантов химической модели шаровой молнии, экспериментальному изучению которой он и посвятил свои дальнейшие исследования. Хотя концепция шаровой молнии, развиваемая Барри, достаточно конкретна и представляется весьма убедительной*, при анализе различных моделей шаровой молнии в данной книге автору удалось избежать предвзятого подхода. Он добросовестно излагает все факты, которые имеются в его распоряжении, как бы предлагая читателю самостоятельно сделать выбор и отдать предпочтение той концепции, которая выглядит наиболее адекватной и последовательной.

Особое место в книге Барри занимает библиография, насчитывающая без малого две тысячи наименований. Составленная с помощью современных методов поиска информации, она включает в себя практически все публикации, в которых затрагиваются вопросы, связанные с шаровой молнией и четочной молнией. Независимо от того, выдержит ли испытание временем развиваемая Барри химическая концепция ша-

* Аналогичная идеология развивается в работах Б. М. Смирнова [1649–1651], опубликованных в отечественных журналах.

ровой молнии, можно с уверенностью утверждать, что данное издание благодаря своей уникальной библиографии в течение многих лет останется настольной книгой всех специалистов в области атмосферного электричества, а также тех читателей, для которых интерес к шаровой молнии – не минутный порыв, а проявление более общего, естественно-го для современного человека интереса к не до конца познанным явлениям неживой природы. Книга практически не содержит математических выкладок и потому доступна читателям, знакомым со школьным курсом физики.

Перевод книги выполнен А. В. Елецким (предисловие, гл. 1, 4, 6, 7), Е. З. Мейлиховым (гл. 2, 3, 5).

А. В. Елецкий

Предисловие

Цель данной монографии – рассмотреть известные физические аспекты двух необычных типов явлений атмосферного свечения, сформулировать их характеристики и свойства и попытаться продвинуться на пути дальнейшего понимания природы этих явлений. Указанные явления, которые носят название *шаровая молния* и *четочная молния*, по внешнему виду отличаются от нормальной линейной молнии. Термины «шаровая молния» и «четочная молния» используются для обозначения тех типов атмосферного свечения, которые наблюдаются случайно и имеют геометрическую форму, соответствующую своему названию. Однако, возможно, что оба явления в действительности представляют собой определенные типы молнии или продолжительного электрического разряда.

Согласно описаниям, четочная молния образуется после разряда молнии между двумя облаками или между облаком и землей. Она имеет вид последовательности светящихся сфер, разделенных темными промежутками, проявляя тем самым сходство с ниткой жемчуга, и остается видимой в течение примерно 1 с. По описаниям шаровой молнии, она представляет собой единичный светящийся шар, который появляется вблизи земли после грозового разряда и также остается видимым в течение около 1 с. Оба явления остаются видимыми значительно дольше, чем длится вспышка нормальной молнии.

Наблюдения показывают, что как шаровая, так и четочная молния, возникают гораздо реже, чем нормальная молния. Хотя четочная молния появляется столь же редко, как и шаровая молния, ее существование, по-видимому, признается установленным научным фактом. С другой стороны, реальность шаровой молнии служила объектом многочисленных дебатов, и по поводу самого ее существования выражалось много скептицизма. В свете множества сообщений и наблюдений автор данной книги признает существование обоих явлений. Никаких попыток оправдать эту точку зрения не делается; вместо этого делаются попытки представить доказательства существования рассматриваемых явлений, оставив читателю свободу критического анализа и оценки.

Давая настоящей книге название, я хотел выразить ту мысль, что

в образовании шаровой и четочной молний принимает участие атмосферное электричество. Я считаю, что это не разряды, а скорее результаты действия разрядов. Я полагаю, что инициирование рассматриваемых явлений обусловлено прохождением грозových разрядов, в частности, разрядов конечных размеров воздух – воздух. Я считаю, что основную роль в образовании и существовании явлений шаровой и четочной молний играют атомы и молекулы газа, возбуждаемые электрическим разрядом.

Данная книга не содержит обзора прошлых сообщений и положения обсуждений событий визуального обнаружения шаровой и четочной молний. В этом нет необходимости, поскольку в научной литературе имеется множество доступных сообщений и обзоров подобного рода. Также умышленно не включен обзор многих теорий. До сих пор не существует единой самосогласованной теории, которая бы удовлетворительно объясняла накопленные факты. В настоящее время я считаю, что термин «шаровая молния» использовался для описания не одного, а нескольких явлений, имеющих сходные внешние черты, но характеризующихся существенно различными физическими процессами и механизмами образования.

Я считал своей целью выделить те физические аспекты, которые следуют из имеющихся фактов. Эти факты заключены в многочисленных (свыше тысячи) сообщениях и их последующих обсуждениях. Характеристики шаровой молнии, например, были развиты по критериям, включающим в себя как внешние параметры (яркость, характер движения, спектр, способ распада), так и ее влияние на наблюдателей и окружающую среду. Включены также оценки таких свойств, как плотность, плотность энергии, температура и эффекты, связанные с электромагнитными полями.

Я включил в книгу обсуждение важных экспериментов, предпринятых с целью воспроизведения явления, похожего на шаровую молнию, в контролируемых условиях. Эксперименты, в которых использовались различные способы воспроизведения естественных механизмов, продолжались свыше 100 лет. Исходя из предположения, что образование шаровой и четочной молний индуцируется грозowymi разрядами, предпринимались определенные попытки, целью которых было продублировать естественные разряды. Были испробованы различные экспериментальные методы создания локализованных областей с относительно высокой степенью ионизации. При этом предполагалось, что использование лабораторных методов может в конце концов привести к результату, похожему на интересующее нас явление. Использовались и другие методы, основанные на добавлении в локализованные объемы воздуха таких примесей, как ионы металлов или газообразные углеводороды. Такие подходы основывались на предположении, что, хотя в природе аналогичная ситуация реализуется не часто, она может рождаться в результате грозового разряда.

В качестве доказательства существования обоих видов молнии в книгу включена коллекция фотографий, которая предлагается на кри-

тический суд читателя. Представлено обсуждение условий, при которых получены эти фотографии, и дан анализ физических фактов. Не все фотографии интерпретируются здесь как истинные изображения двух видов молнии. Как показывают исследования, такие фотографии могут иметь различные интерпретации, поэтому основанные на них доказательства нельзя считать исчерпывающими. Очевидно, читатель может прийти к точке зрения, отличной от мнения специалистов. Автор не имеет в своем распоряжении негативов фотографий и не обсуждал эти фотографии с выполнившими их людьми. Многие из оригинальных фотографий и негативов в настоящее время отсутствуют, поскольку с момента их первой публикации прошло слишком много лет.

В книгу включено большое количество ссылок на описания и обсуждения двух видов молнии. Эти ссылки могут оказаться полезными для тех, кто интересуется поиском информации «из первых рук». Включенные сюда работы были опубликованы в научных изданиях в течение последних 300 лет. Библиография, включающая в себя свыше 1600 ссылок, является наиболее полной библиографией работ, посвященных рассматриваемым видам молнии.

Автор пытался свести до минимума математические обозначения, уравнения и различные выкладки. Полностью уничтожить все уравнения и математические символы, а также соответствующий пояснительный текст, оказалось невозможным. Используемые здесь обозначения приводятся в системе СГС, хотя иногда, для облегчения сравнения с оригинальной публикацией, вводятся английские единицы.

Автор надеется, что данная монография будет стимулировать дальнейшие научные исследования. Недостаток исследований в данной области объясняется тем, что рассматриваемые виды молнии часто классифицируются как мнимые. Кроме того, научные исследования часто бывают затруднены в связи с недостатком надежной информации. Можно надеяться, что данная книга поможет преодолеть разрыв между популярными публикациями и серьезными, но часто недоступными, научными обсуждениями событий, связанных с возникновением этих типов молнии.

Джеймс Дейл Барри

Лос-Анджелес, Калифорния

БЛАГОДАРНОСТИ

При подготовке рукописи автору сильно помог дух сотрудничества, который связывает многих его коллег. Оказались неоценимыми и сильно улучшили качество рукописи постоянное участие и непрерывные советы д-ра С. Сингера, директора исследовательской ассоциации в Афинах (США), Пасадена, Калифорния. Д-р Сингер хорошо известен своей книгой «Природа шаровой молнии» [ее перевод на русский язык: С. Сингер, «Природа шаровой молнии», М., Мир, 1973]. Автор в течение почти 15 лет обменивался с д-ром Сингером информацией по шаровой молнии.

Я ценю также сотрудничество д-ра П. Хуберта из Центра ядерных исследований в Сакле, Франция, присылавшего мне различные сообщения и оттиски работ; д-ра Томпкинса из корпорации «Террене» (Рефуджио, шт. Техас), представившего свои неопубликованные материалы и фотографии; д-ра Пауэлла из Брукхейвенской национальной лаборатории (США), разрешившего использовать его фотографии; проф. Орвила из университета штата Нью-Йорк в Олбани (США), сделавшего ряд замечаний и предоставившего свои фотографии, м-ра Дэвиса из Национальной физической лаборатории (Миддлсекс, Англия), поддержавшего в течение продолжительного времени обмен информацией по шаровой молнии, проф. Юмана из Флоридского университета в Гейнсвилле (США), высказавшего ряд замечаний относительно четочной молнии, и д-ра Эриксона, разрешившего изготовить фотографии с его видеоленты.

С благодарностью автор отмечает любезность различных журналов и отдельных лиц, давших разрешение воспроизвести и использовать фотографии. Эти авторы и журналы специально отмечены в подписях под рисунками, опубликованными в различных главах. Рукопись не могла

бы быть подготовлена без мастерства и неутомимых усилий машинистки миссис М. Шнейдер из Гардены, Калифорния, а также без терпения корректора миссис Уайтид из Лонг-Бич, Калифорния. Многие фотографии были выполнены д-ром Кеннеди из Хантингтон-Бич, Калифорния, который, кроме того, улучшил качество рукописи своими предложениями.

И в заключение я должен поблагодарить свою жену Карен, которая за пять лет работы над рукописью проявила терпение и оказывала значительную помощь. Я глубоко ценю поддержку, оказанную ею и остальными членами моей семьи, Даяной и Дэвидом.

Введение

1.1. Молния

Молния – одно из самых удивительных явлений природы, которое на протяжении тысячелетий поражало воображение людей. Однако научное исследование молнии началось лишь около двух столетий назад, когда д'Алибар во Франции (в 1752 г.) и Франклин в Америке положили начало эре электричества, заложив основы нашего современного «электронного общества». Обсуждение этих ранних экспериментов можно найти в сообщениях «из первых рук» [686, 1893, 1894]. Изучение молнии развивалось от наблюдений и умозрительных рассуждений к теоретическим и экспериментальным работам, основанным на теории электромагнетизма и физике плазмы. По мнению многих исследователей, в настоящее время физика нормальной молнии хорошо понята. При этом, разумеется, остаются открытыми для исследования многочисленные детали.

Характеристики, физика и происхождение атмосферного электричества обсуждаются во многих книгах [300, 352, 495, 496, 665, 901, 902, 905, 1585, 1842, 532, 1830]. Тема очень интересна, и я рекомендую читателю обратиться к более старым трудам, с тем чтобы полнее ощутить процесс развития представлений и оценить достигнутые успехи.

В книге [1830] молния определяется как нестационарный сильноточный электрический разряд, длина пути которого обычно исчисляется километрами. Согласно измерениям [1206], разряд молнии переносит в среднем заряд от 140 до 250 Кл. Полная длительность разряда молнии порядка 0,2 с, а средний ток может достигать тысячи ампер.

Разряды молний возникают в воздухе при условиях, когда электрическое поле, обусловленное накоплением заряда в локализованном объеме, становится достаточно сильным, чтобы вызвать ионизацию и пробой воздуха. Возможны разряды молнии между облаком и землей, между двумя облаками, внутри облака, между облаком и открытым пространством и просто в открытом пространстве. Фактически разряд между облаком и землей состоит из нескольких перемежающихся разрядов, вслед за которыми следует разряд между землей и облаком.

Обычно полный разряд молнии, который длится сотни миллисекунд,

называют *вспышкой*. Часто вспышка состоит из множества элементарных разрядов, или *импульсов*, которые продолжаются десятки миллисекунд и следуют друг за другом с интервалом примерно 40–50 мс. В свою очередь импульсы инициируются разрядами меньшего масштаба – *лидерами*. Канал разряда между облаком и землей, возникновение которого предшествует обратному импульсу, носит название *ступенчатого лидера*. Ступенчатый лидер распространяется вниз со скоростью порядка 10^5 м/с в виде последовательности коротких разрядов, следующих друг за другом с интервалами примерно 50 мкс. Ступенчатый лидер, вызывая на своем пути увеличение локальной степени ионизации, тем самым создает канал для прохождения обратного импульса.

Обратный импульс возникает при условии, когда значение электрического поля вблизи земли становится настолько высоким, что оказывается возможным движение зарядов вверх. Обратный импульс представляет собой фронт волны, обладающий высокой ионизирующей способностью и переносящий потенциал земли по пути, определенному ступенчатым лидером. Обратный импульс создает канал с высокой степенью ионизации, так что область между волновым фронтом и землей пронизывается большими токами. Обратный импульс, движущийся вверх со скоростью, равной $1/3$ – $1/2$ скорости света, обуславливает свечение канала молнии.

Распад канала молнии происходит после прекращения протекания токов и снижения степени ионизации в канале до значений, характерных для нормального воздуха. Однако движение зарядов в облаке может привести к возникновению дополнительных разрядов вдоль пути, определенного прохождением обратного импульса. Этим вторичным разрядам, распространяющимся по ранее возникшему каналу, предшествует разряд, называемый *стреловидным лидером*, который увеличивает степень ионизации канала и облегчает прохождение другого сильноточного обратного импульса. Поскольку стреловидный лидер движется по предварительно ионизованному каналу, скорость его распространения, составляющая около $2 \cdot 10^6$ м/с, превышает скорость ступенчатого лидера. Стреловидный и ступенчатый лидеры различаются также и по внешнему виду. Поскольку стреловидный лидер не должен искать для себя ионизованный путь, он не ветвится в отличие от ступенчатого лидера. Если после прекращения тока в начальном канале проходит время порядка 100 мс или больше, то может образоваться стреловидно-ступенчатый лидер, поскольку произошедшее за это время снижение степени ионизации в канале замыкает образованный ранее канал. Физические процессы в ионизованном канале исследовались, например, в работе [1092].

В последующих разделах книги будут использоваться такие термины, как «импульс», «ступенчатый лидер», «стреловидный лидер», «канал ионизации». По мнению некоторых исследователей, различные явления, в том числе шаровая молния и четочная молния, могут возникать при определенных условиях в результате уменьшения степени ионизации в распадающемся канале. Образование этих явлений связы-

вают с местами деформации канала, где имеется остаточная ионизация, или с действием разрядов, проходящих вдоль распадающегося канала аналогично разряду молнии в открытом пространстве, или с редкими проявлениями аномального поведения канала молнии, природа которых в настоящее время не установлена.

Этот краткий обзор явления молнии не отражает реальной сложности объекта и его различных физических свойств. Более полный анализ может быть найден в цитированных выше работах. В литературе в качестве отдельных вопросов обсуждаются также различные аспекты разряда молнии.

1.2. Существование шаровой молнии и четочной молнии

Термин *шаровая молния* применяют к одиночной светящейся стабильной и сравнительно небольшой шарообразной массе воздуха, которая наблюдается в атмосфере и связана с грозовыми явлениями и естественной молнией. Термином *четочная молния* обозначают последовательность светящихся устойчивых и относительно небольших сферических образований, которая иногда наблюдается в атмосфере и часто рассматривается как след от прохождения разряда естественной молнии.

Исследование и теоретическое описание этих двух форм атмосферного электричества до сих пор существенно зависят от сообщений, содержащих результаты наблюдений и обсуждения. Шаровая молния и четочная молния представляют собой редко встречающиеся в природе формы атмосферного свечения, и, как правило, при их появлении отсутствуют достаточно подготовленные наблюдатели. К тому же исследование затруднено невозможностью воспроизводить по желанию атмосферные разряды, сопровождающиеся появлением шаровой молнии и четочной молнии.

Сомнения вызывало само существование шаровой молнии, и многие специалисты высказывали и до сих пор сохраняют скептическое отношение к этому вопросу. По-видимому, скептицизм, связанный с вопросом о шаровой молнии, является результатом редкости ее появления, а также следствием того, что обычно она наблюдалась и описывалась неквалифицированными наблюдателями. Сообщения и описания этого явления настолько сильно менялись от одного случая к другому, что ученые, которые стремятся к логической согласованности, часто заражались сомнениями и скептицизмом.

Четочная молния, явление достаточно необычное, не вызвала таких эмоций и разногласий, как шаровая молния. Основное различие между наблюдениями шаровой молнии и четочной молнии связано с личным участием наблюдателя. Четочная молния чаще всего наблюдается на больших расстояниях от наблюдателя и связана обычно с грозовыми

разрядами с облака на землю и с облака на облако. Напротив, шаровая молния чаще всего наблюдается с близкого расстояния; она может и не быть непосредственно связана с линейной молнией. Случаи появления шаровой молнии могут описываться как неожиданное наблюдение одного из редких явлений атмосферного электричества, оказывающих на очевидца чрезвычайно сильное эмоциональное воздействие. Поэтому



Рис. 1.1. Рисунок, хорошо иллюстрирующий прямое эмоциональное воздействие появления шаровой молнии на человека. По [666].



Рис. 1.2. Еще один рисунок, иллюстрирующий эмоциональное воздействие шаровой молнии на человека. С разрешения издательства «Харпер энд Бразерс». Впервые опубликовано в [665], впоследствии воспроизводилось в [1059].

естественно, что наблюдение шаровой молнии препятствует холодному, объективному сообщению об этом наблюдении.

Эмоциональный эффект появления шаровой молнии неплохо иллюстрируется рис. 1.1 и 1.2. Рис. 1.2 воспроизводится из известной книги [665], посвященной характеристикам и свойствам атмосферы, а рис. 1.1 – из статьи [666]. Появление шаровой молнии воспринимается очевидцами вполне серьезно, и нередко в сообщениях о наблюдениях шаровой молнии отражается степень близости наблюдателя.

Фотографические свидетельства существования четочной и шаровой молний еще более необычны, чем сообщения о самих явлениях. Это можно объяснить кажущейся противоречивостью некоторых сообщений, сопровождаемых фотографиями. Большинство фотографий представляются весьма сомнительными. Подробное обсуждение многих фотографий в периодике чаще всего приводило к отрицательным выводам. Все имеющиеся в настоящее время фотографии, которые, согласно сообщениям авторов, относятся к шаровой молнии, помещены в гл. 5 данной книги. Фотографии четочной молнии включены в гл. 2. Большинство идентификаций этих фотографий признаны ошибочными; лишь немногие фотографии можно признать истинными изображения-

ми шаровой или четочной молний. Исходя из этих фактов, мы должны заключить, что как шаровая молния, так и четочная молния – события чрезвычайно редкие. В работе [1788], которая будет обсуждаться ниже, на основании анализа фактов делается вывод, что вероятность появления шаровой молнии и четочной молнии на Среднем Западе США составляет примерно 10^{-4} в расчете на каждый зарегистрированный случай появления линейной молнии.

Автор проанализировал большое число сообщений о наблюдениях шаровой молнии и четочной молнии. Библиография этих работ включена в гл. 8. В большинстве случаев указанные работы могут быть найдены в легко доступных научных журналах и периодических изданиях, опубликованных примерно в течение последних 300 лет. Нет сомнений, что хотя шаровая молния и четочная молния – явления редкие, каждое из этих явлений привлекает к себе достаточно большое внимание. Принято считать, что шаровая молния появляется гораздо реже, чем четочная молния, однако статистическая обработка сообщений говорит об обратном. Этого следовало ожидать, если учесть, что четочная молния – научно признанная форма атмосферного электричества, в то время как шаровая молния настолько серьезно не воспринималась.

В результате анализа частоты появления сообщений о наблюдениях шаровой молнии [349] было получено интересное распределение. На рис. 1.3 представлено распределение по датам публикации свыше 1600 работ, содержащих сообщение о наблюдении шаровой молнии или обсуждение ее свойств. Имеющиеся данные разбиты на три категории: а) работы, описывающие случаи наблюдения шаровой молнии – около 500 случаев; б) сообщения (а) о наблюдениях и, кроме того, еще 600 работ, содержащих теоретический анализ; в) сообщения о наблюдениях (а), теоретические обсуждения (б) и, кроме того, еще около 500 работ, содержащих непроверенные сообщения. Данные, опубликованные с 1651 по 1849 г., не показаны, поскольку было найдено всего 54 сообщения, относящиеся к этому периоду.

В настоящее время установлено, что многие сообщения о наблюдениях шаровой молнии в действительности либо относились к другим метеорологическим явлениям, либо были вызваны ошибочными физиологическими ощущениями. В качестве примеров можно привести коронный разряд, огни св. Эльма, поддерживаемые сильными локальными электрическими полями, изображение на сетчатке глаза, сохранившееся после близкой вспышки молнии. Часто в случаях ошибочной идентификации вслед за оригинальным сообщением поступали письма, в которых давалась правильная интерпретация явления. Автор данной книги не предпринимал детального пересмотра публикаций с целью исключения различных ошибочных, противоречивых или дублирующих описаний, опубликованных в различных журналах.

Анализ случаев появления шаровой молнии в Голландии [295] показал, что такие случаи характеризуются циклической периодичностью с периодом 10 лет. Было высказано предположение, что это связано

с периодическим характером солнечной активности, которая также имеет период повторения, близкий к 10 годам. Данные, представленные на рис. 1.3, не выявляют периодичности с 10-летним периодом. Предполагается, что основной пик вблизи 1899 г. служит отражением интен-

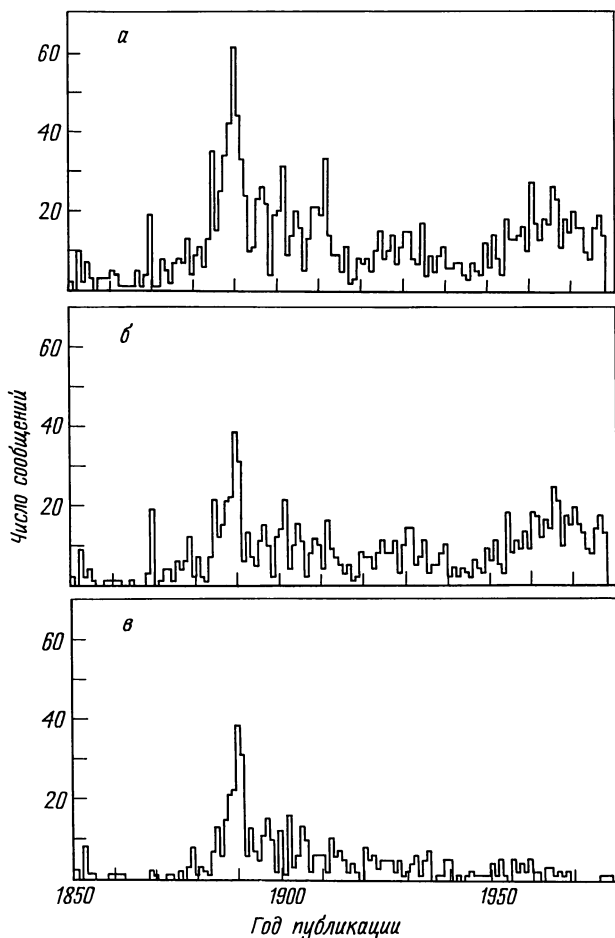


Рис. 1.3. Распределение по датам публикаций, полученное при обработке более 1600 работ, содержащих описания и обсуждения шаровой молнии и опубликованных в научной периодике с 1850 по 1978 г. Ссылки на эти работы имеются в списке литературы. Распределение (а) основано примерно на 500 работах, содержащих сообщения о наблюдениях шаровой молнии; (б) включает в себя работы, вошедшие в (а), и, кроме того, 600 работ, содержащих общие рассуждения; (в) включает в себя работы, вошедшие в (а) и (б), и, кроме того, 500 работ, содержащих непроверенные сообщения. Работы, опубликованные в период с 1651 по 1849 г. (54 события), не показаны. На диаграммах не заметна 10-летняя цикличность распределения.

сивного интереса к электрическим явлениям в этот период, когда широкое распространение получили наблюдения за электрическими явлениями в атмосфере. Если распределение, показанное на рис. 1.3, представить по десятилетиям, то оно окажется аналогичным распределению [1334], отражающему период с 1800 до 1920 г. Вследствие различных неопределенностей в имеющихся данных никакого другого смысла выведенному распределению приписать не удастся.

Следует отметить, что показанное здесь распределение частот появления опубликованных сообщений не может правильно отражать истинную частоту возникновения шаровой молнии в природе. Распределение сообщений по времени и по географическим местоположениям будет искажаться вследствие предубеждений издателей, возможных периодических изменений интересов публики, ошибочных интерпретаций и идентификаций реальных событий, колебаний наблюдателей в отношении публикации и отсутствия в их распоряжении возможности публикации. Согласно оценке [1788], выполненной на основании дистанционных автоматических фотографий молний, частота появления шаровой молнии составляет примерно $3 \cdot 10^{-9} \text{ км}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$. Эта величина согласуется с выводом [295]. В работах [413, 1314] на основании анализа сообщений, относящихся к различным районам и различным периодам времени, установлено, что число сообщений о наблюдениях шаровой молнии составляет примерно 3% от числа сообщений об ударах обычной молнии в землю в Западной Германии и Швеции. Следует отметить, что результаты подобных оценок сильно зависят от различных искажающих факторов и не могут быть очень точными.

Интересно, что многие публикации, содержащие обсуждения свойств шаровой молнии и четочной молнии, некоторые теоретические модели или предполагаемые экспериментальные аналогии, были написаны тотчас же после появления оригинальных сообщений о наблюдениях этих явлений. Ясно, что явления стимулировали работу воображения.

Основная трудность, возникающая при оценке сообщений о наблюдениях шаровой молнии, связана с тем, что приписываемые явлению свойства изменяются в широком диапазоне и противоречат друг другу. Многие исследователи при анализе сообщений отмечали различия в цвете, характере движения, плотности энергии и способе распада [300, 341, 413, 577, 919, 932, 1201, 1476, 1564, 1641].

Похоже, что существует несколько явлений атмосферного электричества, имеющих аналогичные, но немного различающиеся характеристики. Это предположение подтверждается некоторыми экспериментальными данными. Многие исследователи предпринимали лабораторные эксперименты с шаровой молнией. Так, в недавних работах [343, 345] исследовалось горение углеводородов малой плотности, в работе [1443] изучалось возбуждение метастабильных энергетических уровней молекул с помощью высокочастотного разряда, в работе [1632] проводилось испарение металлов с помощью мощных постоянных токов. Во всех этих экспериментах воспроизводились стабильные светящиеся шары в воздухе при атмосферном давлении. Подобное же явление во-

спроизводилось при искусственном инициировании грозовых разрядов с облака на землю [886, 887]. Каждое из указанных явлений обладает своими специфическими чертами, однако при обнаружении в природе все они могли бы быть идентифицированы как шаровая молния.

Как шаровая, так и четочная молнии могут быть единичными или множественными явлениями. Они довольно редко встречаются в природе, не очень хорошо поняты и служат темой довольно интенсивных исследований. Я буду продолжать вести свою картотеку опубликованных работ и приветствовать контакты, направленные на ее расширение и пополнение. Можно надеяться, что дальнейшие исследования, не ограниченные рамками анализа наблюдений, привлекут внимание значительно более широкого круга ученых.

Подробные описания явления четочной молнии, содержащие оригинальные сообщения наблюдателей и комментарии различных исследователей, могут быть найдены в публикациях, список которых представлен в табл. 2.1. Эти ссылки помещены отдельно от полного списка литературы, помещенного в гл. 8, с тем чтобы облегчить поиск работ, посвященных четочной молнии. Приведенные ссылки позволят заинтересованным исследователям получить детальное представление о явлении и различных случаях его наблюдений.

Четочная молния

2.1. Описание

Четочная молния известна и под другими названиями: *жемчужная молния, цепная, ожерельчатая, капельная*. В научной литературе имеется обширная документация и опубликованы многочисленные обсуждения четочной молнии. Хотя количество сообщений и обсуждений, касающихся четочной молнии, существенно меньше числа, посвященных шаровой молнии, общепринято, что четочная молния – это одна из форм атмосферного электричества. Так, например, специалист в области атмосферного электричества Гудлет признавал, что четочная молния – это широко известное явление [770].

Согласно сообщениям, четочная молния обычно появляется между двумя тучами, образуя прерывистую линию светящихся «пятен», которая остается в течение некоторого времени после появления обычной линейной молнии. Светящиеся «пятна» имеют такой же угловой размер, как и диаметр канала линейной молнии, и, по-видимому, обладают сферической формой. Каждое «пятно» отделено от соседнего несветящейся областью. Размер темного промежутка может составлять несколько диаметров светящихся частей.

Принято считать, что четочная молния возникает из канала аномальной молнии между двумя тучами. Канал разряда обычной молнии распадается на ряд не связанных друг с другом светящихся фрагментов. Законченная форма четочной молнии состоит из большого числа частей, по-видимому, существующих одновременно, а не является кажущимся результатом движения одиночного светящегося объекта с периодически меняющейся яркостью. Наблюдателям она представляется в виде устойчивого свечения вдоль траектории обычной линейной молнии, которое существует довольно долгое время после вспышки последней. Согласно сообщениям, время жизни такой четочной молнии составляет 1–2 с.

От обычной линейной или шаровой молнии четочная молния отличается рядом особенностей. Чаще всего сообщается, что ее прерывающаяся линия имеет волнообразный характер и выглядит как отрезок синусоиды длиной в несколько периодов. Однако такая волнообразная

Основная литература о четочной молнии

[163]	Мак-Кроски [1194]
[165]	Малан [1106]
[282]	Матиас [1157, 1164, 1167–1169, 1173]
[287]	Матиас и Бушсбаум [1185]
Аррениус [305]	Мик и Грэгс [1204]
Аткинсон [313]	Морэн [1194]
Байгелоу [377]	Мишин и Бейбулатов [1234]
Бек [364]	Пауэлл и Финкельстейн [1443, 1444]
Бен [366]	Планте [1385]
Бенедикс [369]	Поккельс [1418]
Берг [370]	Прочнов [1457, 1458]
Бидл [361]	Рену [1493]
Болл [389]	Риггенбах-Буркхардт [1504]
Вильсон [1930]	Россман [1533, 1534]
Войцеховский и Войцеховский	Сейгнер [1611]
[1857, 1858]	Смит [1652]
Вольер [1941]	Стекольников [1674]
Газенауэр [828]	Тёплер [1774, 1779]
Гейдке [835]	Томлинсон [1782–1784]
Гильдебрандссон [860]	Туше [1795]
Губерт [868]	Фуше [682]
Гудлет [770]	Фье, Гарри и Губерт [658]
Де Борт [398]	Фон Ханн [820]
Джоул [955]	Фон Килински [984]
Израэль [901]	Хапке [821]
Капица [960, 963]	Шемински и Вольф [1569]
Кейди и Дэвис [471]	Шмаусс [1575–1577]
Кроуфорд [538]	Шпор [1703]
Льюис [1071]	Юман [1825, 1829, 1830]
Люизе [1100]	Ягер [914]

форма имеет место не всегда; зато типичной особенностью четочной молнии является ее «пунктирность».

В табл. 2.1 приведены некоторые из известных автору источников, в которых сообщается о наблюдении четочной молнии.

2.2. Фотографии четочной молнии

Результаты нашего исследования показали, что фотографии четочной молнии не так многочисленны, как это обычно считалось, а большинство фотографий, на которых, якобы, зафиксирована четочная молния, ненадежны. Настоящие фотографии четочной молнии публиковались, пожалуй, даже реже, чем фотографии шаровой молнии. Все фотографии, кроме трех, на которых несомненно зафиксирована четоч-

ная молния, были получены с помощью простых камер в режиме «ожидания» и потому, естественно, вызывают подозрения.

Приведенная на рис. 2.1 фотография линии с прерывающимся свечением была интерпретирована как снимок четочной молнии [1504] и позже публиковалась в работах [369, 1941]. С тех пор эта фотография несколько раз обсуждалась и идентифицировалась то как четочная, то как шаровая молния. В работе [1504] была опубликована еще одна фотография (рис. 2.2), которая также была интерпретирована как фотография четочной молнии. Прерывистое свечение образует кривую линию, не имеющую, однако, волнообразного характера.

В работе [366] подлинность фотографий рис. 2.1 и 2.2 была поставлена под сомнение и было указано, что подобные же эффекты можно

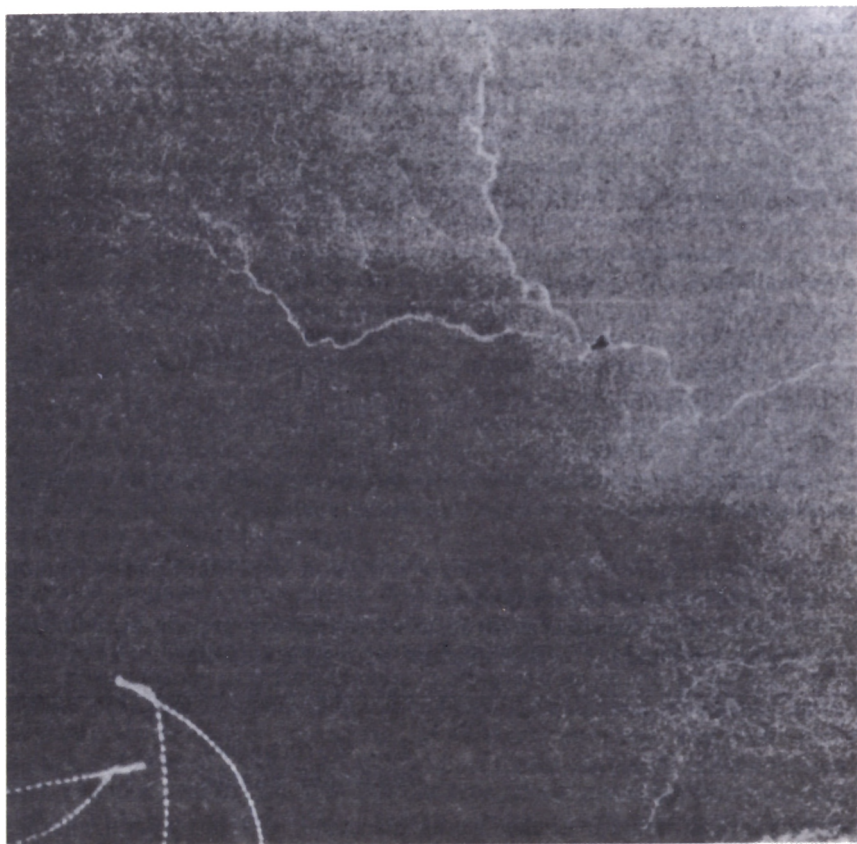


Рис. 2.1. Сделанная во время грозы фотография со следом переменной яркости, идентифицированным как след четочной молнии [1504]. Достоверность такой интерпретации сомнительна в связи с соображениями, иллюстрируемыми рис. 2.3. Увеличенная часть этого снимка с прерывистым следом была позже опубликована в работах [305, 1941, 369].

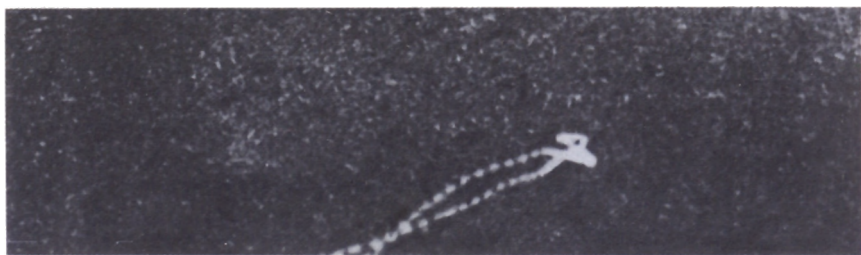


Рис. 2.2. Сделанная во время грозы фотография со следом переменной яркости, идентифицированным как след четочной молнии [1504]. Достоверность интерпретации сомнительна в связи с соображениями, иллюстрируемыми рис. 2.3.

было бы получить при фотографировании уличного фонаря. Такое же предположение обсуждалось [562] при рассмотрении представленной на рис. 5.3 фотографии, на которой, как сообщалось, зафиксирован пульсирующий след шаровой молнии.

В [366] опубликована фотография, полученная при намеренном движении камеры, в поле зрения которой был уличный фонарь. Эта фотография воспроизведена на рис. 2.3. Как отмечается в гл. 5 при обсуждении рис. 5.3, в Европе уличные фонари с натриевыми лампами питаются переменным током с частотой 50 Гц. При этом за время 0,01 с между максимумами тока натриевая плазма может охладиться примерно на 1000°С. Поэтому яркость лампы модулируется, что приведет к появлению «пунктирной» линии при фотографировании движущейся ручной камерой с длительной экспозицией кадра. Таким образом, приведенные на рис. 2.1, 2.2 фотографии [1504] можно классифицировать лишь как сомнительные и нельзя рассматривать (в научном смысле) как фотографии четочной молнии.

На рис. 2.4 приведена фотография из [1611], особенности изображения на которой близки к описанным характеристикам четочной молнии. Прерывистое свечение, как сообщалось, наблюдалось вместе с обычной линейной молнией. Как видно, след четочной молнии в отличие от обычных разрядов молнии не ветвится. Эта особенность, совершенно несвойственная следу обычной молнии, по наблюдениям очевидцев, является отличительной чертой четочной молнии. Однако происхождение этого особого следа на рис. 2.4 стоит под вопросом, поскольку в верхней части фотографии имеется часть следа, повторяющая только что описанный след (его форма явно совпадает с формой основного изображения четочной молнии). Невероятно, чтобы два или более разряда приобрели столь близкие формы под действием атмосферных электрических полей и далеко отстоящих друг от друга пространственных зарядов. Таким образом, фотография рис. 2.4 является сомнительной. Она связана, видимо, с движением камеры, а не представляет собой истинный след четочной молнии.

Другим примером фотографии, на которой, якобы, изображена четочная молния, является приведенная на рис. 2.5 фотография из [1575].



Рис. 2.3. Фотография уличного фонаря, сделанная намеренно перемещаемой камерой с целью получения следа с переменной яркостью [366]. Этот снимок ставит под сомнение интерпретацию рис. 2.1 и 2.2 в качестве фотографий четочной молнии.

Заметно, что длина небольших светящихся пятен увеличивается при движении слева направо. Можно предположить, что след вызван неравномерным движением источника или его движением в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка. Это изображение следует сопоставить с траекторией на рис. 5.3. Обсуждаемая фотография была также опубликована в работах [984, 1576]. В свете соображений работы [336] она также является сомнительной.

Были выявлены только две фотографии с квазипериодической волноподобной структурой, с которой обычно связывается четочная молния. Первая из них (рис. 2.6) была впервые опубликована в работе [1457], а затем повторно воспроизведена в [1458]. Прерывистый вид четочной молнии слабо выражен, и его можно вообще не заметить. Явно заметная модуляция интенсивности может быть связана с характеристиками пленки или особенностями процесса проявления. Сомнения по поводу этой фотографии высказывались в [1880], где снова были заподозрены движение камеры и уличный фонарь.



Рис. 2.4. Сделанная во время грозы фотография со следом переменной яркости, идентифицированным как след четочной молнии [1611]. Повторяющийся след в верхней центральной части фотографии вызывает подозрение, что она могла быть сделана движущейся камерой.

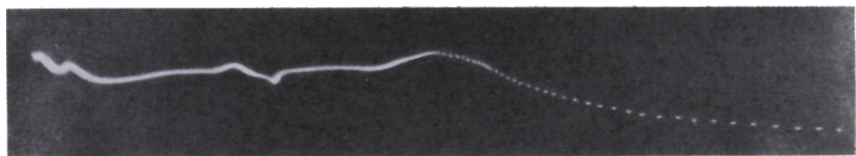


Рис. 2.5. Сделанная во время грозы фотография со следом переменной яркости, идентифицированным как след шаровой молнии [1575]. Этот снимок напоминает фотографии, приведенные на рис. 2.3 и 5.3. Есть подозрение, что фотокамера двигалась. Фотография воспроизводилась в работах [1576, 984].

Другая фотография с волноподобным изображением воспроизведена на рис. 2.7. Она была впервые опубликована в работе [1569] и описана как достоверная фотография четочной молнии. Эту молнию Шеминский сфотографировал ручной камерой, но в момент съемки он ее не видел. Негатив фотографии был тщательно изучен профессором Эггертом, од-



Рис. 2.6. Фотография с квазисинусоидальным следом, идентифицированным как след четочной молнии [1458]. Есть подозрение, что камера двигалась. Впервые эта фотография появилась в работе [1457].



Рис. 2.7. Фотография, сделанная Шеминским в 1933 г. и идентифицированная как жемчужная молния [1569]. Начало и конец указаны стрелками. Факт существования ожерельчатой молнии фотографом засвидетельствован не был, и выражались сомнения в ее достоверности.

нако об окончательных выводах было сообщено мало. Прерывистый след определенно был естественной частью негатива, но о точном его происхождении ничего не говорилось. Фотографию изучал также М. Тёплер, по мнению которого на ней изображена четочная молния.



Рис. 2.8. Рисунок жемчужной молнии, наблюдавшейся ученым М. Тёплером в Дрездене в 1916 г. Впервые опубликован Тёплером [1772] и воспроизведен в работах [1569, 1941].

В работе [1641] также было выражено сомнение, поскольку существование четочной молнии не было достоверно засвидетельствовано.

В прошлом было также опубликовано несколько зарисовок четочной молнии. Одна из них, принадлежащая М. Тёплеру [1772], воспроизведена на рис. 2.8 и заслуживает внимания в связи с тем, что наблюдатель

был известным в свое время специалистом по электротехнике. Этот рисунок обсуждался и воспроизводился в работах [1569, 1941]. Тёплер обсуждал свое наблюдение и интерпретировал его как жемчужную молнию [1772]. Не исключено, что наблюдение разряда обычной молнии с причудливой траекторией могло бы интерпретироваться наблюдателем как нить со светящимися бусинками. Однако очевидцы события сообщали об эволюции линейного следа в прерывистый. Противоречие между устными сообщениями и фотографиями, допускающими различную интерпретацию, указывает на необходимость автоматической дистанционно управляемой и высокоскоростной съемки таких событий при помощи многих камер.

Впечатляющая фотография, на которой, возможно, запечатлена четочная молния, опубликована в работе [1185] (рис. 2.9). Исходная фотография – цветная; изображение молнии на ней – белое. Камера находилась в темной комнате и была направлена на грозу через окно при наклоне к горизонту под углом примерно 15° . Было сделано шесть снимков с 15-минутной экспозицией каждый. Четыре из них были «пустыми», на одном был зафиксирован след обычной молнии, а последний воспроизведен на рис. 2.9.

Изображение является квазипрерывистым, не имеет волнообразного характера, довольно прямолинейно и обладает конечной длиной. Отдельные его части совсем не похожи друг на друга. Эта фотография воспроизводилась в работах [287, 1071], где она интерпретировалась как пример шаровой или четочной молнии.

Похожий четочный разряд был сфотографирован Янгом [1966] (также специалистом) и воспроизведен в [313, 471, 1444]. Эта фотография



Рис. 2.9. Сделанная во время грозы фотография с частью сегментированного светящегося следа, идентифицированного как след молнии с перетяжками [1185]. Воспроизводилась в работах [1071, 287, 1059].



Рис. 2.10. Фотография разряда молнии, инициированного водяным султаном во время эксперимента на море. Была сделана серия фотографий [1966]. Настоящий снимок интерпретируется как след четочной молнии. Воспроизводился в работах [313, 471, 1444].

приведена на рис. 2.10. Разряд произошел перед штормом на море из тучи в водяной столб, образовавшийся в результате преднамеренного взрыва. Эта фотография – не только один из немногочисленных примеров стимулированной молнии, но также и один из редких примеров четочной молнии.

Удар молнии в водяной султан был зафиксирован одновременно двумя кинокамерами. Одна из них производила съемку на 35-мм пленку со скоростью 23,8 кадра в секунду, а вторая – на такую же пленку, но со скоростью 109 кадров в секунду. Обе камеры одновременно зафиксировали последовательные удары молнии в водяной султан. Было зарегистрировано четыре следующих друг за другом удара молнии. Все они

происходили вдоль одной и той же траектории, и каждый последующий разряд проходил еще до того, как предыдущий полностью распадался. След приобретал четочноподобный вид после существенного снижения яркости каждого разряда. Обе камеры зафиксировали такую четочную структуру.

Обсуждение и фотографии других четочных молний, зафиксированных в ходе экспериментов по стимулированию молний, имеются в работах [657, 658]. Разряды молнии вызывались путем запуска маленьких ракет, тянувших за собой заземленную проволоку. Таким образом создавался проводник между наэлектризованным облаком и землей. Возникал разряд, который испарял проволоку и вызывал последующие удары молнии. В этих разрядах ток порядка тысяч ампер продолжался в течение нескольких десятых долей секунды. Наивысшая зафиксированная скорость разряда составляет примерно 10^4 м/с. Фотографии получались как с помощью 35-мм кинокамеры (48–150 кадров в секунду), так и с помощью однокадровой фотокамеры, в режиме ожидания.

Иногда оказывалось, что канал стимулированной молнии существовал в течение довольно длительного времени после основного разряда. Образующаяся четочная структура сохранялась в течение примерно 0,3 с. Отдельные «бусины» имели диаметр около 40 см. Один из примеров такой четочной структуры показан на рис. 2.11. Другие фотографии каналов стимулированных молний приведены на рис. 7.2 и 7.3 [886] и обсуждаются в гл. 7.

Изредка фотографии молнии получались в ходе изучения других явлений. Так, фотографии, приведенные на рис. 2.12 и 2.13, сделаны ав-



Рис. 2.11. Кинокадр устойчивого свечения, оставшегося после стимулированного разряда молнии [886]. Четочноподобная структура сохранялась в течение примерно 0,3 с.

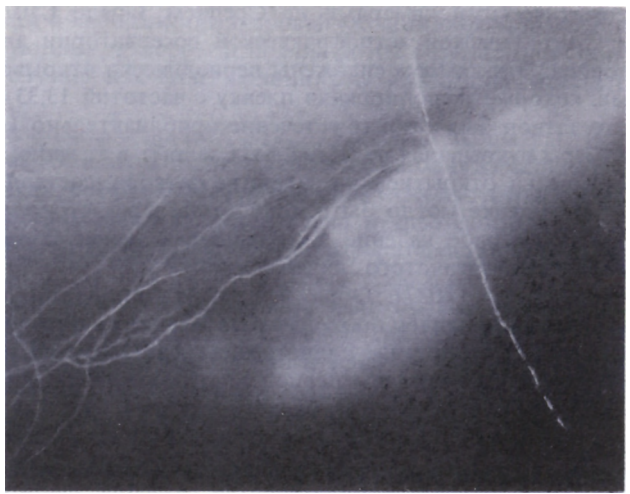


Рис. 2.12. Фотография, сделанная на Среднем Западе США одной из автоматических камер Смитсоновской астрофизической обсерватории [1194]. Камера имела периодически работающий затвор, который открывал объектив на 25 мс, закрывал его на 38 мс и проводил открытие или закрытие объектива за 6 мс. Устойчивые или движущиеся светящиеся объекты фиксировались в виде серии прерывистых линий. Возможной причиной изображения молнии является четочная молния.

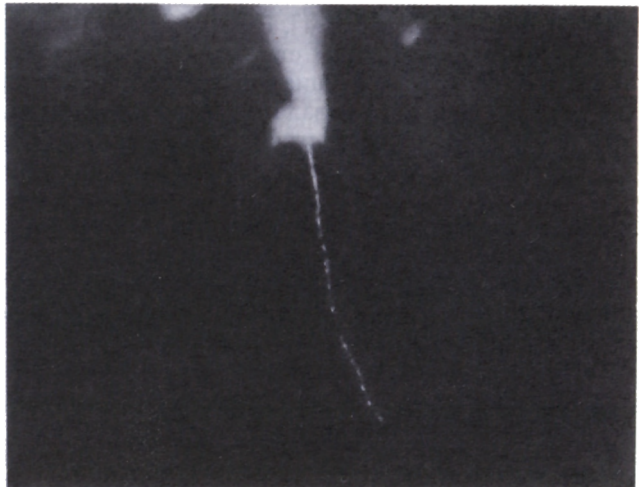


Рис. 2.13. Фотография, сделанная на Среднем Западе США одной из автоматических камер Смитсоновской астрофизической обсерватории [1787]. Камера была снабжена периодически действующим затвором, который открывал объектив на 25 мс, закрывал его на 38 мс и проводил открытие или закрытие объектива за 6 мс. Движущийся светящийся объект зарегистрирован в виде последовательности пунктирных линий. Возможной причиной такого изображения могла быть четочная молния, которая обычно возникает на нижнем конце канала молнии. Шаровая молния возникает, как правило, не на конце этого канала, а в стороне от него (см. рис. 5.16).

томатическими камерами на Среднем Западе США, установленными в Смитсоновской астрофизической обсерватории для регистрации метеоров. Эти камеры снабжены периодически открывающимися затворами, которые экспонировали пленку с частотой 13,33 Гц таким образом, что затвор был открыт в течение приблизительно 1/3 цикла. Объектив камеры открывался на 25 мс, был закрыт в течение 38 мс, а время, требуемое на открытие или закрытие затвора, составляло 6 мс.

На пленке могло быть полностью зарегистрировано любое движущееся световое явление длительностью менее 25 мс. Типичное время прохода ступенчатого лидера молнии от тучи до земли составляет около 20 мс [1027]. Обратный разряд продолжается менее миллисекунды. Пилот-лидер проходит расстояние от тучи до земли всего за несколько миллисекунд. Единственная фаза разряда молнии, требующая большего времени, чем период длительности работы затвора, — это ступенчатый лидер. Поэтому можно ожидать, что обычные молнии будут фиксироваться на пленке без прерывания или всего с одним прерыванием.

Развивающееся в пространстве свечение, существующее в течение многих периодов прерывания экспозиции, будет выглядеть на снимке как серия прерывистых пятен. Следовательно, прерывистые следы можно интерпретировать как четочную или шаровую молнию. Кроме того, движущийся источник света (шаровая молния) должен оставлять след, чем-то отличающийся от долго существующего канала молнии (четочной молнии).

Условия, в которых был получен представленный на рис. 2.12 снимок, описаны в работе [1194]. Разряды молний фиксировались одновременно четырьмя камерами станции. Прерывистый след интерпретировался как четочная молния, поскольку его объяснение как следа шаровой молнии потребовало бы, чтобы последняя двигалась со скоростью до 20 м/с и чтобы существовало много других «шаров». Поэтому изображение было идентифицировано как свечение четочной молнии, образовавшейся после пробоя между тучей и землей. Заметное движение соответствует сносу светящихся областей штормовым ветром со скоростью около 20 м/с. Молния имела длину около 1 км, и четочная структура существовала от 75 до 300 мс. Согласно оценке, в поперечнике размер «бусин» составлял от 50 см до нескольких метров.

В работах [1787, 1788] проанализированы около 12 000 фотографий из архивов станций метеорного патруля. Было отождествлено более 120 000 изображений вспышек молний. Двадцать два фотоизображения были интерпретированы как изображения четочных молний. Одно из них приведено на рис. 2.13.

В работе [1787] отмечалось, что изображение четочной молнии непосредственно примыкает к вершине траектории ствола обычной молнии. В то же время шаровая молния возникает, по-видимому, в стороне от канала молнии (см. рис. 5.16, также приведенный в работе [1787] и идентифицированный как изображение шаровой молнии). Различие между изображениями четочной и шаровой молний состоит также

в том, что интервалы в изображении шаровой молнии определяются периодически действующим затвором и подчиняются определенной закономерности, а в случае четочной молнии эти интервалы меняются нерегулярно.

Явления, зафиксированные на рис. 2.12, 2.13, весьма необычны: за 20 лет наблюдений (500 000 ч экспозиции в пересчете на одну камеру) отмечено только 22 таких события. Интерпретация этих фотографий как изображений четочной молнии затруднительна и требует специальных предположений относительно сложного характера движения головки и ступенчатого лидера молнии. Д-р Томпкинс указал на то, что хотя эти изображения выглядят так, как должны были бы выглядеть четочная и шаровая молнии, их интерпретацию нельзя считать вполне надежной из-за вариаций плотности следов траекторий.

Разряд, похожий на четочную молнию, наблюдался также в экспериментах с высоковольтными разрядами при съемке светящегося канала кинокамерой. Один из таких снимков был получен Р. Голкой и Дж. Шнайдером и приведен на рис. 2.14. Это один из серии из 5 кадров, снятых 16-мм кинокамерой со скоростью 30 кадров в секунду. Очевидно, это явление существовало всего 0,16 с.

Разряд создавался системой индукционных катушек, аналогичных использованным Н. Теслой в 1899–1900 гг., но с применением современных материалов и схемы возбуждения. Индукционные катушки давали напряжение $2,5 \cdot 10^7$ В при энергии около 12 Дж в импульсе (более подробное обсуждение экспериментов Тесла см. в гл. 7).

Недавно была проведена серия экспериментов в воздухе для определения возможного влияния высоковольтных разрядов на авиационное оборудование. Совершенно непредвиденным оказалось появление в этих экспериментах разрядов со структурой типа четочной молнии. Аналогичные виды разрядов неожиданно появлялись и фиксировались на фотографиях и в ходе других экспериментов. Явление, зафиксированное на рис. 2.14, не было замечено экспериментаторами, а было обнаружено на киноплёнке лишь после окончания экспериментов.

Оно было интерпретировано как остаток канала нормального высоковольтного разряда, образующегося в ходе эксперимента. Тесла указывал, что в его высоковольтных экспериментах 1899–1900 гг. иногда появлялись и другие формы разряда, похожие, в частности, на шаровую молнию [1733]. Он связал эти явления с преимущественным разогревом канала разряда другим разрядом, следующим за первоначальным, который создает в этом канале частичную ионизацию. Простое рассмотрение (гл. 7) показывает, что размеры образующейся при этом шаровой молнии могут быть близки к наблюдаемым. Результаты экспериментов Тесла обсуждались также в работе [351].

Приведенные в настоящей главе фотографии четочной молнии подвергались изучению и критическому анализу автором и другими исследователями. Большинство фотографий были признаны фотографиями известных явлений. Наш вывод состоит в том, что большая часть фотографий, считавшихся фотографиями четочной молнии, являются по



Рис. 2.14. Фотография похожего на четочную молнию канала разряда, инициированного индукционной катушкой с напряжением $2 \cdot 10^7$ В и энергией около 12 Дж в импульсе. Приведенный снимок — один из пяти кадров, сделанных 16-мм кинокамерой со скоростью 30 кадров в секунду. Структура типа четочной молнии явно представляла собой остаток канала высоковольтного разряда и существовала всего около 0,16 с. Фотография сделана Р. Голкой и опубликована впервые.

меньшей мере сомнительными и потому должны быть отклонены. Значительное число снимков было отнесено к разряду явно ошибочных. Критическое обсуждение фотографий проводится в гл. 6.

Основной фактор, затрудняющий оценку подобных снимков,— это способ регистрации явлений. Фотографии, полученные с помощью однокадровых камер, легко могут быть неправильно истолкованы ввиду малого количества информации, содержащейся в одном кадре. Более предпочтительный способ регистрации четочной молнии — использование скоростной киносъемки с одновременными визуальными наблюдениями. Серьезное исследование таких явлений должно проводиться несколькими камерами под разными углами (если постоянное присутствие наблюдателей невозможно, то необходимо автоматическое управление работой камер). Примером такой системы является метеорный патруль.

2.3. Образование четочной молнии

Считается, что четочная молния возникает на месте канала молнии, испытывающего периодические продольные колебания интенсивности вследствие возмущения. Такой канал затухает и превращается в серию почти равномерно распределенных областей с устойчивым свечением. Эта схема рассматривалась Тёплером [1773], который предположил, что отдельные части четочной молнии образуются в особых точках канала молнии. Он считал, что развитие четочной молнии происходит в последовательности, иллюстрируемой рис. 2.15.

Вероятный пример подобной последовательности показан на фотографии, сделанной в 1930 г. во время грозы. Эта фотография воспроизведена в [1793], где кратко обсуждаются метеорологические условия, сопутствовавшие событию. Условия съемки (в частности, время экспозиции) неизвестны. Разыскать негатив не удалось. Фотография приведена на рис. 2.16. Произошло шесть последовательных ударов молнии, разделенных в пространстве и во времени. Шестой разряд развился в четочную форму. Обработка, проведенная путем увеличения той части фотографии, где имеется пунктирный след, показала, что все яркие отрезки имеют примерно одинаковую величину и форму и разделены поч-

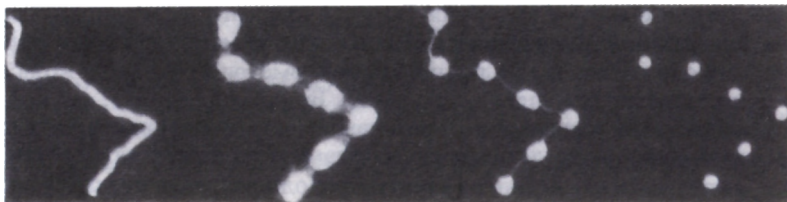


Рис. 2.15. Рисунок Тёплера, иллюстрирующий образование четочной молнии из затухающего канала аномальной молнии под действием продольного растяжения [1773].

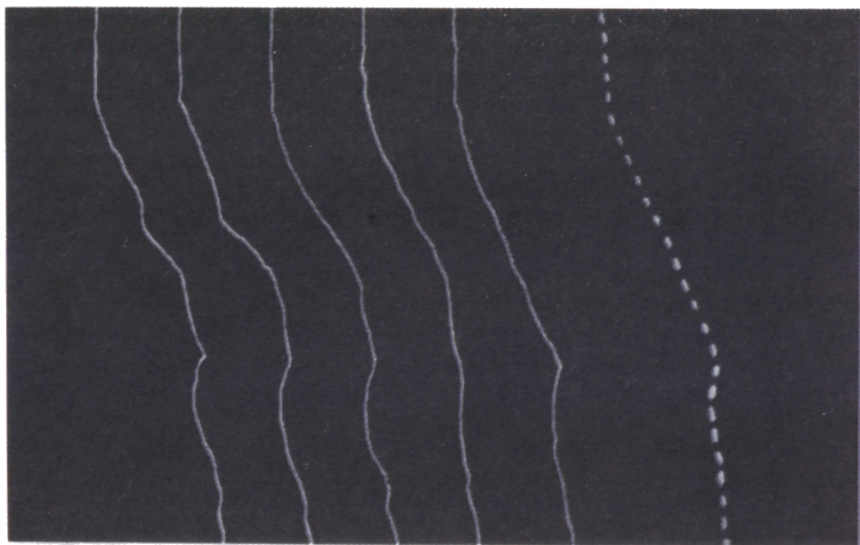


Рис. 2.16. Фотография четочной молнии, явно образовавшейся из линейной молнии. Зафиксировано шесть последовательных разрядов, только последний из которых принял четочную форму [1793].

ти одинаковыми темными промежутками [1793] (там же приведена увеличенная фотография).

Автор [1793] отмечает, что зарегистрированная картина не полностью согласуется с теорией, согласно которой четочная молния – это субъективное восприятие обычной молнии с извилистым (и потому видимым лишь частично) каналом. Светящиеся отрезки и темные промежутки пунктирной траектории расположены довольно регулярно, что заставляет вспомнить о характеристиках, приписываемых обычно четочной молнии. Однако приведенную на рис. 2.16 фотографию нельзя считать абсолютно достоверной ввиду отсутствия негатива и недостатка информации об условиях наблюдения.

В результате лабораторных исследований электрических разрядов было открыто необычное явление, названное пинч-эффектом. Токовый канал не может стабилизироваться в продольном направлении за счет собственного магнитного поля. Возмущения магнитного поля, оси канала или плотности пространственного заряда могут привести к разрывам токового канала. Цилиндрическая геометрия канала может со временем изменяться вдоль его оси. В работах [1825, 1831, 1830] образование и устойчивость четочной и шаровой молнии связывается с пинч-эффектом.

Эксперименты по пинч-эффекту проводились при низких давлениях (от 10^{-3} до 1 мм рт. ст.) и сопровождалась диссипацией энергии 10^3 Дж при напряжении 10^4 В. Условия эксперимента ограничивались невозможностью инициации при атмосферном давлении сильноточных раз-

рядов, напоминающих молнию. Появление плазменных «шнуров» происходит при больших токах (порядка 10^4 А), необходимых для проявления эффектов магнитного давления.

Удержание токового канала собственным магнитным полем рассматривалось в работах [1665, 1715]. Поле тока обычно описывается в цилиндрических координатах. Плазма, удерживаемая азимутальной компонентой собственного поля B_θ , называется плазмой с самоудержанием, а при удержании ее компонентой B_z внешнего поля – плазмой с внешним удержанием. Разряд первого типа называют иногда продольным пинчем, поскольку ток в нем течет в продольном направлении, а разряд второго типа – азимутальным или тета-пинчем. Мы рассмотрим лишь токовый разряд с самоудержанием, или продольный пинч.

Самопинчевание является результатом взаимодействия электронов с магнитным полем, создаваемым током. Силовые линии магнитного поля линейного тока представляют собой концентрические окружности в плоскости, перпендикулярной току. Сила, действующая на электроны, определяется выражением

$$\vec{F} = -e(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) - m\vec{v}\dot{\vec{u}}, \quad (2.1)$$

в котором \vec{u} – скорость электрона, m , e – его масса и заряд, v – частота столкновений электронов с частицами среды, E и B – напряженности электрического и магнитного полей.

Сила $\vec{u} \times \vec{B}$ направлена внутрь (в направлении $-\vec{r}$) и приводит к движению электронов внутрь, т.е. к пинч-эффекту. Формально выражение для описания этого явления может быть выведено путем использования уравнений Максвелла и определения тока $\vec{j} = Ne\vec{u}$ (N – концентрация электронов). Полученное выражение подтверждает наличие направленной внутрь (по направлению $-\vec{r}$) силы, но не дает ее временных и пространственных зависимостей.

В работе [1825] отмечается, что в лабораторных экспериментах по пинч-эффекту сжатие и колебание цилиндрического токового канала не зависят от выбора сечения вдоль его оси. При разряде молнии в атмосфере это может быть и не так. Из-за периодических изменений с высотой различных электрических характеристик атмосферы (таких, как пространственный заряд и электрические поля) могут возникнуть различные условия для пинчевания в разных точках оси разряда. При определенных условиях радиус канала молнии можно описать функцией вида

$$R(z, t) = Af(t) [1 + k \sin(2\pi z/\lambda)], \quad (2.2)$$

где z – координата вдоль вертикальной оси (от земли к облаку), значение параметра λ определяется временем пинчевания и свойствами токового канала [1825].

Приводились аргументы в пользу того, что пинч-эффект должен был бы сначала происходить вблизи земли, где сильный ток начинает течь раньше. Затем пинч распространяется вверх по мере роста тока от зем-

ли к облаку. Длина волны возникающего возмущения определяется временем пинчевания и скоростью распространения. Если время пинчевания порядка микросекунд, а скорость порядка скорости света, то длина волны будет порядка 10 м.

В общем случае любые поперечные волны, распространяющиеся вверх и/или вниз вдоль токового канала, будут иметь случайные фазы и не создавать интерференционных эффектов. Однако можно представить себе, что при определенных условиях могут возникать стоячие волны. Они в свою очередь могут привести к модуляции размеров плазменного столба. Последняя могла бы изменять радиус столба и сама менялась бы во времени и в азимутальном направлении. Такая модуляция могла бы вызываться малым возмущением в некоторой точке.

В работе [866] приводятся данные, свидетельствующие о реальном существовании периодических колебаний в канале молнии. В этой работе изучались тепловые эффекты, связанные с разрядом молнии на заземленный электрод. Было установлено, что ток нагревал поверхность электрода до температуры его плавления. Под действием электромагнитных сил в области контакта столба разряда с электродом кривизна поверхности последнего изменялась. При этом расплавленная поверхность электрода приобретала рисунок, соответствующий близко расположенным концентрическим кольцам.

Картина концентрических колец была выявлена при помощи микроскопа с большим увеличением. Интервал между соседними кольцами в различных картинах такого рода был примерно одинаков и составлял $4 \cdot 10^{-4}$ см. Было высказано предположение, что эти концентрические кольца возникают из-за «ряби» на расплавленной поверхности металлического электрода, вызываемой внутренними акустическими колебаниями столба разряда. По оценкам, частота этих колебаний порядка 10^6 Гц [866].

Следует подчеркнуть, что хотя вдоль радиуса поверхности, разделяющей столб разряда и электрод, такие колебания происходят, их аксиальное распространение зафиксировать нельзя. Сами по себе эти колебания не могут привести к пинчеванию, и упоминание о них служит лишь свидетельством в пользу того, что в канале молнии колебания могут существовать и действительно существуют и что сделанные в работе [1825] предположения могут оправдываться.

С учетом более поздних данных в [866] (в соответствии с работой [1825]) сделан вывод, что ток обычной молнии, по-видимому, не настолько велик, чтобы вызвать пинч-эффект. Однако если бы плотность тока была достаточно высока, то условия пинчевания могли бы удовлетвориться и возникла бы четочная молния.

В настоящее время причина возникновения четочной молнии все еще является предметом различных спекуляций.

Шаровая молния

3.1. Общие характеристики

Распространено мнение, что шаровая молния, как и четочная,—это наблюдаемое во время грозы проявление атмосферного электричества. По свидетельству очевидцев, шаровая молния—одиночное замкнутое шаровидное образование, обладающее большой светимостью и подвижностью и, по-видимому, не чувствительное ни к какой внешней силе. Шаровая молния имеет много других названий: глобулярная молния, огненный шар, молниевый шар и др.

Заключения многочисленных исследователей о свойствах и характеристиках шаровой молнии основаны на обзорах и квазистатистических анализах собранных сообщений, среди которых следует отметить работы [260, 300, 340, 341, 413, 414, 506, 577, 919, 932, 1144–1147, 1201, 1476, 1564].

Упоминания о шаровой молнии можно встретить в многочисленных печатных изданиях и рукописях столетней и даже тысячелетней давности. Так, например, в работе [1461] проведен общий обзор известных из истории случаев наблюдения шаровой молнии от VI в. н. э. до комментариев выдающихся ученых XVIII, XIX и XX вв. В работах [407, 408, 667] обсуждаются детали наблюдений VI в., описанных св. Григорием из Тура. Фламарион [667] приводит также репродукцию находящейся в Лувре картины «Проповедь св. Мартина», на которой изображен огненный шар (*globular igneus*), появившийся во время религиозной церемонии. В работе [7] упоминаются любопытные наблюдения молнии (являющейся, возможно, шаровой молнией), описанные в Англосаксонской хронике 793 г. н. э. Обсуждались также [1821] наблюдения молний и огней св. Эльма, описанные в рукописи Плиния Младшего (77 г. н. э.).

Фламарион [667] описал и обсудил более 20 наблюдений шаровой молнии, самое первое из которых датировано 1557 г. В работе [413] приведено несколько дословных описаний очевидцев из общего числа 215 наблюдений шаровой и четочной молний. Большинство из них относится к XIX и XX вв., хотя обсуждается и одно наблюдение, относящееся к 1744 г. В работе [1564] также рассмотрено несколько сотен подобных наблюдений начиная с 1742 г. вплоть до конца XIX в. У Араго [300] имеется более 30 кратких ссылок на такие наблюдения, проведенные с 1718 г. до середины XIX в.

Еще до 1850 г. в литературе было описано множество сообщений очевидцев [23, 24, 28, 304, 397, 417, 497, 511, 529, 566, 574, 616, 643, 644, 771, 815, 825, 826, 833, 889, 986, 1076, 1138, 1303, 1310, 1333, 1335, 1339, 1368, 1869, 1891, 1895, 1918]. Другие ссылки на подобные наблюдения, проведенные несколько сотен лет назад, содержатся в работах, с которыми автор не смог ознакомиться, но которые также перечислены в библиографическом списке (см. гл. 8).

Свойства шаровой молнии таковы, что позволяют отличить ее от других природных электрических явлений, происходящих в атмосфере. Именно эти ее особые свойства и поведение вызывают столь эмоциональные и горячие дискуссии. В настоящей главе обсуждаются те свойства шаровой молнии, которые относятся к ее общему физическому описанию. Те же свойства шаровой молнии, которые можно использовать для выводов о ее происхождении, обсуждаются отдельно в следующей главе.

Общие характеристики шаровой молнии можно классифицировать по ее различным наблюдаемым, регистрируемым и описываемым физическим свойствам. Они таковы:

форма	звук	распад
размер	запах	связь с молнией
цвет	повреждения	тяга к замкнутому пространству
структура	нагрев	высота
движение	время жизни	

В различных обзорах многочисленных сообщений о наблюдениях шаровой молнии отмечается, что среди описанных свойств наряду с общими есть и не совпадающие друг с другом. Такие различия и противоречия связаны с ошибочной трактовкой других явлений (например, огней св. Эльма) как шаровых молний. Огонь св. Эльма – это визуально наблюдаемый коронный разряд с неподвижного заземленного предмета при наличии в атмосфере электрического поля, причем не обладающий шаровой формой. Из нашего обсуждения такие ошибочные сообщения исключены.

3.2. Наблюдаемые свойства

Форма и размер. Имеются сообщения о шаровых молниях сферической, овальной, каплевидной и даже стержневидной формы. Размеры сферической и овальной шаровой молнии варьируют от нескольких сантиметров до нескольких метров в диаметре. Чаще всего сообщалось о молнии диаметром 10–40 см. В сообщениях о каплевидной молнии фигурируют меньшие размеры (как правило, менее 20 см). О стержневидной молнии сообщалось редко. Отношение ее длины к диаметру обычно не превышает 2, а величина диаметра составляет около 15 см. Большинство наблюдателей оценивали размеры путем сравнения шаро-

вой молнии с каким-либо знакомым предметом. Чаще всего сообщалось о молнии сферической или овальной формы диаметром меньше примерно 40 см.

Размеры шаровой молнии важны для расчета плотности энергии в ней и отбора гипотез о механизме ее образования. Из-за того что перечник источника света обычно кажется меньше, чем его действительный размер, в вопросе об истинной величине диаметра шаровой молнии существует путаница. Влияние особенностей восприятия на наблюдателя и его сообщения обсуждаются в гл. 6 (§ 6.3). Если бы удалось установить, что типичный диаметр молнии (15–40 см) завышен, то полученные путем расчета или рассуждений свойства молнии, зависящие от ее диаметра (такие, как плотность энергии), соответствующим образом уменьшились бы (см. гл. 4, § 4.1, 4.2).

Цвет. В большинстве сообщений о шаровой молнии указывается, что наблюдавшийся объект имел красный, желто-красный или желтый цвет. Изредка сообщалось и о других цветах (включая белый, зеленый и пурпурный). Голубой и бело-голубой цвета характерны для сообщений об огнях св. Эльма. Между цветом и формой нет явной корреляции – согласно имеющимся сообщениям, каждая форма наблюдалась в различных цветах. Однако пурпурный или фиолетовый цвет наиболее часто связан со стержневидной формой молнии.

Немногие наблюдатели сообщали об изменении цвета со временем. Отмеченные изменения бывают трех видов: переход от красного цвета к белому, от фиолетового – к красному и от желтого – к белому. Эти сообщения согласуются в том, что конечный цвет бывает ослепительным или ярко-белым и что после перемены цвета шаровая молния с шумом исчезает. Об изменениях цвета сообщалось, например, в работах [933, 1144–1147, 1493].

Определенный цвет шаровой молнии может свидетельствовать о наличии малых количеств посторонних веществ в газовой среде. Ряд экспериментальных результатов показывает, что цвет связан с примесями, которые имеются в момент возникновения шаровой молнии или появляются со временем. В работах [343, 345] сообщалось о желтом и желто-красном цвете, связанном со сферическим углеводородным пламенем низкой плотности, а в работах [1443, 1444] – о белом и желто-белом цвете в атмосферном воздухе, возбуждаемом высокочастотным разрядом. Эти цвета были объяснены в основном излучением молекул CO_2 , а другие цвета (например, желтый) появлялись по мере увеличения концентрации NO_2 . В работах [1629, 1632] обсуждается образование зеленых шаровидных сгустков, возникающих в сильноточных разрядах постоянного тока. Зеленый цвет связывался с испарением меди из электродов. Детали этих и других экспериментов см. в гл. 7.

Структура. В общем имеются всего три типичные структуры. Первая выглядит как твердое тело с тусклой или блестящей поверхностью или как твердое ядро с полупрозрачной оболочкой, вторая – как вращающееся тело с кажущимся внутренним движением и напряжениями и третья – как сгусток пламени. Все эти три структуры наблюдались

в любой из форм, но с разной частотой. Шаровая молния в виде сгустка пламени чаще всего имела сферическую или овальную форму, красный или желто-красный цвет и диаметр менее 40 см. Шаровая молния с «жесткой» структурой обычно имела зеленый или фиолетовый цвет и диаметр от 30 до 50 см, а в случае «вращающегося тела» была характерна комбинация цветов – чаще всего яркоокрашенная внутренняя часть с бледноокрашенными «полюсами» или полупрозрачной оболочкой.

Движение. Наиболее характерное свойство шаровой молнии – движение. Если классифицировать движения по траекториям, то они бывают следующих типов: а) от тучи к туче; б) от земли (или приповерхностной области) к туче; в) от тучи к земле (или к приповерхностной области); г) горизонтальная траектория над поверхностью земли; д) спиральное или хаотическое движение над землей. Неподвижное состояние часто возникает после первоначального хаотического или горизонтального движения, хотя может наблюдаться и перед этим. Первые два из перечисленных видов движения встречались реже всего – из 1600 сообщений лишь в нескольких говорилось именно о таком движении шаровой молнии. Два случая восходящего движения описаны в работах [1032, 1809].

Между цветом и характером движения шаровой молнии не существует четкой связи. Однако для горизонтальных траекторий характерна структура типа «сгустка пламени» желтого или красного цвета сферической формы с диаметром менее 40 см. Шаровая молния с хаотической траекторией имеет обычно желтый, красный или белый цвет, «жесткую» структуру и овальную или сферическую форму с диаметром менее 30 см.

Неподвижная шаровая молния кажется парящей в воздухе и нечувствительной к внешним силам. Она имеет обычно красный или желто-белый цвет и сферическую или овальную форму с диаметром около 30 см. Часто наблюдалось ее внезапное притяжение к заземленному предмету. Она быстро приближается к такому предмету и с шумом исчезает при соприкосновении с ним.

В ряде обзоров отмечается, что шаровая молния может двигаться против ветра, однако никаких ссылок на сообщения, подтверждающие это, не приводится. В обзоре [341] имеется лишь три ссылки, относящиеся к этому свойству шаровой молнии. В работе [430] сообщается о шаровой молнии, находившейся в неподвижном состоянии при наличии ветра, а в работе [433] – о наблюдении в 1665 г. молнии, медленнодвигающейся против легкого ветра. Об аналогичном явлении сообщалось также в работе [79]. Имеющиеся данные показывают, что в тех сообщениях, в которых речь идет о движении шаровой молнии при наличии ветра, она чаще всего движется по ветру, а не против него.

Звук. Авторы многих обзоров отмечают, что присутствие шаровой молнии часто сопровождается шипящим звуком. Известно лишь несколько оригинальных сообщений (см., например, [583, 584]), в которых детально описывались звуковые ощущения при наблюдении близкой

шаровой молнии. В то же время шипящий звук вполне определенно связывается с таким явлением, как огни св. Эльма, которое иногда неправильно интерпретируют как шаровую молнию. Отсюда можно сделать вывод, что шаровая молния – это, как правило, бесшумное явление.

Запах. Многие очевидцы сообщают о характерном запахе, сопровождающем появление шаровой молнии. Этот запах описывается как резкий и неприятный, напоминающий запах озона, горящей серы или окислов азота. Насколько можно судить, запах отмечался в тех случаях, когда расстояние до шаровой молнии было небольшим. Упомянутые особенности запаха были использованы в качестве основы для построения модели шаровой молнии [1746]. Сейчас использование такой характеристики для обоснования модели шаровой молнии представляется чересчур смелым. Для этого надо было бы предположить, что неопытный наблюдатель в состоянии идентифицировать и различать запахи озона, горящей серы, окислов азота и другие схожие запахи. Установлено (см., например, [1494]), что запахи такого типа характерны для продуктов, появляющихся в результате ионизации молекул атмосферы разрядом молнии.

Повреждения и нагрев. Поскольку шаровая молния – это явление, связанное с атмосферным электричеством, можно ожидать излучения тепла. Действительно, небольшое число наблюдателей сообщало о том, что при этом явлении ощущался поток тепла. В работе [1677] обсуждается случай, когда шаровая молния коснулась наблюдателя, обожгла ему руку и повредила одежду. Другой наблюдатель получил ожог, когда шаровая молния коснулась его ноги [1329]. Сообщалось о человеке, получившем ожоги и потерявшем сознание [135, 144]. В работе [319] также сообщается о тепловом излучении, ощущавшемся наблюдателем. Обсуждались случаи с мальчиком, получившим ранение [1232, 1233], и мужчиной, получившим ожог плеча [1869]. Другие сообщения о ранениях, причиненных шаровой молнией, описаны в работах [861, 901, 1074, 1199, 1333, 1551, 1552].

В ряде случаев обсуждалась возможность сильных телесных повреждений, связанных с шаровой молнией. Сообщалось даже о смерти, вызванной шаровой молнией. Широко известным примером опасности, связанной с шаровой молнией, стала смерть профессора Рихмана в Петербурге в 1752 г. Эта трагедия обсуждалась во многих работах (см., например, [659, 660, 665, 1209, 1444, 1597–1604, 1895], а также гл. 7, § 7.2).

Рихман, известный в свое время ученый, проводил во время грозы эксперименты с помощью устройства, «притягивающего» молнию в лабораторию. Сообщалось, что после разряда молнии через прибор в лаборатории появилась шаровая молния, которая, двигаясь по воздуху, коснулась головы Рихмана, что и привело к его смерти. Это событие было запечатлено на рисунке, воспроизводимом в работах [659, 660, 1443, 1444]. В работе [66] сообщалось о человеке, убитом шаровой молнией, а в работах [595, 1232, 1539, 135] – об убитых шаровой молнией животных.

Сообщалось также о разрушениях, вызванных контактом с шаровой

молний, например о повреждении дерева после отскока шаровой молнии от проводов [486], расщеплении сваи, приведшем к сильному повреждению причала [534], о повреждении самолетов при столкновении с шаровой молнией [1345, 1932]. В работе [1086] сообщалось об ударе шаровой молнии о землю около пруда, в результате чего образовалась яма от 5 до 15 см в диаметре и глубиной 1,2 м.

В отличие от перечисленных сообщений, свидетельствующих о серьезных разрушениях, в других сообщениях указывалось, что шаровая молния не излучает тепла и не причиняет вреда предметам. В работе [1122] отмечалось, что близкий наблюдатель не почувствовал тепла от шаровой молнии, разрушившей крышу, а в описании наблюдавшейся в 1665 г. шаровой молнии указывалось, что при этом не ощущалось никакого тепла, а после ее соприкосновения с домом не было обнаружено никаких повреждений [433]. В работе [681] сообщалось, что шаровая молния столкнулась со столбом, не вызвав никаких разрушений.

Создается впечатление, что различные сообщения противоречат друг другу. Причина этих противоречий не ясна, хотя некоторые исследователи считают, что существует несколько видов шаровой молнии. Поскольку многие сообщения указывают на повреждения или ранения, причиненные шаровой молнией, разумно избегать встреч с нею.

Время жизни. Согласно имеющимся сообщениям, шаровая молния «живет» чаще всего 1–2 с. Такое или меньшее время жизни отмечалось в 80% изученных сообщений. В 40% этих случаев время жизни оценивалось самим наблюдателем. Например, один из них видел, как шаровая молния проникла через окно в комнату, медленно пересекала ее по направлению к противоположной стене и исчезла со взрывом. Наблюдатель оценил скорость шаровой молнии как нормальную скорость пешехода. Исходя из пройденного ею расстояния около 7 м и ее скорости 2 м/с (скорость обычной ходьбы), получаем время жизни в несколько секунд. Незначительная доля сообщений указывает на более длительные времена жизни, достигающие целых минут. Эти большие продолжительности чаще всего относятся к неподвижному голубому или бело-голубому шару, который идентифицируется с огнем св. Эльма.

Распад. Наблюдалось два типа распадов шаровой молнии. Один из них – тихий распад, сопровождающийся уменьшением яркости и диаметра молнии. Второй, называемый взрывом, связан с громким и сильным звуком. Некоторые наблюдатели сообщают о том, что перед взрывным распадом происходит внезапное изменение цвета. Другие, наблюдавшие взрыв шаровой молнии, отмечают, что даже в тех случаях, когда взрывной распад происходит вблизи легко разрушающихся предметов, никаких повреждений не замечалось. Это говорит о том, что такой распад является скорее схлопыванием, а не настоящим взрывом.

Небольшое число наблюдателей отмечает наличие после взрыва некоторого остаточного явления в виде дыма или тумана [1933], дегтя или копоты (появляющихся в месте соприкосновения шаровой молнии с предметом или на траектории ее движения) [74, 558, 1002, 1900]. Срав-

нительная редкость сообщений об остаточных явлениях связана, видимо, с недостаточно внимательным изучением места события.

Связь с молнией. Появление шаровой молнии связывается, как правило, с обычными разрядами молний во время гроз, торнадо (смерчей), землетрясений и других необычных явлений природы. Эти наблюдения служат основой гипотезы, согласно которой шаровая молния связана с разрядом обычной молнии и представляет собой некоторое электрическое явление. Такая связь подтверждается сообщениями, в которых описывается появление шаровой молнии одновременно с произошедшим поблизости разрядом обычной молнии, сразу после него или непосредственно перед ним. Около 90% сообщений связано с наблюдением шаровой молнии во время грозы. Этот процент совпадений подтверждается и данными других обзоров [300, 919, 413, 1564].

Сообщалось также о появлении шаровой молнии во многих других необычных условиях, например на море в штормовую погоду, но без обычной молнии [497, 1123, 1124, 1126, 1252, 1699]; кроме того, свечение и шаровые молнии отмечались во время землетрясений и снежных бурь. Появление шаровой молнии во время снежного бурана описано, например, в работе [1969]. Наблюдалось возникновение красной сферы диаметром 4 см на высоте около 4 м над землей. Наличие электрической активности явствовало из того, что было слышно слабое потрескивание от разрядов между наэлектризованными снежинками.

Электрическая активность во время снегопада уже изучалась ранее. Так, в работе [840] было установлено, что объемный заряд в увлекаемом ветром снеге мог достигать $5 \cdot 10^{-10}$ Кл/м³, или 10^{-15} Кл на снежинку. Это в 100–1000 раз больше, чем в падающем или шквальном снеге. Поскольку заряд электрона равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, то заряд одной снежинки падающего снега соответствует заряду 10–100 электронов.

Электрические явления во время естественных и искусственных снежных и песчаных бурь изучались в работе [1046]. Электризация снежинок или песчинок происходит из-за асимметричного трения друг об друга. Перенос заряда связан с преимущественным переносом ионов одного знака из менее холодной области в более холодную. В случае снега концентрация ионов H^+ и OH^- во льду сильно зависит от температуры, возрастая при ее увеличении. Практически при любой температуре подвижность ионов H^+ выше, чем подвижность ионов OH^- . Более быстрая диффузия ионов H^+ приводит к появлению градиента заряда, соответствующему градиенту температуры в области снежной бури.

Изучение ионизации дыма и газа, извергаемых вулканами, показывает, что внутри вулканического облака существуют сильные электрические поля, чем-то похожие на те, которые обнаружены во время бурь [16]. Установлено, что сильные электрические поля возникают из-за трения пылевых частиц друг от друга [687]. Сообщалось о наличии сильных электрических полей и больших концентрациях ионов в рудничном газе [699]. Таким образом, для всех природных возмущений, при которых может появиться шаровая молния, по-видимому, характерно присутствие сильного электрического поля. Следовательно, можно

думать, что образование шаровой молнии гораздо сильнее зависит от наличия в воздухе заряженных частиц и электрических полей, чем ряд обычной молнии. Это не противоречит сообщениям, согласно которым образование шаровой молнии происходило сразу же после разряда обычной молнии (см., например, [870]). Роль электрического поля важна в обоих случаях.

Изучение свидетельств о землетрясениях (вплоть до 860 г. н.э.) позволило установить, что среди возникающих при этом световых явлений многие представляют собой различные виды обычной молнии и такие явления свечения в атмосфере, как шаровая молния [1729, 1283]. Свойства шаровых молний, возникающих при землетрясении, в основном аналогичны свойствам шаровых молний, появляющихся во время гроз.

Имеется много сообщений о световых явлениях и наблюдениях шаровых молний во время ураганов. Такие события отмечались во время торнадо и шторма [314, 472, 556, 575, 647, 648, 665, 1610, 1810, 1864].

Шаровая молния и другие световые явления обсуждались в работах [401, 1863], в которых также имеются ссылки на более ранние сообщения о подобных явлениях во время торнадо. В работах [1863, 1865] рассмотрена физика электрической активности, сопровождающей торнадо, и высказано предположение о том, что гроза и электрическая активность могут привести к образованию торнадо. Позже в экспериментах с дугами с вихревой стабилизацией было установлено, что энергетический вклад электрической активности в общую энергию торнадо недостаточен для того, чтобы ее можно было считать существенным источником энергии [1892].

Имеются фотографии световых явлений, наблюдавшихся во время торнадо [1861, 1810]. Собраны данные о светящихся объектах различного вида: больших областях, занимающих часть неба, световых столбах и колоннах, а также объектах типа шаровой молнии. Эти фотографии и описания свидетельствуют, что подобные объекты могут возникать в отсутствие явной крупномасштабной грозовой электрической активности.

Многие исследователи предполагают наличие прямой связи между обычной молнией и образованием шаровой молнии. Средняя частота молний на Земле, определенная с помощью установленных на спутниках оптических детекторов, составляет примерно $10^{-6} \text{ км}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$ [1820]. Наиболее часты молнии на юго-востоке США, в районе Мексиканского залива, в Центральной Америке, Центральной Африке, юго-восточной Азии, Индии и Южном Китае. Эти данные интересны в том отношении, что, согласно публикациям, основанным на 1100 сообщениях о шаровой молнии (см. рис. 1.3), она чаще наблюдалась в Центральной и Западной Европе, а не в областях наибольшей грозовой активности. Можно думать, что это – результат стечения случайных обстоятельств в моменты наблюдений, таких, как наличие подходящего способа сообщить об увиденном или какие-то особенности образования

шаровой молнии. Но это может служить указанием на то, что для образования шаровой молнии обычная молния не нужна.

Притяжение к замкнутым пространствам. Около 10% наблюдателей сообщают о склонности шаровой молнии к замкнутым пространствам. Описан, например, случай внезапного появления шаровой молнии в комнате [873, 874]. Сообщалось о проникновении шаровой молнии в комнату через трубу или приоткрытые окно или дверь [1109, 1110, 1693]. Чаще всего скорость шаровой молнии после проникновения в комнату падает, и начинается ее медленное круговое движение. Некоторые наблюдатели сообщали о неподвижном («парящем») состоянии шаровой молнии в комнате, в то время как другие рассказывали о ее специфическом движении. Большинство наблюдений, описывающих поведение шаровой молнии в комнате, согласуются в том, что в замкнутом объеме она исчезает со взрывом, обычно не причиняя вреда ни самой комнате, ни обстановке в ней.

Появление шаровой молнии в комнате считается типичным для ее поведения. Однако такие случаи редко описывались непосредственными наблюдателями. Некоторые из этих сообщений были отобраны и ссылки на них приведены в табл. 3.1.

Высота наблюдений. Шаровая молния наблюдалась преимущественно на небольших высотах. Это, конечно, не означает, что шаровая молния не может существовать на большой высоте, а связано лишь с тем, что для того, чтобы ее заметить, нужны наблюдатели, а они в основном располагаются на небольших высотах. Около 99% сообщений о шаровой молнии относится к ее наблюдениям вблизи земли.

Следует отметить, что наблюдаемая высота шаровой молнии не обязательно свидетельствует, что она образовалась на этой высоте. Высказывались основанные на фотографиях (правда, не являющихся по общему мнению вполне надежными) предположения о том, что шаровая молния может создаваться разрядом молнии на высоте в несколько сотен метров над землей [354, 625]. В некоторых сообщениях говорится также о падении шаровой молнии из тучи.

Имеется много сообщений о наблюдении шаровой молнии на большой высоте из самолета. Описанные в этих сообщениях характеристики

Таблица 3.1

Основная литература о наблюдениях шаровой молнии в закрытых помещениях

[66]	Вебер [1916, 1917]	Мон [1235]
[156]	Вейнхауз и Питкерн [1869]	Нипполдт [1309]
[251]	Долбир [595]	Райан [1151, 1152]
[253]	Кабаллеро [463]	Рихтер [1500]
[274]	Кейзер [958]	Субраманьян [1693]
Адамсон [2]	Кокинг [527]	Тэт [1710]
Бей [355–357]	Мак-Миллан [1199]	Херрич [843]
Брю [420]	Маргс [1122]	Холмс [873, 874]
Бжак [443, 444]	Марш [1123]	Хон [869]

Основная литература о наблюдениях шаровой молнии в самолете или вблизи самолета

[286]	Дженнисон [934, 935]	Пчелко [1345]
Барата [337]	Когаг-Белецкий [1002]	Тейч [1725]
Голд [766]	Лиlienфилд [1072]	Фелшер [652]
Гудлет [770]	Ньюмен [1297]	Юман [1828]

не отличаются от характеристик шаровой молнии, отмеченных в сообщениях о ее наблюдении на уровне земли. Шаровая молния наблюдалась не только снаружи самолета, но и внутри его (см., например, [934, 935, 1828]). В работах [1002, 1345, 1939] описаны случаи ее контакта с самолетом и его возможного повреждения.

Поскольку подобные наблюдения особенно интересны своей необычностью, в табл. 3.2 приведены соответствующие ссылки. Они представляют особый интерес для тех, кто занимается рассмотрением гипотез об образовании и продолжительном существовании шаровой молнии. Основная проблема многочисленных теорий – это источник энергии шаровой молнии, а именно вопрос о том, является ли он внешним или внутренним. Поскольку было замечено, что при соприкосновении шаровой молнии с проводниками не происходит ее мгновенного исчезновения, предположение о внешнем источнике энергии было поставлено под сомнение. Тот факт, что шаровая молния наблюдалась внутри замкнутых металлических объемов, представляет собой более серьезную проблему, поскольку это не совместимо с предположением о внешнем источнике энергии.

Характеристики шаровой молнии, выводимые из наблюдений

Анализ сообщений о свойствах шаровой молнии позволяет составить представление и о других характеристиках этого явления, которые уже не столь очевидны. Однако при этом следует предположить, что опубликованные результаты наблюдений являются правдивыми и достаточно надежными. Мы будем также исходить из применимости к анализу данных наблюдений общих законов физики.

4.1. Плотность

Большинство известных описаний шаровой молнии сходно по крайней мере в одном отношении, а именно что шаровая молния либо парила в воздухе, двигаясь из стороны в сторону сравнительно беспорядочно, либо она появлялась перед очевидцем движущейся сверху вниз. Эти данные, а также очень небольшое число наблюдений поднимающейся вверх шаровой молнии можно использовать для выявления такой ее характеристики, как плотность.

Для объяснения направленного вниз движения шаровой молнии необходимо предположить, что ее плотность превышает плотность воздуха. Если бы мы исходили из того, что шаровая молния поднимается преимущественно вверх, тогда пришлось бы считать ее плотность меньше, чем плотность воздуха. Наконец, при отсутствии явно выраженного движения шаровой молнии вверх или вниз приходится считать плотность вещества в ней сравнимой с аналогичным показателем для окружающего воздуха. Таким образом, с учетом сделанных выше замечаний следует полагать, что плотность (г/см^3) шаровой молнии приблизительно равна плотности воздуха, т.е. составляет около $1,29 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$.

То обстоятельство, что плотность вещества шаровой молнии должна примерно равняться аналогичному показателю для воздуха, отнюдь не определяет ее истинный молекулярный состав. Небольшая примесь лишь в незначительной степени повлияла бы на полную массу шаровой молнии. Справочник [776], выпущенный Американским институтом физики, дает следующие данные о распределении в сухом воздухе

мольных долей компонентов: 78,05% N_2 , 20,95% O_2 , 0,93% Ar , 0,03% CO_2 и следы Ne , He , Kr , H_2 , He , Xe , O_3 и Rn . Влажный воздух также должен содержать пары воды. В гл. 7 мы подробно остановимся на вопросе о том, как небольшие примеси вещества в шаровой молнии оказывают существенное влияние на ее излучательные характеристики. Таким образом мы будем считать, что плотность вещества шаровой молнии примерно совпадает с плотностью воздуха, и воздержимся от предположений относительно характера содержащихся в ней малых примесей. Конечно, следует отдавать себе отчет в том, что проблема небольших вариаций в распределении плотности вещества до сих пор не исследована.

Тот факт, что плотность вещества шаровой молнии приблизительно равна плотности окружающего воздуха, противоречит представлению о шаровой молнии как о сгустке полностью ионизованной плазмы с крайне высокой температурой. Под «высокой температурой» мы понимаем здесь значение, превышающее 10^4 К. Очевидно, сильно нагретый газ будет быстро расширяться и за счет диффузии рассосется в окружающий молнию воздух. Впрочем, ниже в данной главе мы рассмотрим гипотезу о том, что в качестве исходного вещества шаровой молнии может служить частично ионизованный газ.

4.2. Плотность энергии

Значительный интерес для исследователей, изучающих свойства и пути образования шаровой молнии, представляет вопрос о ее энерго-содержании и плотности энергии. Знание величины энергии шаровой молнии необходимо также для теоретического описания самого явления и анализа механизмов ее образования и существования. Любая модель шаровой молнии должна включать такой источник энергии, который обеспечивал бы поддержание наблюдаемых характеристик этого явления.

Энергия шаровой молнии неоднократно определялась в прошлом на основе небольшого числа наблюдений, из которых выводились пригодные для анализа данные. Следует подчеркнуть, что во всех известных автору расчетах предполагалось однородное распределение энергии по объему шаровой молнии. Однако более реалистичный анализ этого предположения ведет нас к заключению, что природа может не оказаться столь простой. Мы можем принять, что распределение плотности энергии сферически-симметрично и может изменяться вдоль радиуса шаровой молнии, постепенно уменьшаясь и принимая значение для окружающего воздуха на его границе с шаром. Такой подход позволяет избежать трудность возникновения резкого скачка плотности энергии на поверхности шаровой молнии и в большей степени отвечает нашему пониманию природы. Указанное предположение вовсе не исключает возможности резкого изменения плотности энергии на протяжении тонкого слоя на границе шара, т.е. проявления скин-эффекта.

Полная энергия шаровой молнии следующим образом выражается через плотность энергии:

$$r=R$$

$$E_0 = \int_{r=0} f(r) 4\pi r^2 dr, \quad (4.1)$$

здесь $f(r)$ – распределение плотности энергии по радиусу, r и R – текущий радиус и расстояние до границы шаровой молнии соответственно. При однородном распределении энергии $f(r) = \text{const}$, и полная энергия E_0 определяется простым соотношением: $E_0 = f(r)V$, где V – объем шара. В случае неоднородного распределения энергии, например для зависимости гауссовского типа,

$$f(r) = \varepsilon_0 \exp(-2r^2/a^2),$$

где a – расстояние вдоль радиуса, на котором величина плотности энергии падает в e^2 раз по отношению к ее значению при $r = 0$ – можно ожидать эквивалентного или полностью отличающегося значения полной энергии шаровой молнии.

Конечно, необходимо отдавать себе отчет, что для шаровой молнии можно с одинаковой долей справедливости, а возможно, и с равной неопределенностью предполагать почти любые распределения энергии. Мы не располагаем сколько-нибудь определенными данными об истинном распределении энергии для шаровой молнии. В наших возможностях лишь выдвинуть физически обоснованные аргументы для установления некоторых пределов. Так, например, можно предположить, что плотность энергии шаровой молнии принимает постоянное значение в объеме своего ядра и по некоторому закону спадает вблизи ее границы, принимая там значение, характерное для окружающего воздуха. На основе известных нам наблюдений можно считать, что температура в ядре молнии, или эквивалентное значение плотности энергии, не слишком отличается от характерной для внешних слоев молнии. Если бы это было не так, то цвет шаровой молнии и ее структура казались бы неоднородными, а это противоречит опубликованным наблюдениям.

Ряд наблюдателей, однако, указывали, что шаровая молния обладает видимой структурой. Например, в работе [337] приведено подробное описание нескольких зон шаровой молнии с явно различной плотностью. Предполагалось наличие внутренних движений шаровой молнии [583], а также заметное изменение плотности вдоль радиуса молнии [590].

Поскольку нам нужно определить плотность энергии для целей сравнения, моделирования и теоретического описания явления шаровой молнии, будем исходить из однородного распределения. В этом случае плотность энергии определяется соотношением

$$\varepsilon = E_0 / V, \quad (4.2)$$

где E_0 – полная энергия шаровой молнии, установленная на основе наблюдений, а V – объем шаровой молнии, обычно рассчитываемый исхо-

дя из видимого (оптического) диаметра. Ниже приведен ряд наблюдений шаровой молнии, описаний и оценок значений ее энергии, и результаты интерпретируются применительно к возможной форме (или формам) шаровой молнии.

Случай 1. Довольно известный случай, позволивший произвести расчет энергии шаровой молнии, был описан Моррисом [1256] и проанализирован Гудлетом [770]. Наблюдавшаяся шаровая молния размером с апельсин и имевшая красный цвет, двигаясь сверху вниз, ударилась о дом, перерезала телефонный провод, обожгла оконную раму и затем очутилась в баке с водой объемом около четырех галлонов (18 л). Вода закипела и оставалась слишком горячей для рук в течение примерно 20 мин, что свидетельствовало о значительном выделении тепла. Не было обнаружено никакого осадка при осмотре воды после ее охлаждения. Минимальное значение энергии шаровой молнии можно определить путем весьма простых расчетов. Оставив в стороне факты разрушения провода и оконной рамы, остановимся лишь на количестве тепла, переданного молнией воде в баке.

Будем считать, что начальная температура воды составляла 20°C, а ее конечная температура достигла примерно 60°C. Согласно имеющемуся описанию, количество воды не превышало 4 галлонов (т.е. примерно 18 л). Моррис [1256] не отметил каких-либо потерь воды за счет кипения. Для повышения температуры 1 см³ воды на 1°C необходимо затратить 1 калорию тепла (1 кал = 4,19 Дж). Поэтому количество переданного молнией воде тепла должно составить по меньшей мере 3·10⁶ Дж.

Как отметил Бойс во время дискуссии, развернувшейся после опубликования статьи [770], диаметр шара, эквивалентного по размеру большому апельсину, составляет примерно 10 см. Отсюда

$$\epsilon(\text{случай 1}) \approx 5,7 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^3. \quad (4.3)$$

Полученное значение лишь немного возрастет, если учесть потери воды на испарение. На испарение затратилось бы дополнительно 538,7 кал/см³ (или 2257,1 Дж/см³).

Поскольку данные [1256] относятся к немногим, позволяющим произвести оценку запасенной в шаровой молнии энергии, было выполнено еще несколько расчетов. Так, в [770] получено значение 3,8·10⁶ Дж; предполагалось, что испарение воды отсутствовало и начальная температура воды равна 10°C, а конечная 60°C. С учетом испарения примерно 4 фунтов воды (1 фунт = 454 см³) в [770] получена энергия 1·10⁷ Дж. Соответствующая плотность энергии, выводимая из (4.2) при диаметре молнии 10 см, равна

$$\epsilon(\text{никаких потерь воды}) \approx 7,3 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^3 \quad (4.4)$$

и

$$\epsilon(\text{с учетом потерь воды}) \approx 1,9 \cdot 10^4 \text{ Дж/см}^3. \quad (4.5)$$

Ряд авторов также воспользовались данными Морриса [1256] и Гудлета [770]. Так, в [484] приведено значение

$$\varepsilon(\text{случай 1}) \approx 2,5 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^3, \quad (4.6)$$

тогда как в [862] получено

$$\varepsilon(\text{случай 1}) \approx 2,4 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^3. \quad (4.7)$$

В работе [12] также рассмотрены результаты обсуждения Гудлета [770] и проанализированы данные наблюдений, приведенные в [497] и [1120]; авторы [12] оценили плотность энергии шаровой молнии как

$$\varepsilon(\text{случай 1}) \approx 4 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^3. \quad (4.8)$$

Наконец, в работах Барри [341, 342] также рассмотрен этот случай наблюдения шаровой молнии; вычисленное значение плотности энергии для шаровой молнии с диаметром около 15 см равно

$$\varepsilon(\text{случай 1}) \approx 2,5 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^3. \quad (4.9)$$

Из сказанного ясно, что разные результаты были получены прежде всего из-за различий исходных предположений. Тем не менее очевидно, что плотность энергии шаровой молнии может быть равна по крайней мере $2 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^3$.

Случай 2. Еще один случай наблюдения шаровой молнии позволяет нам рассчитать сходным путем плотность энергии. В работах [534, 1972] описано появление шаровой молнии, которая опустилась на сваю причала и расщепила ее на мелкие лучины.

Примем, что бревно расщепилось в результате разогрева воды внутри его объема, который привел к быстрому расширению и разрыву волокон. Для того чтобы произошло такое расщепление дерева, необходимо, чтобы направленное по радиусу наружу давление превысило бы прочность дерева на разрыв в перпендикулярном волокну направлении. В данном примере давление создается испарением воды из капилляров дерева, вызванным горячей шаровой молнией.

Прочность дерева на разрыв S зависит от породы, возраста, параметров роста и некоторых других факторов. Примем в качестве исходного значения для величины S значение 500 атм, характерное для дуба. Будем считать, что для создания направленного наружу радиального давления в дереве необходимо превратить в пар воду, заключенную в слое дерева, образующего полый круговой цилиндр. Превращение воды в пар порождает давление, превышающее величину S , поскольку пар оказывается заключенным в ограниченном объеме, первоначально занятом водой.

Давление пара, образованного в объеме V , может легко превысить значение величины S . При нормальных температуре и давлении из 18 г воды образуется 1 моль пара (1 моль = 22,4 л = $2,24 \cdot 10^4 \text{ см}^3$), и его дав-

ление P можно определить из уравнения состояния идеального газа:

$$PV = nRT; \quad (4.10)$$

здесь V – объем, R – универсальная газовая постоянная, равная $82,06 \text{ см}^3 \cdot \text{атм}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ при измерении объема в см^3 , n – число молей газа, T – температура в К.

Если плотность воды $\rho (= 1 \text{ г/см}^3)$, то из $V_{\text{в}}$ грамм воды должно образоваться $V/18$ молей пара. Тогда давление, развиваемое паром при температуре 100°C (или 373 К), составит, согласно (4.10),

$$P = (V_{\text{в}}/18)R(373)/V_{\text{в}}, \quad (4.11)$$

что дает $P = 1700 \text{ атм}$.

Выделим внутри бревна длиной L заполненный водой цилиндрический слой радиусом r_1 и толщиной Δr . Тогда объем воды будет

$$V_{\text{в}} = 2\pi r_1 \Delta r L \quad (4.12)$$

Для получения оценки плотности энергии шаровой молнии необходимо задаться параметрами цилиндрического слоя с водой внутри бревна. Предположим, что радиус цилиндра $r_1 \approx 7,5 \text{ см}$, а толщина стенки мала и составляет $\Delta r \approx 0,1 \text{ мм}$; наконец, положим $L \approx 121,9 \text{ см}$ (4 фута). Тогда объем воды

$$V_{\text{в}} = 57,4 \text{ см}^3. \quad (4.13)$$

Для повышения температуры 1 см^3 воды на 1°C необходимо затратить 1 кал тепла. Чтобы превратить 1 см^3 воды в пар при температуре 100°C , необходимо $538,7 \text{ кал/см}^3$. Количество тепла, нужное для превращения $57,4 \text{ см}^3$ воды при температуре 20°C в пар при температуре 100°C , оказывается равным

$$E \approx 0,15 \cdot 10^6 \text{ Дж}, \quad (4.14)$$

а значение плотности энергии шаровой молнии диаметром 15 см в предположении однородного распределения составит

$$\varepsilon (\text{случай } 2) \approx 85 \text{ Дж/см}^3. \quad (4.15)$$

Следует помнить, что значение плотности энергии может измениться, если бы стали известными распределение массы и энергии в шаровой молнии.

Случай 3. Основу для еще одного расчета энергии шаровой молнии дает случай, когда молния попала в человека и нанесла ему ожог. В работах [1677, 1954] подробно описан этот случай внезапного появления шаровой молнии в комнате. Шар имел яркий нимб, охватывающий центральное ядро; внешний диаметр шара около 10 см, и он светился в течение 1 с. Молния коснулась одежды очевидицы и слегка задела ее руку. В месте контакта с одеждой в последней была прожжена дыра,

и оплавилась относительно большая площадь материала из полиэфирного волокна, а прикосновение молнии к руке вызвало ожог на безымянном пальце из-за нагрева надетого на палец золотого кольца. Если судить о размерах шаровой молнии по прожженной (неправильной формы) дыре в одежде на фотографии, приведенной в [1677], то ядро молнии должно было иметь в диаметре около 2 см.

Полиэфирные волокна плавятся при температуре порядка 250°C , имеют удельную теплоемкость $H = 1,2 \text{ Дж}/(\text{г}\cdot^{\circ}\text{C})$ и плотность $\rho = 1 \text{ г}/\text{см}^3$. Размеры оплавленной зоны равнялись примерно $10 \text{ см} \times 7 \text{ см}$, а толщина материи не превышала 0,1 мм. Количество тепла, необходимое для оплавления материала одежды, можно определить из соотношения

$$E_1 = H\rho V\Delta T; \quad (4.16)$$

здесь ΔT —изменение температуры (скажем, от 20°C до 250°C), а V —объем поврежденного материала ($= 10 \times 7 \times 0,01 = 0,7 \text{ см}^3$). В итоге получаем

$$E_1 = 193 \text{ Дж}. \quad (4.17)$$

Очевидица сообщила также, что заметила на своем теле отблеск от ядра светящегося шара. Предположим, что излучение от шара было эквивалентно тому, что производит лампочка в 50 Вт; тогда за время жизни шаровой молнии в 1 с должна была выделяться энергия

$$E_2 = 50 \text{ Дж}. \quad (4.18)$$

Наконец, ожог пальца также позволяет оценить значение выделившегося тепла. Согласно описанию, ожог выглядел менее сильным, чем при обваривании руки кипятком, так что температура кожи, по-видимому, была ниже 100°C . Затраты тепла на нагрев золотого кольца легко оценить по зависимости (4.16). Удельная теплоемкость золота равняется примерно $H_1 = 0,126 \text{ Дж}/(\text{г}\cdot^{\circ}\text{C})$, плотность золота $\rho = 19,3 \text{ г}/\text{см}^3$, и кольцо обычных размеров занимает объем около 1 см^3 . Затраты тепла поэтому составляют

$$E_3 = H_1\rho V\Delta T, \quad (4.19)$$

и если принять $\Delta T = 80^{\circ}\text{C}$, то будем иметь

$$E_3 = 194 \text{ Дж}. \quad (4.20)$$

Суммируя вместе приведенные выше оценочные значения энергозатрат, получим

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = 440 \text{ Дж}, \quad (4.21)$$

и если воспользоваться выражением (4.2), то в итоге найдем плотность энергии для шаровой молнии диаметром 2 см:

$$\epsilon (\text{случай 3}) = 105 \text{ Дж}/\text{см}^3. \quad (4.22)$$

Важно отметить, что данный расчет в одном отношении существенно отличается от других подобных расчетов. Дело в том, что, согласно наблюдению, оптический диаметр шаровой молнии составлял 10 см, тогда как на основе физических данных он, по-видимому, не превышал 2 см. Истинный диаметр шара был найден путем исследования места контакта молнии с одеждой.

Если произвести расчет плотности энергии, исходя из наблюдаемого (оптического) диаметра светящегося шара, который согласуется с другими расчетами, то мы найдем для диаметра шаровой молнии 10 см

$$\epsilon (\text{случай 3}) \approx 0,8 \text{ Дж/см}^3, \quad (4.23)$$

что составляет менее 1% от считавшихся правильными значений плотности энергии, полученных в рамках предположений, использовавшихся при анализе других наблюдений и сообщений.

Случай 4. Энергия шаровой молнии была оценена в [583, 585] на основе экспериментальных данных, полученных при наблюдении шаровой молнии. Согласно описанию, светящийся объект слегка эллипсоидальной формы появился над поверхностью воды после удара обычной молнии. Объект представлялся состоящим из блестящей белой сердцевины, окруженной двумя светящимися оболочками, причем внутренняя оболочка имела фиолетовый цвет, а наружная – голубой. Размер большой оси эллипса составлял около 14 см. Шаровая молния наблюдалась в течение 80 с и исчезла после соприкосновения с находившимся поблизости предметом.

По мнению автора [583], в шаровой молнии непрерывно генерировалась энергия, поскольку ее перемещения постоянно сопровождалось треском электрических разрядов и излучением. По мере движения шаровой молнии, подгоняемой ветром, за ней оставался видимый след голубоватой дымки. В зоне нахождения шаровой молнии были взяты пробы газа. Для определения химического состава и концентрации частиц использовался масс-спектрометрический анализ.

Удалось установить, что концентрации озона и окислов азота, которые предположительно состояли из молекул NO_2 , значительно превышали соответствующие значения для нормального воздуха. Однако полученные числа нельзя использовать даже для построения весьма грубой модели процессов, поскольку такие же газы формируются в областях, через которые проходят обычные разряды молнии. Впрочем, интересно отметить, что отношение концентраций водорода и кислорода составило около $4 \cdot 10^{-6}$. Если бы шаровая молния поддерживалась за счет прохождения в газе волны детонации или его сгорания, то отмеченное отношение концентраций равнялось бы примерно $3 \cdot 10^{-3}$.

Концентрации молекул NO_2 , измеренные в серии из четырех проб, заключены от 92,3 до 1645 мкг/м³. Было высказано предположение, что измеренное значение концентрации молекул NO_2 можно связать с электрической энергией, заключенной в соответствующем объеме воздуха. Лабораторные эксперименты с электрическими разрядами в воздухе по-

зволили установить, что концентрация молекул NO_2 связана с запасом энергии соотношением

$$[\text{NO}_2] = 6,8 E, \quad (4.24)$$

где концентрация $[\text{NO}_2]$ измеряется в мкг/м^3 , а плотность энергии E – в Дж/м^3 . Приведенным выше значениям концентрации 92,3 и 1645 мкг/м^3 будут соответствовать значения плотности энергии 13,6 и 240 Дж/м^3 . При этом было принято, что полная концентрация молекул равна $5,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а средняя энергия их ионизации 14,5 эВ. Полное количество заключенной в молнии энергии, по оценке, составило 530 Дж. Пользуясь уравнением (4.2), определим плотность энергии для шаровой молнии диаметром 14 см:

$$\varepsilon (\text{случай 4}) = 0,37 \text{ Дж/см}^3. \quad (4.25)$$

Согласно результатам измерений в работе [499], количество образующихся в воздухе при разряде молнии молекул типа NO_x (NO , NO_2 , NO_3 , HNO_3) доходит до $6 \cdot 10^{16}$ молекул на каждый джоуль рассеянной электрической энергии. Присутствие паров воды не оказывает никакого заметного влияния. Средний расход энергии при вспышке молнии через канал диаметром 1–10 см составляет примерно 10^5 Дж/м. В этих условиях обычная молния создает молекулы типа NO_x в количестве, соответствующем концентрации от $7,6 \cdot 10^{15}$ до $7,6 \cdot 10^{17}$ молекул/см³. Указанные значения близки к измеренному Дмитриевым [585] и позволяют предположить, что исследованный им объект был похож на обычную молнию по способности создавать в воздухе молекулы типа NO_x .

Случай 5. В работе Уитмана [1937] описан еще один случай наблюдения шаровой молнии во время грозы с сильным дождем вблизи г. Кобург (ФРГ). Круглый ярко светящийся шар желтоватого цвета появился перед наблюдателем на расстоянии примерно 24 м, на высоте около 16 м над землей. Шар имел диаметр 50–100 см и опускался вниз со скоростью около 4 м/с. Полет молнии закончился на вершине расположенного вблизи дерева. Там она распалась на 8–12 небольших шаров диаметром 12–15 см каждый, которые светились таким же желтоватым цветом. Затем маленькие шары продолжали падать вниз и бесшумно исчезали после контакта с землей. Появление первоначального шара не сопровождалось вспышкой молнии, так что нельзя говорить об остаточном изображении на сетчатке глаза. Явление повторно наблюдалось спустя несколько минут и протекало вполне аналогично первому. Можно заметить, что последовательность событий при данном наблюдении шаровой молнии противоположна зарегистрированной Скоттом [1610]. Последний отметил, что множество небольших, как бы развешанных на дереве и светящихся зеленым цветом шариков поднялось вверх и слилось в один большой шар, который затем свободно поплыл в воздухе.

Несколько небольших светящихся шаров, описанных выше (см. [1937]), упали на асфальтированную дорогу, проходившую под деревом.

Эта часть дороги была внимательно осмотрена, и на ней были замечены круглые пятна расплавленного асфальта. В диаметре эти круглые образования составляли 12–15 см; можно было полагать, что они находились как раз в местах падения небольших светящихся шаров на асфальт. В [1937] отмечено, что данное явление наблюдалось несколькими очевидцами, и все они описали его практически одинаково.

Автор [1937] рассчитал плотность энергии маленьких шаров, упавших на асфальтированную дорогу. В состав асфальта входил битум Б-80, т.е. термопласт, содержащий жидкие компоненты, которые разлагаются при температуре $\sim 170^\circ\text{C}$. Было учтено, что светящийся шарик нагрел и испарил воду, покрывавшую тонким слоем (0,5 мм) асфальт и имевшую температуру 20°C . Кроме того, было принято, что слой асфальта толщиной 1 мм нагрелся до температуры 170°C . Битум марки Б-80 имеет следующие свойства: плотность $\rho = 1 \text{ г/см}^3$, удельная теплостойкость $H = 1,9 \text{ Дж/(г}\cdot^\circ\text{C)}$. Затраты энергии на плавление битума определяются из соотношения

$$E = H\rho V\Delta T, \quad (4.26)$$

и для шаровой молнии диаметром 12 см получаем

$$E_1 \approx 3,4 \cdot 10^3 \text{ Дж}. \quad (4.27)$$

Затраты энергии на испарение воды (с учетом расхода 1 кал/см^3 для повышения температуры воды на 1°C и $538,7 \text{ кал/см}^3$ для образования из кипящей воды пара при температуре 100°C) оказываются равными

$$E_2 \approx 1,6 \cdot 10^4 \text{ Дж}. \quad (4.28)$$

Полная энергия равна сумме

$$E = E_1 + E_2 \approx 1,9 \cdot 10^4 \text{ Дж}, \quad (4.29)$$

а плотность энергии для молнии диаметром 12 см составит, согласно (4.2),

$$\epsilon (\text{случай } 5) \approx 21 \text{ Дж/см}^3. \quad (4.30)$$

Значение ϵ безусловно зависит от количества разложившегося при нагревании битума Б-80. Плавление могло затронуть его слой на глубине больше 1 мм, а для создания местной деформации битума его температура не обязательно должна была достичь 170°C . Неизвестен также и фактический механизм переноса тепла. Поэтому представляется, что полученное выше значение определяет лишь нижнюю границу энергии.

В [1937] подчеркнуто, что описанное наблюдение весьма отличается от другого, сделанного несколько лет спустя. Во время грозы с сильным дождем произошел разряд обычной молнии в крышу здания. Сразу же после удара молнии в месте ее попадания на крышу наблюдался мощный точечный разряд, горевший в течение 1–2 с. Этот разряд,

однако, не был отождествлен с явлением шаровой молнии. Точечный разряд мог быть подобен сфотографированным в работах [886, 658, 657]. Согласно предположениям одного из авторов этих работ, Хуберта, возникновение свечения наблюдаемого объекта могло быть обусловлено тепловым возбуждением газа в небольшом объеме разряда.

Случай 6. Хотя непосредственно во время грозы шаровая молния не наблюдалась, очевидцы сообщали о возникновении вблизи дома свечения. Это свечение продолжалось в течение 2–3 с после вспышки молнии. Сразу после исчезновения свечения произошло замыкание в электросети.

Участок вблизи дома был тщательно осмотрен и на траве был обнаружен искривленный подпаленный след, который шел от дерева к металлической водосточной трубе на соседнем доме. Дерево не было заметно повреждено или обожжено. Обнаруженный след имел длину 10 м и видимую ширину 10 см. В конце этого следа рядом с водосточной трубой под карнизом дома висел фонарь. В стенке его обнаружилась дыра диаметром в четверть дюйма (0,6 см), которая казалась сделанной раскаленным предметом. Разумно предположить, что все перечисленное связано с явлением атмосферного электричества, причем события начались с загорания травы и кончились на стенке фонаря. Явление могло быть ненаблюдавшимся разрядом обычной молнии, свечение которого продолжалось длительное, чем в случае обычной молнии. Можно также предположить, что шаровая молния все-таки сформировалась и вызвала наблюдаемое свечение, а также опаленный след на траве.

Чтобы оценить энергию, потребовавшуюся на опаление травы, в работе [15] был поставлен эксперимент с нагреваемой спиралью, устанавливаемой в разных местах газона. В течение разных отрезков времени нагреватель включался при различных уровнях мощности. Калибровка нагревательного элемента осуществлялась калориметрическим методом. Наилучшего совпадения результатов между искусственно вызванным сжиганием травы и следом, оставленным молнией, удалось достичь при работе нагревателя мощностью порядка 30 Вт, когда трава подвергалась тепловой обработке в течение 300 с с высоты примерно 10 см. При этом выжженное пятно травы имело длину около 10 см, а затраты энергии составили

$$E = 9 \cdot 10^3 \text{ Дж.} \quad (4.31)$$

Полные затраты энергии на опаление травы должны быть больше во столько раз, во сколько полный след на траве от молнии превышает длину контрольного следа, т.е.

$$E_{\text{полн}} \approx 9 \cdot 10^5 \text{ Дж.} \quad (4.32)$$

Согласно оценке на основе ширины следа опаленной травы, диаметр шара составлял 10 см. В итоге плотность энергии шаровой молнии оказалась равной [15]

$$\varepsilon (\text{случай 6}) \approx 1,7 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^3. \quad (4.33)$$

Более высокие значения плотности энергии можно получить, если предположить сферически-симметричное распределение теплового излучения от нагревателя. В таком случае расположенный на высоте 10 см над травой шар диаметром 10 см обладал бы плотностью энергии порядка $1 \cdot 10^4$ Дж/см³. Авторы [15] подчеркнули, что вычисленное значение плотности энергии шаровой молнии больше такового для ионизованного воздуха; это вызывает определенные сомнения.

Случай 7. Явления, подобные шаровой молнии, генерировались также электрическими машинами. Весьма редкий случай образования огненных шаров в некоторых подводных лодках был детально описан Силбергом [1629, 1632]. Огненный шар возник в результате мощных разрядов при переключении аккумуляторных батарей и генераторов. Генераторы использовались для подзарядки батарей. Два генератора были соединены с помощью реле обратного тока, и каждый из генераторов можно было подсоединить к любой из двух батарей аккумуляторов.

Контакты прерывателя были изготовлены из серебра с медными удлинителями и снабжены искрогасительной катушкой. Совершенно случайно полностью заряженную батарею аккумуляторов подсоединили параллельно неиспользовавшемуся генератору. Реле обратного тока разорвало образовавшуюся цепь. Если бы дуга зажглась на серебряном электроде, то искрогасительная катушка переместила бы столб разряда на медные удлинители и тем самым свела к минимуму эрозию серебряного электрода. В нормальных условиях дуга должна была бы погаснуть.

Однако если ток дугового разряда был слишком велик, то на контактах реле возникал огненный шарик зеленого цвета. Время жизни шарика составляло обычно 1 с. Зеленый цвет можно приписать излучательным переходам в атомах меди, входивших в состав вещества шарика. Например, зеленая линия образуется при электронном переходе $4^2P_{3/2} \rightarrow 4^2D_{5/2}$ в атоме меди, когда верхний уровень заселяется электронным ударом из основного состояния $4^2S_{1/2}$. Длина волны этого перехода составляет 510,55 нм, а энергия фотона $E = 3,896 \cdot 10^{-19}$ Дж. При проведении контрольных испытаний было установлено, что огненные шары возникали только в тех случаях, когда превышались определенные пороговые значения мощности или тока в цепи. Например, огненный шарик возникал при токе $I = 1,5 \cdot 10^5$ А и напряжении $V = 260$ В. Выделяющаяся при этом в цепи мощность составляет

$$P = IV = 4 \cdot 10^7 \text{ Вт.} \quad (4.34)$$

Время механического переключения составляло от 0,01 до 0,1 с. Соответствующие значения выделившейся энергии, равной произведению мощности на время, должны находиться в интервале

$$4 \cdot 10^5 \text{ Дж} < E_T < 4 \cdot 10^6 \text{ Дж.} \quad (4.35)$$

Если предположить, следуя [1629, 1632], что от 1 до 10% выделившейся

энергии могло пойти на образование огненного шара, то будем иметь

$$4 \cdot 10^3 \text{ Дж} < E < 4 \cdot 10^5 \text{ Дж}. \quad (4.36)$$

Так как диаметр шара составлял, по оценке, 10–15 см, то плотность энергии равнялась

$$2,3 \text{ Дж/см}^3 < \varepsilon (\text{случай 7}) < 0,76 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^3. \quad (4.37)$$

Подчеркнем, что приведенные расчеты основывались на предположении Силберга о 1–10% вкладе энергии в шаровую молнию. Более достоверное значение 0,1% найдено в работах [1443, 1444], в которых описывались лабораторные измерения. При этих условиях энергия, заключенная в 15-см шаровой молнии, равнялась по меньшей мере

$$E \approx 4 \cdot 10^2 \text{ Дж}, \quad (4.38)$$

так что соответствующая плотность энергии

$$\varepsilon * (\text{случай 7}) \approx 0,2 \text{ Дж/см}^3. \quad (4.39)$$

Более подробно эксперименты [1443, 1444] описаны ниже в этом разделе (см. случай 9) и в разд. 7.5. Кратко отметим, что авторы выполнили измерения энергии излучения в видимом и инфракрасном диапазонах для искусственно созданного явления, а также энергии, затраченной на его образование. Оказалось, что отношение этих двух значений энергии составило примерно 0,001. Данный результат отличается от других в том отношении, что лишь авторам [1443, 1444] удалось непосредственно измерить энергетические параметры процессов, сопровождающих образование и последующее существование лабораторной шаровой молнии.

Случай 8. Известно еще несколько случаев преднамеренного и случайного возникновения явлений типа шаровой молнии при замыканиях накоротко мощных генераторов и аккумуляторных батарей. Например, Джонс в 1910 г. [950] наблюдал образование горящего медного шарика, однако отсутствие каких-либо подробностей не позволяет оценить плотность энергии. По описанию Бранда [413], известно, что норвежский гидроэнергетик Нильсен наблюдал образование светящегося объекта типа шаровой молнии при замыкании накоротко контактов мощного генератора постоянного тока. Замыкание осуществлялось путем подсоединения впараллель водяного сопротивления и закорачивающего устройства. Было высказано предположение, что присутствие воды способствовало образованию светящегося объекта. По свидетельству очевидцев, светящийся красноватым цветом шарик диаметром 5 см плавал в воздухе около закороченных контактов и оставался видимым в течение нескольких секунд. По-видимому, данный эксперимент можно воспроизвести. Фотографии светящегося объекта были сделаны Нильсеном и воспроизведены в [413].

Генератор постоянного тока, использовавшийся для образования

светящегося предмета, развивал мощность 10 МВт при номинальном напряжении 12 кВ. Будем считать, что механическое замыкание цепи осуществлялось в течение 100 мс; тогда на образование светящегося объекта должно было пойти около 10^6 Дж электрической энергии. Если следовать предположению Силберга [1629, 1632] о 1–10% вкладе энергии в образование шаровой молнии, то на основе уравнения (4.2) получим в случае равномерного распределения энергии по объему шарика:

$$19 \text{ Дж/см}^3 \leq \varepsilon (\text{случай 8}) < 190 \text{ Дж/см}^3. \quad (4.40)$$

При использовании экспериментов [1443, 1444], согласно которым на образование шаровой молнии идет 0,1% энергии, найдем для плотности энергии

$$\varepsilon (\text{случай 8}) \approx 15,3 \text{ Дж/см}^3. \quad (4.41)$$

В работе [413] было также отмечено, что Нильсен наблюдал образование светящихся предметов типа шаровой молнии и в других случаях замыканий цепи, содержащей мощный генератор. Если электрическая мощность, выделяемая при замыкании цепи накоротко, не сильно отличалась от отмеченной ранее, то плотность энергии для шаровой молнии соответствовала приведенному выше значению.

Случай 9. Пауэлл и Финкельстейн [1443, 1444] наблюдали в эксперименте образование в воздухе при атмосферном давлении долгоживущего светящегося объекта круглой формы. Для этого молекулы воздуха возбуждались сфокусированным излучением СВЧ-генератора; объект продолжал светиться и после прерывания возбуждающего импульса. Время жизни такого не ограниченного стенкой разряда составляло 0,2–0,4 с, а измеренная температура равнялась 2000–2500 К. В ряде случаев наблюдался неожиданный распад светящегося шара.

Полная мощность излучения объекта, а также излучение в видимом и инфракрасном диапазонах измерялись в течение 300–500 мс; с уровня 10–40 Вт она падала по примерно линейной зависимости. Величина энергии определялась путем интегрирования мощности излучения по времени. Форма и амплитуда снятых кривых немного зависела от материала электродов. Средняя плотность энергии определялась для плазменного шара диаметром 15 см и оказалась равной

$$\varepsilon (\text{случай 9}) \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^3. \quad (4.42)$$

Эти эксперименты более детально проанализированы далее в разд. 7.5. Стоит подчеркнуть, что измерены были как излучение лабораторного объекта в видимом и инфракрасном диапазонах, так и затраченная на его образование энергия. Это впервые позволило экспериментально определить отношение излученной и затраченной энергии. Найденное значение 0,001 меньше предполагаемого ранее, например 1–10% в работах Силберга [1629, 1632].

Случай 10. Ряд исследователей (см. [1288, 651, 343, 345]) описали экс-

перименты по вводу энергии в заданный объем воздуха, в котором находились химически активные молекулы. Воздух при атмосферном давлении смешивался с молекулами углеводородов, причем парциальное давление последних было достаточно низким, и в приготовленной смеси газов возбуждался разряд постоянного тока. В результате наблюдалось воспламенение углеводородной смеси, имевшее сходство с образованием шаровой молнии.

В качестве примера остановимся на экспериментах Барри [343, 345]. Измеренное количество пропана подмешивалось к воздуху при атмосферном давлении. Батарея конденсаторов емкостью 5 мкФ и напряжением 10 кВ обеспечивала появление искры длительностью порядка 1 мс. Разряд постоянного тока инициировал образование светящегося желто-зеленого шарика диаметром около 4 см, который перемещался по камере в течение времени жизни 1–2 с.

Светящийся шар был интерпретирован как результат воспламенения смеси газов и было предположено, что это одна из форм шаровой молнии. На основе данных о подведенной энергии и учета отношения излученной и запасенной энергии (порядка 0,001) [1443, 1444] при однородной плотности энергии имеем

$$\varepsilon (\text{случай 10}) \approx 7 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^3. \quad (4.43)$$

Более подробно результаты экспериментов [343, 345 и 1443, 1444] обсуждаются в разд. 7.3 и 7.5.

Случай 11. На эксперименты Тесла в Колорадо-Спрингс, шт. Колорадо (США), в 1899–1900 гг. иногда ссылаются как на один из способов создания искусственной шаровой молнии. Однако многие годы детали этих экспериментов оставались практически неизвестными из-за отсутствия публикаций. В [1731] Тесла дал лишь краткую аннотацию своих работ и отметил только, что наблюдал искусственно созданные горящие шары. Сравнительно недавно ряд деталей и результатов экспериментов 1899 г. стали известны широкой публике. Общие принципы проведенных Тесла экспериментальных исследований уже обсуждались в литературе [351, 382, 769, 1322, 1624, 1658]. Более подробная информация содержится в дневнике Тесла об экспериментах в Колорадо-Спрингс и опубликованных лишь в 1978 г. [1773].

По-видимому, Тесла несколько раз наблюдал образование горящих шаров, искусственно созданных с помощью его трансформатора (катушки Тесла) в рабочем режиме ~ 50 кВт. Диаметр горящего шара находился в диапазоне 1,9–6,0 см, а время его жизни определялось путем визуального наблюдения. Катушка Тесла работала при пиковом напряжении 12,5 кВ и обеспечивала энергию 12 Дж за импульс. В [769] проанализирована гипотеза Тесла о том, что локализация тепла в канале молнии ведет к образованию горящего шара. Ставшая теперь известной [1733] концепция Тесла основывается на том, что внутренняя энергия шара определяется энергией импульса трансформатора и равна просто кинетической энергии (давление \times объем). Соответствующая зависи-

мость для энергии имеет вид

$$E = P_0 V / (\gamma - 1), \quad (4.44)$$

где P_0 – давление, V – объем, γ – отношение теплоемкостей, равное 7/5 в случае воздуха. Отношение внутренней энергии горящего шара к энергии импульса трансформатора обозначим через n , а отношение внутреннего давления шара к атмосферному – через β . Величина n/β служит мерой к.п.д. горящего шара и равна

$$\frac{n}{\beta} = \frac{4\pi P_0 R^3}{3(\gamma - 1)E_0}. \quad (4.45)$$

Полагая в соответствии с данными наблюдений Тесла [1733] диаметр шара $2R = 3,8$ см и $E_0 = 12$ Дж, найдем

$$n/\beta \approx 0,6. \quad (4.46)$$

Смысл полученного становится ясным, если положить $\beta P_0 \approx 10$ мм рт. ст., что согласуется с данными для газовых разрядов; тогда $n \approx 0,006$, т.е. по порядку величины согласуется с данными [1629, 1632] и несколько больше экспериментально найденного значения 0,001 [1443, 1444].

Пользуясь уравнением (4.2), нетрудно установить искомое значение плотности энергии горящего шара, полагая $E \approx 0,006 \cdot 12$ Дж = 0,07 Дж:

$$\varepsilon (\text{случай 11}) \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^3. \quad (4.47)$$

Дальнейшие подробности экспериментов Тесла обсуждаются в разд. 7.5.

Случай 12. Иной путь определения плотности энергии шаровой молнии основан на рассмотрении сообщений о ее светимости. Ряд очевидцев явления шаровой молнии отмечали, что яркость наблюдаемого объекта была подобна яркости маломощной электрической лампочки. Известны и некоторые экспериментальные данные, подтверждающие этот вывод. Так, в работах [1443, 1444] были выполнены измерения свечения относительно долгоживущего сгустка воздуха, которое было вызвано возбуждением молекул. Начальная мощность излучения равнялась примерно 10 Вт и спадала почти линейно со временем. Значение плотности энергии для шара диаметром 10 см, мощность излучения которого равнялась примерно 10 Вт, а время жизни составляло 1 с, находится из уравнения (4.2):

$$\varepsilon (\text{случай 12}) \approx 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/см}^3. \quad (4.48)$$

Как видно, приведенное значение достаточно малó по сравнению с приведенным ранее.

Если предположить, что каждый атом или молекула излучает только один квант, то по мощности излучения можно определить concentra-

цию соответствующих атомов или молекул. Полагая длину волны излучения $\lambda = 6000 \text{ \AA}$ и соответственно энергию кванта $h\nu = 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, найдем искомую концентрацию:

$$N \approx 5,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}, \quad (4.49)$$

причем частота $\nu = c/\lambda$, $c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$ – скорость света. Вычисленное значение N сравнимо с полученным в [1443, 1444] для долгоживущего светящегося шара, образованного в воздухе искусственным путем.

Предваряя дальнейшее обсуждение в связи с уравнением (4.56), где сопоставляются концентрации возбужденных атомов и электронов для некоторых типов плазмы и концентрация частиц обычного воздуха при стандартных значениях температуры и давления, отметим, что содержащиеся там выводы применимы к нашему случаю. Результаты показывают, что примесь к воздуху возбужденных молекул или атомов с малой парциальной плотностью может оказать существенное влияние на формирование светящегося объекта типа шаровой молнии.

Случай 13. Плотность энергии шаровой молнии можно также оценить, исходя из параметров взрыва, часто сопровождающего исчезновение светящегося объекта. Примем, что акустический шум, интенсивность которого достаточна для улавливания очевидцем, непосредственно связан с мощностью источника – в данном случае шаровой молнии. Для целей оценки будем предполагать, что излученная акустическая мощность приходится целиком на спектр слышимых частот. Вычисленная в итоге мощность излучения представляет собой нижнюю границу, поскольку не учитывает другие возможные потери мощности на радиационные и конвективные процессы.

Плотность звуковой энергии на некотором расстоянии от его источника определяется выражением

$$D = \frac{p^2}{\rho_0 c_1^2} = \frac{p^2}{\gamma P_0}, \quad (4.50)$$

где γ – отношение теплоемкостей для газа (в случае воздуха $\gamma = 1,4$), c_1 – местная скорость звука, p – изменение давления при распространении возмущения, P_0 – местное давление газа, ρ – плотность среды. Величина D определена в единицах Дж/см^3 (см., например, гл. 3 в [776]).

Плотность звуковой энергии на некотором удалении от источника определяется соотношением

$$I = p^2 / \rho_0 c_1, \quad (4.51)$$

причем I измеряется в Вт/м^2 . При нормальной температуре стандартное давление газа равно 760 мм рт. ст., или примерно 10^6 дин/см^2 . Минимальный уровень восприятия звука (нулевой уровень акустического давления) составляет

$$P_{\min} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ дин/см}^2, \quad (4.52)$$

а уровень шума, заглушающего нормальную человеческую речь, лежит на 55 дБ выше. Этот уровень несколько превышает тот, что рекомендован в качестве приемлемого уровня шума для открытых комнат.

Таким образом найдем

$$I_{\min} = \frac{P_{\min}^2 c_1}{\gamma P_0} \times 3,5 \cdot 10^5 \simeq 3 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2. \quad (4.53)$$

Будем предполагать, что шаровая молния представляет собой точечный источник звука, который излучает сферические звуковые волны, и пренебрежем возможными потерями энергии. Поскольку плотность потока энергии в звуковой волне обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника, то на расстоянии $R = 10$ м отмеченную силу звука создаст источник мощностью

$$W_{\text{звук}} = 3 \text{ Вт}. \quad (4.54)$$

Будем считать далее, что хотя любой взрыв шаровой молнии происходит за время около 0,1 с или меньше, при этом излучается столько звуковой энергии, как если бы шар продолжал существовать в течение своего полного времени жизни ~ 1 с. Тогда значение полной энергии шаровой молнии должно равняться примерно 3 Дж. Пользуясь уравнением (4.2), легко определить нижний предел плотности энергии для взрывающейся шаровой молнии диаметром 10 см:

$$\epsilon (\text{случай 13}) \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^3. \quad (4.55)$$

Найденное значение довольно хорошо согласуется с тем, что было установлено в [1443, 1444] в случае искусственно созданного в воздухе светящегося объекта типа шаровой молнии. Некоторая дополнительная информация об этих экспериментах будет приведена в разд. 7.5.

Обсуждение результатов

Известен целый ряд оценок плотности энергии шаровой молнии, основанных на теоретическом описании этого явления или использовании предположений относительно косвенных данных наблюдений. Так, в [307] проанализированы имеющиеся отчеты и обсуждения и приведено в качестве разумной оценки энергии шаровой молнии значение $1 \cdot 10^5$ Дж. При диаметре молнии 10 см плотность энергии равна $1,9 \cdot 10^2$ Дж/см³. В работе [1151] явление шаровой молнии рассматривается как результат некоторого типа горения, возбужденного разрядом обычной молнии; плотность энергии оценена как $2,4 \cdot 10^7$ Дж/см³. Это значение обсуждается в работах [333, 583]; авторы сравнили его с удельной теплотой, выделяющейся при взрыве тринитротолуола, и пришли к выводу о его нереалистичности. Соответствующее значение плотности энергии для тринитротолуола составляет $2 \cdot 10^3$ Дж/см³, ввиду чего значительно бóльшие величины энергии должны ставиться под со-

мнение. В работе [333] выведено значение плотности энергии $2,8 \cdot 10^5$ Дж/см³ для случая взрыва шаровой молнии, вызвавшего разрушение глинобитного дома. Детальный анализ этого факта вряд ли возможен ввиду незнакомства с оригинальным сообщением.

В работе [1294] развита квантово-механическая модель шаровой молнии, построенная автором ее много лет назад [1293], и получено значение плотности энергии 57,3 Дж/см³ для шара диаметром 20 см. Одна из наиболее ранних моделей шаровой молнии была предложена в [1746]; предполагалось, что молния состоит преимущественно из озона и может быстро распадаться путем взрыва с образованием кислорода. Для случая шара диаметром 50 см в [1746] была ошибочно оценена энергия такого превращения в $1 \cdot 10^7$ Дж. Причина этой ошибки заключалась в использовании неверных значений теплоты образования озона. Как отметили Сингер [1641] и несколько позже Смирнов [1647, 1648, 1651] и Стаханов [1670] в работах, расширивших наше представление о химической природе процессов в шаровой молнии, правильное значение плотности энергии должно составлять 6–7 Дж/см³.

Можно предположить, что в качестве верхнего предела для плотности энергии шаровой молнии следует использовать значение, соответствующее полностью ионизованной воздушной плазме. Были рассмотрены многочисленные гипотезы, в которых заданный объем ионизованного воздуха образуется за счет редко проявляющихся особенностей разряда обычной молнии. Так, например, создание полностью ионизованной плазмы в небольшом объеме воздуха может обеспечиваться за счет энергии, выделяющейся на конечной стадии разряда обычной молнии.

Для полной ионизации воздуха требуется энергия порядка 39 эВ. Потенциал ионизации молекул N₂, наиболее распространенного компонента воздуха, равняется $\sim 15,6$ эВ, в то время как энергия диссоциации N₂ с образованием двух невозбужденных атомов N составляет около 9,8 эВ, а потенциал ионизации атомов N равен 14,5 эВ. Переводный множитель для интересующих нас единиц энергии равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж/эВ. При стандартных значениях температуры и давления концентрация молекул в воздухе $L_0 = 2,69 \cdot 10^{19}$ см⁻³.

Если учесть только процессы ионизации молекул азота, то для образования из ионов N₂⁺ полностью ионизованной плазмы необходимо подвести к единице объема воздуха энергию порядка

$$\epsilon_{\text{ион-возд}} = 65 \text{ Дж/см}^3. \quad (4.56)$$

Аналогичная величина в случае образования в воздухе полностью ионизованной плазмы атомных ионов N⁺ должна составить

$$\epsilon_{\text{ион-возд}}^* = 170 \text{ Дж/см}^3. \quad (4.57)$$

Близкое значение плотности энергии для полностью ионизованной воздушной плазмы получено в [1522]. Однако, как отмечено, например, в книге [1715], концентрация ионизованных частиц в газовом разряде

находится в диапазоне $N = 10^{10} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Если применить эти данные к анализу процессов в воздушной плазме шаровой молнии, то получим оценку плотности энергии

$$\epsilon_{\text{разряд-возд}} \leq 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^3. \quad (4.58)$$

Трудно оценить устойчивость малого объема полностью ионизованной воздушной плазмы. Различные плазменные эффекты, перенос тепла и диффузия довольно быстро вызовут распад такой полностью ионизованной плазмы. Если следовать Капице [960, 962], то ожидаемое значение времени распада полностью ионизованной воздушной плазмы при атмосферном давлении должно равняться примерно 10 мкс. Эксперименты Синицына [1644] с высокочастотным разрядом при пониженном давлении подтвердили наличие послесвечения плазмы, продолжающегося после выключения источника возбуждения газа, причем время жизни плазмы равнялось около 1 мкс. Согласно проведенным экспериментам, время жизни частично ионизованной воздушной плазмы при атмосферном давлении может оказаться значительно большим и достигать 1 с. Несколько исследований, в том числе [663] и [1448] и др., успешно продвинули вперед анализ плазменной модели шаровой молнии, которая остается одной из наиболее полезных моделей.

4.3. Природа энергии шаровой молнии

Время от времени выдвигались предположения, что в природе может существовать более чем одна форма (или тип) шаровой молнии. Это предположение подтверждается наблюдениями, согласно которым в одних случаях были отмечены разрушения и иной ущерб в результате возникновения шаровой молнии, а в других – никаких неблагоприятных последствий ее появления не вызывало. Кроме того, по свидетельствам очевидцев, шаровая молния может распадаться либо бесшумно, либо путем взрыва. Остается предположить, что распад шаровой молнии путем взрыва отвечает большей энергии, чем бесшумный распад. Чтобы оценить возможность существования по крайней мере двух типов шаровой молнии, были проанализированы значения плотности энергии и их распределение. В табл. 4.1 собраны различные оценки плотности энергии и ряда других параметров шаровой молнии.

Сразу же отметим, что расчеты плотности энергии обеспечивают точность лишь по порядку величины; кроме того, точность уменьшают и систематические ошибки. Такие ошибки могут вноситься, скажем, за счет разности между наблюдаемым и истинным диаметрами шаровой молнии, поскольку эффект гало завышает реальный размер светящегося объекта. Видимый размер шаровой молнии может оказаться и меньше истинного из-за отсутствия данных об инфракрасном излучении объекта и распределении энергии по радиусу. Чувствительность значения плот-

Таблица 4.1

Сводка известных к настоящему времени данных о величине плотности энергии шаровой молнии *

Литература	Основные предположения при расчете (равенство энергий)	Полная энергия, Дж	Диаметр, см	Плотность энергии, Дж/см ³
<i>Наблюдения и анализ их результатов</i>				
[333]	Энергия механического разрушения	$4 \cdot 10^9$	30	$2,8 \cdot 10^5$
[1256]	Выделение тепла при распаде	—	—	—
[770]	То же	$3 \cdot 10^6$	10	$7,3 \cdot 10^3$ — $1,9 \cdot 10^4$
[484]	« «			$2,5 \cdot 10^3$
[862]	« «			$2,4 \cdot 10^3$
[12]	« «			$4 \cdot 10^3$
[341]	« «			$2,5 \cdot 10^3$
[15]	Энергия теплового разрушения	$9 \cdot 10^5$	10	$1,7 \cdot 10^3$
[1677], [1954]	То же	$3 \cdot 10^3$	2	$8,7 \cdot 10^2$
[534], [1972]	Выделение тепла при распаде	$1 \cdot 10^5$	15	85
[1120], [12]	Энергия механического разрушения	$3 \cdot 10^6$	60	26
[1937]	Энергия теплового разрушения	$1,9 \cdot 10^4$	12	21
[585]	Энергия образования молекул в продуктах сгорания	530	14	0,4
<i>Лабораторные эксперименты</i>				
[1629]	Энергия, рассеянная при коротком замыкании цепи	$4 \cdot 10^4$	15	23
[413]	Энергия, рассеянная при коротком замыкании цепи	$1 \cdot 10^3$	5	15
[341], [343] [345], [651], [1288]	Энергия, выделявшаяся при воспламенении молекул углеводородов	0,25	4	$7 \cdot 10^{-3}$
[1443, 1444]	Измеренная энергия ВЧ-разряда	10	15	$5 \cdot 10^{-3}$
[1731, 1733] [351, 769]	Энергия высоковольтного разряда	0,07	4	$2 \cdot 10^{-3}$
<i>Модели шаровой молнии</i>				
[1151, 1728]	Энергия, выделяющаяся в процессе горения вещества, инициированного разрядом обычной молнии	—	—	$2,4 \cdot 10^7$

Литература	Основные предположения при расчете (равенство энергии)	Полная энергия, Дж	Диаметр, см	Плотность энергии, Дж/см ³
[1020–1022]	Энергия разряда обычной молнии	$1 \cdot 10^6$	$(6 - 3) \times 10^2$	$2 \cdot 10^2$
[1522]	Плотность энергии полностью ионизованной плазмы	—	—	170
[1293]	Энергия квантового газа	$2,4 \cdot 10^5$	20	57
[1743–1746], [1641, 1647, 1648, 1651, 1670]	Энергия превращения озона в кислород	$4 \cdot 10^5$	50	6

* Все данные были разделены на три категории для более детальной характеристики источника. В силу субъективного характера оценки деления зависимых переменных точность значений приводится только по порядку величины. Наблюдаемые значения обычно определялись авторами первой из процитированных работ с помощью указанного метода и/или последующими исследователями в более позднее время. Можно думать, что надежность экспериментальных данных выше той, которую дают другие источники, вследствие более надежного характера подобных исследований. В значения плотности энергии, приписываемые авторам работ [343, 344, 413, 1629, 1632], были внесены изменения с учетом результатов измерений в [1443, 1444]; тем самым меняются исходные положения первых трех авторов. Реальность значений, превышающих $2 \cdot 10^2$ Дж/см³, сомнительна ввиду установленных Ричи [1522] и другими авторами физических пределов изменения этой величины. Можно считать, что среднее значение плотности энергии шаровой молнии составляет 1 Дж/см³.

ности энергии к ошибке определения диаметра шаровой молнии описывается производной от плотности энергии по диаметру D . Так, например, 30% погрешность наблюдаемого диаметра D приведет к 100% погрешности для плотности энергии. Такого рода ошибки в опубликованных данных наблюдений могут во многом объяснить противоречия между вычисленными значениями плотности энергии шаровой молнии.

Таким образом, следует отдавать себе отчет в том, что надежность приводимых значений плотности энергии сомнительна. В силу неопределенных ошибок при интерпретации данных наблюдений стандартные критерии надежности и достоверности к этим данным применить нельзя. Однако можно применить к анализу величин, выведенных из наблюдений, критерий относительной надежности, отражающий наличие физических пределов. Например, значения плотности энергии, превышающие $1 \cdot 10^3$ Дж/см³, явно чрезмерно велики и маловероятны. В работах [333, 583] отмечалась невозможность достижения таких значений вследствие того, что выделение энергии при взрыве тринитротолуола составляет примерно $2 \cdot 10^3$ Дж/см³. Кроме того, верхний предел для искомой величины может быть установлен исходя из надежных физиче-

ских оценок. К примеру, значение плотности энергии $1,7 \cdot 10^2$ Дж/см³ для полностью ионизованной плазмы воздуха [1522] является одним из таких граничных значений.

Нет сомнений, что принятие многими исследователями мало обоснованных больших значений плотности энергии шаровой молнии объясняется тем, что на этом пути открывается возможность некоторых весьма сложных и отчасти таинственных механизмов формирования молнии, которые учитывают ее столь большое энергосодержание. Однако маловероятно, чтобы какой-либо естественный источник энергии, заключенный в объеме шаровой молнии, до сих пор оставался необнаруженным и неидентифицированным. Указанная трудность отчетливо осознавалась Капицей [960, 962]; поэтому для поддержания непрерывного существования шаровой молнии он предложил использовать внешний источник энергии. К сожалению, даже и после проведения весьма интенсивных исследований не удалось обнаружить никакого эффективного внешнего естественного источника энергии для шаровой молнии. Поэтому нам следует признать весьма малую вероятность существования шаровой молнии с крайне большим значением плотности энергии и принять в качестве приемлемого диапазон изменения иско- мой величины от $2 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^2$ Дж/см³, который отмечен на рис. 4.1.

Указанный диапазон плотности энергии шаровой молнии отнюдь не исключает рассеяния больших количеств энергии при ее распаде, поскольку шар диаметром 30 см и максимальной плотностью энергии $2 \cdot 10^2$ Дж/см³ обладает запасом энергии $1 \cdot 10^6$ Дж и вполне может причинить тот ущерб, который приписывают взрывам шаровой молнии очевидцы. Возможность выделения энергии примерно на таком уровне обсуждалась в [1022]. Если принять в качестве верхнего предела плотности $2 \cdot 10^2$ Дж/см³, что находится в диапазоне плазменных параметров шаровой молнии, это явление можно будет оградить от разного рода мифов и спекулятивных умозаключений.

Необходимо учитывать, что обсуждаемые здесь данные могут не быть вполне репрезентативными, поскольку количество соответствующих наблюдений составляет лишь малую долю их полного числа. Среди общего числа примерно 1000 опубликованных отчетов [347] можно отметить не более 12 достаточно полных свидетельств, позволяющих оценить плотность энергии шаровой молнии. Поскольку шаровая молния относится к разряду относительно редких событий с частотой появления порядка $1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-9}$ км⁻²·мин⁻¹ [295, 413, 1314, 1788], можно ожидать публикации данных лишь об относительно энергоемких объектах. В результате оценки плотности и запаса энергии при учете лишь данных наблюдений могут оказаться завышенными. Так, например, в результате экспериментального исследования одного из типов шаровой молнии в [1443, 1444] было найдено значение плотности энергии порядка $5 \cdot 10^{-3}$ Дж/см³.

Вследствие большого диапазона возможных значений плотности энергии, представленного в табл. 4.1, и наличия двух наблюдаемых типов распада шаровой молнии возможно предположить существование

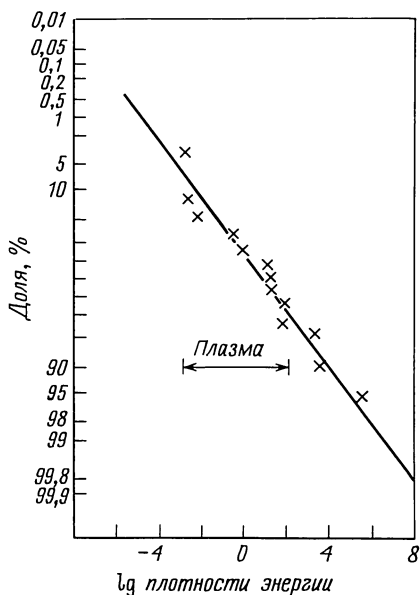


Рис. 4.1 Нормальное распределение для плотности энергии шаровой молнии, основанное на данных ее наблюдений в естественных и лабораторных условиях. Все эти данные включены в табл. 4.1. Искомое распределение было получено в результате построения зависимости десятичного логарифма плотности энергии от доли (в %) для каждого сообщения, отнесенного к полному числу имеющихся данных. Поскольку приведенное распределение можно охарактеризовать лишь одним углом наклона, представляющего данные прямой линии, то отсюда следует вывод о существовании в природе лишь одного типа шаровой молнии.

по крайней мере двух форм шаровой молнии: с повышенным запасом энергии и с меньшим запасом. Для количественной оценки этой гипотезы, а также с целью раскрытия природы этого явления был построен график данных о плотности энергии молнии.

При этом использовалось нормальное графическое распределение экспериментальных и выведенных на основе наблюдений значений плотности энергии из табл. 4.1. Кроме того, из рассмотрения были исключены менее надежные данные, в частности связанные с разного рода моделями и оценками. Нормальное распределение использовалось по причине его инвариантности к порядку величины данных. Искомое распределение было получено как зависимость десятичного логарифма плотности энергии от доли (в процентах) каждого свидетельства, отнесенной к полному числу имеющихся данных. При существовании только одного типа шаровой молнии кривая нормального распределения будет характеризоваться одним-единственным наклоном. В противном случае должны проявиться множественные наклоны кривой.

На рис. 4.1 представлено нормальное распределение для плотности энергии шаровой молнии, основанное на данных табл. 4.1. При наличии нескольких данных для одного события (например, в ситуации типа той, что отвечает первому столбцу табл. 4.1) использовалось одно усредненное значение. Включенные в табл. 4.1 три значения из работ [343, 345; 413; 1629, 1632] были исправлены с учетом более правильного отношения запасенной и вложенной энергии, найденного в экспериментах [1443, 1444] (подробности см. в разд. 4.2, случаи 7, 8 и 10, и разд. 7.5).

На графике также проведена наилучшим образом подогнанная пря-

мая, проходящая через точки на рис. 4.1. Хотя выравнивание данных с помощью прямой с постоянным наклоном не относится к числу достаточно точных процедур обработки экспериментальных данных, однако если иметь в виду точность исходных данных, то такой прием вполне обоснован. Каких-либо признаков многих наклонов (наличие изломов) не видно. Таким образом, на основании имеющихся данных наблюдений и выполненных оценок следует признать существование лишь одного типа шаровой молнии, что противоречит сделанным ранее предположениям.

Выполненный нами анализ данных о плотности энергии шаровой молнии позволяет выявить две новые особенности. Шаровая молния – явление с относительно малой плотностью энергии; она составляет по порядку величины 1 Дж/см^3 , а изменения значений охватывают диапазон $2 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^2 \text{ Дж/см}^3$. Кроме того, явление имеет лишь одну форму, способную распадаться как бесшумно, так и со взрывом.

4.4. Температура

Температура шаровой молнии может быть выведена из ее наблюдаемых свойств. Видимый цвет излучения шаровой молнии можно связать с излучательными характеристиками абсолютно черного тела. Отнесенная к единице поверхности полная мощность излучения абсолютно черного тела с температурой T в спектральном диапазоне $d\nu$ описывается уравнением Планка

$$dI_\nu = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{\nu^3 d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (4.59)$$

где частота излучения ν измеряется в Гц, $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка, $c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$ – скорость света, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Значение длины волны, соответствующее максимальной спектральной мощности излучения абсолютно черного тела, определяется из соотношения

$$\lambda_m T = 2898 \cdot 10^{-4} \text{ см} \cdot \text{К}, \quad (4.60)$$

так что шаровая молния красного цвета с $\lambda_m = 6300 \text{ Å}$ будет иметь температуру

$$T \approx 4600 \text{ К}. \quad (4.61)$$

Шаровая молния желтого цвета с $\lambda_m = 5800 \text{ Å}$ будет характеризоваться температурой 5000 К, голубого цвета с $\lambda_m = 4700 \text{ Å}$ – температурой 6200 К, белого цвета – температурой 10 000 К и выше. Если обратиться к тем наблюдениям шаровой молнии, в которых отмечался голубой или бело-голубой цвет ядра молнии, окруженного пылающим

нимбом, то необходимо признать, что температура шара может меняться вдоль радиуса.

Следует помнить, что использование соотношения типа (4.60) зависит от идентификации цвета наблюдателем, которая в свою очередь зависит от цветового восприятия глаза человека. Реакция глаза на свет явилась предметом недавних исследований. Результаты работы [592] позволили установить, что ближнее инфракрасное излучение с длиной волны около 1 мкм (которое обычно считается выходящим за пределы чувствительности нормальным зрением) воспринимается глазом как цвет, характеризующийся примерно половиной длины волны инфракрасного излучения. Таким образом, температура шаровой молнии, определенная из (4.60) по цвету светящегося предмета, будет примерно вдвое меньше истинной в том случае, если молния сильно излучает в ближней инфракрасной области. Возможна также и разница в восприятии инфракрасного излучения разными наблюдателями, что также могло сказаться на опубликованных ими отчетах о наблюдениях шаровой молнии.

Температура шаровой молнии была оценена в работе [585]. Подробности самого наблюдения описаны выше в разд. 4.2 (случай 4). При этом наблюдении были взяты четыре пробы воздуха в местах нахождения светящегося шара. Как оказалось, отношение концентраций озона и окислов азота менялось от 0,8 до 2,5. Выполненные позже лабораторные измерения характеристик тлеющего разряда позволили установить, что это отношение может меняться от 1 до 6 в зависимости от разности потенциалов между электродами, причем с ростом этой величины отмечалось падение отношения концентраций. Измеренное отношение концентраций соответствовало разности потенциалов между шаровой молнией и землей порядка 300–400 кВ.

Было обнаружено, что отношение концентраций озона и окислов азота уменьшалось по мере повышения температуры разряда, причем температуре порядка 4000 К соответствовало значение искомого отношения 0,8. Следует помнить, что визуальные наблюдения приводят к завышенным оценкам температуры по яркости и цвету плазменного объекта. Основываясь на этих оценках, можно было бы оценить температуру шаровой молнии порядка 14 000 К.

В работе [1293] исследовалось существование плазменного шара, целиком состоящего из свободных электронов и положительных ионов, и был выполнен расчет его температуры. При этом число электронов и положительных ионов считалось равным, так что условие квазинейтральности плазмы соблюдалось как в малых элементах объема, так и в целом для всего шара. Кроме того, предполагалось, что плазма сформировалась в воздухе и, следовательно, ее плотность была эквивалентна плотности окружающего воздуха.

Выполненный с помощью квантово-механического подхода анализ показал, что ионизованная масса газа может находиться в метастабильном состоянии. Связь в единое целое могла бы обеспечиваться за счет сил обменного взаимодействия в электронном газе. Энергия обменного взаимодействия электронов имеет чисто квантовую природу и характе-

ризует слабые силы притяжения между электронами с противоположно направленными спинами. Обычные силы электростатического отталкивания между электронами могли быть уравновешены за счет влияния положительных ионов, вкрапленных в электронный газ. Автор работы [1293] пренебрег энергией поляризации ввиду ее малости по сравнению с энергией обменного взаимодействия. Таким образом, преобладающий вклад в силы сцепления для квазиравновесной плазмы с температурой T вносят силы межэлектронного обменного взаимодействия.

В работе [1293] получено выражение для средней энергии обменного взаимодействия электронов, содержащихся внутри облака с концентрацией n :

$$E_{\text{обм}} = - \frac{e^2 n h^2}{8 \pi m k T_{\text{обм}}}; \quad (4.62)$$

здесь введено обозначение $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Предположим далее, что плазменный сгусток будет находиться в устойчивом состоянии все время, пока силы обменного взаимодействия электронов будут уравновешены кинетическими силами расширения. С учетом максвелл-больцмановского распределения частиц по энергиям приходим к простой связи между тепловой энергией газа и его температурой:

$$E_{\text{тепл}} = (3/2) k T_{\text{обм}}. \quad (4.63)$$

Можно ожидать, что плазменный сгусток будет устойчив до тех пор, пока $E_{\text{обм}} \geq E_{\text{тепл}}$. Приравняв две энергии, получим искомую температуру:

$$T_{\text{обм}}^2 = \frac{e^2 n h^2}{12 \pi m k^2}. \quad (4.64)$$

Величина $T_{\text{обм}}$ была рассчитана для случая, когда концентрация электронов $n = 2,69 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$, т.е. равнялась концентрации молекул воздуха:

$$T_{\text{обм}} = 632 \text{ К}. \quad (4.65)$$

Соответствующее значение плотности энергии равно

$$\varepsilon = 0,35 \text{ Дж/см}^3. \quad (4.66)$$

Результат получен в предположении, что в плазме, состоящей из электронов и положительных ионов (нейтральной в малых элементах объема), основную роль играют силы обменного взаимодействия электронов, и плазма может остаться устойчивой, если ее тепловая энергия достаточно мала. В упомянутой выше работе практическое влияние энергии, затрачиваемой на первичную ионизацию среды, не рассматривалось. Можно также предполагать, что в ионизованном газе начнется

довольно быстрая рекомбинация, приводящая к сокращению времени жизни плазмы.

Представление о репрезентативности рассчитанной цветовой температуры как истинной температуры шаровой молнии правомерно отнюдь не в любом случае. В природе известно несколько примеров излучения света без установления теплового равновесия. Часто наблюдаемым и хорошо изученным примером такого рода является биолюминесценция, т.е. излучение света живыми организмами. Способностью излучать свет обладают некоторые виды бактерий, грибов, простейших одноклеточных, рыб и насекомых. Возможно, наиболее часто встречающимся или по крайней мере самым известным объектом подобного рода является светлячок.

Биолюминесценция обусловлена протеканием химических реакций, в продуктах которых образуются возбужденные молекулы, которые затем деовозбуждаются и рожают кванты света. Лежащие в основе протекания этих процессов химические реакции (хемилюминесценция) хорошо известны и могут быть воспроизведены в лабораторных условиях.

Излучение света светлячком обусловлено хемилюминесцентной реакцией окисления молекулы люциферина в присутствии фермента-катализатора. Соответствующий цикл химических реакций был подробно исследован в работах [1613, 1927]. Излучение образуется при переходах между внутренними состояниями молекул, причем один фотон приходится на одну реакцию с молекулой люциферина. При этом излучательный переход в молекуле обусловлен химической реакцией и не связан с каким-либо источником тепла.

Свойства и характеристики излучения при биолюминесценции и хемилюминесценции никак не связаны с цветовой температурой объектов. Соответствующие реакции генерируют излучение в видимой области при комнатной температуре. Следовательно, истинная температура излучающей системы равняется примерно 20°C (300 K), тогда как цветová температура, согласно уравнению (4.60), равна 5000 K. Высказывались предположения, что видимый свет от шаровой молнии обусловлен протеканием определенных хемилюминесцентных реакций, сходных с теми, которые ответственны за излучение светлячков.

Недавние лабораторные исследования [1443, 1444] позволили установить, что внутримолекулярные переходы ответственны за излучение видимого света одним типом устойчивой шаровой молнии в виде светящегося воздушного шарика, созданной в лаборатории. Соответствующие реакции были инициированы чисто столкновительными процессами обмена энергией между частицами, а не химическими реакциями. Поступающая энергия поглощалась и накапливалась на метастабильных уровнях и перераспределялась между другими молекулами. Дальнейшие подробности см. в разд. 7.5 «Безэлектродные разряды».

Испускание света не было связано с тепловыми процессами, и понятие цветовой температуры к ним неприменимо. Можно предположить, что приложение понятия цветовой температуры к явлению шаровой молнии тоже может оказаться неприемлемым.

4.5. Радиация

При попытках объяснить наблюдаемые свойства шаровой молнии высказывались предположения о радиоактивной природе явления. В работе [12] был рассмотрен ряд ядерных реакций с участием изотопов ^{16}O , ^{15}O , ^{14}N и ^{17}F , а также образованием протонов, позитронов и γ -квантов. Кванты имели бы энергию порядка 0,5 МэВ и длину пробега в воздухе порядка нескольких сотен метров. В работе [865] отмечено, что подобное γ -излучение представило бы серьезную угрозу для здоровья наблюдателя. На расстоянии 2 м от источника поглощенная доза излучения составила бы от 175 до 325 рад/с. Такая доза неминуемо вызовет лучевую болезнь, а возможно, и смерть.

Были высказаны предположения исследовать термолюминесцентные свойства различных материалов (включая воду), находящихся вблизи или контактирующих с шаровой молнией. Если шаровая молния обладает радиационными свойствами, то в некоторых материалах может быть возбуждена термолюминесценция. Термолюминесценцией называют свойство твердых тел излучать при нагреве свет. В обычных условиях камень испускает свет при первом нагреве, но теряет способность к термолюминесценции при повторном нагреве после охлаждения. Однако если образец облучается мощным рентгеновским или γ -источником после первичного нагрева и охлаждения, то его способность к термолюминесценции восстанавливается.

Согласно теории люминесценции, радиация вызывает возбуждение электронов и переходу их в зону проводимости кристалла. Возбужденные электроны попадают в ловушки и оказываются там в связанном состоянии, образуя метастабильные уровни, или F -центры. При нагревании электроны освобождаются из ловушек и вызывают наблюдаемую термолюминесценцию кристалла. В подходящем материале может быть детектирована мощность поглощенной дозы излучения порядка нескольких сотен рад/с. Если бы время жизни шаровой молнии превышало 1 с и равнялось, например, 3 с, то близлежащий предмет мог получить дозу облучения порядка 10^3 рад.

Автор [1229] исследовал на γ -радиоактивность образец, взятый с колокольни церкви, которая, по свидетельству очевидцев, была повреждена шаровой молнией в 1638 г. В статье [1785] приведено полное драматизма описание грозы, приведшей к образованию шаровой молнии, и размеров нанесенного повреждения. С помощью обычных для термолюминесценции методов был исследован образец материала с сохранившейся с тех времен колокольни. Никаких данных об увеличенном выходе термолюминесценции от образца получено не было. Часть образца была подвержена облучению от γ -источника радиоактивного кобальта-60. Пик термолюминесценции был зафиксирован при 110°C и не был стабильным даже при комнатной температуре. Минимальное значение детектированной дозы облучения составило 100 рад. Таким

образом, в данном случае факт облучения образца сколько-нибудь интенсивным радиоактивным излучением выявить не удалось.

Аналогичная оценка выхода термoluminesценции от кирпичей дома, в который попала шаровая молния, была выполнена в [673]. Возраст строительных материалов в данном случае составлял всего 25 лет, и нормальная мощность поглощенной дозы излучения была весьма низкой, не превышая 0,5 рад/год. Исследование материала не подтвердило факта облучения заметной дозой радиации. Исходя из данных для контрольных образцов и чувствительности использованной аппаратуры, удалось установить, что шаровая молния могла быть источником радиации, обеспечивающим долю излучения менее 5 рад. Таким образом, выводы авторов двух цитированных выше работ [673, 1229] совпадают, и можно сделать вывод, что шаровая молния не является заметным источником γ -излучения.

4.6. Магнитное поле

Многие исследователи шаровой молнии предполагали, что связанные с ней электрическое и магнитное поля имеют фундаментальное значение для процессов формирования и/или поддержания «жизни» шаровой молнии. Однако лишь немногие использовали наблюдаемые характеристики для анализа электрических и магнитных полей, связанных с шаровой молнией.

В работе [381] рассчитана индукция магнитного поля (150 Гс), связанного с присутствием шаровой молнии. В основу расчетов легли данные наблюдений 1811 г.: раскачивание церковного колокола стало требовать больших усилий после внезапного появления шаровой молнии. Согласно предположению Блэра, раскачивание колокола сдерживалось магнитным полем от шаровой молнии.

Автор [381] упростил задачу, заменив колокол металлическим диском, вращающимся в магнитном поле. Электрический потенциал, возникающий при пересечении диском магнитных силовых линий, определяется выражением

$$V = NHA \cdot 10^{-8}, \quad (4.67)$$

где N – число оборотов диска в секунду, A – площадь диска, H – напряженность магнитного поля в гауссах, V – потенциал электрического поля в вольтах.

Энергия, рассеянная при протекании электрического тока в металле на участке с сопротивлением R и падением напряжения V , находится из соотношения

$$E = 2V^2/R; \quad (4.68)$$

здесь появление множителя 2 обусловлено вращением диска в магнитном поле, а величина E измеряется в Дж.

Согласно предположению, работа электрических сил была эквива-

лентна работе, затрачиваемой звонарем на удар в колокол. Эта последняя работа примерно равна произведению силы в 10 кГ на путь в 1 м. Таким образом, $E = 100$ Дж. Омическое сопротивление колокола со средним диаметром 70 см было положено равным $3,5 \cdot 10^{-6}$ Ом, толщина стенки равнялась 7 см, длина стенки считалась равной 80 см; удельное сопротивление бронзы взято равным $18 \cdot 10^{-6}$ Ом·см.

Полагая $E = 100$ Дж, с помощью записанных выше уравнений легко рассчитать напряженность магнитного поля:

$$H = 150 \text{ Гс.} \quad (4.69)$$

Понятно, что полученное значение дает лишь оценку искомой величины, поскольку форма колокола больше похожа на пологий конус, а вовсе не на диск. Величину сопротивления также нельзя рассчитать точно, поскольку неизвестны распределение вихревых токов и характер их протекания по стенке колокола.

Вычисленное значение напряженности магнитного поля шаровой молнии оказалось достаточно большим; оно не было подтверждено результатами других наблюдений. Полученные данные позволяют заключить, что если шаровая молния индуцирует внешнее магнитное поле, то в ней должна существовать цилиндрическая составляющая тока и, вероятно, вращательная структура. Наличие магнитного поля может также повлиять на характер движения шаровой молнии, поскольку ее поле будет взаимодействовать с другими аналогичными полями в окружающем пространстве.

4.7. Заключительные замечания

Необходимо ясно осознавать, что пределы ошибок в расчетах, выполненных в данной главе, могут быть весьма значительными. Исходные данные, на которых строятся расчеты, являются в определенной степени неполными, сами события невозможно ни воспроизвести снова, ни подвергнуть необходимому контролю, и, наконец, сделанные оценки исходят из предполагаемых значений ряда параметров. Так, например, средний размер шаровой молнии порядка 10–15 см выбирался из условия согласования оценок наблюдателей.

Если бы истинный размер шаровой молнии превышал указанное среднее значение, то вычисленное значение плотности энергии оказалось бы значительно меньше найденных ранее. В работах [1275–1277, 1675] описывается случай появления молнии, которая проникла внутрь помещения через застекленное окно и проделала в нем дыру диаметром 1,6–1,7 см. Фотография оконного стекла с отверстием почти круглого сечения была воспроизведена авторами упомянутых работ, и весьма часто ее приписывают проявлению шаровой молнии. Аналогичная фотография оконного стекла с небольшой дыркой обсуждалась в работах [740, 1198], и ее также относят к факту появления шаровой молнии.

Юман [1826] провел измерения диаметра канала молний и отметил факт существования двух типов каналов. Большая часть результатов измерений попадает либо в группу со значениями 2–5 мм, либо в группу со значениями 2–5 см. Следовательно, если шаровая молния формируется при разряде обычной молнии, то диаметр ее сердцевины не должен превышать 5 см. Отсюда также следует, что шаровая молния диаметром 10–30 см могла сформироваться в результате значительного расширения шарообразного сгустка, первоначальный размер которого соответствовал диаметру канала обычной молнии. Кроме того, это позволяет предположить наличие радиальной структуры в шаре и зависимости плотности энергии от радиуса; более высокие значения в сердцевине шара, а меньшие значения – во внешней области.

Можно прийти к заключению, что видимый диаметр шара не определяет истинной границы молнии и что существует не видимая глазом внешняя оболочка, имеющая определенное протяжение и постепенно сливающаяся с окружающим воздухом. Отсюда неизбежно следует, что опубликованные результаты наблюдений размеров шаровой молнии в действительности оказываются заниженными. Граница шаровой молнии не может определяться ее видимой границей, определяемой по размеру излучающей области. Это соответствует нашим естественным представлениям о том, что резкие скачки в природе, как правило, встречаются редко. Граница шаровой молнии может быть размытой, возможно, меняющейся со временем и должна иметь плавный переход к окружающему воздуху.

С учетом сказанного распределение энергии в шаровой молнии может простирается за пределы видимой ее границы и захватывать область размером в два или три диаметра. Естественно, что увеличение диаметра шаровой молнии вдвое снизит плотность энергии со значения, скажем, $1 \cdot 10^3$ Дж/см³ до более приемлемого значения $1 \cdot 10^2$ Дж/см³.

Существование шаровой молнии накладывает определенные требования на характер процесса ее формирования. Шаровая молния должна обеспечиваться энергией либо от внутреннего источника, либо непрерывно получать энергию извне. Капица [960] предложил в качестве внешнего источника энергии резонансный СВЧ-генератор, однако подобного рода излучение в природе обнаружить не удалось. Уже много лет назад были рассмотрены параметры внутренних источников энергии шаровой молнии, основанных либо на процессах горения углеводородных смесей [857], либо на использовании энергии испаренных атомов металлов [1290]. Экспериментальные исследования позволили проверить некоторые из этих ранних гипотез и продемонстрировать ряд современных достижений, связанных, в частности, с накоплением энергии на метастабильных уровнях молекул. Более подробно эти эксперименты обсуждаются в разд. 7.3, 7.4 и 7.5.

Источниками потерь энергии массой (возбужденного) газа должны быть излучение акустических волн, оптическое и инфракрасное излучение, конвективный теплообмен и столкновение с обменом энергией с окружающим газом. Эти потери должны уравниваться поступле-

нием энергии от внешних источников или восполняться за счет перераспределения внутренней энергии. С большой вероятностью можно считать, что в нормальных условиях подвод запасенной энергии в каналы ее излучения осуществляется относительно медленно, ибо зависит от протекания в среде процессов столкновений. Если какие-либо внешние возмущения ускоряют этот процесс, то в результате может произойти быстрое перераспределение энергии и зарядов, которое приведет к наблюдаемому взрыву шаровой молнии. Таким образом, можно предположить, что два типа процессов распада шаровой молнии не обязательно связаны с двумя различными по форме явлениями. Распад молнии путем взрыва представляет собой просто видоизмененную форму бесшумного распада. Модели шаровой молнии, предложенные Пауэллом и Финкельстейном [1443, 1444] и Барри [341, 342], согласуются с этими предположениями. Однако первая из этих моделей представляется более реалистичной, чем вторая.

Фотографии шаровой молнии

5.1. Фотодокументы

По сравнению с большим количеством фотографий обычной молнии число снимков шаровой молнии незначительно. По приближенной оценке, имеется более 100 000 фотографий обычной молнии. В то же время известно лишь около 60 опубликованных фотоснимков или рисунков природной шаровой молнии. Конечно, некоторые из них представляют собой повторные публикации более ранних оригиналов или мало отличающиеся изображения тех же объектов. После отбора для обсуждения осталось всего 24 отдельных и явно различных снимка (см. табл. 6.2 гл. 6). Более того, анализ каждого такого фотоснимка, соответствующего ему сообщения и последующего обсуждения приводит к выводу, что большинство этих снимков сомнительно.

При оценке остальных снимков исследователь должен сохранять скептицизм до тех пор, пока в его распоряжении не окажутся надежные и однозначные доказательства. Нельзя считать фотографию единственным и полным подтверждением. Нужно изучить и другие данные, в том числе сообщения о явлениях, свидетелями которых было много людей, и физические эффекты, вызванные явлением. Косвенные данные следует принимать во внимание, но не считать их первичными. Необходимо подчеркнуть, что имеющиеся фотографии сами по себе не являются надежным вещественным и полным документальным свидетельством для понимания природы и объяснения явления шаровой молнии.

Фотографии, на которых, как полагают, запечатлена шаровая молния, иллюстрируют такие же противоречия, как и обычные сообщения о шаровой молнии. На одной фотографии она кажется абсолютно сферической, на другой – вытянутой, на третьей – явно теряющей часть своей массы, на четвертой – находящейся в хаотическом движении, на пятой –двигающейся прямолинейно, а некоторые фотографии явно сомнительны. В общем, эти фотографии соответствуют характеру различных сообщений: они в какой-то мере противоречат друг другу и кажутся имеющими мало общего.

Чтобы выявить смысл в этих фотографиях и систематизировать их, они были разбиты на восемь классов, или типов. Это разбиение на

типы основано на наблюдаемых свойствах шаровой молнии. Каждый тип молнии отражает какое-то одно ее общее свойство, которое легко идентифицируется и выделяется среди других видов. Эти типы таковы:

- | | |
|---------------------------|--------------------------------|
| 1. Пульсирующее свечение. | 5. Стационарный объект. |
| 2. Многократный след. | 6. Непрерывный одиночный след. |
| 3. Распад канала молнии. | 7. Естественные разряды. |
| 4. «Фейерверк». | 8. Искусственные явления. |

Эти восемь типов соответствуют видимым различиям между разными фотографиями и многочисленными сообщениями. Такое разбиение также позволяет легко идентифицировать ложные сообщения и снимки.

Трудно переоценить значение фотографий шаровой молнии в качестве пригодных для изучения визуальных изображений этого явления. Кроме того, эти фотографии могут дать гораздо больше сведений, чем простые сообщения наблюдателей. К сожалению, фотографии шаровой молнии публикуются гораздо реже, чем сообщения о ней. А так как появление шаровой молнии – редкое событие, то ясно, что ее фотографии – это тоже большая редкость. Ниже будет показано, что хотя некоторые фотографии и считались снимками шаровой молнии, большинство их ошибочно и лишь немногие вправе считаться истинными.

В табл. 5.1 собраны все известные автору ссылки на работы, в которых приводятся и обсуждаются фотографии, идентифицированные как фотографии шаровой молнии. Для полноты и удобства пользования приведены все известные ссылки.

Таблица 5.1

Основная литература о сообщениях и обсуждениях фотографий или рисунков, идентифицированных как изображения естественной или искусственной шаровой молнии

Аббот [1]	Дердеевский [550]
Арениус [305]	Дженнингс [933]
Аткинсон [313]	Диксон [581]
Балтин [332]	Дмитриев [587]
Барри [340]	Дмитриев, Дерюгин и Калининевич [580]
Батц [454]	Дэвис и Стандлер [562]
Бауман [354]	Жокке [1975, 1976]
Бауэр [353]	Капица [961]
Бейли [326]	Картрайт [487]
Бенедикс [369]	Кейд и Дэвис [471]
Боначина [392]	Колобков [1012]
Бранд [413]	Кун [1032]
Вальтер [1880]	Леонов [1058]
Вимейстер [1842]	Матиас и Бухсбаум [1185]
Вольф [1941–1943]	Матуйо [1183]
Гейст [742]	Меро [1215]
Губерт [886]	Мюлайзен [1270]
Давыдов [558]	Мюллер-Гиллебранд [1274, 1275]
Данн [606]	

Петерсен [1357]
 Польте [1437, 1438, 1439]
 Прочнов [1457, 1458]
 Рааб [1468]
 Ритчи [1520, 1522]
 Россман [1535]
 Рутерс [1549]
 Саланов [1588]
 Сингер [1641]
 Скотт [1608]
 Стекольников [1676]
 Таунсенд [1796]
 Телетов [1728]

Томпкинс и Родней [1787]
 Томпкинс, Родней и Годдинг [1788]
 Трубридж [1809, 1810]
 Фон Гайдингер [797]
 Фон Килински [984]
 Холцер и Уоркмен [875]
 Холцер, Уоркмен и Сноди [876]
 Хэтч [829]
 Шагин [1619]
 Шемински и Вольф [1569]
 Шнейдерманн [1583]
 Эрикссон [625]
 Юнг [1966]

5.2. Типы фотографий

5.2.1. Тип 1. Пульсирующее свечение

Этот тип характеризуется одиночным линейным и непрерывным следом, принадлежащим одиночному светящемуся объекту, интенсивность свечения которого изменяется в процессе движения.

Фотографии этого типа шаровой молнии мало отличаются от фотографий четочной молнии, хотя имеется и одно явное отличие. Это явление имеет место вблизи земли и неподалеку от наблюдателя, в то время как четочная молния удалена и наблюдается обычно на высоте туч. Рассматриваемый тип характеризуется также большим числом сомнительных фотографий и неправильных трактовок. Все эти фотографии при публикации считались относящимися к шаровой молнии.

На рис. 5.1 и 5.2 приведены две фотографии, демонстрирующие удивительный сегментированный след [587, 588]. Они были сняты во время грозы, сопровождавшейся разрядами обычных молний. Рис. 5.2—это увеличенная правая часть фотографии рис. 5.1. Было проведено подробное изучение модуляции интенсивности [591], что позволило оценить относительную яркость свечения вдоль следа. Модуляция оказалась близкой к 100%. Подробное исследование предполагает движение в трех измерениях. Рис. 5.2 следует сравнить с рис. 5.33, где приведена фотография разряда обычной молнии, полученная с помощью кинокамеры. Рис. 5.33 и результаты его изучения показывают, что разряды обычной молнии трехмерны и при регистрации однокадровой камерой могут дать весьма различные двумерные изображения.

Кажется вполне правдоподобным предположение о том, что многие из так называемых фотографий шаровой молнии, полученных с помощью однокадровых камер,—это снимки разряда обычной молнии, которая на небольшой части своей траектории совершает быстрые хаоти-

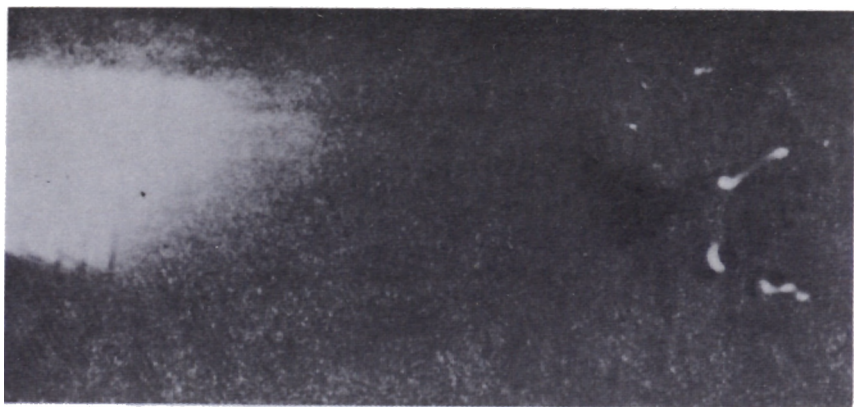


Рис. 5.1. Сделанная во время бури фотография модулированного по интенсивности свечения, приписываемого шаровой молнии [588].



Рис. 5.2. Увеличенная правая часть фотоснимка рис. 5.1 с модулированным по интенсивности свечением [588]. След, приписываемый шаровой молнии, изучался с целью определения относительного диапазона изменения интенсивности свечения вдоль него. Снимок воспроизводился в работе [591].



Рис. 5.3. Фотография следа с модулированной интенсивностью свечения, приписываемого шаровой молнии [933]. Само явление визуально не наблюдалось, и есть подозрение, что это – изображение уличного фонаря, а модуляция интенсивности связана с движением камеры. Снимок воспроизводился в работах [1042, 340, 313, 471, 454, 562].

ческие движения. Совокупность хаотических движений в небольшом объеме пространства привела бы к тому, что плотность тока в этом элементе объема оказалась бы выше, чем на линейной части траектории. Поэтому такой объем характеризовался бы более ярким и более продолжительным свечением, чем линейная часть разряда.

На рис. 5.3 приведена, пожалуй, наиболее спорная из фотографий, связываемых с шаровой молнией. Она была опубликована в [933] и воспроизводилась в работах [313, 340, 453, 471, 1042]. Эта фотография была предметом многочисленных дискуссий. Согласно сообщению, сама шаровая молния непосредственно не наблюдалась, а была случайно сфотографирована во время грозы. Небольшое размытие фона приписывалось непроизвольной мышечной реакции снимавшего на разряд молнии. В оригинальной фотографии обращает на себя внимание изменение цвета пятен вдоль следа. Сначала они красные, затем становятся желтыми и, наконец, белыми. При тщательном изучении снимка можно также обнаружить явное отражение свечения в окнах здания. В работах

[313, 1042] отмечаются и другие детали, отсутствующие в первой работе [933].

Хотя многие считали эту фотографию несомненно связанной с шаровой молнией, сам снимок и место события были критически изучены в работе [562]. Авторы смогли с точностью до 30 см связать положение яркого пятна в левой части фотографии с положением 140-ваттной натриевой лампы уличного фонаря. Несмотря на заверения снимавшего, что во время съемки лампа не горела, по данным электрической конторы было установлено, что в это время лампа на самом деле была включена.

Натриевые лампы в Англии работают от сети переменного тока с частотой 50 Гц (50 периодов в секунду). Модуляция интенсивности питаемых таким током натриевых ламп уличных фонарей достигает примерно 50% (за полупериод длительностью 0,01 с). В течение полупериода температура паров натрия может изменяться на 1000°C, но усредненное по времени или среднеквадратичное значение остается постоянным. Это означает, что при фотографировании натриевой лампы уличного фонаря движущейся камерой может получиться квазилинейный след с модулированной интенсивностью. Однако вместо медленного изменения цвета изображения вдоль траектории должны происходить какие-то изменения цвета, в течение каждого полупериода связанные с изменением температуры паров натрия.

Отмечено также, что пятнистая структура заметна и в тени на краю, связанной, видимо, с краем рамы окна, через которое была сделана фотография. Поскольку это пятнистое изображение не могло наложиться на тень оконной рамы изнутри, нельзя исключить, что все рассматриваемое событие связано с движением камеры и уличным фонарем. Согласно дополнительному частному сообщению одного из авторов работы [562], изменение цвета в верхнем правом углу снимка связано с более темным небом в этом месте и эффектом виньетирования. Кроме того, он смог воспроизвести тот же эффект, что и на снимке, фотографируя уличный фонарь. Вообще фотографии уличных фонарей и их ошибочная идентификация с разрядом обычной молнии – довольно распространенное явление. Эта общая трудность была осознана уже давно (см. работу [366], которая появилась вскоре после публикации снимка, ошибочно идентифицированного как фотография четочной молнии [1502]). Поэтому напрашивается вывод о том, что многие фотографии шаровой молнии, сделанные ручной однокадровой фотокамерой, связаны с движением камеры и искусственными источниками света (такими, например, как уличные фонари).

5.2.2. Тип 2. Многократный след

Этот тип фотографий характеризуется многочисленными связанными и точно повторяющимися друг друга следами, вызванными, по всей

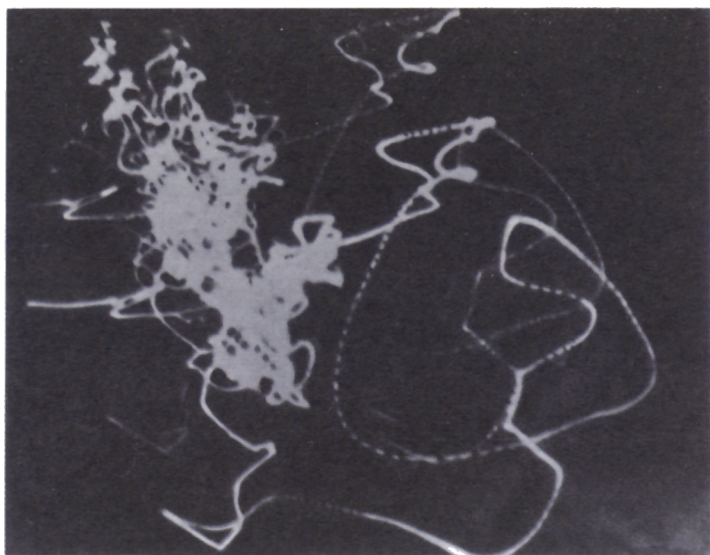


Рис. 5.4. Фотография, сделанная Р. Спикерманом в 1908 г. во время грозы [1]. Предполагалось, что на ней зафиксированы следы серии связанных разрядных траекторий. Эти следы связаны, по-видимому, с движением камеры. Фотоснимок воспроизводился в работах [875, 1275, 1726].

видимости, некоторым числом светящихся объектов, изображения траекторий которых постоянно повторяют друг друга.

Многие фотографии, приписываемые шаровой молнии, содержат многократные и явно повторяющиеся следы. Они выглядят так, как будто изображения на них связаны с согласованным движением нескольких шаровых молний. Иногда эти многократные следы промодулированы по интенсивности, т.е. имеют вид прерывистых линий. Вполне вероятно, что такие фотографии являются результатом движения камеры и их идентификация с шаровой молнией ошибочна.

Типичный пример – фотография, приведенная на рис. 5.4 [1]. Она была сделана Спикерманом в 1908 г. Согласно сообщению, молния находилась на некоторой высоте над землей. В работе [1275], в которой была воспроизведена фотография, отмечалось, что во время съемки камера двигалась. Эта же фотография приводилась в работе [875] в качестве подтверждения того факта, что одновременно может происходить много разрядов, каждый из которых одинаково реагирует на локальное электрическое поле и распределение объемного заряда. Однако имело место движение камеры, которое, как сейчас считается, и послужило причиной возникновения следов.

В работе [875] была опубликована еще одна похожая фотография (рис. 5.5). Событие произошло около земли неподалеку от наблюдателя,

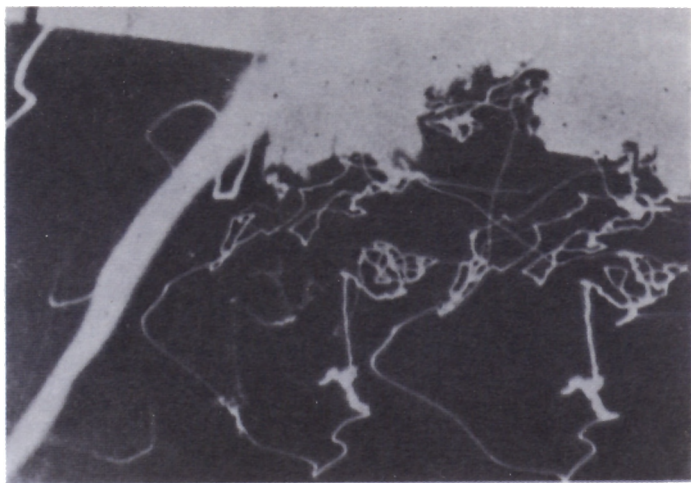


Рис. 5.5. Фотография с множественными изображениями разряда молнии, принимавшаяся за фотографию движущейся шаровой молнии [875]. Есть подозрение, что появление тождественных следов связано с движением камеры.

и были зафиксированы множественные изображения. На фотографии явно видны по крайней мере три совершенно одинаковых изображения. Наблюдатели не сообщали о наличии шаровой молнии, и есть подозрение, что камера двигалась.

Другая фотография с множественными следами, на которой, как сообщалось, изображена шаровая молния, представлена на рис. 5.6 [1619]. Эта фотография была сначала опубликована в том виде, в котором она показана здесь (с тремя близкими к вертикали светящимися следами). В работах [1726–1728] она воспроизводилась уже с одним следом. Нижние концы этих следов явно заканчиваются в месте расположения лампы. Хотя связаться с фотографом не удалось, мы пришли к выводу, что на снимок повлияло движение камеры и отождествление его с фотографией шаровой молнии ошибочно.

Другие фотографии, ошибочно считавшиеся фотографиями шаровой молнии, приведены на рис. 5.7 [1973] и 5.8 [1965]. На рис. 5.7 повторяющийся след довольно слаб и наиболее отчетлив слева от центра фотографии. Эта фотография обсуждалась в работе [1973], где с помощью других похожих фотографий было показано, как могут появиться такие множественные следы при движении камеры при наличии в поле зрения искусственных источников света. В работе [1973] подчеркивалось, что камера не двигалась, а источников света не было. Однако, учитывая сложность и запутанность различных заявлений, мы не можем признать, что на этой фотографии запечатлена шаровая молния, и полагаем, что следы на ней связаны с движением камеры.

Фотография рис. 5.8 [1965] (она воспроизводилась также в [581])

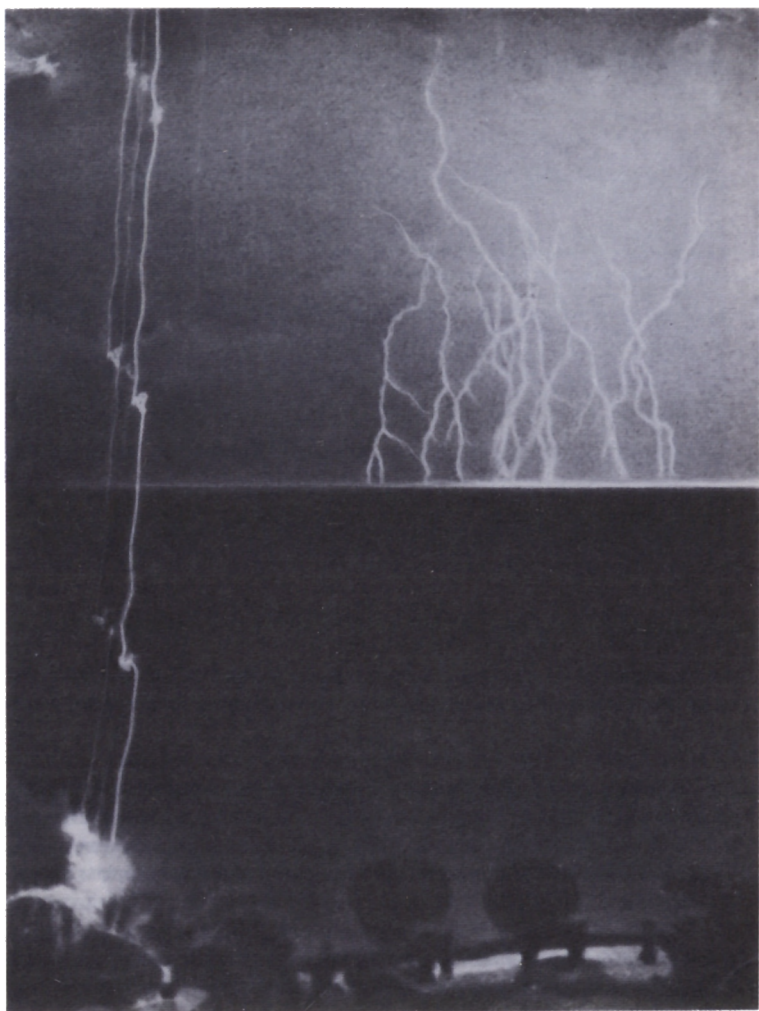


Рис. 5.6. Фотография множественного следа, идентифицированного как след шаровой молнии [1619]. Множественность изображения связана, по-видимому, с движением камеры. Фотография воспроизводилась также в работе [1728].

легко отождествляется со снимком лампы горящего уличного фонаря, полученном при движении камеры. Подозрения, что движение камеры и уличные фонари часто могут приводить к появлению множественных изображений, похожих на изображения шаровой молнии, высказывались ранее в работах [1437, 1438, 1608]. На рис. 5.9 приведена специально сделанная фотография с множественными следами «молнии» [1437].



Рис. 5.7. Фотография со следом, связанным, как считалось, с шаровой молнией [1973]. Наличие слабого дублирующего следа позволяет думать, что имело место движение камеры. Воспроизводилась также в работе [353].



Рис. 5.8. Фотография, полученная, как полагают, при движении камеры [1965]. Ее следует сравнить с предыдущими фотографиями настоящего раздела. Воспроизводилась также в работе [581].

Фотография, приведенная на рис. 5.10, была сделана в 1955 г. и считалась фотографией шаровой молнии. Сверху и справа от основного следа виден слабый повторяющийся след. Нерезкость основного следа наводит на мысль, что снимок получен движущейся камерой. Фотография была первоначально опубликована в [1942, 1943], а затем воспроизводилась в [961, 1270].

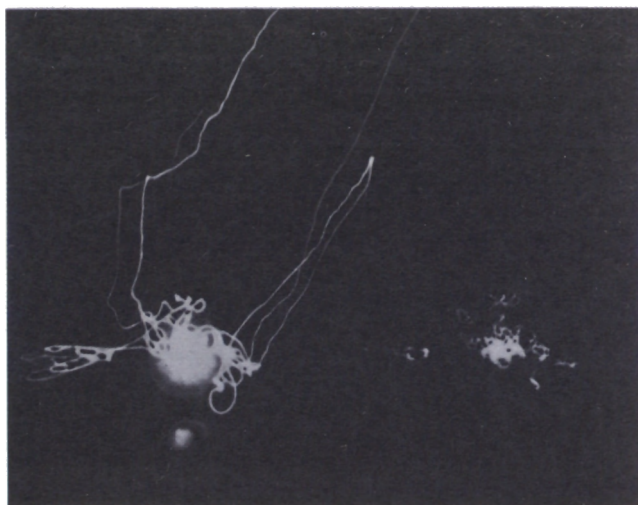


Рис. 5.9. Фотография нескольких уличных фонарей, полученная при намеренном движении камеры [1437]. Следы на ней иллюстрируют характер подобных множественных следов и схожи со следами на предыдущих фотографиях настоящего раздела. Воспроизводилась также в работе [1438].

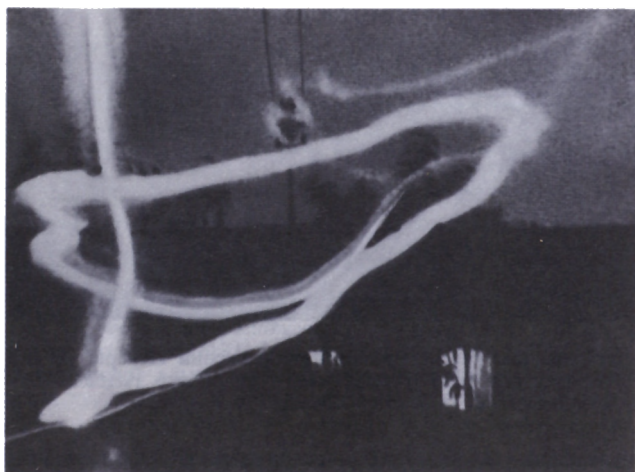


Рис. 5.10. Фотография, сделанная в 1955 г. во время грозы и идентифицированная как фотография шаровой молнии [1942]. В верхней правой части снимка заметен слабый дублирующий след. Первоначально опубликована в работе [1943], воспроизводилась в работах [961, 1270].



Рис. 5.11. Фотография ночной улицы. Камера специально двигалась для получения множественных следов [353]. Основной след – уличный фонарь; модуляция его интенсивности связана с изменением (частота 50 Гц) электрической мощности. Эта фотография использовалась для того, чтобы поставить под вопрос подлинность фотографии, приведенной на рис. 5.7.

На рис. 5.11 приведена полученная намеренно перемещаемой камерой фотография ночной улицы [353]. Основной след – это след уличного фонаря, кажущаяся модуляция интенсивности которого связана с питанием переменным током частотой 50 Гц. Эта фотография была сделана для того, чтобы показать ошибочность идентификации фотографии рис. 5.7 как снимка шаровой молнии. Она также демонстрирует те сложности, с которыми связано признание подлинности многочисленных фотографий, считавшихся фотографиями шаровой молнии. В работе [904]

также приводится фотография, полученная с помощью специально двигавшейся камеры с целью показать, что сам по себе снимок еще недостаточен для идентификации изображения как связанного с шаровой молнией.

Ясно, что все фотографии такого типа (с множественными следами) можно легко связать как с движением камеры относительно фонарей, так и с шаровой молнией. Ни одна из опубликованных фотографий с множественными следами «шаровой молнии» не сопровождалась надежными свидетельствами, полностью исключающими возможное движение камеры. По мнению многих исследователей, ни одна из этих фотографий не может уверенно считаться фотографией шаровой молнии. Все такие фотографии с множественными следами следует оценивать с учетом возможного движения камеры. Следовательно, все фотографии с множественными и/или дублирующими друг друга следами должны внушать подозрение.

5.2.3. Тип 3. Распад канала молнии

Для этого класса фотографий характерно наличие вблизи следа обычной линейной молнии отдельного небольшого светящегося участка, явно образованного молнией и оставшегося как нечто, отделенное от основного разряда.

Мысль о том, что шаровая молния является результатом разряда обычной молнии и возникает вблизи ее главного канала, очень стара. Из того факта, что появление шаровой молнии происходит, как правило, во время грозы, нетрудно заключить, что шаровая молния связана с разрядом обычной молнии. В работах [1208, 1314] и др. было высказано предположение о том, что шаровая молния образуется в местах, где разрядный канал резко изменяет направление или изгибается. Пример такого явления, связанного с наблюдением шаровой молнии, описан в работе [870].

На рис. 5.12 приведена фотография, иллюстрирующая это явление [354]. Сообщалось, что светящийся шар появился сразу же после разряда молнии. Этот шар образовался вблизи нижнего конца разрядного канала. Отдельно возникший шар сфотографирован не был.

Не исключено, что наличие кажущегося ярко светящегося конца канала молнии является результатом хаотического движения этого канала в небольшой области при затухании разряда обычной молнии. Такая особенность поведения обсуждалась в [876], где в качестве свидетельства приводился кинокадр, показанный на рис. 5.33. При этом могло бы возникнуть «стационарное» локализованное свечение, для объяснения которого не обязательно было бы привлекать шаровую молнию. Кроме того, на обсуждаемых фотографиях зафиксированы явления, происходящие на больших расстояниях от наблюдателя, а не вблизи него, как это имеет место при наблюдении шаровой молнии.

Похожая фотография разряда обычной молнии, но с отдельным шаровидным светящимся образованием приведена на рис. 5.13 [1215]. Не-

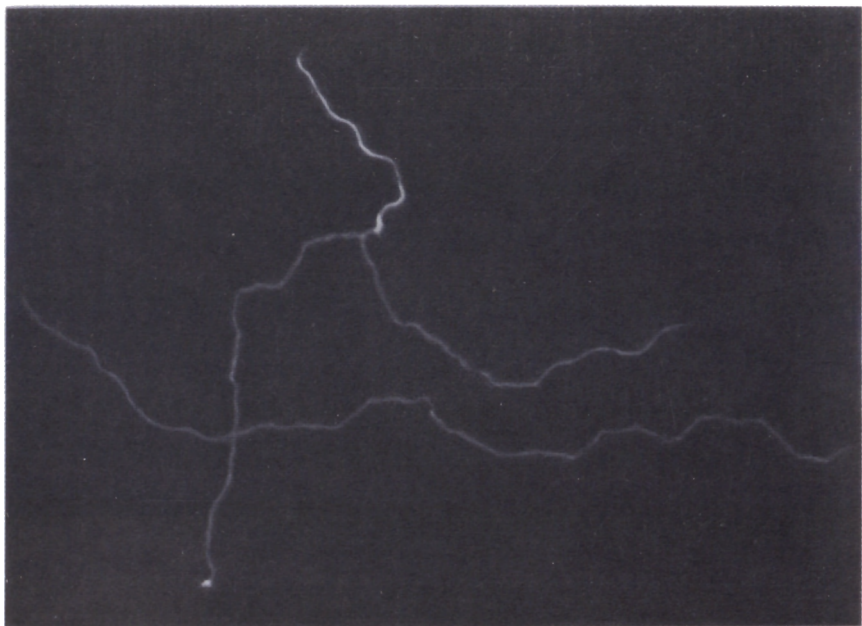


Рис. 5.12. Фотография разряда молнии, окончившегося над землей [354] (след в левом нижнем углу). В этой области, согласно сообщению, образовалась шаровая молния.

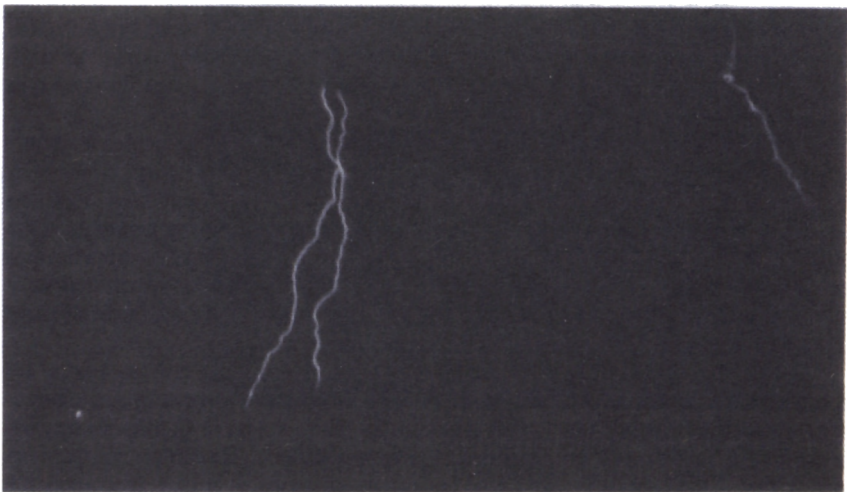


Рис. 5.13. Фотография, сделанная во время грозы [1215]. Отдельное пятно в левом нижнем углу трансформировалось, согласно сообщению, в шаровую молнию.

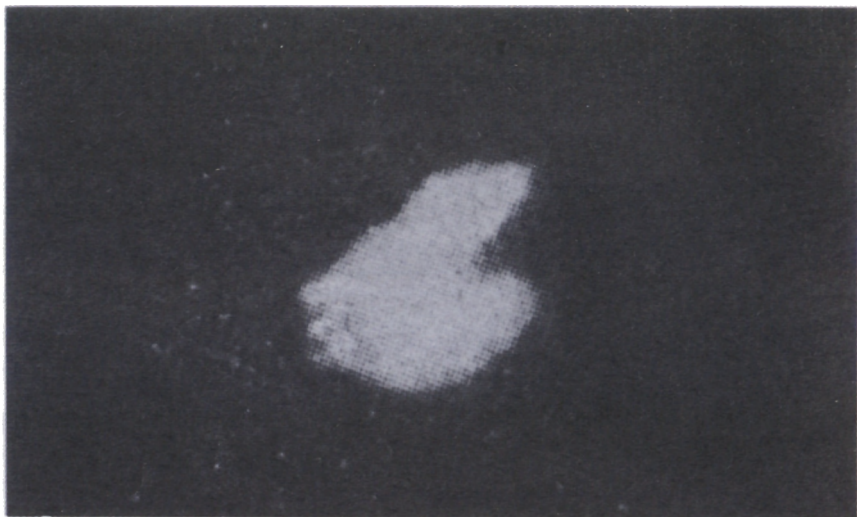


Рис. 5.14. Увеличенное изображение изолированного пятна в левом нижнем углу рис. 5.13, идентифицированного как шаровая молния.

большое отдельное светящееся пятно расположено в левом нижнем углу фотографии. Его увеличенное изображение показано на рис. 5.14 (опубликовано также в [1215], воспроизводилось в [340]). Известно, что снимок получен во время грозы, а небольшое светящееся пятно оставалось видимым в течение нескольких секунд и так же, как на фотографиях рис. 5.18, 5.19 [938, 939], было похоже на огонь. Увеличенный снимок показывает, что это небольшое светящееся образование можно интерпретировать и как изогнутую часть канала молнии, наблюдаемую с торца.

Опубликовано довольно много фотографий обычных молний, оканчивающихся не у земли, но не связанных с появлением шаровой молнии. Легко понять, почему возникает мысль о связи последней с обычной молнией при изучении фотографий вроде той, которая приведена на рис. 5.15. Этот снимок похож на изображение на рис. 5.12 и другие фотографии, на которых видны молнии, заканчивающиеся «утолщением» на конце. Согласно сообщениям, при подобном разряде молнии вблизи земли образуется остаточная шаровая молния.

Авторы работ [1787, 1788] изучили ночные снимки, сделанные в течение примерно 10 лет метеорным патрулем Смитсоновской астрофизической обсерватории. На 12 000 изученных фотографиях было обнаружено около 120 000 зафиксированных следов молний. Двадцать четыре из них были интерпретированы как события, связанные или с шаровой (2), или с четочной (22) молнией. В [1194] также сообщалось о событии, интерпретированном как четочная молния (см. рис. 2.12, 2.13).

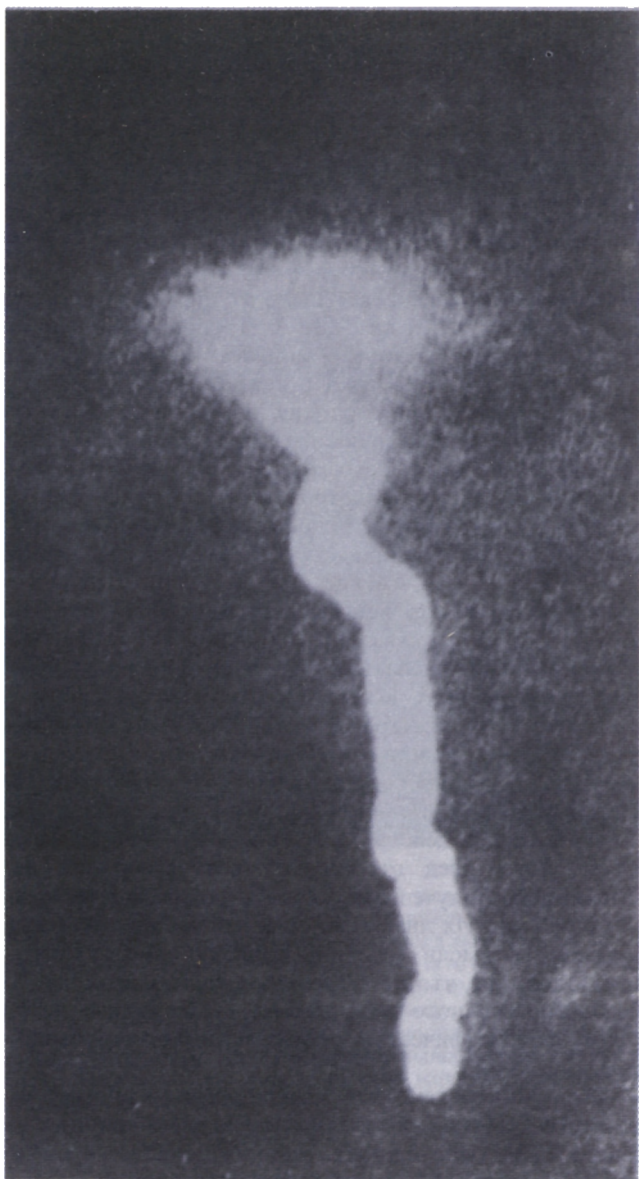


Рис. 5.15. Фотография разряда молнии от облака, закончившегося, согласно сообщению, над землей и приведшего к образованию в точке своего окончания шаровой молнии [1314].

Патрульные фотокамеры предназначены для исследования и регистрации метеоров, постоянно направлены на ночное небо и работают автоматически. Они снабжены периодически действующими затворами, открывавшими фотопленку с частотой 13,33 Гц таким образом, что затвор открыт в течение примерно $1/3$ периода. Объектив открывался на 25 мс, закрывался на 38 мс, его открытие или закрытие происходило за 6 мс. Освещенный или светящийся объект, движущийся поперек поля зрения камеры, фиксировался бы в виде серии точечных или пунктирных следов. Фотографии каналов молний встречаются довольно часто.

Типичный ступенчатый лидер молнии проходит путь от облака к земле примерно за 20 мс [1027]. Продолжительность главного разряда составляет всего несколько миллисекунд. Таким образом, разряд молнии должен фиксироваться в течение одного цикла действия затвора. Изображения, соответствующие более длительным событиям, указывали бы на продолжительное свечение канала и могли бы интерпретироваться как шаровая или четочная молния.

Одно из таких зафиксированных событий было идентифицировано как шаровая молния и иллюстрируется на рис. 5.16. В работах [1787, 1788] были сформулированы следующие требования, выполнение которых необходимо, прежде чем след на фотографии можно было бы считать следом шаровой молнии: 1) изображение должно иметь регулярную структуру, связанную с периодической работой затвора; 2) изображение должно казаться отходящим от канала молнии не в направлении касательной к нему. В этих работах проведен статистический анализ тех следов, характеристики которых совпадают с возможными следами шаровых или четочных молний, с целью определения случайного или неслучайного характера их периодичности. Было выявлено отсутствие такой случайности и установлено, что пунктирный характер следов связан в действительности с периодическим действием затвора. Кроме того, след отходил от канала молнии не по касательной.

Согласно полученным данным, скорости шаровых молний составляли 60–120 м/с. Их диаметры оценивались по расстоянию и размеру изображений и имели величину порядка одного метра. Было высказано предположение, что применение крупномасштабных автоматических камер обзора ночного неба явилось бы надежным воспроизводимым методом фотографической регистрации формирования и появления шаровых молний.

Было установлено, что возникновение шаровой молнии – это довольно редкое событие. Согласно полученным данным, ночью на Среднем Западе США одна шаровая молния появляется на площади $6 \cdot 10^5 \text{ км}^2$, что соответствует частоте события, равной $4 \cdot 10^{-11} \text{ км}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Указанное значение можно сравнить с относительно малой частотой появления интенсивных вспышек молнии, регистрируемых приборами на спутниках. Предполагается, что именно эти интенсивные разряды молнии ответственны за образование шаровых молний. В работе [1819] сообщалось, что интенсивность таких вспышек более чем в 100 раз пре-



Рис. 5.16. Фотоснимок, являющийся частью фотографии ночного неба, сделанной метеоритной службой Смитсоновской астрофизической обсерватории [1787]. Затвор автоматически работающей камеры открывал объектив на 25 мс, закрывал его на 38 мс, проводя открытие или закрытие за 6 мс. Движущийся светящийся объект был бы зарегистрирован в виде серии пунктирных линий. Анализ изображения и параметры камеры приводят к выводу, что на снимке зарегистрирован одиночный светящийся объект, падающий со скоростью 60–120 м/с и имеющий диаметр 2–4 м. Широкая вертикальная полоса в верхнем правом углу была идентифицирована как канал обычной молнии, закончившийся над землей. Непрерывный пунктирный след от конца этого канала к земле идентифицирован как след шаровой молнии. Похожая фотография приводилась в работе [1789] и позже в работах [505, 506].

вышает интенсивность обычных молний, а энергия их излучения превышает 10^6 Дж. Частота таких событий оценивается в $3 \cdot 10^{-5} \text{ км}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Следовательно, если образование шаровых молний связано с интенсивными вспышками молний, то вероятность такого события довольно мала.

Несмотря на то что существует довольно много фотографий, на которых, согласно сообщениям, зарегистрирована шаровая молния, имеется лишь несколько кино- или видеофильмов таких событий. Существует только один видеофильм с изображением объекта, идентифицированного как шаровая молния [625]. В нем сняты разряды молнии во время грозы над Горным Трансваалем (Африка). Изображения отдельных кадров этого фильма снимались фотокамерой с экрана телевизора.

Временное разрешение системы видеозаписи составляло 20 мс (период смены кадров). Одиночный кадр представляет собой фиксацию событий на протяжении 20 мс, а последовательные изображения отделены друг от друга интервалами в 20 мс.

В работе [625] опубликована серия из восьми последовательных кадров, на которых видны слабый распространяющийся вниз лидер и яркий обратный разряд. Один из этих кадров (кадр 6) воспроизведен на рис. 5.17. Шарообразный объект появился вблизи вершины основного канала на высоте около 300 м от земли. Он существовал, по-видимому, в паузе между проходом лидера и обратным разрядом, а не во время высвечивания основного разряда. Время его существования 20–40 мс, а кажущийся диаметр около 5 м. Однако имело место размытие изображения, так что оценка размера довольно приближенная. В то же вре-

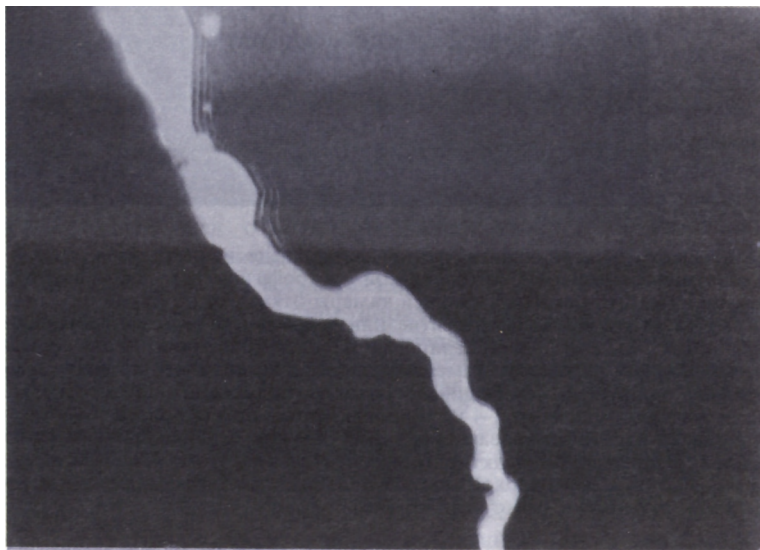


Рис. 5.17. Фотография одного из кадров видеоленты, на которой зафиксирован светящийся шарообразный объект, появившийся на вершине канала молнии [625]. Длительность кадра составляла 20 мс, а шар существовал 20–40 мс. Он возник на высоте около 300 м от земли и имел диаметр менее 5 м. Фотография воспроизводилась также в работе [506].



Рис. 5.18. Сделанная во время грозы фотография, на которой зафиксировано несколько отдельных объектов, идентифицированных как шаровые молнии [939]. Первоначально было опубликовано много подобных фотографий. Подлинность снимка была подтверждена авторитетными учеными. Фотография воспроизводилась в работах [1012, 1042, 1058, 1641].

мя по размеру он близок к объектам, описанным в [938, 939], которые, согласно этим сообщениям, также возникли высоко над землей. Их фотографии приведены на рис. 5.18, 5.19.

В [625] отмечалось, что шаровидный объект не мог быть результатом оптической иллюзии, поскольку он наблюдался лишь короткое время и только во время разряда одной молнии. Указывалось также, что идентификация этого объекта как шаровой молнии была лишь первой попыткой и еще ждет своего подтверждения. Однако метод исследования (видеозапись) схож с методом работы [1787] (автоматическая фотосъемка), обсуждавшимся выше и в гл. 2.

Такие методы, как автоматическая фотосъемка, киносъемка и (или) видеозапись, являются наиболее предпочтительными методами изучения шаровой молнии.

Чрезвычайно трудно составить окончательное мнение относительно



Рис. 5.19. Сделанная во время грозы фотография, на которой зафиксировано несколько отдельных объектов, идентифицированных как шаровые молнии [938]. См. также рис. 5.18. Воспроизводилась в работах [1012, 1042, 1058, 1728, 1641, 326].

достоверности приводившихся выше фотографий. Оно в значительной степени должно зависеть от интерпретации и научного анализа. Поэтому следует воздержаться от каких-либо однозначных утверждений и оставить вопрос открытым для дальнейшего рассмотрения. Изображения на этих фотографиях действительно обладают теми взаимосвязанными и общими характерными чертами, которые предполагают образование шаровой молнии при разряде обычной молнии. Снимок на рис. 5.16 – это один из нескольких, отобранных при анализе тысяч фотографий, сделанных автоматическими камерами. Он, возможно, является наиболее интригующим из всех имеющихся в настоящее время. Основываясь на имеющихся свидетельствах и их интерпретации, можно полагать, что фотография рис. 5.16 является одной из немногих достоверных фотографий шаровой молнии.

5.2.4. Тип 4. «Фейерверк»

Изображения этого типа выглядят как слегка вытянутый движущийся вверх светящийся шар с «лучами» остаточного светящегося вещества, которые образуют «хвост» за основным одиночным телом. В целом это похоже на медленно поднимающуюся «римскую свечу».

О такой шаровой молнии говорят, что она имеет «фейерверочный» вид. Во многих сообщениях отмечалось, что она напоминает горящий шар, испускающий пламя и продукты сгорания. Ее характеристики напоминают пламя и по цвету, и по структуре, однако внутреннее «движе-

ние» в этом «пламени» отсутствует. Типичными являются красно-желтый цвет и диаметр 50–100 см, хотя иногда этот размер бывает и большим. Явление бывает одиночным или состоит из группы похожих объектов. О шаровой молнии такого типа опубликованы многочисленные сообщения наблюдателей; существует также много ее фотографий.

Множество свидетельств о наблюдении огненной шаровой молнии, теряющей при своем движении вещество, собрано в работах [65, 141, 186, 824, 898, 1654]. В некоторых сообщениях приводятся более подробные сведения. Так, в работе [1610] описан зеленый огонь св. Эльма, оставивший святающееся зеленым светом вещество после того, как он взмыл над деревом.

Во многих сообщениях описана шаровая молния, напоминающая огненный шар со структурой и языками, напоминающими пламя. В ряде случаев эти структуры могли быть похожи на остаточное вещество, выброшенное в ходе процесса. Среди многочисленных работ, описывающих огненную шаровую молнию, отметим [389, 443, 444, 447, 526, 527, 791, 868, 1252, 1258, 1332, 1471, 1539, 1654, 1691, 1845, 1866, 1869, 1916, 1970]. Во избежание ошибок следует соблюдать осторожность. Например, в работе [1574] описан огненный объект, находившийся на земле вблизи наблюдателя и скорее всего являвшийся огнем св. Эльма.

По поводу фотографий огненной или «пиротехнической» шаровой молнии рождались различные споры и предположения об их происхождении. Наиболее часто воспроизводилась и обсуждалась серия фотографий, первоначально опубликованных в [938, 939]. Они были сделаны во время грозы в Небраске (США). Грозовым тучам типа дождевых облаков предшествовало вторжение масс холодного воздуха. Многократно происходили разряды обычных молний между тучей и землей. Шаровая молния появилась во время грозы, когда было замечено бледно-лиловое тело, медленно падавшее из облака. Согласно сообщению, структура тела была бесформенной, чем-то напоминающей шар, и относилась к типу «фейерверка». Несколько таких тел попали на близлежащую линию электропередачи, прокатились по проводам на расстояние 30 м или более и, упав на землю, со взрывом исчезли. Фотографии на рис. 5.18, 5.19 взяты из работ [938, 939] соответственно. Они типичны для всех опубликованных в этих работах фотографий. Их обсуждение проводилось в работе [1641], опровергнувшей толки о том, что на них запечатлены огни фейерверка. Исходные фотографии и негативы были изучены также в [1558], где было сделано заключение, что изображения на фотоснимках совсем не похожи на огни фейерверка. Вопрос о том, не был ли автор работ [938, 939] введен в заблуждение фейерверком, обсуждался, кроме того, в работах [372, 1641]. Он сослался на неопубликованное исследование этого события, проведенное Г. Нориндером, согласно которому внешний вид объектов очень напоминал огни фейерверка. В работе [1558] также признавалось наличие такого сходства.

Истинную природу объекта, запечатленного на этих фотографиях (шаровая молния или огни фейерверка), возможно, никогда не удастся



Рис. 5.20. Фотография объекта, идентифицированного как шаровая молния [1032]. Согласно сообщению, явление возникло после образования основной структуры и сопровождалось кажущимся испусканием светящегося остаточного вещества. Фотография воспроизводилась в работах [984, 504].

установить. Однако о наблюдениях подобных структур в виде огненных шаров в торнадо сообщалось в работах [1840, 1864]. Наблюдения, описанные в [1215], также схожи с теми, о которых сообщалось в [939] (см. рис. 5.13).

На рис. 5.20 запечатлена шаровая молния, окруженная явно истекающим из нее при подъеме веществом [1032]. При увеличении ясно видно, что потоки этого вещества истекают из основного тела молнии, которая, как отмечено в сообщении, поднималась от земли. Шаровая молния с «лучами» или «языками» описывалась и в других многочисленных работах [141, 258, 259, 898, 913, 1041, 1258].

Фотография рис. 5.20 обсуждалась также в работе [372], в которой отмечалось, что посетивший место события проф. Швенкхаген пришел к выводу о том, что буря вызвала короткое замыкание в линии электропередачи, а возникший при этом сгусток капель жидкого металла был ошибочно принят за шаровую молнию. Об ударе молнии в опору линии не упоминалось, и исследования опоры не проводилось. Восходящее движение массы расплавленного металла представляется маловероятным.

Похожий, но более ранний рисунок шаровой молнии приводится



Рис. 5.21. Рисунок объекта, замеченного из окна и идентифицированного как шаровая молния [797]. Согласно наблюдению, во время движения объект испускал остаточное вещество. Рисунок воспроизводился в работах [305, 1941, 369, 1641].

в работе [797]. Он воспроизведен на рис. 5.21, из которого легко усмотреть его близкую аналогию с фотографией рис. 5.20. Согласно сообщению, этот объект испускал остаточное вещество по мере его восходящего движения мимо наблюдателя.

Опубликовано и несколько других рисунков огненной или лучистой шаровой молнии. В [392] обсуждается произошедшее в 1638 г. событие, вызвавшее сильные разрушения. В [665, 1058] приводится рисунок шаровой молнии на полу сарая (см. рис. 1.2). В [1443, 1842] воспроизведен опубликованный ранее рисунок, иллюстрирующий смерть проф. Рихмана (Петербург, 1753 г.) от шаровой молнии [659, 660]. См. также обсуждение в гл. 7 и рис. 7.1.

5.2.5. Тип 5. Стационарный объект

Для этого типа характерно наличие одиночного квазисферического объекта, парящего над землей без видимого движения.

Одно из самых ранних подробных обсуждений явления шаровой молнии было проведено Брандом [413, 414]. В этих работах собрано несколько сотен отчетов о наблюдении шаровой молнии и выполнено их квазистатистическое исследование. Автор отметил, что в то время не было известно ни одной фотографии природной шаровой молнии, и приводились две фотографии сферического свечения, вызванного коротким замыканием выводов генератора постоянного тока. Эти две фотографии приведены на рис. 5.22 и 5.23 и отнесены к рассматриваемому типу (а не к типу 8), поскольку само явление происходило в атмосфере. На второй из этих фотографий выше обширной светящейся области поднялся шар.

Предполагалось, что искусственно вызванный разряд привел (по-видимому, в присутствии водяного пара) к образованию чего-то похожего

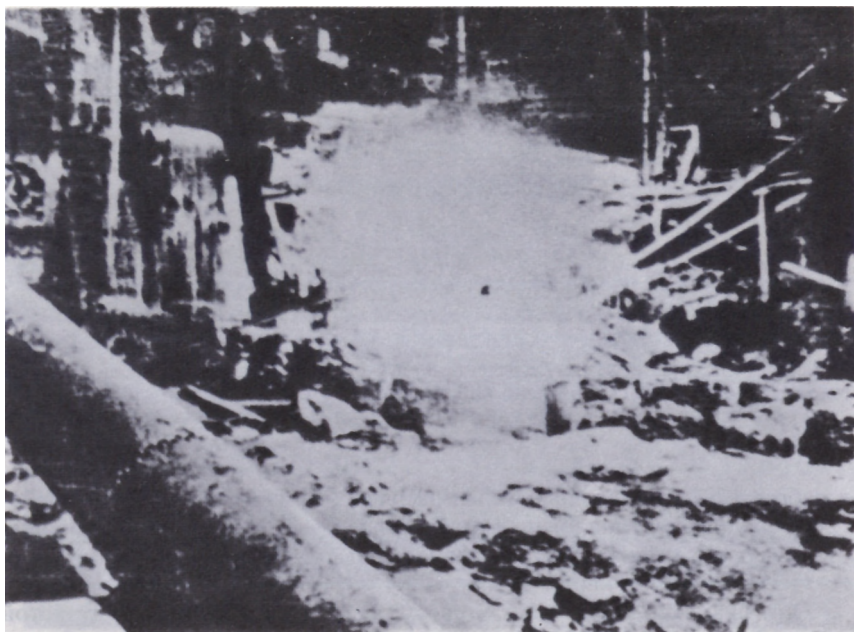


Рис. 5.22. Фотография светящегося шара, образовавшегося при закорачивании выводов электрогенератора вблизи от водопада (сделана А. Нильсоном) [413]. Воспроизводилась в работе [414].

на шаровую молнию. Очень трудно различить детали явления; в работе [413] сообщалось лишь о немногих его деталях и характерных особенностях. Свечение было красноватым по цвету, могло быть создано повторно и длилось несколько секунд. Мощность генератора постоянного тока составляла 10^7 Вт при напряжении 12 кВ. Если время закорачивания принять равным 1 мс, то выделяющаяся в этом явлении энергия составила бы 10^4 Дж. Эти фотографии (рис. 5.22, 5.23) рассматривались также в [1316, 1641]. Подробное обсуждение этого явления см. в гл. 7.

Более высококачественная фотография объекта, принятого за шаровую молнию, опубликована в [1314] и приведена на рис. 5.24. Она воспроизводилась также в [1316, 1641]. Объект был идентифицирован как шаровая молния; согласно сообщению, он двигался мимо здания, находившегося поблизости от наблюдателей. Была замечена и вторая шаровая молния, которую, однако, не удалось сфотографировать. Согласно сообщению, диаметр шаровой молнии составлял около 30 см.

В [505] была опубликована приведенная на рис. 5.25 фотография неподвижного светящегося объекта. Похожий рисунок опубликован в работе [742] (рис. 5.26). На обоих рисунках изображен кажущийся неподвижным объект, висящий над землей. В обоих случаях имеется информация, сообщенная наблюдателями. Однако эти фотографии не



Рис. 5.23. Фотография светящейся области, образованной при закорачивании выводов электрогенератора [413]. Ср. с рис. 5.22. Воспроизводилась в работе [414].

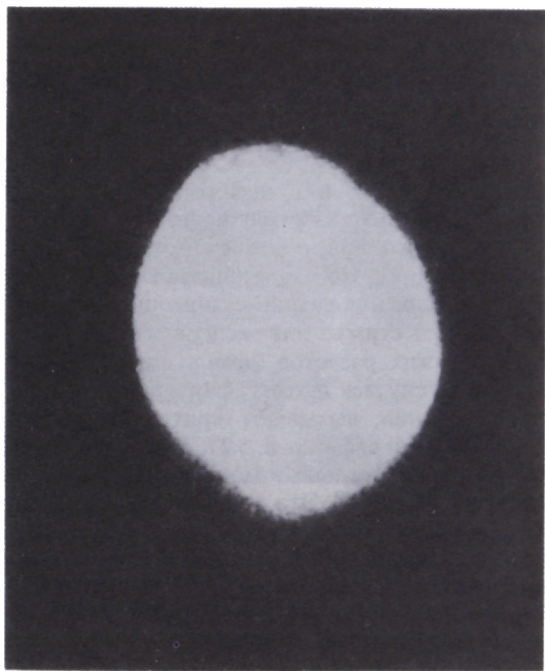


Рис. 5.24. Фотография объекта, идентифицированного как шаровая молния (сделана Х. Шнайдерманом в 1935 г. во время грозы) [1314]. Воспроизводилась в работах [1316, 1641, 326].



Рис. 5.25. Фотография одиночного светящегося объекта, висящего в воздухе над садом (сделана М. Р. Лайонзом) [505]. Объект был идентифицирован как шаровая молния. Подробности наблюдения очень скудны.

дают дополнительной информации исследователям и не прибавляют нам знаний о явлении шаровой молнии. С другой стороны, три предыдущие фотографии более существенны и дают больше информации. Самое важное – это свидетельство возможности создания схожих с шаровой молнией явлений с помощью электромеханических устройств. Это создает стимул для экспериментальных исследований и основу для теоретических расчетов (детали см. в гл. 7).

В ряде случаев фотографии объектов, идентифицированных как шаровые молнии, вызывают критическое отношение. Примером может служить фотография рис. 5.27, сделанная Дж. Ханспергером и опубликованная первоначально в монографии [1457], а позже (в ответ на критику) в работе [1458]. Эта монография и многие приведенные в ней фотографии обсуждались в [1880], где было высказано предположение, что фотография рис. 5.27 могла быть получена с помощью двойной экспозиции огней здания и уличного фонаря и вызвана движением камеры. Судя по [1458], схожие критические замечания высказывал Линке, работу которого, однако, нам изучить не удалось.

Обсуждение относящихся к этой фотографии фактов в работах [1458, 1459] довольно неопределенно. Проявление пленки производилось самим снимающим, а характеристики камеры и фактическое время

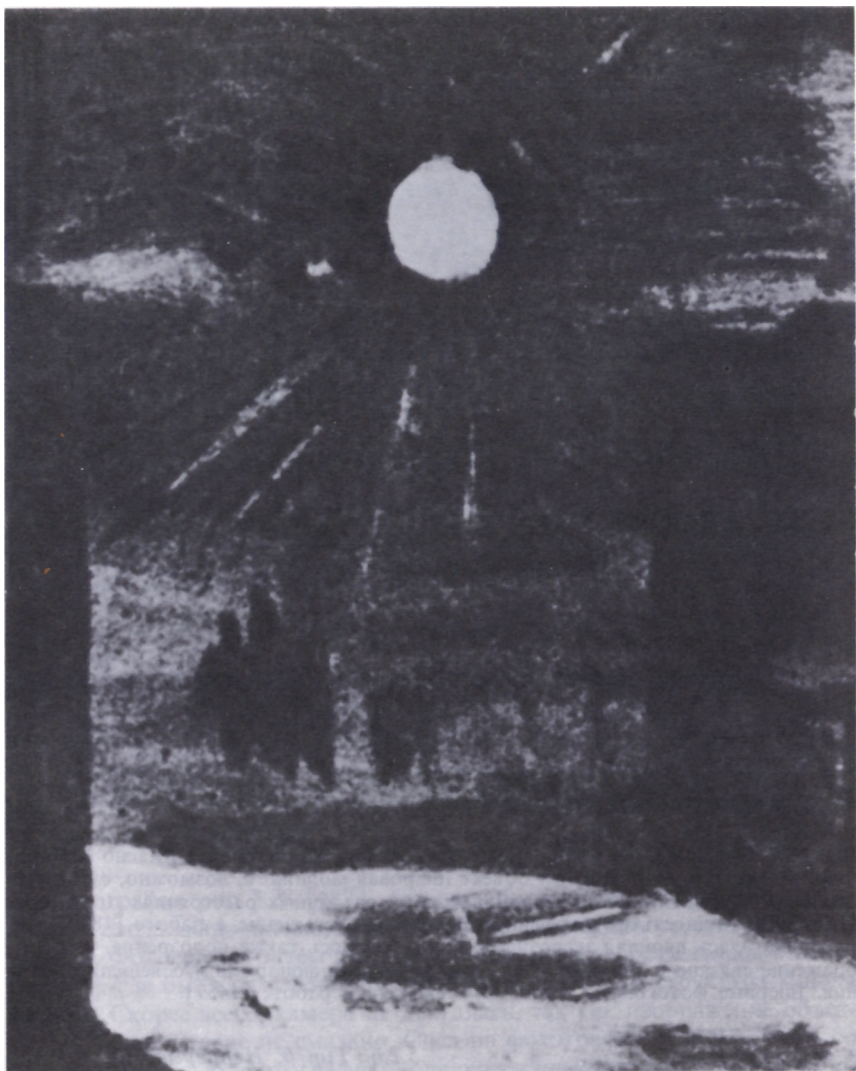


Рис. 5.26. Рисунок, на котором изображен одиночный светящийся объект, являющийся, согласно сообщению, шаровой молнией [742]. Сообщены также некоторые детали наблюдений.

экспозиции были восстановлены по памяти. Фотограф не видел шаровой молнии и был удивлен тем, что обнаружил такое изображение на пленке. Таким образом, эта фотография весьма сомнительна.

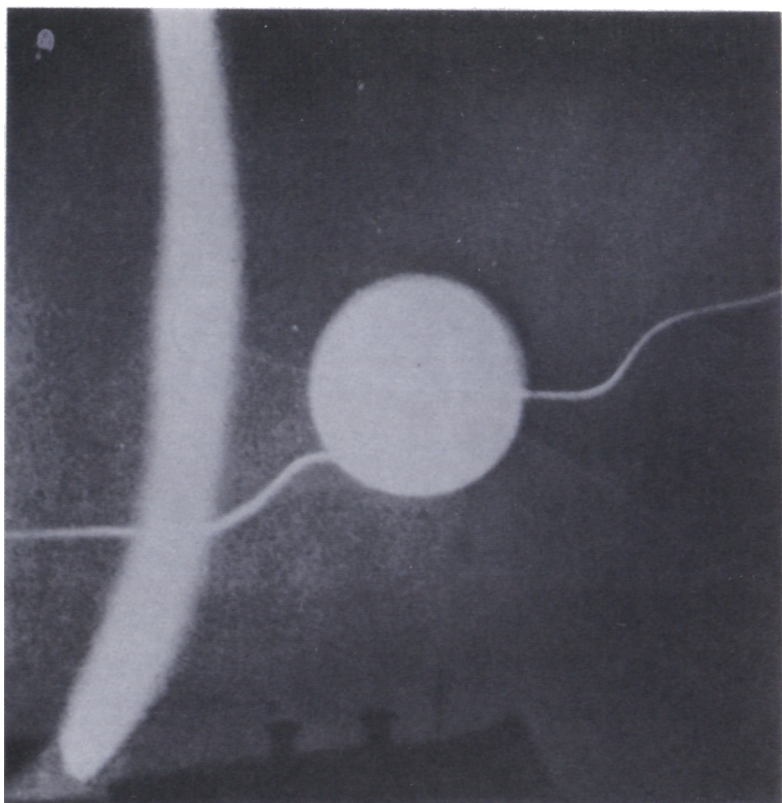


Рис. 5.27. Сделанная во время грозы фотография, на которой, согласно сообщению, запечатлен неподвижный объект (шаровая молния) и, возможно, следы нескольких других объектов, находившихся на различных расстояниях от камеры [1458]. Подлинность фотографии ставилась под сомнение в работе [1880], где предполагалась двойная экспозиция. Высказывалось также подозрение, что изображение связано с движением камеры, уличными фонарями и освещением здания. Впервые фотография была опубликована в работе [1457].

5.2.6. Тип 6. Непрерывный одиночный след

Для этого типа фотографий характерно наличие одиночного четкого следа непрерывно светящегося объекта, траектория движения которого кажется чисто случайной.

Интересно, что многие так называемые фотографии шаровой молнии были получены случайно. При длительной экспозиции фотокадра во время грозы на пленке остается неожиданный след какого-то не замеченного снимающим явления. Получившийся на снимке след впоследствии идентифицируется как след шаровой молнии.



Рис. 5.28. Сделанная во время грозы фотография со следом светящегося объекта [875], который первоначально идентифицировался как горизонтальный разряд молнии, а позже – как след шаровой молнии. О наблюдении шаровой молнии при первоначальной публикации не сообщалось [487]. Фотография воспроизводилась также в работе [1727].

Фотография рис. 5.28 [487] – это типичный пример случайных фотографий следа шаровой молнии. В работе утверждалось, что это след молнии. Фотография затем была воспроизведена и обсуждалась в работе [875], где была отмечена ленточная или трубчатая структура канала молнии. Скорее всего, камера не двигалась, так как изображение объектов на заднем плане не смазано. След на фотографии рис. 5.28 схож со следами на других фотографиях, однако отличается тем, что видимый след горизонтален и имеет определенную структуру. Эта фотография воспроизводилась в [1726–1728], где она уверенно идентифицировалась как фотография следа шаровой молнии.

В связи со световыми явлениями при землетрясении было замечено, что разряды молнии могут происходить в горизонтальном направлении и иметь трубчатую структуру [1729]. В работе [1367] также опубликовано полученное из «первых рук» сообщение о наблюдении долгоживущего горизонтального трубчатого участка молнии. Он был ярко-голубым и, похоже, непрозрачным, имел длину около 8 м и диаметр

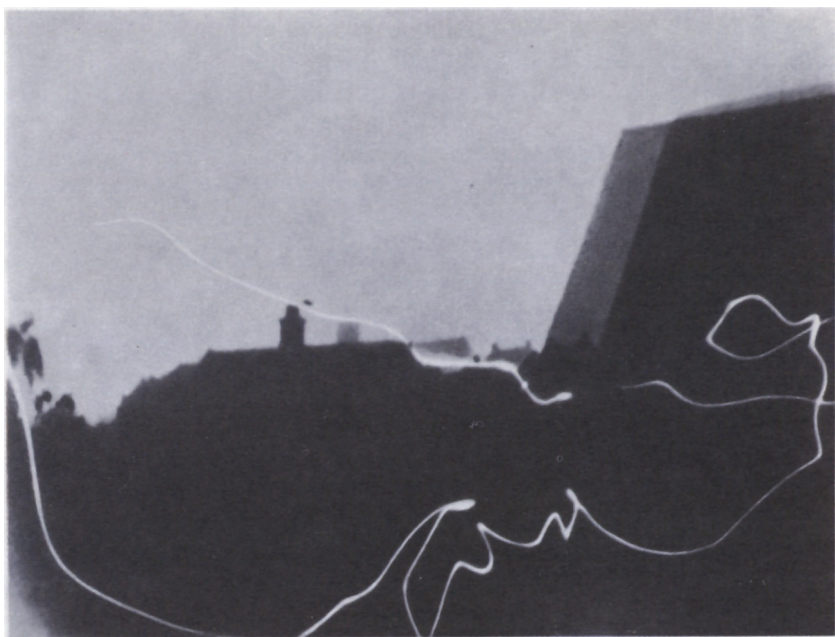


Рис. 5.29. Фотография М. Бирда со следом светящегося объекта, идентифицированного как шаровая молния [1355]. Наличие явного движения камеры породило сомнение в истинности этой фотографии [1438]. Впервые опубликована в работе [1356], воспроизводилась в работах [1355, 1275, 1641].

40 см. Трубчатый вид мог быть, конечно, результатом быстрого движения лидера в узкой ограниченной области, что было подтверждено исследованиями с использованием быстродействующей фотокамеры [876]. См. рис. 5.33, 5.34.

Похожая фотография с квазигоризонтальным следом, оставленным светящимся объектом, приведена на рис. 5.29. Она была получена Бирдом в Одессе, опубликована в работах [1355, 1356] и воспроизводилась в работах [1275, 1641]. Судя по записям и воспоминаниям очевидцев, объект медленно проследовал в поле их зрения. Диаметр шара был оценен в 5 см. Он прекратил свое существование, проникнув в дымовую трубу и взорвавшись в камине.

Эта фотография также вызвала обширную дискуссию, особенно в связи с тем, что, как указано в работах [1355, 1356], налицо было движение камеры. В работе [1438] эта фотография приведена в качестве типичного примера изображения, полученного за счет движения камеры. При этом повторялись те же аргументы относительно сложности интерпретации фотографий разряда молнии, которые выдвигались и ранее [1437]. Приведена также фотография так называемого следа молнии, полученная при съемке уличного фонаря движущейся камерой. В работе

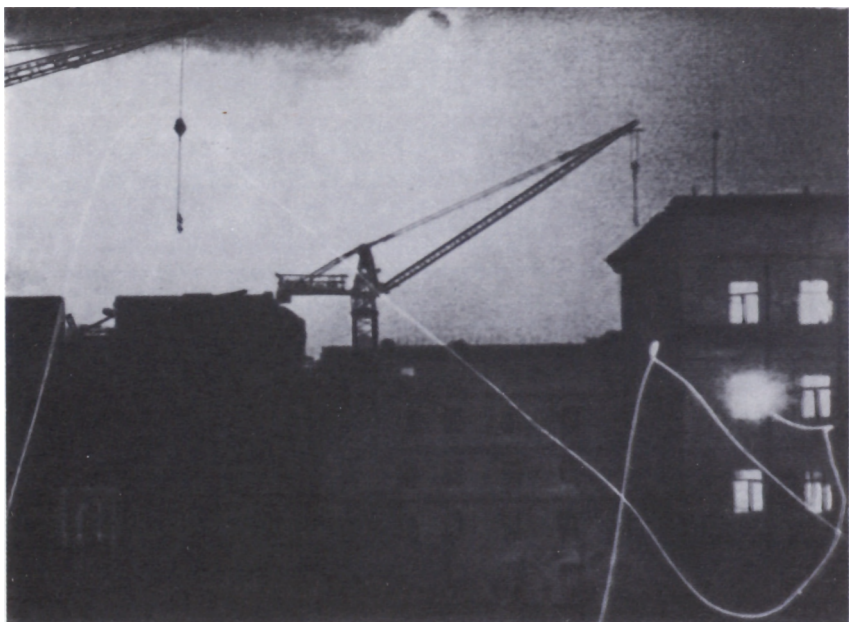


Рис. 5.30. Сделанная во время грозы фотография одиночного следа ненаблюдавшегося объекта, впоследствии идентифицированного как шаровая молния [558]. На перенлете окна, у которого закончилась траектория этого объекта, были найдены остатки вещества, похожего на сажу. Фотография воспроизводилась в работах [1058, 1641, 326].

[581] фотография рис. 5.29 также интерпретировалась как следствие движения камеры, на что указывает ее сходство с более ранней фотографией (рис. 5.8). Кроме того, в [1439, 1723] отмечалось об ошибочном описании условий съемки в работе [1357], где утверждалось, что снимок был сделан днем. Хотя и с большим трудом, но было установлено, что получить такую фотографию до сумерек было бы невозможно.

Возможно, эта фотография имеет черты сходства с теми, которые получены при движении камеры, но она отличается от последних наличием подтверждающих сообщений. Вообще лишь немногие фотографии шаровой молнии дополняются подтверждающими сообщениями очевидцев. Однако у снимка на рис. 5.29 имеется сообщение очевидца. В связи с этим ее идентификация в настоящее время хотя и сомнительна, но считаться явно ошибочной не может.

Замечательная фотография представлена на рис. 5.30 [588]. Она воспроизводилась и довольно подробно обсуждалась в [1058, 1641]. Эта фотография также была получена случайно (при длительной экспозиции) и не подтверждена фотографом. Автор первой публикации интерпретировал гладкие непрерывные линии как следы шаровой молнии. Как видно в правой части рис. 5.30, след заканчивается на краю окна.



Рис. 5.31. Сделанная А. Душеливичем фотография светящейся шаровой молнии, наблюдавшейся во время грозы на горном перевале в Карпатах [588]. Согласно сообщению, объект имел диаметр 6–8 см и переменную яркость. Фотография была первоначально опубликована в работе [550].

Исследование этого окна выявило следы копоты длиной около 1 см, хотя само окно не было повреждено [588]. Были обнаружены обугленная часть деревянного переплета и небольшой участок размягченной оконной замазки, указывающие возможное место контакта. О похожих на сажу следах, оставленных шаровой молнией, сообщалось и ранее [1900].

Фотография рис. 5.30 не являлась предметом споров и дискуссий относительно ее подлинности, как это имело место в отношении предыдущей фотографии. Возможно, это связано с опубликованным на той же странице замечанием [1675], в котором делалось предположение, что следы на фотографии могут быть вызваны различными причинами и даже обычной молнией. Рассматриваемая фотография похожа на фотографию обычной молнии, приведенную на рис. 5.35 [875]. Фотографии рис. 5.30 и 5.29 следует также сравнить с фотографиями обычной молнии на рис. 5.33 и 5.34. Фотография на рис. 5.30 должна поэтому считаться сомнительной.

В [588] воспроизведена фотография, первоначально опубликованная в работе [550] и также идентифицированная как фотография шаровой молнии. Она была сделана Душеливичем, научным сотрудником Бухарестской аэрологической обсерватории. Шаровая молния появилась во время грозы на одном из горных перевалов в Карпатах и, согласно сообщению, наблюдалась в течение некоторого времени. Эта фотография воспроизведена на рис. 5.31.

В работе [591] проанализированы как сама фотография, так и данные, относящиеся к условиям наблюдения. В ней делается вывод,



Рис. 5.32. Фотография светящегося объекта, сделанная Я. Веенстра в Арнхеме из окна здания [1549]. Первоначально ее считали похожей на фотографию рис. 5.10. Она обсуждалась в работах [1925, 1944], в которых был сделан вывод о том, что это не шаровая молния. Другие данные также указывают на то, что полученное изображение не может быть связано с шаровой молнией.

что объект имел диаметр 6–8 см и обладал переменной светимостью с частотой 3–5 Гц. Эти колебания светимости были связаны с увеличением диаметра на 20–30%, сопровождавшимся уменьшением общей яркости. По-видимому, на объект влияли расположенные поблизости металлические конструкции (возможно, это происходило за счет сопутствующих градиентов электрического и (или) магнитного поля). Кроме того, сообщалось, что шаровая молния постепенно затухла на расстоянии порядка нескольких ее диаметров. После этого появился сноп искр, аналогичный описанному в [1032].

В отсутствие подтверждающей информации идентификация изображения как следа шаровой молнии оказывается затруднительной. Примером может служить фотография рис. 5.32, опубликованная в работе [1549]. Она была сделана Веенстра в Арнхеме из окна здания, выходящего на север, с экспозицией 10 с. Хотя в [1549] изображение на этой фотографии и не интерпретировалось как след шаровой молнии, но она сравнивалась с более ранней фотографией, приведенной на рис. 5.10, причем отмечалось их сходство.

Полученная фотография обсуждалась по крайней мере в четырех работах того времени [1780, 1781, 1925, 1944], и авторы всех этих работ были согласны во мнении, что следы на фотографии не связаны с шаровой молнией. В работе [1944] эта фотография сравнивалась с теми, которые ранее воспроизводились в [875, 1468, 1942, 1943], отмечались различия между ними и высказывалось предположение, что на фотографии рис. 5.32 изображена обычная линейная молния. Вместе с тем в этой работе считалось, что другие фотографии, ныне занесенные в разряд сомнительных, являются подлинными. В то же время в [1780, 1781] был признан ошибочный характер этих фотографий и высказано предположение, что изображение на них связано с какой-то другой (не шаровой молнией) формой электрического разряда. В работе [1925] совершенно определенно утверждалось, что изображение на фотографии рис. 5.32 не может быть связано с шаровой молнией, поскольку 10-секундная экспозиция не согласуется с общепринятыми характеристиками молнии.

Тщательное изучение фотографии показывает, что на ней, по-видимому, имеются и другие следы. К сожалению, большая их часть закрыта листвою деревьев, что делает невозможным более подробное исследование. Поскольку начала основного и вторичного следов лежат за ветвями расположенных на переднем плане деревьев, они не могут быть следствием движения камеры. Вполне вероятно предположение о линейном разряде, который и явился источником этих изображений. Из-за отсутствия какой-либо подтверждающей информации от свидетелей явления нет веских причин для утверждения о связи следов на фотографии с шаровой молнией.

Вслед за обсуждением фотографий «шаровой молнии» [1781] в работе [1805] была опубликована примечательная фотография, ошибочно связывавшаяся ранее с шаровой молнией. Было показано, что изображение в виде непрерывной светлой линии нельзя в отсутствие подтверждающих данных интерпретировать как след шаровой молнии. В сопутствующем обсуждении [904] упоминалось о более ранней критике [353, 903] нескольких фотографий, которые, согласно ранним сообщениям, являлись фотографиями шаровой молнии (см. рис. 5.7, 5.10 и 5.20). Была воспроизведена еще одна похожая фотография, полученная умышленно перемещаемой камерой.

Сложность интерпретации изображений, имеющих вид непрерывной линии, как следов шаровой молнии подчеркивается тем обстоятельством, что имеется множество фотографий обычной молнии похожего вида. Следующий параграф, посвященный обсуждению таких фотографий, иллюстрирует трудность интерпретации.

5.2.7. Тип 7. Обычные разряды

Этот тип фотографий включает такие, на которых изображены обычные разряды, ошибочно принятые за шаровую молнию, и те, которые, хотя и не являются фотографиями шаровой молнии, но очень на них похожи.

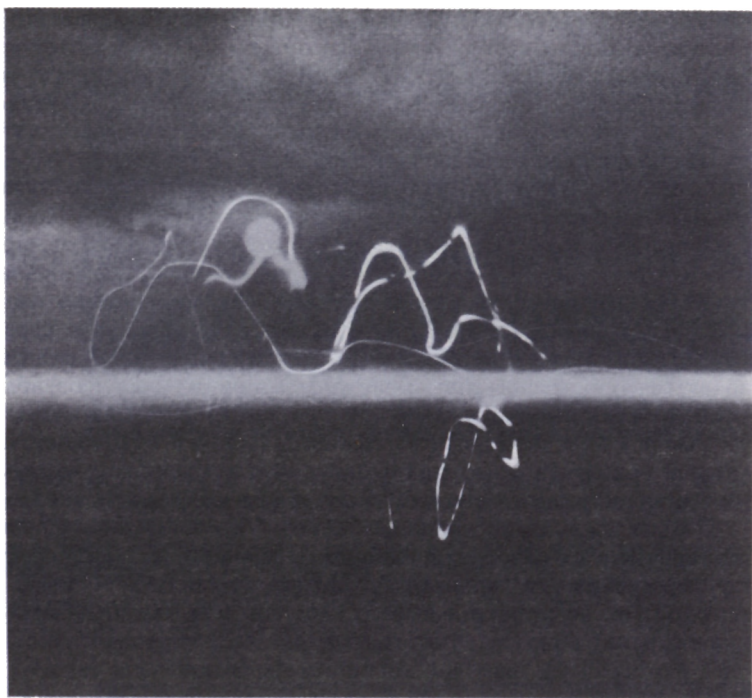


Рис. 5.33. Полученная во время грозы с помощью фотокамеры с быстро движущейся пленкой фотография, на которой видна быстрая и причудливая траектория лидера разряда обычной линейной молнии. Движение в небольшой области глаз и обычная фотокамера воспринимают как одиночный неподвижный объект. Фотография первоначально опубликована в работе [876] и воспроизводилась в работах [875, 1641].

Известно, что разряд обычной линейной молнии имеет сложную, иногда весьма извилистую траекторию в атмосфере. Развитие разряда можно изучать с помощью фотосъемки, применяя высокоскоростные камеры. В камерах, используемых для съемки молний, пленка может быстро двигаться в горизонтальном или вертикальном направлении. Типичная скорость движения пленки составляет 500–1000 см/с. Такая скорость необходима потому, что скорость продвижения канала молнии достигает величины $5 \cdot 10^8$ см/с.

Показанная на рис. 5.33 фотография обычной молнии была первоначально опубликована в [875]. Разряды лидерного типа происходили примерно в 30 м от камеры. Событие было зарегистрировано двумя камерами с движущейся пленкой, что обеспечило стереоскопический эффект, а также обычными камерами.

Анализ фотографии показывает, что разряд не был одиночным, а состоял по крайней мере из четырех частей. Скорость разряда составляла

примерно 10^7 см/с. Изображение, напоминающее шар, связано с движением излучающих свет разрядов в небольшом объеме, которое продолжалось всего около 10 мкс. Уже в работе [876] отмечалось, что шаровидное свечение не связано с шаровой молнией. Считалось, что это — обычное световое пятно, возникшее из-за сложного хаотического движения разряда в небольшом объеме.

Было высказано предположение, что разряды такого типа — это не обычная молния в общепринятом смысле этого слова. По-видимому, след возникает в результате развития вторичных разрядов, происходящих во время сильных гроз и не относящихся к разрядам основного типа. Нерегулярность траектории и изменение на обратное направление движения разряда предполагают чрезвычайно сложное и нерегулярное распределение электрических полей вблизи земли. Такие поля могут создаваться пространственным зарядом коронных разрядов вблизи земной поверхности и искажаться поверхностной проводимостью. Эти вторичные разряды, по-видимому, происходят почти одновременно с более мощными разрядами молнии и могут вызываться быстрым изменением напряженности электрического поля вблизи разрядного канала молнии.

Разряд, зарегистрированный на рис. 5.33, возможно, близок по характеристикам к разряду, показанному на рис. 5.28. Оба они чрезвычайно нерегулярны и произошли вблизи земли. На основе изучения рис. 5.33 можно прийти к выводу, что рис. 5.28 мог бы быть объяснен аналогичным образом. Фотография рис. 5.28 первоначально не считалась фотографией шаровой молнии и была признана таковой несколькими авторами лишь позже. Поэтому она была отнесена к фотографиям типа 6. Однако мы не считаем ее истинной фотографией шаровой молнии.

Фотография, представленная на рис. 5.34, была сделана неподалеку от того места, где и фото рис. 5.33, и первоначально опубликована в [875]. Она была получена с помощью простой ручной однокадровой камеры. Явное отсутствие размытия позволяет заключить, что заметного движения камеры не было. Считается, что неясная часть изображения — это разряды с островерхих частей дерева. Можно думать, что это явление — не шаровая молния. Скорее всего, это быстроизменяющийся разряд, связанный с нерегулярными и быстро меняющимися электрическими полями. Он довольно похож на тот, который запечатлен на фотографии рис. 5.31, и вполне мог быть вызван вторичными быстрыми разрядами аналогичного типа.

Фотография рис. 5.35 с одиночным тонким следом опубликована в работе [875]. Разряд происходил менее чем в 20 м от камеры. Последняя была ручного типа и, судя по всему, не двигалась. Этот разряд существенно отличается от тех, которые изображены на рис. 5.33, 5.34, в том отношении, что он оставил не хаотически изменяющийся, а гладкий след. Эта фотография схожа с теми, которые показаны на рис. 5.29 и 5.30. Она была интерпретирована как изображение не шаровой, а близкой к обычной молнии. Сравнение показывает, что и другие две



Рис. 5.34. Сделанная во время грозы фотография нерегулярного следа, оставленного вторичными лидерными разрядами обычной линейной молнии [875]. Она не интерпретируется как фотография шаровой молнии, но иллюстрирует возможность такой интерпретации в случае, когда разряд быстро движется в небольшой области.

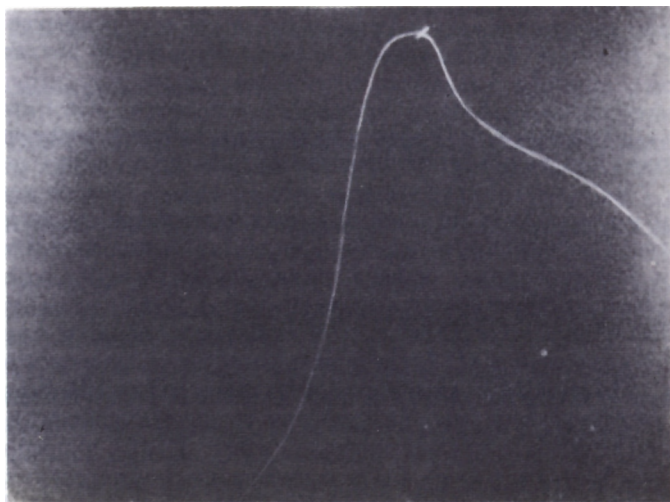


Рис. 5.35. Сделанная во время грозы фотография, интерпретируемая как фотография разряда обычной молнии [875]. Она схожа с другими фотографиями, связываемыми с шаровой молнией. Кроме того, эта фотография показывает сомнительность тех доказательств, которые приводятся при интерпретации подобных следов как результата шаровой молнии.

фотографии связаны, по-видимому, с аналогичными природными разрядами.

Фотография разряда молнии ленточного или вихревого типа приводилась в работе [1679]. Она не связывалась с шаровой молнией, но была очень похожа на фотографии типа непрерывного одиночного следа (если считать, что движение камеры отсутствовало). Эта, а также другая фотография, опубликованная в работе [1672], явно свидетельствуют о сложности интерпретации источника изображения только на основе фотоснимков.

Фотографии 5.33 и 5.34 важны в том отношении, что помогают сформулировать возможное общее представление о наблюдении шаровой молнии. Одна из форм шаровой молнии может быть результатом мощных кратковременных объемных зарядов, связанных с сильными и нерегулярными электрическими полями, и коронных разрядов вблизи поверхности земли. Кажущееся единым тело шаровой молнии может быть результатом быстрого перемещения разряда в небольшом объеме. Непрерывное свечение связано с продолжительным существованием большого пространственного заряда и наличием вторичных быстрых разрядов, продолжающихся в течение времени, намного (возможно, в тысячи раз) превышающего обычное время свечения. Последнее составляет лишь около 10 мкс. Такой процесс может, помимо того, служить источником энергии для возбуждения молекул. Он может приводить к появлению видимого излучения, интерпретируемого свидетелями как свечение шаровой молнии. См. гл. 7, § 7.5.

5.2.8. Тип 8.

Искусственные явления

Этот тип фотографий относится к лабораторным явлениям, имеющим вид шаровой молнии или ее видимого следа.

В прошлом веке ученые заинтересовались электрическими явлениями и проводили эксперименты с электрическими генераторами с целью воссоздать явления типа молнии. Было выполнено множество опытов и найдено много общего между свойствами искусственных и естественных электрических явлений, в том числе и для шаровой молнии. Различные эксперименты, относящиеся к шаровой молнии, подробно обсуждаются в гл. 7, где приводится также много фотографий.

По-видимому, самой первой из фотографий лабораторных разрядов, представленных как искусственно созданную шаровую молнию, была фотография, опубликованная в работе [1810] и воспроизведенная на рис. 5.36. Эта работа была основана на замечательных экспериментах итальянского физика профессора Риджи и немецкого физика Тёплера, поскольку сфотографированные разряды были, по-видимому, получены на установке, построенной по идее А. Риджи. В частично откачанной и закрытой цилиндрической стеклянной трубке создавался тлеющий разряд. Концевые электроды присоединялись к электрической батарее и высоковольтному генератору. Постулировалось, что разряд в разре-

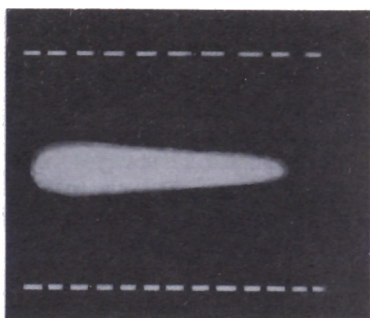
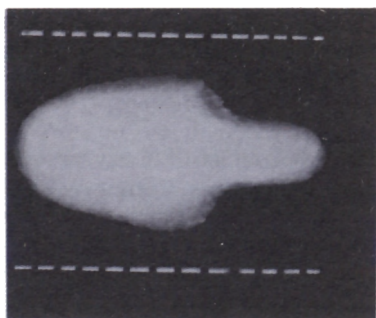


Рис. 5.36. Фотографии светящихся объектов, созданных в лаборатории с помощью управляемого электрического разряда в частично откачанном сосуде [1810]. Не исключено, что эти фотографии сделаны А. Риджи и М. Тёплером.

женном газе аналогичен природному разряду, происходящему в разреженном газовом канале разряда молнии. По аналогии принималось, что шаровая молния — это разряд, рождаемый обычной молнией. Аналогичная идея более подробно обсуждалась многими исследователями, разрабатывавшими теорию образования шаровой молнии. Среди них наиболее известны работы [434, 435, 862, 1071, 1208, 1293, 1522].

Несмотря на то что многие исследователи отмечали аналогию между тлеющим разрядом в частично откачанном сосуде и шаровой молнией, они проявляли скептицизм, полагая, что подобный результат не может быть достигнут при естественном атмосферном давлении. Распространение искровых разрядов в воздухе при атмосферном давлении и характер коронных разрядов исследовались многими учеными. Сначала полагали, что таунсендовская теория [1797, 1798] образования искры абсолютно правильна. Согласно этой теории, начальный электрон, вышедший из материала отрицательно заряженного катода, порождает лавину электронов за счет столкновений при продвижении вдоль межэлектродного промежутка. Образованные таким путем электроны и положительные ионы создают пространственный заряд с плотностью, достаточной для поддержания искры.

Более поздние теоретические и экспериментальные работы показали, что чисто таунсендовский механизм не работает при давлениях, значительно превышающих 100 мм рт.ст., и длинах разрядного промежутка более 3 мм. Основной причиной для отказа от таунсендовского механизма разряда послужило несоответствие между измеренной и предсказываемой теорией скоростью продвижения начального электрона через межэлектродный промежуток. Теоретическое время пробоя оказалось большим, чем в эксперименте. Сейчас известно, что искровой разряд распространяется за счет появления вторичных электронов, созданных начальным электроном (электронами) в среде, где происходит это распространение.

Это означает, что при появлении начальных электронов в промежутке накапливается пространственный заряд, а перестройка зарядов ведет к протеканию тока в среде, что в свою очередь увеличивает число зарядов. Распространение искры связано с лавинным эффектом. Искра — это непрерывный процесс, который сам является неустойчивым, но обеспечивает переход между двумя устойчивыми состояниями: отсутствием тока и наличием тока (разрядом).

Для разряда молнии в атмосфере представление об искровом разряде заменяется представлением о распространении быстрого лидера. Это весьма быстрое распространение заряда в воздухе вдоль канала пространственного заряда высокой плотности, которое эффективно снижает электрическое сопротивление этого канала. За ним уже следует разряд молнии. При распространении разряда в воздухе создаются области с максимальной плотностью заряда. Кроме того, разряд в атмосфере следует за неоднородностями электрического поля в воздухе, в свою очередь изменяет это поле и создает другое, измененное и неоднородное поле. Ясно также, что ионизация воздуха будет неоднородна в соответствии с неоднородностью электрических полей и пространственных зарядов и будет зависеть от различия в подвижностях положительных и отрицательных зарядов.

Экспериментальные и теоретические исследования коронных и других типов разрядов в воздухе подробно описаны в [1092, 1645]. Установлено, что вторичные электроны, образующиеся при ударе положительно заряженной частицы в катод, приводят к лавинной ионизации окружающего газа. После ионизации молекул воздуха они претерпевают излучательную рекомбинацию, при которой может возникать видимый свет. Для того чтобы разряд мог распространяться за пределы области, занятой зарядом, ионизация должна простирается на гораздо большие расстояния. Начальный разряд может поддерживаться лишь конечное время, поскольку подвижность пространственного заряда, а также образование и движение отрицательных и положительных ионов изменяют условия лавинообразования в начальном разряде. Если приложенное поле остается сильным или увеличивается, происходят лавинная ионизация и распространение разряда, причем этот процесс имеет периодический характер. Понятия «быстрый разряд» или «стример» относятся именно к этому процессу распространения.

Когда процесс является самоподдерживающимся, т.е. когда он распространяется на расстояние, многократно превышающее среднюю длину свободного пробега электрона, образуется коронный разряд. Корона видна невооруженным глазом благодаря возникающему излучению. В [1092] приведены многочисленные фотографии короны; некоторые из них воспроизводятся здесь. Слева на рис. 5.37 приведена фотография свечения короны вокруг положительно заряженного острия. На правой фотографии видны стримеры, которые могут налагаться на свечение короны при расширении области разряда. На рис. 5.38 показаны пробойные стримеры в разрядном промежутке, распространяющиеся от положительно заряженного острия. Создается впечатление,



Рис. 5.37. Фотография созданного в лаборатории светящегося коронного разряда [1092]. Корона и вспышечные стримеры наблюдались вблизи положительно заряженного острия диаметром 2 мм, размещенного над плоским электродом.

что новые стримеры догоняют старые и обеспечивают продвижение разряда через межэлектродный промежуток.

Создаваемые в лаборатории коронные разряды и коронные разряды в атмосфере, называемые огнями св. Эльма,—совершенно аналогичные явления. Такие коронные разряды могут возникать вблизи отрицательно и положительно заряженных острых электродов. В природе (поскольку земля во время грозы обычно заряжена положительно) верхняя оконечность предмета, возвышающегося над землей, становится положительно заряженным острием. Образующийся при этом коронный разряд наблюдался множество раз на протяжении многих веков.

Однако твердо установленное свойство коронных разрядов состоит в том, что условия, обеспечивающие возможность таких разрядов, не допускают их свободного движения. Корона не может отделиться от заряженного острия и «блуждать» в воздухе, поскольку она поддерживается сильным электрическим полем, образующимся вблизи острия. Именно подвижность шаровой молнии отличает ее от огней св. Эльма. Фотографии, сопровождающие сообщения свидетелей о свободном передвижении шаровидного светящегося тела, не могут относиться к коронным разрядам. Однако фотографии тех объектов, которые оставались неподвижными, можно отнести к снимкам коронных разрядов. В связи с этим природу объектов, изображенных на рис. 5.25, 5.26, приходится считать неустановленной.

Нет сомнений, что свечение ионизованного в лабораторных условиях воздуха может напоминать о сообщениях и фотографиях, связываемых с шаровой молнией. Установлено, что ионизованный воздух, т.е. воздушная плазма низкой плотности, в целом действительно напоминает шаровую молнию. Плазму можно создать обычным способом (с по-

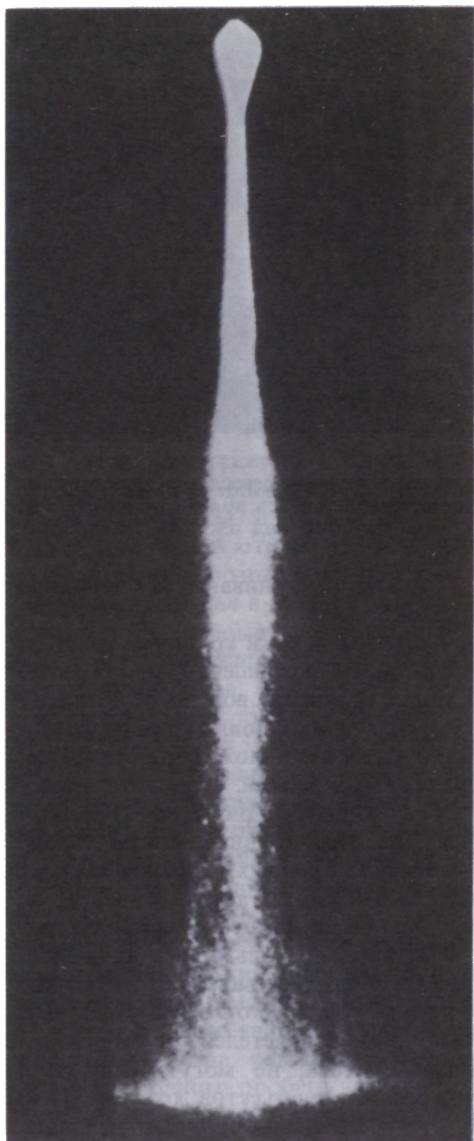


Рис. 5.38. Фотография светящегося пробойного стримера в лабораторных условиях [1092]. Разряд создавался между положительно заряженным острием и плоским электродом. Видно явное сходство с предыдущими рисунками.

мощью постоянного напряжения) или с помощью высокочастотных электромагнитных полей. Созданию плазмы и изучению проблем ее удержания посвящено множество работ.

Основополагающей работой, в которой изучались свойства высокочастотного плазмоида, является работа [1951]. Термин «плазмOID» относится к любым светящимся образованиям, образующимся в высоко-

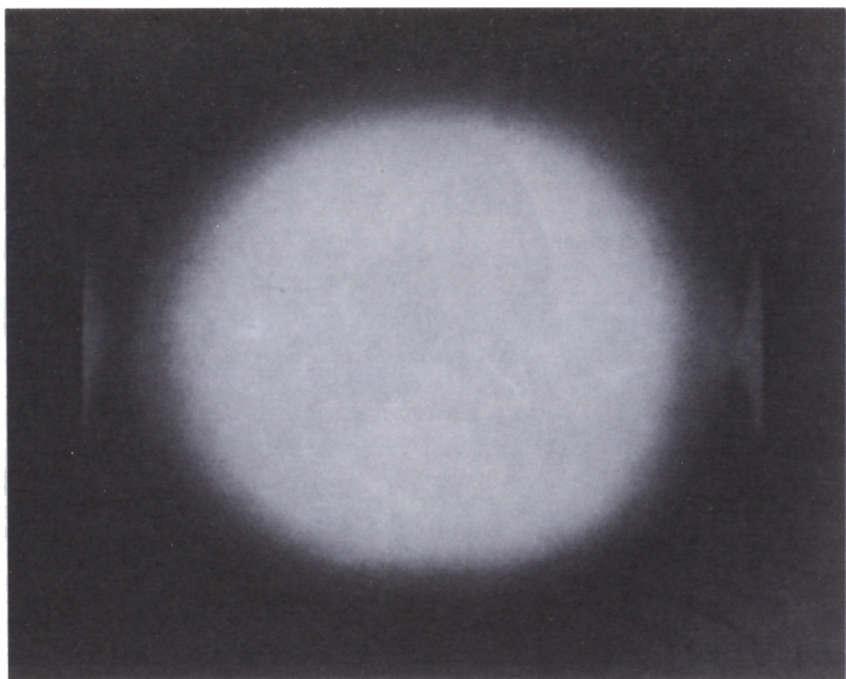


Рис. 5.39. Фотография лабораторного высокочастотного разряда в частично откачанном объеме [829].

частотном разряде. Среди них – шарообразные, веретенообразные и любые другие плазменные образования, возникающие в высокочастотном разряде и имеющие четкую форму. Плазма образуется при фокусировке высокочастотного излучения (с частотой 1–100 МГц) в частично откачанном сосуде. Установлено, что свойства плазмоедов несколько изменяются с давлением. Такие плазмоеды могут существовать в воздухе при атмосферном давлении и в откачанных сосудах.

Фотография типичного плазмоеда, созданного между плоскопараллельными электродами, показана на рис. 5.39 [829]. Электроды видны в левой и правой частях фотографии. Частота возбуждения составляла 15 МГц, расстояние между электродами 25 см, давление в сосуде $0,3 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. Плазмоед был белого цвета, имел сферическую форму диаметром около 12 см. При других давлениях его форма менялась. Он мог становиться эллипсоидальным, как яйцо, плоским и слегка утолщенным вблизи центра, как два прижатых друг к другу блюдца; он мог внезапно исчезнуть при изменении давления.

Аналогичная экспериментальная методика – безэлектродный разряд – приводит к похожим явлениям. В частности, плазмоед образовался в фокусе параболической радиолокационной антенны и мог удалиться

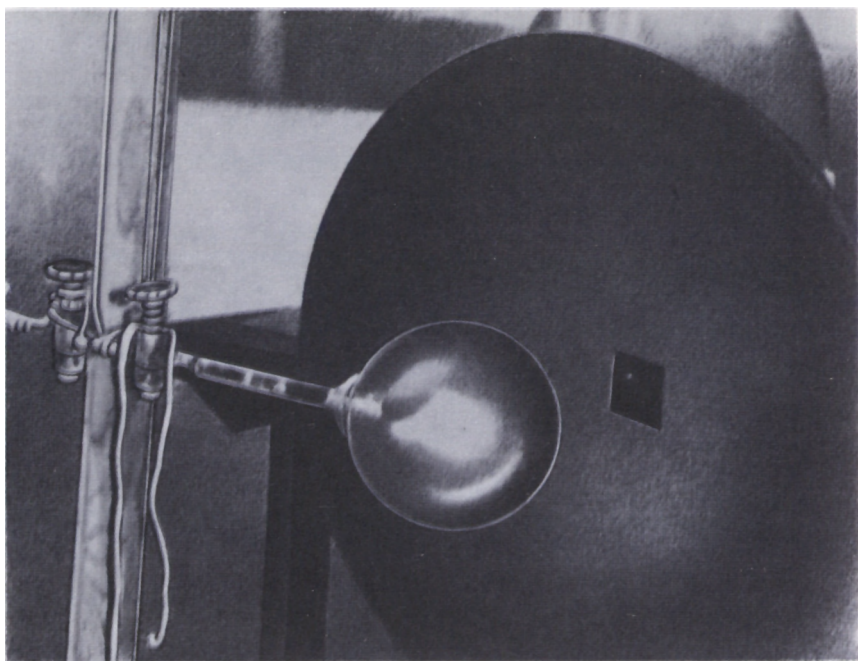


Рис. 5.40. Фотография высокочастотного разряда в частично откачанной камере [1522]. Высокочастотное поле фокусировалось в камере с помощью параболической радарной антенны.

ся от нее на некоторое расстояние. В ранней работе [317] было показано, что в результате сверхвысокочастотного пробоя воздуха может образоваться «электрический огонь». Такие безэлектродные разряды можно создавать в воздухе и других газах при нормальном давлении, как это было установлено в работах [813, 1522], в которых использовался радиолокационный передатчик X-диапазона (частота 8,2–12,4 ГГц). В работе [1522] использовался передатчик с частотой 9 ГГц, мощностью в импульсе около 21 кВт и средней мощностью 50 Вт, работавший в режиме импульсной модуляции с длительностью импульсов 0,5 мкс и частотой их повторения 3450 Гц.

Плазмод, полученный в этой работе, показан на рис. 5.40. Он был создан в откачанной стеклянной камере диаметром около 13 см. Давление менялось от 0,1 до 80 мм рт. ст., а стеклянный сосуд размещался на расстоянии около 60 см от антенны. Форма и цвет безэлектродного разряда менялись с давлением, как и в случае разрядов, описанных в [1092]. Цвет изменялся от бесцветного прозрачного, красного, фиолетового до голубого, а форма — от сферической до цилиндрической и других окруженных ореолом форм. Перед пробоем было необходимо создать в разрядной камере начальную ионизацию. Только после

достижения определенного уровня предварительной ионизации возникал безэлектродный разряд.

Было установлено, что свечение плазмоида не является постоянным, а периодически изменяется с частотой повторения радиоимпульсов. Последние имели почти прямоугольную форму и длительность 0,5 мкс. Свечение нарастало за 0,4 мкс и медленно затухало в соответствии со спадом концентрации ионизованных частиц в плазмоиде. Интенсивность свечения спадала до нуля примерно за 1 мкс.

Аналогичный высокочастотный разряд изучался в работе [741]. Он создавался при давлении 10–40 мм рт.ст. в сосуде, помещенном в фокусе микроволновой антенны. Частота излучения составляла 10 ГГц, а используемая мощность 40 кВт. Была также опубликована фотография разряда, внешний вид которого весьма схож с разрядом, показанным на рис. 5.40.

Сравнительно долгоживущий безэлектродный разряд в воздухе удалось создать с помощью высокочастотного генератора с частотой 75 МГц. Такие разряды были созданы при атмосферном давлении [1443, 1444]. Одна из фотографий этого эксперимента приведена на рис. 7.14. Свечение связывается с излучением молекул CO_2 , возбужденных разрядом в метастабильное состояние. Оно продолжалось в течение примерно 1 с после выключения высокочастотного поля, а на воздухе – около 0,5 с. Более короткая «жизнь» в воздухе связана, по-видимому, с конвекционным перемешиванием в открытом пространстве.

Время существования свечения сильно зависит от состава электродов. Когда используются электроды из материала с высоким давлением паров, свечение оказывается более продолжительным. В случае электродов с низким давлением пара свечение после выключения высокочастотной дуги исчезает быстрее.

Цвет разряда связан с соотношением N_2 и O_2 в атмосфере. Свечение N_2 – голубое, а O_2 – белое. Свечение воздуха, содержащего около 20% O_2 , – желто-белое. Желтый цвет связан с увеличенным содержанием NO_2 в разряде. Свечение разряда в N_2O было оранжевым, более интенсивным, чем в воздухе, и продолжалось около 2 с после выключения высокочастотной мощности.

Использование различных экспериментальных способов создания объектов, похожих на шаровую молнию, не следует считать подтверждением того или иного механизма ее образования или существования. Природе могут быть и не нужны такие механизмы или процессы. Для концентрации энергии в небольшом объеме воздуха в лабораториях использовались различные экспериментальные методы. Однако контролируемые разряды в атмосфере не получены. Кроме того, большинство экспериментальных результатов относится к разрядам в откачанных сосудах, а использованные методы возбуждения в природе скорее всего не существуют. Более подробное обсуждение этих экспериментов см. в гл. 7.

5.3. Недоступные фотографии

Большое число фотографий, упомянутых в той или иной работе, оказались недоступны для автора. В работах [332, 1975], по-видимому, опубликованы фотографии, первоначально интерпретированные как фотографии шаровой молнии. Однако этот же случай был изучен в работах [1872, 1880], где после исследования фотографий они были связаны с уличным фонарем и движением камеры. В работе [1975] обсуждалась также фотография, сделанная Вольфе в Берлине в 1902 г. Было показано, что множественные следы на ней также вызваны движением камеры. Фотографию Вольфе нам получить не удалось.

Многочисленные фотографии молнии были опубликованы в [1457]. Три из них были интерпретированы как фотографии шаровой молнии. В [1880] по этому поводу выражается скептицизм, а изображения на фотографиях связываются с уличными фонарями и движением камеры. В доказательство подлинности этих фотографий они были воспроизведены и подробно обсуждались в работах [1458, 1459]. Фотография и, по-видимому, обсуждение других свидетельств существования шаровой молнии приводились в [1468]. Эта фотография рассматривалась в [1942], где было высказано предположение, что она аналогична тем, которые публиковались в [875]. Автор работы [1468] имел, по-видимому, и свои личные наблюдения.

В [1535] опубликована фотография шаровой молнии, которая позже кратко обсуждалась Капицей [961]. Согласно сообщению, было опубликовано также несколько фотографий в многотиражной газете [1582]. Одна из них позже воспроизводилась в работах [1314, 1316]. Капица [961] обсуждал фотографию, опубликованную в работе [1674]. Фотография [1796] была сделана еще в конце прошлого века и, по-видимому, похожа на ту, которая опубликована в работе [1504].

Фотография, опубликованная в работе [1942], по-видимому, идентична той, которая появилась в работе [1943]. Известно, что две фотографии, интерпретируемые как фотографии шаровой молнии, опубликованы в работе [606]. Еще две фотографии шаровой молнии были представлены во Французскую Академию наук [1983]. Опубликованы они не были.

Основные возражения

6.1. Предварительные замечания

Скептицизм исследователей в отношении шаровой молнии не является новой реакцией на имеющиеся данные наблюдения. Уже отмечалось, что такие выдающиеся ученые своего времени, как Фарадей и Араго, подвергали сомнению существование шаровой молнии. Так, Фарадей [644] писал: «Я не собираюсь отрицать тот факт, что в атмосфере могут появляться огненные шары; однако весьма сомнительно, что они имеют что-либо общее с разрядом обычного электричества или как-либо связаны с молниями либо атмосферным электричеством».

Многие метеорологи и наблюдатели на метеорологических станциях скептически относятся к реальности шаровой молнии. Так, серьезные сомнения высказаны в работах [300, 1089, 1571, 1572, 1782–1784], опубликованных в то время, когда интерес к любым электрическим явлениям стимулировал высокую активность в этой области. Автор более поздней работы [372] указал, что он не наблюдал шаровую молнию в ходе более чем двадцатилетних исследований в качестве метеоролога и специалиста по изучению молнии. На основе этого факта и документально подтвержденных свидетельств ошибочности большого количества сообщений о наблюдениях шаровой молнии он пришел к заключению, что такого явления, как шаровая молния, не существует. Многие исследователи (в частности, авторы работ [308, 895]) не смогли найти ни одного реального подтверждения существования шаровой молнии, которое не могло бы быть интерпретировано другим, более естественным способом. Еще категоричнее работа [897], где предполагается, что концепция шаровой молнии является попросту вымыслом.

Однако о наблюдениях шаровой молнии сообщали такие известные ученые, как Лёб [1091], Марш [1123–1125, 1128] и Ротч [1536, 1538]. Профессор физики Кабальеро [456] сообщил о появлении шаровой молнии в 1890 г., которое наблюдалось также другим профессором. В работах [1624] и [1818] указывается также, что Нильс Бор и Виктор Вайскопф сообщали о наблюдениях шаровой молнии.

Конечно, можно возразить, что отсутствие определенных данных является просто результатом того, что появление шаровой молнии – событие весьма редкое. Даже Шонланд [1585] согласился с тем, что все

имеющиеся сообщения не могут быть ошибочными и что должны существовать явления, которые не сводятся к предельной форме огней св. Эльма. Основная трудность связана с невозможностью исследования шаровой молнии систематическим путем. По-видимому, это наиболее распространенное возражение, высказываемое исследователями при попытке проанализировать явление и обсудить его природу и физическую сущность.

Беспристрастный анализ сообщений о шаровой молнии приводит к выводу, что значительная доля этих сообщений весьма сомнительна и может быть интерпретирована различными способами. Например, поскольку, как сообщалось, многие наблюдения шаровой молнии производились в период грозовой активности, вполне естественно считать, что некоторые сообщения могут быть обусловлены оптической иллюзией, вызванной остаточным изображением на сетчатке ослепленного глаза. Кроме того, поскольку некоторые характеристики огней св. Эльма подобны соответствующим характеристикам шаровой молнии, можно считать, что еще большее число сообщений является результатом ошибочной идентификации.

Огни св. Эльма – хорошо известное явление свечения, которое временами наблюдается в период грозовой активности или во время протекания других электрических процессов в природе. Это явление интенсивно исследовалось в лаборатории (см., например, [1758–1760, 1780, 1781]). Огни св. Эльма представляют собой видимое проявление коронного разряда с некоторых выступающих над землей предметов. При большой разности потенциалов между землей и облаком, которая возникает в неблагоприятных погодных условиях, напряженность электрического поля в окрестности такого предмета может достигать значительной величины. Это определяется геометрией предмета и его проводимостью. Так, например, электрическое поле вблизи острия или предмета с малым радиусом кривизны много больше, чем в случае, когда предмет плоский или имеет плавное скругление.

Интенсивное электрическое поле может вызывать эмиссию электронов с поверхности предмета, которые в свою очередь могут вызывать диссоциацию и ионизацию молекул воздуха. Рекомбинация этих молекул приводит к выделению энергии в виде излучения, длина волны которого может оказаться в видимом диапазоне спектра. Наблюдатель может описывать явление как светящийся шар, который парит над объектом или движется около него.

Согласно описаниям, содержащимся, например, в [413, 1296], огонь св. Эльма имеет овальную или шарообразную форму, размер примерно с большой апельсин и голубой или голубовато-белый цвет свечения. Однако наблюдались случаи, когда диаметр шара значительно превышал 30 см. Распад свечения происходит бесшумно, однако может иметь как внезапный, так и плавный характер. Время существования рассматриваемого явления значительно больше, чем время жизни шаровой молнии; обычно оно исчисляется многими секундами или даже минутами.

Характерное различие между огнем св. Эльма и шаровой молнией состоит в кажущемся независимом движении последней. Хотя, согласно наблюдениям, огонь св. Эльма способен перемещаться, он может двигаться вдоль проводника, иногда испытывая пульсации, но никогда сам по себе не освобождается от проводника. Таким образом, огонь св. Эльма не может ни подниматься, ни опускаться, ни летать, что так характерно для шаровой молнии. В работах [410, 486, 614, 699, 1332] объекты, наблюдавшиеся во время гроз вблизи проводов линий электропередач, описывались как шаровая молния. Однако в действительности эти явления представляли собой огни св. Эльма.

Следует добавить, что свечение, нередко наблюдавшееся во время гроз (см., например, [1969]), является, несомненно, примером огней св. Эльма, а не шаровой молнии.

Другая форма огней св. Эльма, не связанная непосредственно с проводниками, использовалась в [474] для объяснения неидентифицированного движущегося свечения облаков и предметов, наблюдаемого иногда ночью в нижних слоях атмосферы. Как предполагается в этой работе, рои ночных насекомых могут испускать свечение типа коронного, двигаясь через области электрического поля большой напряженности, возникающего в результате таких природных явлений, как грозы или пылевые выбросы. Различные виды широко распространенных насекомых, которые перемещаются в воздухе роями, были подвергнуты в лаборатории воздействию электрического поля напряженностью около 2 кВ/см. При этом наблюдалось свечение. Согласно измерениям, интенсивность излучения на расстоянии 18 см от излучающего насекомого составляет примерно $4 \cdot 10^{-6}$ Вт/см², что вполне достаточно для восприятия человеческим глазом на расстоянии около 6 м. На возможность существования такого явления в природе указывают измерения электрического поля в окрестностях гроз. Согласно измерениям с самолета, которые обсуждаются в [474], напряженность электрического поля составляет от 1 до 3 кВ/см.

Эксперименты и анализ, описанные в [474], казалось бы, ставят под сомнение утверждение о связи огней св. Эльма с близкорасположенными проводниками. Однако коронный разряд, возникающий вблизи тела насекомого, обусловлен структурой этого тела. Оболочка тела насекомого с его различными выступающими органами образует специфический проводник, на выступах которого возникают области повышенной напряженности электрического поля. Жидкая среда внутри тела насекомого образует электролит. При внесении насекомого во внешнее электрическое поле с точек, выступающих над поверхностью его тела, стекают коронные разряды. При этом явления разрядов происходят тогда, когда насекомое живо; у мертвого насекомого они отсутствуют.

Взаимосвязь между шаровой молнией и огнями св. Эльма обсуждалась неоднократно. Было высказано предположение, что в некоторых редких случаях огни св. Эльма превращаются в шаровую молнию. Среди более чем 1100 сообщений, собранных автором, имеется только два сообщения о подобных случаях. В работах [979, 1610] сообщалось, что

светящийся шар, вначале парящий над расположенным на земле предметом, внезапно освободился от «притяжения» к заземленному предмету и удалился от него. Такие наблюдения, хотя они и редки, несомненно, могут описывать только образование шаровой молнии. Указанные наблюдения могут также отражать события типа обсуждавшихся в [474]. В подавляющем большинстве случаев шаровая молния наблюдалась тогда, когда светящаяся форма, по-видимому, уже существовала в течение некоторого времени. Сообщения о наблюдениях формирования шаровой молнии составляют лишь малую часть сообщений о наблюдениях шаровой молнии, которые и сами нечасты. Поэтому и само существование шаровой молнии как единого, отдельного, индивидуального явления ставилось под сомнение.

6.2. Оптические иллюзии

Поскольку огромное количество сообщений было вызвано просто оптическими иллюзиями или остаточными изображениями, многие заключали, что шаровая молния просто не существует. Эта точка зрения отражена в работах [303, 304, 633, 794, 895, 1107, 1564, 1571, 1572, 1587, 1588, 1703, 1810, 1811, 1841]. Как правило, в подобных работах утверждается, что остаточное изображение, формирующееся в глазу наблюдателя, появляется под воздействием вспышки интенсивного излучения разряда обычной молнии.

Выполненный недавно [1476] анализ наблюдений шаровой молнии показал, что многие наблюдатели вначале обнаруживали шаровую молнию в точке, куда приходился удар нормальной молнии в землю. Число таких наблюдений составляет почти половину всех опубликованных описаний шаровой молнии. В [658] высказано предположение, что разряд молнии облако–земля может мгновенно вызывать интенсивное свечение почвы, обусловленное частичным испарением вещества в точке попадания разряда.

Сложность явлений, связанных с формированием остаточного изображения, хорошо известна и являлась предметом многочисленных исследований как чисто психологических, так и по психологии зрения. При этом установлено, что отрицательные остаточные изображения более часты, нежели положительные. Положительное остаточное изображение возникает в результате визуального наблюдения яркого источника света, интенсивность которого велика по сравнению с фоном. Положительное остаточное изображение формируется в световом конусе глаза и фиксируется обычно вблизи центра сетчатки, но не в самом центре. Конечно, наблюдатель будет стараться центрировать изображение кажущегося объекта. Вследствие этого по мере движения глазных мышц, стремящихся скорректировать смещение изображения относительно центра, возникнет иллюзия дрейфа объекта относительно фона, который видит наблюдатель. Таким путем возникает кажущееся движение объекта.

Особенностями положительного остаточного изображения являются сохранение его в течение некоторого времени и необычный характер движения изображения. Например, может показаться, что остаточное изображение проходит сквозь закрытое окно и другие материалы. Конечно, при этом не сообщается ни о каких повреждениях, и в процессе проникновения изображение не испытывает никаких изменений. Время от времени сообщается именно о таком поведении шаровой молнии.

В зависимости от многих обстоятельств положительные остаточные изображения существуют в течение 2–10 с. Разумеется, их исчезновение происходит внезапно и бесшумно. Хотя положительные остаточные изображения беззвучны, наблюдатели могут сообщать о наличии звуков, что обусловлено другими окружающими явлениями. Эти особенности, несомненно, создают аналогию с шаровой молнией.

Как сообщается в [303], дрейфующее положительное остаточное изображение, похожее на шаровую молнию, может быть вызвано при использовании в качестве интенсивных источников излучения импульсных ламп и стробоскопических источников света. Д-р Кеннеди, работая над фотографиями для автора данной книги в 1977–1978 гг., исследовал в затемненной фотолаборатории восприятие положительного остаточного изображения. Изображение воспринималось в течение 1–2 с после интенсивной вспышки света, создаваемой ксеноновой лампой. Длительность существования изображения после вспышки могла достигать 15 с. Исчезновение изображения – внезапно и бесшумно – достигалось путем движения глаз. Положительное остаточное изображение могло воспроизводиться повторно в затемненном помещении, однако оно не обнаруживалось в слабо освещенном помещении. По-видимому, появление в глазу остаточного изображения зависит от уровня контраста вспышки и отсутствия различных изображений в затемненном помещении непосредственно перед вспышкой.

Резкое несогласие с точкой зрения на шаровую молнию просто как на результат ошибочной идентификации высказывалось авторами работ [503, 560, 935]. Их основное возражение основывалось на фактах одновременного наблюдения явления шаровой молнии несколькими очевидцами, представившими аналогичные сообщения. Поскольку для каждого свидетеля характерны свои особенности восприятия и ориентация, они должны были по-разному описывать эффекты остаточного изображения или оптической иллюзии. Кроме того, поскольку остаточные изображения должны быть локализованы относительно фона, на котором наблюдается стимулирующий изображение объект, последние должны приближаться или удаляться с приближением или удалением фона. Следовательно, можно ожидать существования общего соотношения между кажущимся диаметром изображения и расстоянием до него. В сообщениях о наблюдении шаровой молнии никакого соотношения подобного рода не отмечено. Следует добавить также, что некогда ученые сомневались в реальности метеоритов, о падениях которых часто сообщали неподготовленные наблюдатели.

6.3. Эффекты восприятия

В работе [502] сообщения о наблюдениях шаровой молнии ставятся под вопрос по той причине, что ошибки часто возникают из-за эффектов восприятия. Сообщаемые наблюдателем характеристики изображения шаровой молнии могут быть сомнительными, поскольку наблюдатель должен оценивать ее свойства по известным размерам окружающих предметов. Размеры этих известных предметов сопоставляются затем с кажущимися размерами, внешним видом и положением наблюдаемого изображения, а описание явления дается относительно известных деталей места действия. В том случае если неизвестный объект наблюдается на неопределенном фоне, таком, как небо или плохо освещенный ночной фон, то наблюдателю приходится при описании события полагаться на свои суждения об окружающем.

К сожалению, если размеры и расстояния очень неопределенны, то оценки параметров неизвестного объекта будут весьма сомнительны. Поскольку оценка расстояний и размеров обычно производится по отношению к объектам с известными расстояниями и размерами, то в случае, если известные объекты фона расположены дальше, чем неизвестные объекты, оценка истинных размеров последних оказывается завышенной. Напротив, если известные объекты расположены близко, то размер расположенного дальше неизвестного объекта будет недооценен. В ситуации, когда в окружении имеется много известных предметов для сравнения (например, в комнате), описания окажутся более точными.

Кроме того, существуют и другие эффекты восприятия, которые могут повлиять на оценку кажущегося движения объекта. Например, ощущение движения может быть вызвано изменениями условий освещения неизвестного объекта: увеличение освещенности интерпретируется как движение в направлении наблюдателя, а ее уменьшение – как удаление. Изменения размеров объекта также могут интерпретироваться как его движение относительно наблюдателя: увеличение размера связывается с движением в направлении наблюдателя, а уменьшение – с удалением. Автокинетические эффекты, связанные с движением глазных мышц, могут привести к ощущению хаотического или неверно воспринимаемого движения.

Таким образом, можно заключить, что к сообщениям неподготовленных наблюдателей следует относиться с известной долей сомнения. Это не означает, что рассматриваемого явления не существует; однако при выводе свойств данного явления на основании сообщений наблюдателей следует проявлять осторожность.

6.4. Сводка результатов и ошибочные интерпретации

Как следует из анализа, представленного в гл. 2 и 5, большинство опубликованных фотографий четочной молнии и шаровой молнии весьма сомнительны. Причины сомнений в подлинности фотографий изложены в соответствующих главах, где анализируется возможность соответствия этих фотографий правильной картине явления.

Имеющиеся фотографии и их репродукции четочной молнии и шаровой молнии перечислены в табл. 6.1 и 6.3 соответственно. Фотографии, полученные одним автором, представлены одной ссылкой. В табл. 6.2 перечислены фотографии или репродукции искусственно воспроизведенного явления, идентифицированного как шаровая молния. Классическим примером трудностей, возникающих при анализе многих фотографий конца прошлого – начала нынешнего столетий, служат работы [1678, 1899]. В них пунктирные изображения уличных фонарей, образованные посредством движения камеры, были интерпретированы как вторичные разряды, инициированные молнией.

Необходимо отметить, что одна фотография еще не дает достаточно оснований для утвердительного ответа на вопрос о существовании явления шаровой молнии. Было изготовлено множество фотографий, аналогичных опубликованным и идентифицированным как фотографии шаровой молнии. В [931] была опубликована фотография ложного солнца, полученная с самолета. Изображение представляло собой вытянутый неокрашенный объект. Изображение образовалось в результате отражения Солнца от кристалликов льда, находящихся в перистом облаке.

Изображение ложного солнца видно только при взгляде на облако сверху, когда кристаллы льда служат своего рода зеркалом. Угол между направлением на ложное солнце и вертикалью равен углу возвышения Солнца. Очевидно, что при рассмотрении фотографии без знания истинных условий ее получения изображение ложного солнца можно принять за изображение шаровой молнии. Однако ложное солнце не может наблюдаться в условиях, при которых появляются шаровые молнии.

Многие старые фотографии должны быть подвергнуты сомнению главным образом из-за их возраста. Фотография как широко распространенное и общедоступное занятие распространилась примерно с 1930 г.; фотографии, выполненные в более ранние годы, часто отражают несовершенство фотографической аппаратуры и материалов. Еще более старые фотографии, особенно выполненные до 1900 г., часто иллюстрируют ту неразбериху, которая возникает при интерпретации изображения без полного знания всех обстоятельств его получения.

В гл. 2 обсуждаются ряд фотографий четочной молнии и их аналогия с изображениями, создаваемыми источниками света – уличными фонарями – и движущейся камерой. Рис. 2.3 представляет собой фотографию, выполненную автором работы [366] с целью демонстрации

Таблица 6.1

Фотографии или репродукции, идентифицированные как четочная молния*

Рисунок	2.1(24) 2.2(25)	2.4(27)	2.5(27)	2.6(28)	2.7(28)	2.9(30)	2.10(31)	2.11(32)	2.12(3)	2.13(3)	2.16(38)
Ссылка	[1504]	[1611]	[1575]	[1458]	[1569]	[1185]	[1966]	[886]	[1194]	[1787]	[1793]

* В круглых скобках указана страница в данной книге, на которой помещена соответствующая фотография

Таблица 6.2

Фотографии или репродукции, идентифицируемые как искусственно воспроизведенная шаровая молния*

Рисунок	5.22(108), 5.23(109)	5.36(123)	5.40(128)	7.2(153), 7.3(154)	7.5(159)	7.6(160)	7.11(169)	7.14(183)
Ссылка	[413]	[1810, 1811]	[1522]	[886]	[1402]	[1394]	[340]	[1443, 1444]

* В круглых скобках указана страница в данной книге, на которой помещена соответствующая фотография.

Фотографии или репродукции, идентифицируемые как естественная шаровая молния*

Рисунок	5.1(87)	5.3(88)	5.4(90)	5.5(91)	5.6(92)	5.7(93)	5.8(93)	5.10(94)	5.12(97)	5.13(97)	
Ссылка	[587, 588]	[933]	[1]	[1275]	[1619]	[1973]	[1965]	[1942, 1943]	[354]	[1215]	
Рисунок	5.16(101)	5.17(102)	5.18(103) 5.19(104)	5.20(106)	5.21(107)	5.24(109)	5.25(110)	5.26(111)	5.27(112)	5.28(113)	5.29(114)
Ссылка	[1787]	[625]	[938, 939]	[1032]	[797]	[1314]	[505]	[742]	[1458]	[487]	[1355, 1356]
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											
Рисунок											
Ссылка											

* В круглых скобках указана страница в данной книге, на которой помещена соответствующая фотография

результатов умышленного движения камеры. Аналогичное предположение высказано в работе [1880]. По-видимому, фотографии, представленные на рис. 2.1 и 2.2 [1504], 2.4 [1611], 2.5 [1575], 2.6 [1458], 2.7 [1569] как изображения четочной молнии идентифицированы ошибочно.

Таким образом, приходится заключить, что большинство фотографий, о которых сообщалось как об изображениях четочной молнии, являются результатом ошибочной идентификации. Как сообщается в [1106], одна из предполагаемых фотографий четочной молнии была критически проанализирована д-ром Бергером, специалистом в области исследования молнии. Анализируя оригинальный негатив, он обнаружил, что эмульсия была крест-накрест изъедена насекомыми. Получившееся изображение было интерпретировано как четочная молния. Этот пример еще больше подчеркивает, что фотографические свидетельства, в особенности те, которые получены с помощью неподвижной камеры, должны подвергаться тщательному анализу и не должны заслуживать доверия до тех пор, пока не будут получены другие доказательства. Эта проблема обсуждалась также Сингером [1641].

На рис. 2.10 [1966] и 2.11 [886] представлены фотографии механически инициированных разрядов молнии с разрядным каналом постоянной яркости. Геометрические характеристики канала не соответствуют всем тем, которые обычно приписываются четочной молнии. Однако эти фотографии можно считать полноправными примерами одного из типов четочной молнии.

Фотографии, представленные на рисунках 2.9 [1185], 2.12 [1194], 2.13 [1787], похожи на снимки инициированных разрядов в том, что они не отражают характеристики геометрии каналов, обычно приписываемые естественной четочной молнии. Тем не менее это единственные имеющиеся фотографии естественной четочной молнии.

Исходя из анализа пяти или шести фотографий, изображающих, как общепринято, четочную молнию (это рис. 2.10 [1966], 2.11 [886, 887], 2.9 [1185], 2.12 [1194], 2.13 [1787] и, возможно, 2.16 [1793]), мы должны пересмотреть определение четочной молнии.

Термин «четочная молния» должен применяться к кажущемуся стабильным свечению, которое может иногда оставаться после разряда нормальной молнии между облаком и землей. Канал сегментирован, имеет неоднородную яркость и состоит из отдельных элементов, несколько различающихся по размерам и форме. Расстояние между светящимися элементами может меняться. Свечение остается устойчивым в течение порядка 1 с. Канал не обладает кажущейся периодичностью в продольном направлении.

Такое определение несколько отличается от общепринятого, обсуждавшегося в гл. 2. Основные различия состоят в том, что четочная молния, как показывает анализ фотографий, не связана с молниевым разрядом облако–облако, ее канал не выявляет периодическую синусоидальную форму, светящиеся элементы не обязательно сфероидальны, расстояние между элементами не постоянно.

Аналогичный анализ показал, что многие из фотографий и репро-

дукций, перечисленных в табл. 6.2 и идентифицированных как изображение естественной шаровой молнии, также ошибочны. Установлено, что движение камеры в сочетании с такими типичными источниками света, как уличные фонари, могут привести к фотографическим эффектам, похожим на характеристики шаровой молнии. Вызывают подозрения фотографии, представленные на рис. 5.3 [933], 5.4 [1], 5.5 [1275], 5.6 [1619], 5.7 [1973], 5.8 [1965] и 5.10 [1942]. Об этом говорит анализ рисунков 2.3 [366], 5.9 [1437] и 5.11 [353].

Кроме того, объекты на фотографиях рис. 5.28 [487] и 5.30 [558] не наблюдались очевидцами и могут быть интерпретированы аналогичным образом. Отмечается, однако, что эти последние фотографии вряд ли получены с помощью фонарей и движущейся камеры; скорее, они относятся к естественной молнии. Аналогию между этими фотографиями ясно иллюстрирует анализ фотографий на рис. 5.33 [876], 5.34 [875]. Часто естественные разряды состоят из быстро движущихся стреловидных каналов, которые в зависимости от локализации меняющихся во времени электрических полей и пространственных зарядов могут образовывать в пространстве сложные линии. Как мы видели, фотографирование таких разрядов с помощью неподвижной камеры может приводить к ошибочной идентификации. Кроме того, канал молнии может заканчиваться над землей, и вид поперечного сечения конечного участка канала может интерпретироваться как изображение шаровой молнии. Таким образом Варлей объяснял наблюдения, описанные в работе [62], а также ложную шаровую молнию, наблюдавшуюся согласно [308].

Фотография, представленная на рис. 5.29 [1355, 1356], аналогична опубликованной в [558]. Единственное различие состоит в том, что в первом случае объект, по сообщениям свидетелей, медленно передвигался. В результате последующих дискуссий, опубликованных главным образом в работах [1438, 1439], возникли серьезные сомнения в достоверности этой фотографии. Фотография, выполненная Давыдовым [558], не проверялась.

Фотография, представленная на рис. 5.31 [588], подтверждается сообщениями нескольких свидетелей. Эта фотография чрезвычайно трудна для детального анализа и извлечения определенной информации. След не похож на изображение, приведенное на рис. 5.35 [875], и, возможно, обусловлен прохождением нормального разряда. В настоящее время эта фотография не может быть идентифицирована без оговорок. Фотография, представленная в работе [1549], была подвергнута сомнению авторами [1925, 1944] и не рассматривается как изображение шаровой молнии.

Фотографии на рис. 5.12 [354] и 5.13 [1215] могут изображать раннюю стадию формирования шаровой молнии. Фотография, приведенная на рис. 5.15 [1314], изображает не шаровую молнию, а скорее всего то явление, которое указано автором вначале. Поскольку большинство фотоаппаратов имеют выдержку не менее $1/125$ с, а разряд молнии происходит за десятки миллисекунд, не следует удивляться тому, что явление шаровой молнии, если оно в действительности возникает из канала нор-

мальной молнии, не было полностью схвачено на пленку. Однако, даже будучи подкреплены сообщениями о результатах наблюдений (которые могут быть сомнительными), эти фотографии не являются столь надежным доказательством, каким их представляют.

Фейерверчный тип шаровой молнии представляется фотографиями и рисунками 5.18 и 5.19 [938, 939], 5.20 [1032], 5.21 [797], которые похожи друг на друга и аналогичны другим описаниям. Однако в работе [1032] приведена фотография поднимающейся шаровой молнии, которая в действительности является очень редкой. Фотографии на рис. 5.18 и 5.19 [938, 939], как предполагается в [372], могут изображать фейерверки, хотя тщательное исследование, выполненное автором работы [1558], привело его к уверенности, что эти изображения не могли быть получены с помощью фейерверка. В более скептической работе [1703] эти фотографии [938, 939] отвергаются, причем утверждается, что все сообщения о наблюдениях шаровой молнии являются ошибочными. Не разделяя такую точку зрения, мы должны отметить, что большинство фотографий могут быть ошибочными, поскольку отсутствует дополнительная информация.

По причинам, которые уже рассматривались, все фотографии и рисунки, содержащие изображения единичных светящихся объектов (рис. 5.24 [1314], рис. 5.25 [505], 5.26 [742], 5.27 [1458]), сомнительны. Подобные изображения могут быть вызваны как нормальным электрическим светом, так и естественными явлениями, например огнями св. Эльма или обычной молнией. Подлинность фотографий, приведенных в работе [1314], подтверждается данными наблюдений, а также исследованиями автора. Однако сомнения остаются, поскольку все эти изображения могут быть объяснены более естественным образом.

Таким образом, у нас осталось только три фотографии, которые не вызывают сильных сомнений и явно не являются ошибочными и которые можно всерьез обсуждать как изображения шаровой молнии. Фотография, представленная на рис. 5.1 [587, 588], не вполне безупречна, поскольку она могла быть получена искусственно. Видимое отсутствие на фотографии движения камеры и других источников освещения, как естественных, так и искусственных, а кроме того, обнаружение в конечной точке остатков материала говорят в пользу подлинности этой фотографии. Но некоторые детали остаются открытыми для анализа.

Примером фотографии естественной шаровой молнии может служить рис. 5.16 [1788]. Некоторые ее особенности позволяют более убедительно интерпретировать ее как изображение естественной шаровой молнии. Она была получена с помощью камеры с автоматическим дистанционным управлением. Затвор открывался автоматически с довольно высокой частотой ($33\frac{1}{3}$ Гц). Таким образом, постоянная составляющая свечения движущегося объекта могла быть отделена от вспышки нормальной молнии. Поскольку камера была жестко фиксирована, всякое ее движение исключалось. Кроме того, по крайней мере в 2–4 отдельных случаях были зарегистрированы одинаковые следы. Следует

добавить, что подобные случаи были редки, их вероятность оценивается для ночных условий как одно событие на $6 \cdot 10^5 \text{ км}^2$.

Однако, как сообщил д-р Томпкинс автору данной книги, различные фотографии не полностью согласуются друг с другом, и их интерпретация не вполне определена. Они не отражают характеристик линейной молнии и в то же время не допускают полную и безупречную интерпретацию в качестве изображения четочной или шаровой молнии.

Более интересным представляется приведенный на рис. 5.16 [625] кадр, который является видеозаписью разряда облако–земля нормальной молнии. Было получено фотографическое изображение серии последовательных видеок кадров, на четвертом из которых появилось изображение шара. По-видимому, светящийся шар образовался вблизи облака на высоте около 300 м. Это не соответствует представлениям о нормальной шаровой молнии, которая обычно появляется вблизи земли. Длительность свечения составляла не 1 с, а 20–40 мс. Кроме того, можно предполагать, что появление шара произошло скорее в период между грозовыми разрядами, нежели в период максимальной амплитуды тока. Исходя из этого, можно сделать предположение о локализованном возбуждении метастабильных энергетических уровней молекул с последующим их распадом и видимым излучением, обусловленным снижением яркости канала разряда.

Можно думать, что опубликованные в [625] фотографии отражают процесс образования шаровой молнии, которая не опустилась до малых высот, где она могла бы иметь большую длительность. Вполне возможно, что эти фотографии отражают наиболее общий тип шаровой молнии, который никогда не наблюдался невооруженным глазом. Возможно, что наблюдаемое вблизи явление представляет собой предельный случай более частого явления, происходящего на больших высотах.

Однако, поскольку необходимо трезво оценивать фактические доказательства, представляется сомнительным, можно ли хотя бы одну из трех фотографий с определенностью считать изображением естественной шаровой молнии. Необходимо больше надежных подтверждающих данных.

Если предположить, что указанные фотографии отражают явление естественной шаровой молнии, то полученные на основании их анализа свойства этого явления окажутся весьма расплывчатыми. Оказывается, что источником его образования служит аномальный канал линейной молнии, плотность шаровой молнии несколько превышает плотность воздуха, а интенсивность ее свечения может изменяться. Ее диаметр меньше метра.

Многие фотографии и репродукции, перечисленные в табл. 6.3 и идентифицированные как искусственно воспроизведенная шаровая молния, также явно ошибочны. Фотографии, представленные на рис. 7.5 [1402, 1403] и рис. 7.6 [1410], отражают, как теперь признается, явления, происходящие при разрядах постоянного тока небольшого масштаба. На фотографии, приведенной на рис. 5.36 [1810, 1811], представлено свечение разряда низкого давления, которое аналогично наблюдавшемуся

в работе [1092] (рис. 5.37) свечению, не идентифицированному в качестве шаровой молнии. Фотографии, представленные на рис. 5.40 [1522] и 5.39 [829], воспроизводят явления в разряде низкого давления. Ни одна из этих фотографий не идентифицировалась авторами как шаровая молния.

Естественная шаровая молния должна удовлетворять двум важным критериям: явление должно происходить при атмосферном давлении, и оно должно существовать после прекращения работы источника энергии. Имеется три известных примера, удовлетворяющих этим критериям.

Возможность возникновения явления стабильного свечения при атмосферном давлении в результате горения малой примеси углеводородов иллюстрируется фотографией, представленной на рис. 7.11 [340]. Однако, как отмечалось в работах [343, 345], указанный процесс горения происходит при концентрации углеводородов в воздухе, значительно превышающей ту концентрацию, которая обычно достигается в природе. Следовательно, либо такой процесс должен иметь малую вероятность, либо должен существовать какой-то механизм локального увеличения плотности углеводородов до уровня, при котором может поддерживаться горение малой примеси.

Фотографии, представленные на рис. 5.22 и 5.23 [413], воспроизводились неоднократно при коротком замыкании высоковольтных цепей. Как показывают эксперименты [1629], в результате подобных процессов может создаваться стабильное свечение в воздухе. Вероятно, исходной причиной образования видимого объекта является испарение материала электрода, которое представляет собой другой способ воспроизведения явления атмосферного свечения.

Согласно предположению, высказанному в [886], грозовой разряд облако–земля может создавать на земле или в земле летучую фракцию, которая, возбуждаясь внешним источником энергии, может оставаться видимой в течение периода, превышающего время существования канала нормальной молнии. Возможно, что этот процесс ответствен за образование объекта, фотография которого представлена на рис. 7.2 [886]. Похоже, что указанная концепция подтверждается фотографией, полученной в экспериментах [1443] и представленной на рис. 7.14.

Масса воздуха, возбуждаемая высокочастотным разрядом, остается светящейся после прекращения работы источника питания. Эксперименты [1443, 1444] примечательны тем, что в них явление свечения и другие характеристики, присущие шаровой молнии, были получены в нормальном воздухе без каких-либо примесей. Источником свечения служили главным образом молекулы CO_2 . Энергия возбуждения западалась на метастабильных уровнях других молекул и затем медленно передавалась молекулам CO_2 с последующим излучением.

Таким образом, большинство фотографий, идентифицированных как изображения шаровой и четочной молнии, являются ошибочными. Лишь немногие из них могут быть признаны подлинными. Как справедливо отмечается, наличие фотографий – условие необходимое, но не до-

статочное. Хорошо бы иметь по возможности фотографии, снятые одновременно с двух направлений. Чаще всего исследуемое явление возникает непредсказуемым образом, и наблюдатель оказывается неподготовленным. Отсюда ясно, что наиболее предпочтительным методом фотографирования шаровой молнии является использованный в работах [1788, 625] метод съемки с дистанционным автоматическим управлением.

Автор данной книги просил бы критически исследовать предполагаемые фотографии шаровой молнии и запрашивать мнение профессионалов по этому поводу.

Шаровая молния в лаборатории

7.1. Введение

Вопрос о происхождении и источниках шаровой и четочной молний возбуждал воображение как исследователей, так и дилетантов. С тех пор как многие специалисты пришли к заключению, что эти редкие формы свечения связаны с грозой, было предпринято множество попыток воспроизвести явление искусственно. Лабораторные эксперименты проводились как с природными источниками электричества, так и с электрическими машинами. В начале XVII в. исследователи пытались использовать атмосферное электричество и естественную молнию для изучения порождаемых ими электрических явлений. Создание впоследствии батарей, индукционных машин, высоковольтных источников тока и высокочастотных генераторов позволило исследователям наблюдать электрические явления в лаборатории при воспроизводимых условиях. Исследователям желательно и необходимо воспроизводить явление по своей воле, с тем чтобы систематически и объективно проверять справедливость теории или набора исходных допущений. Ученый не может быть удовлетворен карандашно-бумажной моделью, которая никогда не может быть подвергнута критической экспериментальной проверке.

Предварительно обсуждаются имеющиеся в настоящее время концепции и модели, предложенные для объяснения шаровой и четочной молний. В лаборатории воспроизводились электрические явления, сопровождающиеся возникновением шаровой молнии, однако ни в одном случае не наблюдались все характеристики, присущие естественным объектам. Хотя экспериментальные попытки были не вполне успешными, тем не менее как сами эксперименты, так и их результаты следует признать достаточно полезными. Мы должны признать, что самое важное — не способы получения явления, а природа его самого.

Мы располагаем обширной информацией о лабораторных явлениях, которые проявляют многие важные свойства естественных объектов. Исследование этих явлений привело к развитию наших знаний. Несомненно, в последующих экспериментах будут использоваться результаты прошлых экспериментов и углублено наше нынешнее понимание явления. Не следует забывать, что наши познания о природе, фазах развития, восприятии, источниках энергии, продолжительности существования

ния и процессах распада естественных шаровой и четочной молний остаются несколько спекулятивными.

Беспристрастная оценка лабораторных экспериментов, предпринимаемых для исследования образования шаровой и четочной молний, оказывается очень трудной. Существуют определенные представления о направлении и конечных результатах исследования, и трудно преодолеть связанное с этим предубеждение. В зависимости от личного мнения и опыта исследователя результаты могут трактоваться по-разному. Экспериментатор, исследующий шаровую и четочную молнии, сталкивается с несколькими проблемами: во-первых, имеется мало достоверных сведений о физической природе явлений; во-вторых, при наличии многих лабораторных явлений, напоминающих по внешнему виду естественные объекты, до сих пор не существует убедительных свидетельств их устойчивости или процесса образования. Согласно основному критерию, приемлемым является такой процесс образования шаровой или четочной молнии, в результате которого в воздухе при атмосферном давлении формируется устойчивая локализованная область свечения, которая продолжает существовать в течение конечно-го периода времени после отключения источника энергии.

Серьезные лабораторные исследования шаровой молнии начались лишь в прошлом веке или чуть раньше. Это не должно удивлять, поскольку до середины XVIII в. отсутствовали как подходящее оборудование, так и технические знания. Самой ранней из сообщенных работ по шаровой молнии можно считать исследование, случайно проведенное в середине XVIII в. петербургским профессором Рихманом с использованием естественной молнии. Наиболее раннее лабораторное исследование было, по-видимому, проведено столетие спустя д-ром Монселем [1241]. Прогресс электротехники и развитие понимания электрических явлений стимулировали дальнейшие попытки, предпринятые в конце XIX в. и описанные в работах [844, 852, 899, 900, 1051, 1064, 1207, 1377–1414, 1756, 1761, 1763]. Общее развитие техники в нынешнем столетии также привело к постановке дальнейших исследований [317, 340, 341, 342, 345, 651, 1288, 1289, 1443, 1444, 1522]. Эти лабораторные эксперименты усиленно обсуждались в литературе.

Для того чтобы легче рассмотреть результаты лабораторных экспериментов, вся область экспериментальных исследований была разбита на четыре типа в соответствии с использованным методом экспериментов: Тип 1. Использование естественной молнии с целью попытки воспроизвести светящееся явление для исследования в контролируемых условиях. Тип 2. Использование электрического разряда в газе для образования светящихся «горящих» явлений. Тип 3. Использование электрического разряда через твердый проводник для образования светящихся паров металла в атмосфере. Тип 4. Использование сфокусированного высокочастотного разряда в контролируемой атмосфере для формирования светящегося устойчивого явления.

Вскоре станет ясно, что явления, аналогичные шаровой молнии, могут быть воспроизведены при использовании различных эксперимен-

тальных методик. Все возникающие явления обладают некоторыми характеристиками естественных объектов. Основные различия между перечисленными экспериментальными методами заключаются не столько в получаемых результатах, сколько в способе формирования ограниченного объема с энергией, превышающей энергию нормального воздуха. На основе представленных результатов лабораторных экспериментов создается впечатление, что естественная шаровая молния, возможно, не одно, а множество явлений, схожих по своим проявлениям, но с различной физической природой, разными критериями устойчивости и несколько различающимися свойствами, зависящими от состояния атмосферы и окружающей среды в момент наблюдения события.

7.2. Использование естественной молнии (тип 1)

Поскольку шаровая молния чаще всего связана с молнией и грозой, для ранних исследователей было естественным попытаться использовать в лабораторных экспериментах атмосферную молнию. В работах [577, 617, 1058, 1212, 1443, 1444] первое научно зафиксированное исследование явления, похожего на шаровую молнию, связывается с именем профессора Рихмана из Петербурга. Считается, что разряд, похожий на шаровую молнию, случайно образовался во время грозы. Этот случай получил широкую известность в кругу исследователей явлений, связанных с линейной и шаровой молнией. Такая известность обусловлена не столько результатами самого эксперимента, сколько тем фактом, что шаровая молния, как сообщалось, ударила Рихмана в лоб, в результате чего он 6 августа 1753 г. скончался.

События, сопутствующие описанному случаю, обсуждались на основе полученной из России информации в работах [25, 1895], а также в более поздних публикациях [516, 617, 659, 660, 665, 825, 1058, 1209, 1212, 1443, 1444]. Сообщение Уотсона [1895] основывалось на переводе сообщения, сделанного профессором Винклером из Лейпцига, который в свою очередь получил сведения, по-видимому, из сообщения профессора Хайниуса из Лейпцига. В публикациях [1058, 1895] упоминается еще одно обсуждение этого происшествия, проведенное в 1753 г. Ломоносовым, членом Петербургской Академии наук, однако в распоряжении автора данной книги оригинал этого обсуждения отсутствует. Некоторые детали экспериментальной установки с рисунками и размерами приведены в работах [25, 1895], а также в последующих публикациях [617, 825, 1058, 1212]. В статье [25] приводятся даже результаты вскрытия трупы Рихмана.

Экспериментальная установка Рихмана состояла в основном из незаземленного молниеотвода, размещенного на крыше лаборатории, который с помощью изолированных металлических проводников подсоединялся к электрометру, находящемуся в лаборатории. Эксперименты с молнией были предприняты для относительных измерений величины

заряда, накопленного на подвешенных отталкивающихся нитях. Заряд собирался молниеотводом из атмосферы, приобретшей электризацию во время грозы. Попадание молнии в металлический прут молниеотвода не было обязательным и не предусматривалось, однако это событие, как известно, произошло.

Основным экспериментом, который невольно выполнил Рихман, было осуществление интенсивного электрического разряда через воздушный промежуток. Мы можем предположить, что поскольку использованный Рихманом незаземленный молниеотвод, согласно сообщениям, притянул к себе интенсивный разряд естественной молнии, в лаборатории Рихмана произошел индуцированный сильноточный разряд между металлическими электродами в воздушном промежутке. Согласно сообщению Уотсона [1895], состав атмосферы был таким же, как состав воздуха в непосредственной близости от лаборатории; другими словами, никаких специальных добавок в воздух не вводилось.

За экспериментом наблюдал Соколов, гравер Петербургской Академии наук. Как сообщалось в работах [1058, 1212, 1895], Соколов заметил бело-голубой огненный шар размером с кулак. Шар двигался от металлического стержня электрометра в направлении головы Рихмана. Вскоре после 1753 г. была изготовлена гравюра на дереве, иллюстрирующая несчастный случай с Рихманом. По-видимому, она впервые была опубликована в [659, 660] и воспроизводилась в последующих публикациях [617, 1443, 1444, 1641, 1642, 1842]; здесь эта гравюра представлена на рис. 7.1. Благодаря этой гравюре на дереве, а также описаниям события, приведенным в [577, 1058, 1443, 1444], широкое распространение получила версия, согласно которой смерть Рихмана последовала в результате действия шаровой молнии. В работах [578, 665] опубликована иллюстрация, аналогичная рис. 7.1, однако в ней Рихман изображен лежащим на полу.

Однако тщательный анализ имеющихся фактов, в особенности по сообщениям [25, 1895], дает возможность предположить, что явления, похожего на шаровую молнию, могло вообще не быть. Согласно [25], Соколов наблюдал большой голубой и белый огонь, перемещавшийся между металлическим стержнем электрометра и головой Рихмана. Он также отметил, что шарообразное пламя обычно возникало в воздушном промежутке в результате прохождения через аппаратуру как естественного, так и искусственного разрядов. Это противоречит сообщению [1895] о бело-голубом огненном шаре. В статье [25] имеется также значительно более детальное описание повреждений в комнате и в здании, нежели в работе [1895]. Кроме того, в ней описаны попытки оживления Рихмана и последующее анатомическое исследование его трупa.

Авторы работ [25, 1895] пришли к заключению, что Рихман был убит электрическим разрядом. Ни в одной из них не отмечено каких-либо специфических особенностей формы или характера возникновения этого разряда. В работе [825] не упоминается сферическая форма пламени и высказывается мнение, что смерть явилась результатом удара молнии. Как следует из данных вскрытия, приводимых в [25], отме-



Рис. 7.1. Воспроизведение гравюры на дереве, иллюстрирующей смерть д-ра Рихмана в 1753 г. в Петербурге, которая, согласно сообщениям, была вызвана шаровой молнией. Предполагается, что шаровая молния образовалась в экспериментальной установке, предназначенной для измерения грозовых облаков. Воспроизводится с разрешения д-ра Пауэлла и издательства «Академик пресс». Впервые гравюра опубликована в [659]. Этот же рисунок или его небольшие модификации воспроизводились в [665, 660, 617, 1842, 1443, 1444, 1641, 578].

ченные на труп повреждения связаны скорее с прохождением электрического тока, нежели с прикосновением горячего шара. Кроме того, в случае шаровой молнии необходимо предполагать полную (или почти полную) электрическую нейтральность шара. На основе имеющихся фактов мы должны заключить, что Рихман был убит не шаровой молнией, а электрическим разрядом. К сожалению, в настоящее время мы не располагаем многими характерными подробностями несчастного случая с Рихманом.

Интересно, что экспериментальные исследования атмосферного электричества вообще и шаровой молнии в частности развивались в направлении от использования разрядов естественной молнии к искусственно-

му воспроизведению разрядов небольшого масштаба в лаборатории. Однако, несмотря на развитие современной техники или скорее благодаря такому развитию, в последнее время экспериментальные исследования шаровой молнии вновь обратились к использованию разряда естественной молнии. Поскольку возможность измерения концентрации заряженных частиц в атмосфере и в разряде молнии чрезвычайно маловероятна, исследователи пошли по другому пути. Стало возможным моделирование разряда молнии и до некоторой степени управление его параметрами.

Искусственное инициирование молнии впервые было продемонстрировано на море авторами работ [1299, 1300]. В грозовые облака запускались небольшие ракеты, соединенные с землей тонкой металлической проволокой. Эта проволока задавала путь грозовому разряду. Эксперименты проводились с корабля в море, благодаря которому обеспечивалась высокая степень мобильности. Таким путем осуществлялось управление разрядами молнии, которая по желанию экспериментатора возникала при наличии естественной концентрации заряженных частиц.

Аналогичные эксперименты, проведенные на суше, описаны в работе [658]. Ракеты запускались с металлической вышки высотой 24 м. Металлическая проволока диаметром 0,2 мм сматывалась с катушки, укрепленной на вышке либо на более короткой мачте, расположенной рядом с вышкой. Примерно за 5 с ракета поднимала проволоку на высоту около 700 м. С целью обеспечения безопасности ракета обычно разрушалась по достижении максимальной высоты. Проволока задавала путь прохождения сильноточного разряда, в результате которого она испарялась, контролируемая молния вела себя аналогично движущейся вверх естественной молнии, поражающей высокие предметы. Она начиналась со сравнительно тихого разряда. В течение нескольких десятых долей секунды величина тока составляла несколько килоампер. Скорость движения разряда вверх достигала примерно $2 \cdot 10^4$ м/с для отрицательно заряженных облаков и была более чем в 5 раз выше для положительно заряженных облаков.

Фотографирование управляемых разрядов производилось авторами работ [657, 658, 886], в которых использовались либо киносъемка (48–150 кадров в секунду), либо съемка на одиночные кадры. Анализ фотографий показал, что во многих случаях распад канала управляемой молнии сопровождается появлением четочной структуры. С ростом тока в молнии появление четок становилось все более очевидным. Отдельные яркие четки имели диаметр около 40 см и время жизни порядка 0,3 с. На рис. 2.11 для примера показана одна из фотографий таких разрядов.

Было установлено, что канал молнии вначале прямолинеен, но постепенно приобретает все более извилистую форму. При этом яркие четки появляются там, где степень сжатия канала максимальна. Это соответствует предположению авторов работы [1096], согласно которому четки появляются в местах деформации канала. Между диаметром пучка и временем жизни имеется положительная корреляция.

Наряду с четочной структурой на заключительной стадии распада канала иногда наблюдались один-два светящихся шара, которые оставались вблизи земли. Эти шары поднимались со скоростью 1–2 м/с, откуда следует, что их плотность ниже, чем окружающего воздуха. Было обнаружено также, что светящиеся четки могли оставаться невозмущенными и, по-видимому, устойчивыми даже при близких последующих разрядах. Это свидетельствует о том, что светящиеся четки не являются результатом протекания тока в начальном канале, ибо такой ток должен претерпевать возмущения под действием соседнего разряда. На рис. 7.2 представлена фотография стабильной светящейся четки вблизи земли.

По-видимому, светящиеся четки не являются результатом испарения металлических проволочек. После возникновения разряда разрушение проволочек происходит вначале у нижнего конца, вблизи катушки, где проволочка испытывает максимальное натяжение. Затем проволочка движется вверх под действием сохранившейся тяги ракеты, так что между проволочкой и землей возникает воздушный зазор в несколько метров. После завершения процесса ионизации воздуха величина тока возрастает, и нижний участок канала длиной в несколько метров испускает вначале меньше света, чем верхний участок. Это различие исчезает на ранней стадии послесвечения канала. Образование четок происходит как в нижней части канала, где проволочка отсутствует, так и в верхней части, где она имеется.

Другие эксперименты проводились с разрядами молнии, ударявшими в деревянные столбы и в трубки, заполненные сажой и расположенные на земле. При этом наблюдалось появление локализованного одиночного светящегося шара, который существовал и после исчезновения канала. Свечение шара выглядело стационарным; его диаметр составлял около 25 см. В работе [658] предполагалось, что светящиеся шары возникают под воздействием мощных электрических токов, циркулирующих в земле у основания канала разряда. При этом, как и в [1802], принималось, что нагрев почвы вызывает разогрев газа, что в свою очередь вызовет его свечение. Были ли эти горячие газы нормальным воздухом, нагретым до относительно высокого уровня, или углеводородами, вовлеченными в процесс горения, или горячим воздухом, взаимодействующим с поверхностными загрязнениями, в настоящее время неизвестно. На рис. 7.3 представлена фотография такого явления удара молнии в землю. В статье [19] обсуждается аналогичное представление об изменении вещества в месте поражения молнией.

В работе [1966] сообщается о случайном инициировании разряда молнии на водяной фонтан, возникший в результате подводного взрыва. В 1957 г. в Чесапикском заливе были проведены эксперименты для исследования явлений, происходящих при взрывах мин и глубинных бомб. Во время одного из испытаний молния ударила в центральную часть водяного фонтана в тот момент, когда высота фонтана над поверхностью залива составляла около 75 м.

Для исследования структуры фонтана использовались две камеры,



Рис. 7.2. Снимок продолжительного свечения, полученный с помощью кинокамеры. Свечение осталось вблизи земли после возбуждения грозового разряда между облаком и землей. Иногда светящийся объект вблизи земли продолжает свое существование после распада основного светящегося канала, поднимаясь вверх со скоростью 1–2 м/с. Воспроизводится из работы [886] с разрешения Губерта и Комиссариата по атомной энергии Франции.



Рис. 7.3. Полученная с помощью кинокамеры последовательность фотографий продолжительного свечения, возникающего при возбуждении грозового разряда, который замыкается на заземленном объекте. Предполагается, что источником свечения могут быть подземные газы, нагретые в результате протекания тока. Воспроизводится из работы [886] с разрешения Губерта и Центра ядерных исследований Франции.

с помощью которых велось фотографирование на некотором расстоянии. Каждая из них зафиксировала вспышку молнии. Всего было зарегистрировано четыре отдельных разряда. Похоже, что все разряды проходили по одному и тому же пути и возникали прежде, чем затухал

предшествующий разряд. Наиболее интересным эффектом было появление четочной структуры во время затухания свечения разряда (см. рис. 2.10).

Таким образом, явления, похожие на шаровую и четочную молнию, могут при желании воспроизводиться для исследований. Метод управляемого инициирования молнии представляется одним из наиболее эффективных методов исследований шаровой и четочной молнии. Явления можно воспроизводить повторно столько раз, сколько необходимо для целей исследования. Подобная методика основана на использовании естественных событий, которые могут быть вызваны там, тогда и так, где, когда и как желает экспериментатор; однако ее применимость ограничена условиями, накладываемыми на естественную концентрацию зарядов. В результате этот метод приобретает преимущества над лабораторными методиками исследования искусственной шаровой и четочной молнии. Наиболее важное преимущество связано с достижимостью сильных токов и большой диссипации заряда. Явления свечения могут исследоваться в естественной среде или в среде, которая в определенной степени приспособлена для целей эксперимента.

7.3. Электрический разряд в газе (тип 2)

Араго [299] идентифицировал шаровую и четочную (*éclairs en boule*) молнию как одну из трех форм молний. Авторитет Араго способствовал утверждению в науке точки зрения на указанные явления как на проявления естественного атмосферного электричества. Позднее французский исследователь академик дю Монсель [1241] в своей классификации выделил четыре типа разряда молнии, включив в нее кроме уже известных видов шаровой молнии также коронный разряд и огни св. Эльма в качестве разновидностей атмосферного электричества. Поэтому в то время как для экспериментаторов, так и для теоретиков было вполне естественным связать рассматриваемые явления с новой наукой об электричестве.

Однако были и такие ученые, например великий Фарадей [644], которые были убеждены в том, что шаровая молния не связана с электрическим разрядом. Как отмечено в [1571], они приписывали ее появление эффекту сохранения изображения близкого разряда молнии на сетчатке глаза. В результате между исследователями возник продолжительный конфликт, и серьезные исследования явления шаровой молнии могли оказаться под угрозой. История этих событий, произошедших на раннем этапе исследований электричества, детально, с привлечением документов, освещена в серии публикаций [918–928].

Лабораторные исследования электрических явлений не могли бы начаться до создания в 1745 г. лейденской банки. Лейденская банка обычно состоит из широкогорлого стеклянного сосуда или другой емкости из диэлектрика, внутренняя и внешняя поверхности которого до высоты

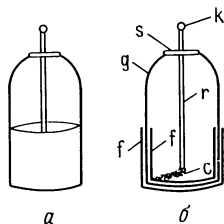


Рис. 7.4. Схема лейденской банки: *а*—вид сбоку; *б*—сечение по вертикали. Банка представляет собой сосуд (*г*) из диэлектрика (стекла), нижняя часть которого покрыта изнутри и снаружи металлической проводящей фольгой (*ф*); электрический контакт между внутренней фольгой и шариком (*к*) осуществляется с помощью металлического стержня (*г*), цепочки (*с*) и изолирующей пробки (*с*).

в несколько см оклеивались металлической фольгой (рис. 7.4). Горлышко банки закрывалось деревянной или пробковой крышкой, через которую пропусклся металлический стержень, касающийся своим нижним концом внутренней металлической фольги. Верхняя часть стержня или провода заканчивалась небольшим металлическим шариком. По существу этот прибор представлял собой простой конденсатор: два проводящих элемента, разделенные изолятором.

Создание лейденской банки приписывается независимо друг от друга экспериментатору по имени Кунеус, монаху Клейсту и лейденскому профессору Мушенброку. Согласно [1895], автором этого устройства был профессор Мушенброк. Банка Мушенброка вначале заполнялась водой, игравшей роль внутреннего проводника, а внешним проводником являлась мокрая рука экспериментатора. Она заряжалась в результате прикосновения к одному из контактов источника электричества, в то время как другой контакт был заземлен. Согласно историческим сообщениям, металлическая фольга была добавлена Уотсоном вскоре после его появления в Лейдене. Металлическая фольга заряжалась либо трением, либо в результате накопления статического электричества. При разрядке лейденской банки получались довольно высоковольтные искры.

Многие ранние исследователи изучали особенности разряда лейденской банки. История первых экспериментов довольно бедна точными описаниями. Похоже, что самые первые эксперименты с разрядкой лейденских банок были проведены двумя английскими физиками, Арденом и Констеблем, в конце XVIII в. Они накапливали в лейденской банке мощные заряды и наблюдали в точке прохождения разряда небольшие светящиеся шары. Подобный шар имел диаметр около четверти дюйма, красный цвет, совершал быстрое беспорядочное движение и прекращал свое существование с громким взрывом. Результаты этих экспериментов описаны в работе [375], где проводится аналогия с результатами наблюдений метеоров и атмосферного электричества.

В [1133] описываются, а в [28] обсуждаются эксперименты с различными жидкостями и газами, выполненные с помощью лейденской банки. В [956] результаты экспериментов с разрядами лейденских банок сравниваются с естественной молнией.

Вплоть до середины XIX в., когда физики стали располагать подходящим оборудованием, эти серьезные аналогии между шаровой мол-

ний и электрическими разрядами не были подтверждены. При разряде между металлическим электродом и плоской поверхностью, покрытой жидкостью (обычно водой), осуществляемом с помощью катушки Румфорда, была получена мощная электрическая искра [1242, 1244]. При этом наблюдался ярко-красный разряд сферической формы. Было замечено, что при наличии жидкости яркость пламени и сферического разряда возрастает. Влажный воздух приводит к более эффективным результатам, нежели сухой. Автор работ [1242, 1244] предположил, что эксперименты с высоковольтной искрой воспроизводят условия, аналогичные тем, которые имели место в большинстве случаев наблюдений шаровой молнии; а именно: появлению шаровой молнии сопутствуют такие обстоятельства, как электризованное облако, влажная атмосфера, плоская влажная проводящая земля, а также разряд молнии между облаком и землей.

В то время было много и других исследователей, которые также обсуждали кажущуюся аналогию между экспериментами с искрой и естественными явлениями. Для многих из них было достаточно того, что разряды выглядели ярко светящимися, имели сферическую форму, желтый или красный цвет, обладали высокой подвижностью и проявляли зависимость свойств от влажности. В работе [1419] были возрождены представления Араго о шаровой молнии как о типе молниевых разряда, отличающемся сферической формой. Другие рассматривали шаровую молнию как результат воздействия нормального разряда на атмосферу. Среди сторонников концепции шаровой молнии как разряда, аналогичного разряду индукционной катушки или лейденской банки, были такие известные экспериментаторы, как авторы работ [646, 956, 1524, 1708, 1734, 1735]. Кроме того, в заметке [133] сообщалось, что профессор Кавалло наблюдал яркий огненный шар, который поднимался от сильно заряженной лейденской банки и со взрывом распадался.

По мере прогресса в области экспериментальной техники развивались и исследования природных электрических явлений, опирающиеся на использование лабораторных разрядов. За время с середины до конца XIX в. росла популярность экспериментов по разрядке конденсаторов. В работах [1376–1414] Планте сравнил свойства разрядов постоянного тока, горящих в различных условиях при атмосферном давлении. В [1393, 1395, 1397] он обсудил конструкцию и принцип действия своей *machine rheostatique*, которую он использовал в некоторых экспериментах для получения мощных электрических зарядов. Его эксперименты детально обсуждались современниками [920–922, 924–926, 1564, 1565, 1914], а недавно – в работах [1058, 1059]. В то время широко распространилось мнение, что работы Планте продемонстрировали существование полученной в лаборатории шаровой молнии.

В основном Планте использовал разряд между параллельными пластинами. Он был воодушевлен успехами экспериментов с лейденскими банками и разработал методику, основанную на использовании более современной аппаратуры. Разумеется, плоский конденсатор – это результат развития и совершенствования лейденской банки. Планте

провел эксперименты с двумя плоскопараллельными металлическими пластинками, разделенными тонким экраном из слюды. Конденсатор соединялся с полюсами батареи аккумуляторов, дающей напряжение около 4000 В. Разряд возникал в результате пробоя слюдяного экрана в наиболее слабом месте. В точке возникновения разряда возникал небольшой шар, появление которого, по-видимому, вызывалось испарением части конденсатора. Эксперимент продолжался всего несколько минут, пока батарея была в состоянии поддерживать разряд. Светящийся шарик совершал над поверхностью пластинок хаотические движения. Разряд сопровождался потрескиванием.

Затем Планте приступил к экспериментам, которые, по его мысли, лучше воспроизводили условия в атмосфере. К пластинам были добавлены мокрые поверхности, образованные дисками из прокладочной или фильтровальной бумаги, смоченными дистиллированной водой. При подключении конденсатора к батарее между пластинами возникал разряд в виде небольшого огненного шара. Огненный шар появлялся только между влажными поверхностями и не возникал вообще в случае сухих поверхностей. Разряд хаотически перемещался над пластиной, но оставался между увлажненными участками. Разряд в виде огненного шара между влажными поверхностями мог продолжаться до тех пор, пока напряжения источника было достаточно для поддержания разряда.

Планте считал, что разряд приводил к испарению воды, которая способствовала поддержанию разрядного тока между двумя пластинами конденсатора. Рис. 7.5 иллюстрирует проведенные эксперименты. В работах [1402, 1410, 1914] опубликованы также фотографии.

Проводились также эксперименты с заостренными металлическими электродами и блюдом, заполненным водой. Использовались металлические стержни длиной 60 см и диаметром 1 см, изготовленные из меди, латуни, железа или угля. Источником напряжения служила система накопительных батарей. При уменьшении расстояния между концом электрода и поверхностью воды возникал разряд. Обычно Планте подавал на воду отрицательный заряд. Было обнаружено, что вблизи поверхности воды образуется разряд сферической формы. Эти наблюдения иллюстрируются рис. 7.6, приведенным в работе [1394] и воспроизведенным впоследствии в [1914]. Шар был ярко окрашен и передвигался вблизи поверхности воды, по-видимому, хаотически. Цвет и интенсивность могли изменяться при изменении материала электрода и величины приложенного напряжения.

Планте считал, что результаты его экспериментов связаны с естественной шаровой молнией. В то время многие верили, что эти эксперименты действительно имеют прямое отношение к естественному явлению. Другими словами, считалось, что шаровая молния связана в основном с электрической грозовой активностью. Эта точка зрения в течение десятилетий существенно ограничивала научный анализ шаровой молнии. Шаровая молния рассматривалась как явление, возникающее непосредственно в результате электризации атмосферы и прямо связанное с процессом разряда. Считалось, что условия, способствующие

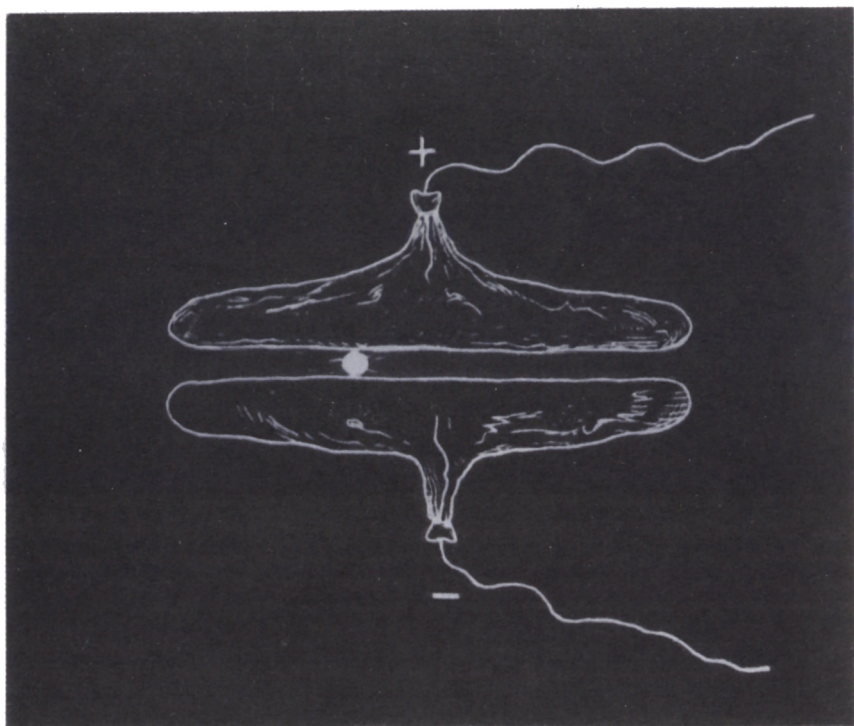


Рис. 7.5. Рисунок, иллюстрирующий свечение разряда между двумя пластинами конденсатора при высоком напряжении. Воспроизводится из статьи [1402] с разрешения Французской Академии наук (Париж); опубликован также в работах [1403, 1410, 1914].

щие возникновению этого явления, плохо известны и редко встречаются в природе.

Интерпретация экспериментальных результатов Планте не избежала критики. Наибольшую известность получили работы [1493, 1914], авторы которых не могли согласиться с выводами Планте о том, что естественные электрические поля, существующие в атмосфере, приводят к возникновению разрядов описанного типа. Вебер считал упомянутую аналогию между явлениями, наблюдаемыми в природе и в эксперименте, неверной интерпретацией, основанной на априорных предположениях. Однако эксперименты с разрядом продолжались. Укажем, например, работы [1061, 1062, 1064], в которых использовались высоковольтные индукционные аппараты; эти работы подробно проанализированы в [1564, 1565].

В этих экспериментах высоковольтный разряд происходил в промежутке между цилиндрическим и плоским электродами, разделенными

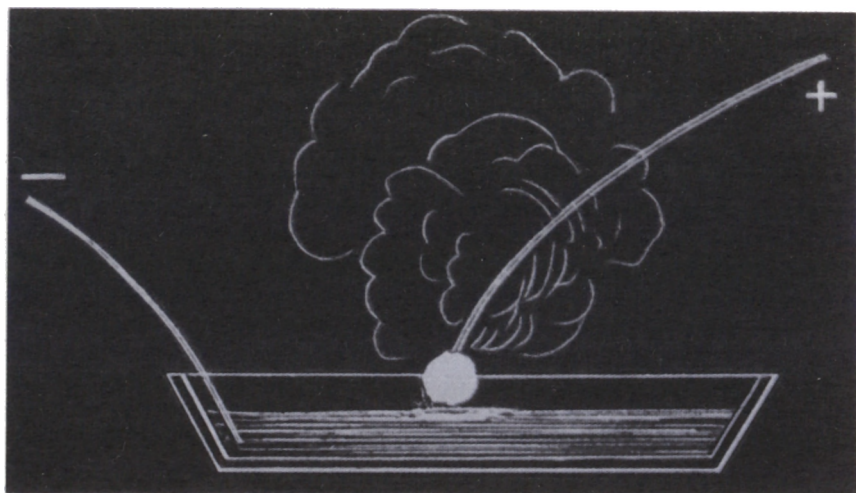


Рис. 7.6. Рисунок, иллюстрирующий свечение разряда постоянного тока при атмосферном давлении, возникающего при использовании в качестве отрицательного электрода поверхности жидкости, а в качестве положительного электрода — тонкого металлического стержня. Воспроизводится из работы [1394] с разрешения Французской Академии наук (Париж); см. также [1914].

расстоянием 6–8 см. Разряд представлял собой небольшой красно-голубой светящийся шар диаметром около 0,05 см, совершавший быстрое беспорядочное движение. Эксперименты проводились также с парафином, чистой водой или соленой водой, наносимыми на плоскую пластинку. Кроме того, добавлялись такие реагенты, как хлористый барий и хлористый стронций. При этом несколько изменялся размер разряда, а также его окраска, которая могла быть красной, желтой, зеленой или белой.

Согласно [203], аналогичные эксперименты проводил Пильщиков, который использовал индукционную катушку и изменял состав разряда, нанося скипидар на металлическую пластинку. При этом тоже образовывался огненный шар. Впоследствии оказалось, что введение углеводов может повлиять на характеристики разряда. По-видимому, Пильщиков впервые вводил в разряд углеводороды. Связь между взрывчатыми газами (углеводородами) и явлением возникновения шаровой молнии была, по-видимому, впервые отмечена в [857].

В конце XIX в. было выполнено много аналогичных экспериментов. Согласно [330], при использовании в качестве источника напряжения высоковольтной катушки возникали светящиеся сферические разряды над поверхностью воды. Развивая методику Планте, автор работы [852], использовав трансформатор, получил источник переменного напряжения до 10^4 В. В качестве электродов использовались медная пластинка и поверхность воды, разделенные расстоянием в 2–4 см. При

этом, как и в экспериментах Планте, наблюдались свечение, огненные шары и пламена овальной, сферической и конической форм.

Отмечены подвижность разряда, зависимость цвета от приложенного напряжения, а также резкий запах озона или селитры. Анализ образующихся газов показал [852], что в разряде образуются окислы азота. В связи с этим было выдвинуто предположение, что образование и существование шаровой молнии связаны с горением азота.

Связь других экспериментов с явлением шаровой молнии не столь очевидна. В работе [1051] изучалось движение светящегося электрического разряда, полученного экспериментально. Образование светящихся разрядов отмечалось в [988, 900]. Авторы указанных работ в качестве одного из полюсов использовали фотопластинку, с тем чтобы запечатлеть след, оставленный разрядом, и получить сведения в его параметрах. След движущейся искры фиксировался по повышенной концентрации атомов серебра.

На рубеже XIX–XX вв. ученые часто обращались к экспериментальным работам [707–718]. Результаты газоразрядных исследований и их связь с естественной шаровой молнией обсуждаются в работах [919–928]. Однако этих, по-видимому, важных работ в распоряжении автора данной книги не оказалось.

В качестве примера создания шаровой молнии в лаборатории обсуждались также экспериментальные работы [1505–1516]. В статьях [1810–1811] опубликованы фотографии разрядов в газе, аналогичные снимкам, воспроизведенным Риджи [1505–1516] и представленным на рис. 5.36. Свечение возникало в результате высоковольтного разряда в частично откачанном сосуде с газом.

Теперь известно, что подобные явления, возникающие в высоковольтном тлеющем разряде, довольно типичны для разряда в разреженных газах. Однако при атмосферном давлении такие явления протекают по-иному. Можно полагать, что шаровая молния связана с высоковольтным разрядом. Однако было бы не совсем верно использовать для ее изучения эксперименты, выполненные при низком давлении. Для более точного воспроизведения условий, связанных с возникновением шаровой молнии, эксперименты должны проводиться при атмосферном давлении.

Необходимо отметить, что в этих разнообразных экспериментах не был воспроизведен независимо существующий самоподдерживающийся светящийся объект. Разряды представляли собой временные образования, длительность существования которых определяется временем разрядки конденсатора. Это не означает, однако, что некоторые аналогичные типы разряда не могут встречаться в природе и интерпретироваться как случаи появления шаровой молнии. Однако связь таких разрядов с шаровой молнией несколько сомнительна.

Анализ экспериментов с разрядами в газе часто усложняется в связи с недостатком надежных опубликованных данных. Так, в [988] предложен эксперимент с вихревыми токами во влажном воздухе при атмосферном давлении, в котором разряд создавался с помощью катушки

Тесла. Это предложение, видимо, является отражением идеи, высказанной в [1863]. Результаты экспериментов автору данной книги неизвестны. Далее в статье [907] обсуждаются газоразрядные эксперименты в воздухе, заключенном в диэлектрические цилиндры. Приведенные в [907] данные слишком кратки для того, чтобы дать им сколько-нибудь определенное истолкование.

С целью исследования природы шаровой молнии и четочной молнии и создания репрезентативной модели явления в середине 50-х годов нашего века были предприняты достаточно детальные эксперименты. Науэр [1288, 1289] воспроизвел большинство ранних экспериментов, а результаты проанализировал на основе теории плазмы и теории газового разряда. Кроме того, в этих работах с большим успехом были использованы новые методики. По мнению Науэра, аналогия между некоторыми типами разрядов и известными свойствами шаровой молнии не выдерживает критического анализа. Он пришел к заключению, что хотя можно в лаборатории произвести газоразрядные явления, при которых свечение обладает некоторым сходством с шаровой молнией, однако ни разу не был воспроизведен одиночный независимый светящийся объект, имеющий все характеристики шаровой молнии.

В начале Науэр, стремясь повторить и изучить детальнее результаты Планте, осуществлял разряд между поверхностью воды и металлическим точечным электродом, расположенным над нею. Величина промежутка составляла 2–14 мм, напряжение менялось в диапазоне 500–1500 В, разрядный ток составлял 20–250 А. Характер полученных результатов менялся при изменении полярности электродов.

При отрицательном заряде точечного электрода возникал дуговой разряд квазисферической формы. Казалось, что сфера состоит из множества очень ярких шариков различного цвета. Наиболее яркое пятно располагалось прямо под концом электрода; нижняя часть сферы была пронизана множеством фиолетово-голубых нитей. Аналогичные рисунки приводились Планте [1393].

При положительном заряде точечного электрода появлялся разряд в виде огненного шара. В этом случае дуга также состояла из отдельных светящихся ячеек и расположенных в нижней части разряда нитей. Однако нити образовывали над поверхностью воды конус и, похоже, пронизывали весь шар. Цвет разряда зависел от материала электрода, а интенсивность свечения возрастала с ростом разрядного тока. При оборачивании электродов смоченными бумажными прокладками поведение дуги соответствовало наблюдениям Планте. Разряд имел ярко-оранжевый цвет и обладал высокой подвижностью.

Науэр также повторил эксперименты Гезеуса [845–853], которые могут рассматриваться как аналог экспериментов Планте, но с использованием переменного тока вместо постоянного. Характеристики наблюдаемого разряда оказались суперпозицией двух ранее полученных при постоянном токе результатов, когда металлический электрод заряжался положительно или отрицательно относительно поверхности воды. Разряд переменного тока был не столь подвижным, как разряд постоянно-

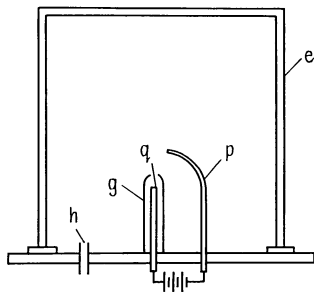
го тока. Изменение геометрии разряда достигалось путем изменения материала плоского электрода. Похоже, что форма и внешний вид разряда в определенной степени зависели от электропроводности и теплопроводности материала плоского электрода.

В общем в эксперименте Науэра были повторены и подтверждены результаты, полученные Планте и другими авторами. Однако, обсуждая эти результаты, Науэр не делает вывода, что аналогичным образом могут протекать и естественные явления. Он отмечает, что разряды не были сконцентрированы в ограниченном объеме, а представляли собой довольно сложную структуру, заполняющую межэлектродный промежуток. Науэр не нашел путей для моделирования естественного явления без использования сложной, а может быть, и неадекватной теории плазмы. Он не считал, что изученные Планте разряды отражают явления в природе.

Науэр попытался также смоделировать в лаборатории грозовое облако с целью проверки грозовых гипотез происхождения шаровой молнии. На изолированном столе размещался герметизированный деревянный ящик с размерами $60 \times 60 \times 20$ см. На дне ящика помещался плоский металлический электрод, который посыпался смесью мокрого песка и гравия. Через смесь продувался воздух, который проходил поверхность смеси в виде пузырьков. Над поверхностью мокрой смеси подвешивался другой плоский металлический электрод. Межэлектродный промежуток заполнялся теплым, сухим, чистым или запыленным воздухом; при этом наблюдалось поведение пузырьков при приложении к электродам высокого напряжения. Оказалось, что пузырьки подвержены воздействию статистического электрического поля, однако никаких светящихся пузырьков не замечалось.

Более плодотворный эксперимент был выполнен Науэром при использовании аппаратуры, показанной на рис. 7.7. В небольшую стеклянную трубку внутренним диаметром 5–7 см помещался металлический электрод. Размер отверстия на конце трубки мог меняться. Второй электрод помещался рядом со стеклянной трубкой. Оба электрода располагались в стеклянной камере, которая могла откачиваться. Согласно наблюдениям Науэра, в затемненном помещении сразу после прохождения искры между двумя электродами из верхнего отверстия небольшой

Рис. 7.7. Схема экспериментальной камеры, использованной Науэром [1289] для исследования явлений разряда в атмосфере углеводородов при нормальном давлении. Один электрод (q) закрыт суженной с одного конца стеклянной трубкой (g), другой электрод загнут таким образом, что его конец находится вблизи отверстия стеклянной трубки. Аппаратура находится в вакуумной камере (e), соединенной с вакуумным насосом с помощью шланга (h).



стеклянной трубки возникал светящийся объект, длительность существования которого составляла несколько секунд.

Исследуя этот объект, Науэр обнаружил, что его свойства зависят от давления воздуха в камере. При низких давлениях порядка 15 мм рт. ст. (1 атм = 760 мм рт. ст.) образуется большое яркое облако; при более высоких давлениях, около 1 атм, образуются более тусклые облака меньших размеров. Использовались различные газы: кислород воздуха, водород, пропан, смесь воздуха с хлором, смесь воздуха с парами бензола и аргона. При этом изменялись окраска, яркость и размеры возникающего облака.

Важно отметить, что светящееся облако возникало в воздухе и при нормальном атмосферном давлении. Чтобы облегчить образование облака, необходимо сделать достаточно маленьким отверстие на конце небольшой стеклянной трубки, в которую помещен один из электродов. Светящееся облако, возникающее в воздухе при нормальном давлении, было видно даже в незатемненном помещении, хотя детали его формы можно было видеть только в темноте. Спектроскопический анализ излучения светящегося облака позволил обнаружить присутствие водорода.

Было обнаружено, что светящееся облако поднимается вверх, что, видимо, обусловлено нагревом газа искровым разрядом. Согласно показаниям термометра, находящегося в контакте со светящимся облаком, температура поднялась на 15°C выше комнатной. Сужение конца стеклянной трубки, в которой помещался электрод, улучшило условия формирования светящегося облака. Для воспроизведения явления при атмосферном давлении требовалось небольшое отверстие. После прекращения свечения появлялся освещенный вихрь. Науэр отвергал возможность образования светящихся облаков в результате явлений окисления или горения, поскольку подобные феномены возникали и в инертных газах, например в аргоне. Влияние небольших количеств растворителя, непредумышленно оставленного при очистке камеры, точно не установлено.

Однако наиболее важные эксперименты Науэра связаны с горением. Случайно было обнаружено, что небольшие следы бензола, оставшиеся в стеклянной камере после ее очистки, при искровом инициировании приводят к образованию в камере больших светящихся облаков. Эксперименты проводились в закрытой камере диаметром 6–8 см и длиной 50–200 см. Между двумя электродами, помещенными внутрь камеры, зажигалась электрическая искра. Светящиеся облака появлялись после прекращения искрового разряда и существовали в течение нескольких секунд. Эти облака не заполняли весь объем камеры, а имели диаметр 2–3 см. Образование светящихся облаков становилось более вероятным, когда углеводород полностью перемешивался в замкнутом объеме воздуха. Было обнаружено, что конфигурация электродов, представленная на рис. 7.8, является более эффективной, нежели показанная на рис. 7.7. Оптимальными оказались железные электроды, слегка согнутые на концах и отстоящие друг от друга на расстоянии 5–10 мм. Система же-

лезных электродов помещалась в камеру, в которой можно регулировать состав газа.

Науэр проводил эксперименты как при низких давлениях (40–200 мм рт. ст.), так и при атмосферном давлении. При низких давлениях светящиеся облака возникали при концентрации водорода 3,8–9%, концентрации пропана 1,24% и при значительно меньших (практически неизмеримых) концентрациях бензола. Следует отметить, что доля газообразного горючего, необходимая для образования светящегося облака, довольно мала; похоже, что ее величина обратно пропорциональна молекулярному весу углеводорода. О величине энергии, диссипируемой искрой, в оригинальной статье сказано несколько неопределенно. Если предположить, что рассматриваемые эксперименты аналогичны описанным выше, т.е. напряжение 10^3 В, искра длительностью 1 мс и ток в несколько ампер, то можно прийти к выводу, что в газовой смеси, заключенной в камере, может быть рассеяно только ~ 10 Дж.

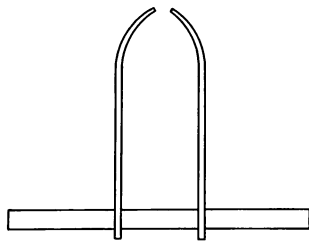
Науэр обнаружил, что светящиеся облака не подвержены влиянию внешних электрических и магнитных полей. Цвет облаков мог изменяться только за счет добавления примесных газов; при этом получались все цвета. Светящееся облако походило не столько на явление горения, сколько на электрический тлеющий разряд – казалось, мягкое свечение испускается с поверхности светящегося тела. Наблюдались также смеси цветов, однородные цвета, полосы и лоскуты. Водород давал бледно-голубое свечение, а при добавлении паров бензола или пропана возникало свечение, видимое даже в ярко освещенной комнате.

Светящиеся облака двигались в основном вверх, хотя наблюдалось также и движение вниз. Согласно измерениям, скорость движения находилась в пределах 0,33–10 м/с. При низком содержании примеси никакого шума от явления не отмечалось, однако при высоком уровне примеси был зарегистрирован небольшой шум. Облако рассеивалось, как правило, бесшумно, но временами с громким звуком, когда облако касалось стенки камеры.

Заслуживает внимания одна специфическая особенность. Камера была разделена плоским диском с центральным отверстием диаметром 7 мм, помещавшимся внутри камеры. Как правило, светящееся облако гасло, когда оно соприкасалось с диском. Однако в ряде случаев светящееся облако как будто проходило сквозь отверстие и восстанавливало размеры и форму, существовавшие ранее.

Науэр заключил, что существует определенная корреляция между

Рис. 7.8. Конфигурация металлических электродов, использованных Науэром [1289] для создания управляемой дуги в вакуумной камере. Как было установлено, оптимальное расстояние между электродами равно 5–10 см.



естественной шаровой молнией и полученными в лабораторных условиях облаками, светящимися за счет возбуждения углеводородов при малой концентрации. Тем самым предполагалось, что природа шаровой молнии никак не связана с электричеством. Первоначальный электрический разряд требовался лишь для инициирования процесса горения при малых концентрациях горючего, но в дальнейшем какая-либо электрическая активность уже не нужна. При горении возникают наблюдаемые светящиеся облака. Было также высказано предположение, что, возможно, до разряда никаких углеводородов не требуется. При разряде происходит диссоциация паров воды и высвобождается водород, который затем и участвует в процессе горения. Насколько эти теоретические построения реализуются в природе – вопрос открытый и пока не получивший подтверждения. Мы заключаем, что эксперименты Науэра с горением углеводородов при низкой концентрации – наиболее существенный шаг после экспериментов Планте, выполненных 70 лет назад.

Эксперименты Науэра были продолжены Фером [651], который исследовал другие газообразные углеводороды и изучил движения и времена жизни в процессах горения при низкой концентрации. Он многократно получал светящиеся облака в атмосфере углеводородов. В его экспериментах явление возбуждалось электрической искрой.

Весьма важные результаты, полученные Науэром и Фером, оказались в основном неизвестными большинству исследователей шаровой молнии. Работы Науэра публиковались на немецком языке в журналах, которые обычно не рассматривались как источник информации для специалистов по метеорологии и физике атмосферы. Работы Фера публиковались на иврите. Поэтому прошло более десяти лет, прежде чем эти эксперименты стали широко известны. Методика поджигания малой примеси была развита в работах Барри [341, 342, 343, 345] и опубликована в широко доступных журналах в Англии, ФРГ и СССР. В статьях [341–344, 346] подробно описана экспериментальная техника, используемая при исследовании явления горения малой примеси углеводородов, и представлен анализ процесса горения.

Точка зрения на шаровую молнию как на результат горения газообразных углеводородов обсуждалась несколькими исследователями. Впервые такое обсуждение было опубликовано в [857], а первые экспериментальные исследования в этом направлении были, согласно [203], выполнены Пильшиковым. Науэр [1288, 1289] впервые стал добавлять газообразные углеводороды в замкнутый объем с газом. Барри [341–343, 345] впервые воспроизвел явление, похожее на шаровую молнию, при атмосферном давлении.

Эксперименты Барри [341–343, 345], основанные на предположении, что один из типов свечения может быть воспроизведен в результате горения малой примеси газообразных углеводородов, были предприняты специально с целью исследования возникновения явления, похожего на шаровую молнию. В большую лабораторную емкость, герметизированную при стандартных атмосферном давлении и температуре, вводилось определенное количество газообразного углеводорода, после чего через

межэлектродный промежуток, находящийся в этой емкости, пропускал разряд постоянного тока.

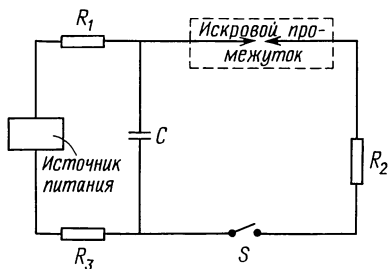
Экспериментальная камера представляла собой шестистенный прозрачный ящик из плексигласа с толщиной стенок 0,62 см и внутренними размерами $50,2 \times 50,2 \times 100,4$ см. Через уплотненные отверстия в одной из стенок камеры пропускались высоковольтные кабели и система трубок для введения газообразных углеводородов. Углеводороды вводились стандартным методом вытеснения жидкостью и полностью перемешивались с газом в камере с помощью небольшого бесщеточного неискрящего фена, укрепленного внутри камеры. Для уменьшения возможности загрязнения камеры она откачивалась после каждого эксперимента.

Высоковольтный разряд осуществлялся с помощью батареи конденсаторов с номинальными параметрами 5 мкФ и 25 кВ. Для зарядки конденсаторов использовался высоковольтный источник питания с номинальным напряжением 10 кВ, изготовленный в лаборатории. Конденсаторы с масляным погружением использовались для мгновенного разряда. Схема включения разрядного тока представлена на рис. 7.9. Разрядная искра коммутировалась механически; длительность разряда составляла несколько миллисекунд.

Искровой промежуток был образован двумя медными электродами, расположенными на высоте 25 см от дна камеры и ориентированными вдоль ее центральной вертикальной оси. Были испытаны электроды разнообразных размеров и форм, установленные на различных расстояниях. Оказалось, что наиболее интересные результаты получаются при использовании конфигурации, представленной на рис. 7.10, при длине промежутка 0,5 см. Этот вывод соответствует результатам Науэра [1288].

В начале эксперимента к атмосферному воздуху подмешивалось 5 объемных процентов пропана, после чего коммутировался разряд. После уменьшения количества добавляемого газа на 0,2% процесс повторялся. Как и ожидалось, в начале серии попыток наблюдались явления нормального горения. При снижении содержания углеводорода до величины, меньшей необходимой для нормального горения (около 2,8%), никаких явлений не наблюдалось. Однако в диапазоне 1,4–1,8% возникал

Рис. 7.9. Электрическая схема установки, использованной Барри [341] для воспроизведения явления длительного свечения, подобного шаровой молнии, при атмосферном давлении газа с небольшой примесью газообразных углеводородов. Конденсаторы масляного типа с номинальными параметрами 5 мкФ, 25 кВ заряжались от источника питания напряжением 10 кВ. Разряд включался механически, имел длительность около 1 мс и поглощал около 250 Дж.



небольшой желто-зеленый огненный шар. Он был ярко освещен, имел диаметр несколько сантиметров, быстро и неупорядоченно двигался по камере и тихо распадался. Фотография этого явления представлена на рис. 7.11. Огненный шар, интерпретируемый здесь как лабораторная шаровая молния, наблюдался при атмосферном давлении и существовал в течение 1–2 с. Самое главное, что время существования явления значительно превышало время введения энергии.

Пренебрегая малыми реактивными потерями в разрядной цепи, можно оценить энергию разряда величиной порядка $2,5 \cdot 10^2$ Дж. Принимая диаметр шара равным 4 см, получаем плотность энергии в объекте, аналогичном шаровой молнии, порядка $7 \cdot 10^{-3}$ Дж/см³. Отношение диссипируемой энергии к величине энергозапаса, оцененного в работах [1443, 1444], составляет примерно 10^{-3} (подробности см. в разд. 7.5). Плотность энергии в шаровой молнии обсуждается в гл. 4, разд. 4.2.

Довольно давно известно, что в результате электрического разряда в атмосфере простых углеводородов могут образовываться более сложные углеводороды. Экспериментальные исследования подобных эффектов [1427] были предприняты с целью понимания химии ранней атмосферы Земли и Юпитера. В экспериментальную камеру вводился метан, который под действием тлеющего и искрового разряда частично превращался в сложные углеводороды. К ним относятся бензол, толуол, 2,2-диметилбутан, 2-метилпентан, 3-метилпентан, 2,4-диметилгексан и 3,4-диметилгексан; чаще всего в импульсном разряде образовывался C_6H_6 .

Как продемонстрировано в [489, 490], распыленные аэрозоли при электризации образуют длинные цепочки полимеров, которые слепляются в единый комок. Авторы этих работ вводили аэрозоли углеводородов в замкнутую стеклянную камеру объемом около 4 м³ и заряжали частицы с помощью кистевого разряда. Заряженные частицы образовывались в сферическом объеме диаметром около 20 см, плавающим в центре камеры. Заряд сферы, по-видимому, противоположен заряду электрода. Цвет сферы отличался от цвета исходного вещества. Она состояла из отдельных чрезвычайно длинных цепочек. Использо-

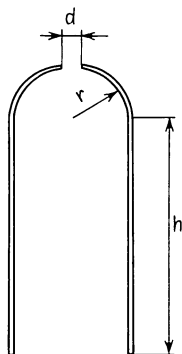


Рис. 7.10. Геометрия металлических электродов, использованных Барри [341, 342] для воспроизведения явления длительного свечения, подобного шаровой молнии, при атмосферном давлении газа с небольшой примесью газообразных углеводородов. Радиус кривизны скругленных электродов $r = 1$ см, расстояние между ними $d = 0,5$ см, высота стержня над основанием вакуумной камеры $h = 10$ см.

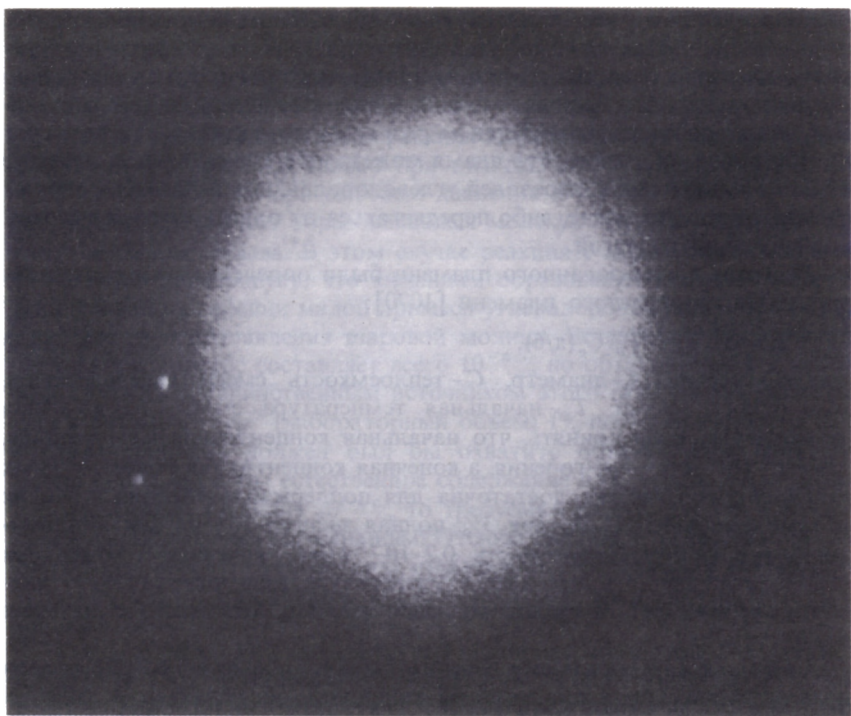


Рис. 7.11. Фотография длительного свечения, подобного шаровой молнии, которое возникает при локализованном горении малой примеси газообразных углеводородов в результате инициирования искровым разрядом [340].

лось большое количество различных углеводородов. Одним из них был *p*-ксилен-азо- β -нафтол, концентрация которого составляла 15 мг/м^3 . Вначале его цвет при тиндалевском рассеянии был зелено-голубым, но после электризации и слипания он оказался ярко-красным. На связь интересных явлений электризации с шаровой молнией указывалось в работах [271, 343, 345, 489, 490].

Обсуждалось предположение, что образованию шаровой молнии может способствовать превращение простых углеводородов в более сложные. Согласно [343, 345], один из типов шаровой молнии может представлять собой пламя малой примеси углеводорода. Горючим для пламени может служить небольшая примесь паров углеводородов в атмосфере, которые выделяются в результате разряда молнии между облаком и землей. Обычно низкая концентрация примеси может увеличиваться в результате процесса слипания за счет электризации, исследованного в работах [489, 490].

Явления горения малой примеси исследовались экспериментально, например, в [1070]. Горение может осуществляться в виде сферического

пламени, которое либо расширяется в радиальном направлении, либо, если топливо подается из окружающего пространства в центр сферического пламени, остается в стационарном состоянии. Было высказано предположение, что шаровая молния в виде сферического пламени может инициироваться атмосферным разрядом и поддерживаться за счет примеси углеводородов. Это пламя может либо существовать в центре области концентрации аэрозолей углеводородов, подпитываясь потоком частиц, падающих извне, либо передвигаться от одной области высокой концентрации к другой.

Размеры локализованного пламени были определены на основании уравнения сферического пламени [1070]:

$$E = d^3 (T_b - T_a) C_p (\pi/6), \quad (7.1)$$

где E – энергия, d – диаметр, C – теплоемкость смеси углеводородов, ρ – плотность смеси, T_a – начальная температура смеси, T_b – конечная температура. Если принять, что начальная концентрация CН_4 меньше, чем это требуется для горения, а конечная концентрация более сложных углеводородов как раз достаточна для поддержания горения в малом объеме (например, C_3H_8 при 3%, полная энергия 10^2 – 10^6 Дж, теплоемкость 0,28 кал/(г·К), плотность $0,2 \cdot 10^{-3}$ г/см³, конечная температура 4000°С, если принять, что цвет и температура взаимосвязаны), то диаметр сферического пламени, согласно расчету, окажется в пределах 6–130 см.

Связь между явлением горения малой примеси углеводородов и естественной шаровой молнией подробно обсуждалась в работах [1230, 1641]. При этом было отмечено, что температура метана и пропана, горящих в воздухе при оптимальных условиях, составляет не 4000, а 2000°С. При неоптимальных условиях, т. е. при меньших парциальных давлениях углеводорода, можно ожидать, что температура окажется еще ниже. Однако Сингер [1641] отмечает, что при низких концентрациях углеводородов может существовать другой механизм горения, который хуже изучен по сравнению с процессом нормального горения пламени.

Некоторые сложные молекулы углеводородов при нагреве в воздухе претерпевают холодное окисление: например, пентан испускает голубое свечение. Температура реакции находится вблизи 220°С, а цвет связывают с излучением молекулы формальдегида. В результате протекания реакции холодного окисления молекулы формальдегид образуются в возбужденном состоянии. Однако существование реакции холодного окисления метана и пропана не подтверждено, хотя эксперименты Науэра наводят на мысль о наличии такой реакции.

Образование сложных молекул из метана и пропана было подтверждено лазерными экспериментами [352]. Смесь гелия, воздуха и метана или пропана при низком давлении (10 мм рт. ст.) подвергалась воздействию тлеющего разряда. В результате электрохимического окисления углеводородов образовывались молекулы СО и СО₂. Эти молекулы находились в колебательно возбужденных состояниях и могли накапли-

вать энергию для последующей генерации лазерного излучения. Кроме того, при окислении метана возникали молекулы NH_3NO_2 , обладающие способностью взрываться. Во время экспериментов произошло несколько взрывов.

Можно предположить, что реакция образования молекул NH_3NO_2 способна протекать не только при низком, но (при некоторых оптимальных условиях) и при высоком давлении. Реакция может протекать до тех пор, пока число образовавшихся молекул NH_3NO_2 не станет достаточным для взрыва. В этом случае реакция с шумом прекращается.

Следует подчеркнуть, что механизм образования шаровой молнии, основанный на горении малой примеси углеводородов, не может объяснить все случаи появления шаровой молнии. Естественное содержание метана в атмосфере составляет всего $10^{-4}\%$ по объему [1475]. Если бы атмосфера была единственным источником этого газа, то для достижения в объеме 10^5 см^3 (лабораторный объем) 1%-ной концентрации CH_4 процесс слипания должен был бы охватить объем сферы радиусом около 100 м. Если бы естественное содержание CH_4 в небольшой области превышало величину $10^{-4}\%$, то требуемый радиус действия процесса слипания оказался бы меньшим. Отсюда следует, что процесс мог бы быть более вероятным в районах повышенного содержания углеводородов, например над болотами или естественными месторождениями природного газа.

Так, в работе [325] показано, что в районах повышенной влажности (болота и топи) интенсивность выделения метана существенно возрастает с повышением температуры. Можно предположить, что при ударе молнии в землю на ограниченной площади происходит выделение значительного количества метана. В результате может достигаться плотность углеводородов, достаточная для горения. В экспериментах с искусственным инициированием молнии [886] были получены фотографии стабильных светящихся шаров, образующихся вблизи поверхности земли в результате разряда облака на землю. При этом предполагалось, что локальное повышение концентрации горючих газов определяется выделением из земли или окружающих материалов в точке поражения молнией. Стабильное свечение, возникающее в результате искусственно инициируемого молниевых разряда облака на землю, проиллюстрировано на рис. 7.2 и 7.3.

Явление образования сферического пламени в атмосфере исследовалось также в [976]. В результате электролиза воды при сильном импульсном токе и напряжении 120 В возникал пузырь, состоящий из смеси водорода с кислородом, который затем подвергался воздействию импульса напряжения величиной 80 кВ. Источником высокого напряжения служил генератор Маркса. Возникающее пламя имело голубоватую окраску и существовало в течение 0,5 с. По-видимому, продолжительность жизни пламени определяется возможностью поддерживать скорость подачи соответствующей кислородно-водородной смеси за счет процессов диффузии. Ограниченная программа экспериментов [976] охватывала область давлений от 70 до 150 мм рт. ст.; более полные иссле-

дования не были завершены. Для установления правильной концепции необходимы дополнительные эксперименты при атмосферном давлении. Было высказано предположение, что сферическое пламя может естественным образом возникать в атмосфере и поддерживаться за счет образования или выделения таких горючих газов, как водород или метан. Время его существования может определяться диффузией этих газов в область горения.

Квазисферические пламена реакции $\text{CH}_4\text{--O}_2$ в однородных стационарных электрических полях исследовались в работе [1442]. В качестве электродов использовались большие плоскопараллельные металлические экраны, разделенные промежутком в 20–60 см. Образующиеся сферические пламена имели диаметры от 5 до 15 см. Результаты подтверждают модель [1443]. Подробнее см. разд. 7.5.

В работе [1120] обсуждалось появление огненного шара вблизи кучи торфа. Это согласуется с представлением о поведении горящего газа. Вначале отмечалось, что красный светящийся шар диаметром 60 см медленно опускался в долину. Затем наблюдателю показалось, что шар несколько раз погрузился в кучу, разбрасывая большие количества материала и оставляя в куче заметные дыры. Согласно сообщению, все явление продолжалось около 20 мин.

Однако представление о природе шаровой молнии как о горении малой примеси углеводородов в воздухе не объясняет появление шаровой молнии в тех местах, где нет газообразных углеводородов. По этой причине мы должны рассматривать механизм окисления газообразных углеводородов в качестве возможной основы для объяснения одного, а никак не всех типов шаровой молнии.

7.4. Пары металлов

Шаровая молния и другие явления свечения независимо от того, какова их природа – чисто электрическая или электрохимическая, могут быть исследованы с помощью обычных лабораторных методов. Как мы видели, такие исследования проводятся и приводят к различным результатам. Исследование явлений, возникающих в результате испарения твердых веществ и подобных шаровой молнии, в контролируемых лабораторных условиях оказывается более трудным, поскольку в этом случае объект имеет плазменную природу. Известно несколько примеров случайных или преднамеренных исследований такого рода. Как показывают наблюдения, пары металла, или плазмOID, могут существовать в воздухе независимо от механизма образования и, по-видимому, самоподдерживаться. Если не обращать внимания на метод получения и природу подобного образования, то его можно классифицировать как шаровую молнию. Это еще раз подтверждает гипотезу о том, что в качестве шаровой молнии могут рассматриваться (и рассматриваются) многие явления различной природы.

Впервые предположение о том, что шаровая молния может предста-

влять собой металлический пар, светящийся при нагреве, было, по-видимому, высказано в [1290]. Однако, как отмечено в [1089], это предположение следует рассматривать как умозрительное, поскольку в то время оно не подкреплялось лабораторными исследованиями. Согласно сообщениям [413, 414], норвежский гидроэнергетик Нильсон показал, что явление свечения можно воспроизвести путем замыкания контактов мощного генератора постоянного тока. Генератор замыкался при введении водяного сопротивления параллельно замыкающему устройству.

Отмечено, что от области замыкания отделилась красноватая светящаяся масса и оставалась видимой в воздухе в течение нескольких секунд. Фотографии этого события воспроизведены на рис. 5.22 и 5.23. Явление было повторяющимся и как будто могло воспроизводиться произвольно. На рис. 5.22 показана большая масса светящегося воздуха, вероятно, возникшая в момент закорачивания генератора. От большой светящейся массы отделен светящийся шар. На рис. 5.23, полученном несколькими мгновениями позже, виден шар, поднявшийся над большой светящейся массой.

При закорачивании контактов диссипировалась большая энергия. При напряжении 12 кВ генератор развивал мощность 10^7 Вт; принимая длительность разряда равной 1 мс, получим, что для образования шара затрачивалось свыше 10^4 Дж.

Еще одно явление, возникающее при коротком замыкании, описано в [950]. Кусок медной проволоки случайно попал на контакты стандартной сети напряжением 110 В. В момент короткого замыкания появился раскаленный шар, медленно прокатился по столу и исчез. Диаметр шара был около 3 см, а цвет – желто-белым. При исследовании на поверхности стола была обнаружена линия, состоящая из опаленных точек, как если бы шар подпрыгивал по дереву. Опаленные точки стояли друг от друга на несколько сантиметров. Линия заканчивалась трещиной на поверхности стола. Прямо под трещиной находился выдвижной ящик стола; в нем был обнаружен небольшой медный шарик диаметром около 1 мм.

Было предположено, что медный шарик остался от наблюдавшегося светящегося шара и что раскаленный объект состоял из паров меди. Однако, как отмечалось, при этом не наблюдался зеленый цвет, обычно характерный для паров меди. Это может быть объяснено ограниченным тепловым излучением, что обусловлено рассеянием энергии во время формирования шара. Насколько можно судить, никаких экспериментов с целью повторения описанного явления не предпринималось. Остается много сомнений.

В [1651], где кратко обсуждаются типы шаровой молнии, предполагается, что один из типов явления образуется при ударе разряда молнии в твердое вещество, скажем металл. При этом предполагается, что светящийся шар может состоять из металлического пара при температуре около 2000°C . Возникший таким путем шар будет тяжелее воздуха и может существовать некоторое время, находясь в контакте с землей.

Автор данной книги не имеет в своем распоряжении неопубликованных сообщений по этому вопросу.

Аналогичные наблюдения описаны и проанализированы в статьях [1629, 1632]. При случайном закорачивании прерывателя цепи на подводной лодке возник светящийся шар. Явление подтверждено документально и воспроизводилось повторно при квазиконтролируемых условиях.

Подводная лодка имела две системы аккумуляторных батарей и два генератора для подзарядки. Генераторы были связаны друг с другом с помощью реле обратного тока, так что любой генератор мог использоваться с любой системой батарей. Основные контакты прерывателя цепи были сделаны из серебра с медными напайками и тушащей катушкой. Поверхности серебряных пластин находились в физическом контакте друг с другом. По-видимому, произошло случайное подключение реле обратного тока, предназначенного для отсоединения заряжающейся батареи от неработающего генератора.

При случайном замыкании реле обратного тока автоматически разъединило замкнутые контакты. В этот момент между серебряными контактами образовалась дуга, а тушащая катушка вытолкнула дугу в направлении медных напаяк (что предусмотрено конструкцией для уменьшения эрозии контактов). Обычно в таких условиях дуга быстро гасла. Однако иногда заряда батареи оказывалось достаточно для поддержания дуги между медными напайками. При этом наблюдался раскаленный огненный шар зеленого цвета, который перемещался в направлении от контактов во внешнее пространство. Плавающий шар существовал примерно в течение 1 с. В [1629, 1632] предполагалось, что зеленый цвет был обусловлен излучением нейтральных паров меди из плазмоида.

На военно-морской верфи в Филадельфии в 1974 г. проводились испытания устройства обратного тока. При постоянном токе 156 000 А, напряжении 260 В и пиковой мощности $4 \cdot 10^7$ Вт возникал огненный шар. Время переключения составляло 10–100 мкс, так что в эксперименте диссипировалась энергия от 0,4 до $4 \cdot 10^6$ Дж. Наблюдаемый диаметр шара изменялся примерно от 10 до 15 см. (См. разд. 4.2, случай 7, где обсуждается плотность энергии, заключенной в шаровой молнии.)

Согласно предположению [1429], основанному на результатах ранних наблюдений, шаровая молния может быть следствием быстрого нагрева металла и образования облака атомарного металлического пара. Во время сильной грозы наблюдалось несколько огненных шаров, которые катились вдоль по улице. Один из шаров имел диаметр 60–90 см, другие были меньше. Это произошло непосредственно после удара сильного разряда молнии в телефонный столб, расположенный неподалеку. Нагрев телефонного провода наведенным током вызвал плавление участка проводов. Оторвавшийся кусок проволоки стал кружиться по улице, создавая иллюзию светящегося движущегося шара. Появление меньших шаров могло быть вызвано наличием меньших ку-

сков оторвавшегося провода, испытанных нагрев и закручивание, или возникновением облаков в результате испарения провода.

Для продолжительного существования светящегося шара, состоящего из испаренного металла или горячих газов и способного скачками перемещаться по земле, требуется его определенная изоляция от потерь за счет теплопроводности и конвекции. Кеннеди и другие исследователи указывали, что это может происходить за счет быстрого выделения водяного пара из влажного грунта, находящегося под шаром. Водяной пар может создать тепловой барьер между относительно горячим шаром и влажной поверхностью. Это аналогично предохраняющей пленке водяного пара, возникающей под каплей воды на горячей плите. Капля существует гораздо дольше, чем следовало бы ожидать, исходя из изолирующих свойств слоя водяного пара, образованного между каплей и горячей поверхностью.

Из этих надежно документированных и повторяющихся наблюдений можно видеть, что существуют несомненные доказательства возможности создания явления свечения с помощью сильноточного разряда. Следует, однако, упомянуть, что мы не располагаем конкретными свидетельствами в пользу того, что это явление порождено металлическим плазмойдом. Это не означает, что явление нереально, однако существование стабильного плазмоподобного объекта в настоящее время не подкреплено ничем, кроме общих суждений. Явления в сильноточных разрядах вполне могут представлять собой другую разновидность явления шаровой молнии.

Исследования, связанные с концепцией металлического пара, проводились в работах [19, 20]. Разряд создавался в вакуумной камере со стенками из диэлектрика. Камера отделялась от внешней атмосферы тонкой мембраной, которая в момент разряда разрушалась. Разряд вызывал эрозию диэлектрика, в результате чего возникала светящаяся плазма, в состав которой входил разрушенный материал. При разрушении мембраны эрозионная плазма выбрасывалась в атмосферу лаборатории. Плазма оставалась видимой в течение примерно 10 мс.

Предполагалось, что эти эксперименты моделируют удар молнии в землю, когда нагретое и эжектируемое вещество образует светящийся шар. Аналогичная концепция обсуждалась в работах [1802–1804, 658] (см. разд. 7.2).

В экспериментах [19, 20] использовался блок конденсаторов емкостью 80 мкФ, начальным напряжением 12 кВ и энергией около 5000 Дж; при этом пиковое значение разрядного тока достигало примерно 12 кА. Разряд осуществлялся в камере, предварительно откачанной до давления 10^{-5} атм. В качестве материала стенок использовались различные диэлектрики. Масса материала, эжектируемого разрядом в камеру, составляла примерно $3 \cdot 10^{-2}$ г. Возникла светящаяся плазма, время существования которой превышало результат соответствующей оценки для плазмы в атмосфере. Так, согласно оценкам Капицы [960, 962], полностью ионизованная плазма при атмосферном давлении должна распадаться примерно за 10 мкс.

Результаты эксперимента были проиллюстрированы серией фотографий, относящихся к последовательным моментам времени. Вначале представляется, что эрозионная плазма имеет форму шара, а затем постепенно становится вихреобразной. Явление продолжалось всего несколько миллисекунд и выглядело достаточно ярким. Авторы работы отмечают, что эрозионная плазма обладает гораздо более высокой интенсивностью и гораздо меньшим временем жизни, чем естественная шаровая молния. Прямой аналогии с образованием шаровой молнии не проводилось. Просто было отмечено, что светящаяся, относительно долго живущая эрозионная плазма может существовать при атмосферном давлении. Образование вихревой структуры может иметь важное значение для ее времени жизни и, возможно, связано с механизмом ее образования, как и с механизмом образования одного из типов шаровой молнии.

7.5. Безэлектродные разряды

Развитие электротехники и электронной техники в конце XIX в. привело к появлению более сложных способов концентрации энергии в малом объеме воздуха. Высоковольтные разряды были заменены высокочастотными разрядами, которые оказались достаточно эффективными для создания в локализованном объеме воздуха плазмоида, обладающего высокой интенсивностью свечения и относительно высокой температурой. Такая техника, пример которой [829] иллюстрируется на рис. 5.39, стала распространенной в первые годы развития исследований по управляемому термоядерному синтезу.

Первые исследования безэлектродных разрядов были предприняты в конце XIX в. [1731, 1733, 1741]. Результаты экспериментов Тесла [1731, 1733], которые недавно стали непосредственно связывать с исследованием шаровой молнии, не были сколько-нибудь широко известны. Это объясняется недоступностью лабораторного журнала Тесла с записями экспериментов 1899 г., выполненных им в Колорадо-Спрингс (США). Тесла только однажды [1731], обсуждая явления естественной молнии, сослался на свои эксперименты с огненными шарами. Он сообщил, что создавал искусственные огненные шары, но в детали эксперимента не вдавался. Позднее эксперименты Тесла описывались и обсуждались в популярной литературе [351, 382, 769, 1322, 1624, 1658]. Журнал Тесла с записями экспериментов в Колорадо-Спрингс в 1899 г. содержит дальнейшие (хотя и неполные) подробности. Он недавно опубликован и теперь имеется в распоряжении исследователей [1733].

Известно, что Тесла проводил эксперименты с системой, состоящей из трех больших катушек: первичной, вторичной и дополнительной, которая являлась продолжением вторичной. Вторичная и первичная катушки имели диаметр около 15,4 м и высоту 2,4 м. Дополнительная катушка укреплялась на высоте примерно 3,7 м над полом; она имела диаметр 2,4 м и высоту 2,4 м. Сверху к дополнительной катушке была

прикреплена разрядная сфера (сферический конденсатор) диаметром около 29 см.

Первичная катушка была соединена с батареей конденсаторов емкостью около 1 мкФ, питаемой генератором мощностью 50 кВт, и индуктивно соединялась с другими катушками (таким же образом были связаны друг с другом все катушки). Напряжение на первичной катушке достигало около 12 кВ, на вторичной катушке – около 10^6 В, на дополнительной катушке – примерно $12,5 \cdot 10^6$ В. Прерыватель у Тесла работал с частотой 4,2 кГц, и каждый разряд, инициируемый дополнительной катушкой, имел энергию примерно 12 Дж в импульсе.

Как сообщается в работах [382, 769, 1658], Тесла получал искусственную шаровую молнию диаметром около 1,9–6 см.

Тесла предполагал, что возникновение шаровой молнии происходит в две стадии. Вначале небольшой объем воздуха под действием мощного разряда молнии испытывает резкий нагрев с соответственным уменьшением локального давления. При этом, согласно закону Пашена (сопротивление искрового промежутка пропорционально произведению давления на межэлектродное расстояние), сопротивление данной области газа должно возрасти. В результате вскоре после прохождения начального разряда в том же канале возникает второй разряд, который оказывается второй стадией. Этот разряд приводит к дальнейшему увеличению температуры малой области за счет джоулева нагрева, так что поддерживается баланс между кинетическим давлением газа и атмосферным давлением среды, окружающей катушку. Наблюдая горячий газ (сферу), сообщают о явлении шаровой молнии.

Гипотеза Тесла была развита математически в [351]; кинетическая энергия газа (произведение давления на объем) была приравнена внутренней энергии E огненного шара. Баланс энергии имеет вид

$$E = P_0 V / (\gamma - 1), \quad (7.2)$$

где P_0 – давление, V – объем, γ – отношение теплоемкостей (для воздуха $\gamma = 7/5$). Расчеты, выполненные в предположении, что отношение энергии шара E к полной энергии E_0 равно $n \approx 0,5$, а давление P_0 равно атмосферному, дали величину радиуса шара 1,8 см, которая хорошо согласуется с сообщением Тесла [1733].

Данная модель может быть развита посредством введения параметра β , равного отношению давления шара P к атмосферному давлению P_0 . Тогда коэффициент использования энергии n/β можно будет выразить соотношением

$$\frac{n}{\beta} = \frac{4\pi P_0 R^3}{3(\gamma - 1)E_0}. \quad (7.3)$$

Для диаметра $2R = 3,8$ см получаем

$$n/\beta = 0,6. \quad (7.4)$$

Отношение n/β можно интерпретировать, считая, что для газовых разрядов (а возможно, и для каналов молний) величина $\beta P = 10$ мм рт. ст. (1 мм рт. ст. = 1/760 атм), так что $\beta = 0,01$, $n = 0,006$. Значение n хорошо согласуется с использованным в работах [1629, 1632] и лишь немного превышает значение, полученное в экспериментах [1443, 1444].

Тогда внутренняя энергия будет близка к величине $E = 0,07$ Дж, а средняя плотность энергии для шара радиусом 1,9 см в силу уравнения (4.2) окажется равной

$$\varepsilon \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^3. \quad (7.5)$$

Интересно отметить, что это значение сравнимо с результатом экспериментов [1443, 1444] и соответствует частично ионизованной плазме воздуха с $N \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

В отличие от этих данных, которые выглядят обнадеживающими, в работе [1130], где обсуждаются ранние эксперименты Тесла, искусственно созданный в этих экспериментах огненный шар трактуется как огонь св. Эльма. Здесь следует упомянуть, что наблюдения Тесла в 1899 г. могут быть связаны с явлением бескистевых разрядов, поскольку в пояснениях Тесла нигде не говорится, что огненные шары продолжали свое существование после прекращения подведения энергии к катушкам. Однако Тесла отметил, что огненный шар существует в течение измеримого промежутка времени, и сфотографировал это явление. Автор не имеет в своем распоряжении этих фотографий. Учитывая лабораторный журнал Тесла и общие дискуссии в популярной литературе, мы должны считать, что наблюдавшиеся им огненные шары представляют собой определенный тип шаровой молнии.

Следует добавить, что, по сообщению Тесла [1731, 1732], он неоднократно регистрировал в атмосфере во время грозы стоячие электромагнитные волны. В некоторых из разработанных позднее теориях шаровой молнии (например, [493, 960, 962]) независимо выдвигалось предположение, согласно которому для продолжительного существования шаровой молнии необходимо наличие таких стоячих волн. Хотя эксперименты Тесла в значительной степени остались неизвестными, они широко цитируются как важный шаг в решении проблемы экспериментального воспроизведения шаровой молнии.

В другом месте, в более позднее время и при менее благоприятных условиях эксперименты с безэлектродными высокочастотными разрядами были поставлены Бабатом [316, 317]. По-видимому, Бабат был первым, кто провел обширные, подробные и широко опубликованные исследования безэлектродных высокочастотных разрядов, возбуждаемых генераторами высокой мощности. Работа Бабата, где воспроизводится разряд при атмосферном давлении, анализировалась многими исследователями шаровой молнии. Результаты Бабата в литературе [1060] относят к явлению шаровой молнии, однако сам Бабат называл это газоразрядное явление «огненным шаром» [316, 317].

Существенное свойство безэлектродных разрядов состоит в том, что

они образуются в определенной среде на некотором расстоянии от высокочастотного электрода или антенны. Излучаемые электромагнитные поля концентрируются в фокусе антенны, и сильные электрические и магнитные поля могут вызывать эффективную ионизацию среды с образованием плазмоида, висящего в пространстве без контакта с какими-либо предметами.

Бабат исследовал безэлектродные разряды в высокочастотных электрических полях при частотах от 10^6 до 10^8 Гц. Напряженность электрического поля в разряде изменялась от десятков до сотен вольт на сантиметр. Мощность, вводимая в разряд, варьировалась в пределах от долей ватта до 100 кВт.

Для возбуждения разряда с частотой до 10^8 Гц и мощностью до 100 кВт использовался ламповый СВЧ-генератор. Высокое напряжение от источника постоянного тока, рассчитанного на напряжение 10 кВ, пропусклось через дроссельную катушку (L_1), соединенную с серединой проводника, связывающего аноды ламп генератора. Схема цепи представлена на рис. 7.12. Дроссельная катушка была изготовлена из 10 витков медной трубки квадратного (10×10 мм), прямоугольного (10×20 мм) или круглого (диаметр 13 мм) сечения и имела диаметр 100 мм и длину 100 мм. Аналогичная катушка была подсоединена к центральной точке проводника, связывающего сетки ламп со смещающим сопротивлением R величиной 400 Ом.

Катоды СВЧ-генератора были заземлены через индуктивность, чтобы поддерживать пропорциональность между фазами и амплитудами сеточного и анодного напряжений. Частота генератора регулировалась посредством изменения размеров и формы сеточного и плоского проводников.

Обычно Бабат [317] инициировал безэлектродные разряды при пониженном давлении в отпаянном баллоне. Давление менялось с целью исследования свечения. Разряды могли инициироваться также при атмосферном давлении, но в этом случае было необходимо каким-либо способом обеспечить начальный пробой.

Внешний вид разрядов менялся в зависимости от давления и подво-

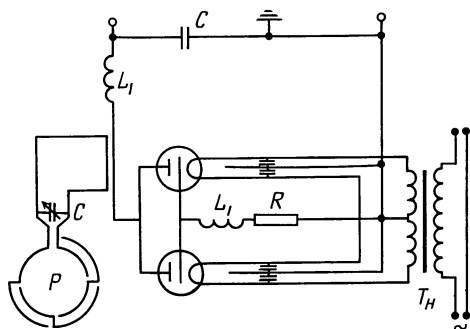


Рис. 7.12. Схема электрической цепи, использованной Бабатом [317] при создании первых безэлектродных высокочастотных разрядов пониженного давления. Управление высокочастотной энергией осуществлялось путем подстройки колебательного контура.

димой мощности. Разряды при частотах 10^6 – 10^7 Гц и давлениях примерно от 0,1 до 10 мм рт.ст. представляли собой полый цилиндр, прижатый к стенкам разрядной трубки. При более высоких давлениях разряд имел желто-белый цвет и перемещался по трубке, часто касаясь стенок. При давлениях в десятки мм рт.ст. возникал огненный шар. При еще более высоких давлениях шар расширялся, и на его полюсах возникали огненные «пальцы». При атмосферном давлении разряд имел форму веретена с яркой сердцевинкой и едва светящимся внешним слоем и совершал по трубке некоторое движение.

Вначале работа Бабата не связывалась с шаровой молнией. Бабат исследовал возможность промышленного использования высокочастотных полей. Он упоминал о таких направлениях, как газовая электрохимия, окисление азота, производство ацетилена, обработка огнеупорных материалов и создание интенсивных источников света. Кажущаяся аналогия внешних проявлений безэлектродного разряда и шаровой молнии была отмечена многими исследователями вскоре после публикации сообщений Бабата. Использование безэлектродных разрядов в целях экспериментального изучения шаровой молнии было продолжено и развито многими исследователями.

Почти два десятилетия спустя после работ Бабата возобновились исследования лабораторных безэлектродных разрядов [827]. Сообщалось о наблюдении огненного шара при давлении 10^{-4} мм рт.ст. Температура электронов была высокой, порядка 10^5 К, а концентрация невелика, порядка 10^8 см $^{-3}$. Первым, кто употребил для обозначения светящихся объектов сферической и веретенообразной формы, наблюдаемых в безэлектродном разряде при низких давлениях, термин «плазмодид», по-видимому, был Вуд [1950, 1951].

С целью подтверждения результатов Бабата и исследования природы ионизации были предприняты эксперименты [813, 1522]. В качестве источника СВЧ-излучения использовался импульсный радиолокатор, работающий на частоте около $9 \cdot 10^9$ Гц. Пиковая мощность излучения составляла примерно $21 \cdot 10^3$ Вт при длительности импульсов 0,5 мкс и интервалом между импульсами 290 мкс. Пирамидальная рупорная антенна радиолокационной установки была направлена на параболический отражатель. Последний концентрировал энергию СВЧ-излучения на откачанном стеклянном баллоне диаметром 10 см, расположенном в его фокусе. Давление в баллоне варьировалось от 0,1 до 77 мм рт.ст.; баллон располагался на расстоянии 60 см от антенны.

Безэлектродный разряд легко зажигался при давлении воздуха в баллоне от 0,3 до 47 мм рт.ст. Его цвет и размеры зависели от давления. При давлении свыше 47 мм рт.ст. разряд исчезал. Ритчи [1522] не сумел воспроизвести разряд при атмосферном давлении, как это сделал Бабат [317]. Похоже, что это связано с мощностью источника. Бабат использовал источник с выходной мощностью 100 кВт, в то время как мощность генератора, использованного Ритчи, составляла лишь 50 Вт.

При давлении около 1 мм рт.ст. Ритчи наблюдал красные разряды, имеющие форму сосиски. При давлении 5 мм рт.ст. разряд принимал

нерегулярную форму, расслаивался, становился непрозрачным и приобретал ярко-фиолетовую окраску. При давлении свыше 10 мм рт.ст. разряд принимал форму боба, окруженного тонким голубым гало. Фотография разряда воспроизведена на рис. 5.40.

Временные характеристики ионизации исследовались с помощью фотоумножителя. Измеренное время нарастания излучения разряда составило примерно 0,2 мкс; время затухания было значительно большим. Из предположения, что степень ионизации пропорциональна интенсивности светового излучения, следует, что она достигает максимального значения примерно в середине импульса СВЧ-излучения. Оказалось также, что время падения ионизации превышает промежуток между импульсами.

Многие исследователи, занимающиеся проблемой удержания плазмы и ее возможными применениями, всерьез обсуждали предположение, что шаровая молния представляет собой безэлектродный разряд. При этом шаровая молния рассматривалась как одно из плазменных явлений, понимание физической природы которого может дать ключ к решению других проблем.

Ритчи [1519, 1520] обсудил возможность использования явления шаровой молнии, создаваемой безэлектродными разрядами, в качестве оружия. Другие исследователи (например, [469, 470, 966, 1014, 1105]) изучили возможность создания разряда на больших расстояниях от фокусирующей антенны.

В США издан сборник работ советских ученых, посвященный исследованиям в области шаровой молнии, безэлектродного разряда и теории удержания плазмы. Работы отражают состояние дел в советской науке по данному вопросу в начале 60-х годов [1521]. Исследования советских ученых в области шаровой молнии отражены также в серии статей, опубликованных в журнале *Foreign Science Bulletin*. В этом журнале описаны различные эксперименты с высокочастотным разрядом. В одной из работ [335] исследовался случай появления шаровой молнии на самолете, который описан в сообщении [1939]. Носовая часть самолета в полете моделировалась параболической металлической поверхностью, на которую натекал поток плазмы. При облучении плазмы электромагнитным излучением частотой 30 ГГц на поверхностном газовом слое образовывались плазмойды. Их конкретные характеристики не приводятся.

Позднее [336] были предприняты эксперименты с целью воспроизведения явления шаровой молнии при высоких напряженностях поля, создаваемого S-образными электродами. Разряд атмосферного давления возбуждался с помощью импульсного генератора напряжения с амплитудой 150 кВ. Задержка разряда осуществлялась введением в промежуток диэлектрика. При этом могли производиться разряды длительностью около 70 мкс, с током $7 \cdot 10^3$ А и энергией около 2 кДж. С помощью фотографии со вспышкой были зафиксированы светящиеся образования. Было установлено, что короткоживущие светящиеся плазменные облачка по структуре аналогичны цилиндрическим вихрям низ-

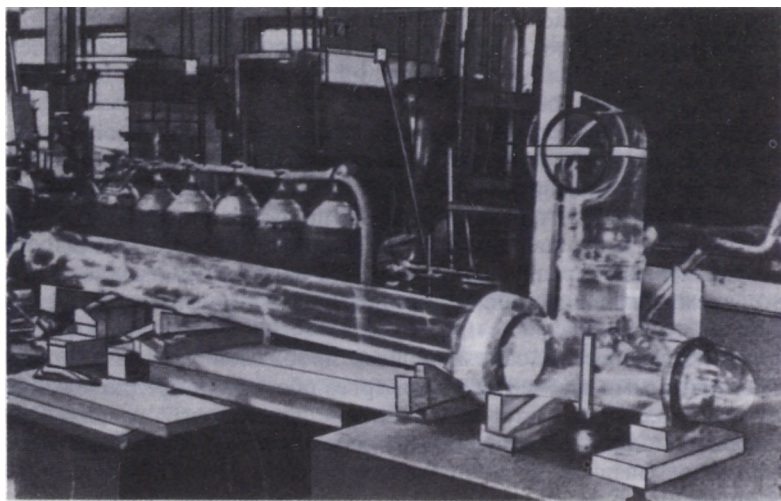


Рис. 7.13. Фотография экспериментальной установки, используемой для воспроизведения явления длительного свечения при атмосферном давлении. Вначале высокочастотный разряд возникал в горизонтальной части трубки, а после выключения источника питания поднимался по вертикальной секции. Воспроизводится с разрешения из [1443]. Аналогичная фотография опубликована в [1444].

котемпературной плазмы. Явление не обладает теми сложными свойствами, которые присущи шаровой молнии.

Использование высокочастотного разряда для исследования шаровой молнии получило существенное развитие в работе Менуоринга и последующих экспериментах Пауэлла и Финкельстейна [1443, 1444]. Согласно [1445] и позднее [662], Менуоринг воспроизводил в лаборатории при атмосферном давлении воздуха долгоживущее светящееся явление шаровой формы. Он использовал высокочастотный дуговой разряд между открытыми электродами при частоте $7,5 \cdot 10^7$ Гц. При увеличении межэлектродного расстояния светящийся шар мог быть отделен от электродов. Более важным является тот факт, что шар мог существовать примерно 0,5 с после прекращения высокочастотного возбуждения. Кроме того, шар поднимался над электродами, что, по-видимому, связано с тепловым эффектом.

Эксперименты при атмосферном давлении были продолжены Пауэллом и Финкельстейном [1443, 1444], которые использовали высокочастотный генератор мощностью 30 кВт, работающий на частоте $7,5 \cdot 10^7$ Гц. Вначале в невысоком стеклянном цилиндре с внутренним диаметром 15 см возникал светящийся «шар», на самом деле имеющий несколько удлиненную форму. Выводы высокочастотного генератора пропускались в стеклянный цилиндр. Один из электродов мог передвигаться

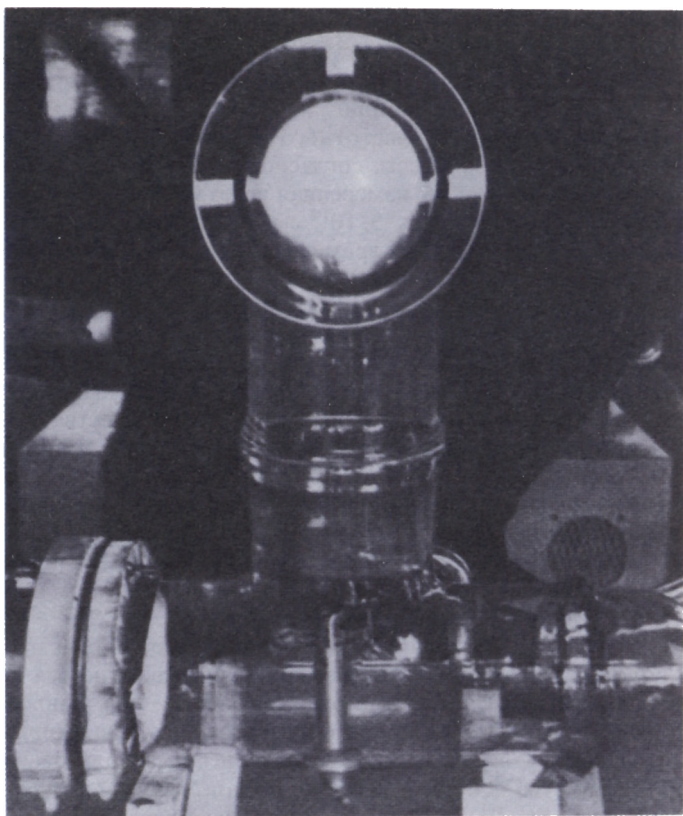


Рис. 7.14. Фотография продолжительного свечения воздуха, которое получено в эксперименте при атмосферном давлении в результате фокусирования высокочастотного разряда. Если бы это явление наблюдалось в природе, оно было бы идентифицировано как шаровая молния. Воспроизводится с разрешения из [1443]. Аналогичная фотография опубликована в [1444].

гаться вдоль оси стеклянного цилиндра, что позволило изменять межэлектродное расстояние. Вначале дуговой разряд формировался в промежутке между двумя электродами. При отодвигании одного электрода от другого разряд продолжался, увеличиваясь в размере. Фотография экспериментальной установки показана на рис. 7.13.

После окончания высокочастотного возбуждения светящийся столб превращался в излучающий объект квазисферической формы, который поднимался вверх по вертикально расположенной цилиндрической трубке. Если конвективному движению препятствовали стенки цилиндра, светящийся шар оставался в стационарном состоянии в течение 0,5–1 с. На открытом воздухе, в отсутствие стенок, время жизни было вдвое короче. На рис. 7.14 представлена фотография долгоживущего

светящегося объекта, возбуждаемого высокой частотой при атмосферном давлении. Было обнаружено, что в контролируемых условиях лаборатории свечение может воспроизводиться повторно. Это позволило исследовать некоторые детали.

Напряжение высокочастотного источника, используемого для возбуждения воздушной массы, согласно измерениям, составило 500 В. Концентрация электронов, измеренная через 0,1 с после окончания импульса возбуждения, равнялась $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Наложение электрического поля приводило к увеличению времени жизни шара. Исчезновение шара происходило внезапно и сопровождалось громким звуком.

Излучение шара затухало по экспоненциальному закону с постоянной времени 0,2–0,3 с. Полная энергия светящегося шара в воздухе составляла порядка 4–15 Дж, а плотность энергии — $2 \cdot 10^{-3} - 10^{-3} \text{ Дж/см}^3$. Это соответствует концентрации метастабильных молекул $4 \cdot 10^{15} - 14 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, или около 0,01% от всего количества молекул воздуха. Было обнаружено излучение как в видимой, так и в инфракрасной областях спектра. Отношение измеренной энергии светящегося шара к энергии, затраченной на его образование, составило около 10^{-3} . Это противоречит значениям 1–10%, опубликованным ранее, скажем в [1629, 1632]. Последние далеко превосходят любые предположения; эти значения использовались в гл. 4 для получения информации о плотности энергии шаровой молнии в атмосфере.

Исследовалось влияние давления газа, его состава и материала электродов на характеристики и внешний вид светящегося шара. Долгоживущие светящиеся шары могли возникать при давлениях от 0,5 до 3 атм. Долгоживущие шары образовывались при использовании таких газов, как O_2 , N_2 , NO_2 , и не возникали при использовании CO_2 и аргона. В качестве покрытия для электродов использовались Pt, Au, Ag, Cu, Zn, Cd, C, Sn, W, Al, Rb, Hg. Долгоживущие шары не появлялись при использовании электродов, покрытых Pt и Hg. Возможно, что сложная многоуровневая структура атомов Pt и Hg открывает слишком много каналов дезактивации и препятствует накоплению энергии на возбужденных метастабильных уровнях молекул.

Спектр излучения и время распада светящегося объекта зависели от материала электрода. Спектр излучения светящегося шара в N_2 состоял исключительно из линий испускания атомов примеси, поступающей в газ из электродов. Этот спектр с идентифицированными линиями, полученный с помощью полуметрового спектрометра «Джерелл–Эш», приведен на рис. 7.15. Ни полос, ни континуума в спектре обнаружено не было. Такой характер спектра не соответствует представлению о малом влиянии электродов на свечение шара в воздухе.

Спектры светящегося шара в воздухе состояли преимущественно из полос с небольшой добавкой атомных линий. В воздухе наиболее ярко выраженными полосами были полосы Шумана–Рунге O_2 (3370–3617 Å), полосы OH (3064 Å), полосы PtO (5664 и 5906 Å) и континуум CO_2 (от 3500 до 5100 Å). Как можно видеть из рис. 7.16, где показан типичный

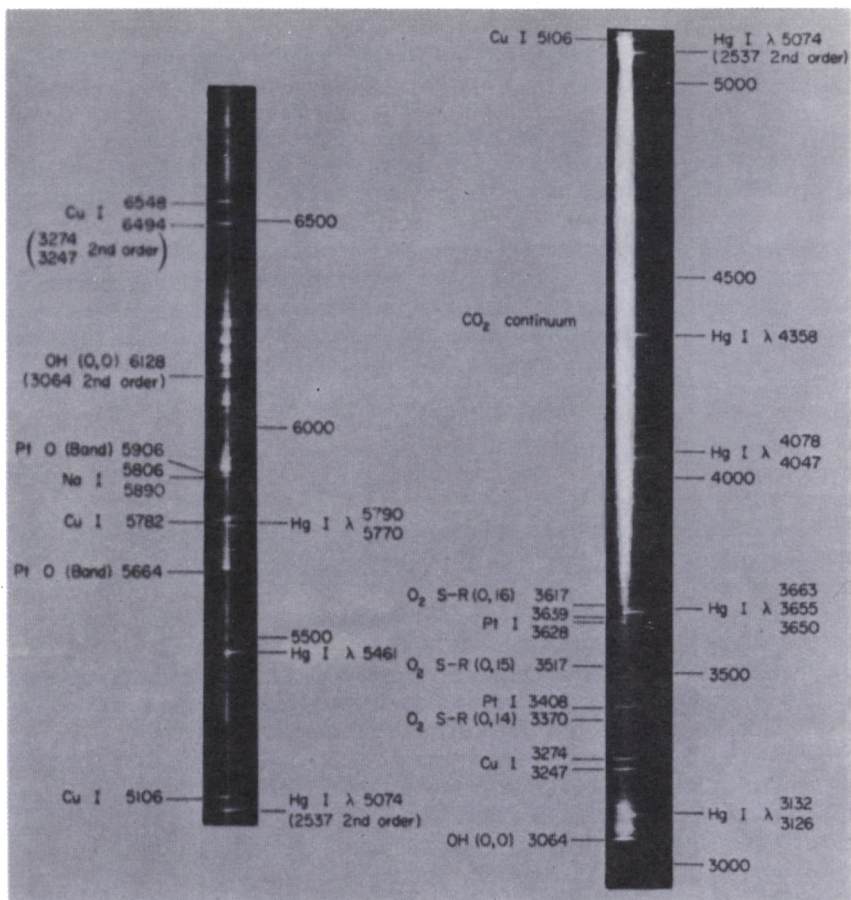


Рис. 7.16. Типичная спектрограмма продолжительного свечения воздуха, которое инициировано высокочастотным разрядом. Спектр записан с помощью полуметрового спектрометра Jarrell Ash, имеющего дисперсию 20 Å/мм. Спектр воздуха существенно отличается от спектра N₂. Основную роль играет интенсивный континуум CO₂, в то время как линии, обусловленные материалом электрода, вносят второстепенный вклад. Воспроизводится с разрешения издательства «Академик пресс» и д-ра Пауэлла. Опубликовано впервые в [1443] и затем воспроизведено в [1444].

ния. Разряд в воздухе был всегда вначале белым с постепенным пожелтением, по мере увеличения концентрации NO₂ · N₂O образовывались большие светящиеся шары почти чисто оранжевого цвета, которые существовали в течение 2 с после прекращения высокочастотного разряда.

Параметры излучения долгоживущих светящихся объектов, образуемых высокочастотным разрядом, могут быть сопоставлены с со-

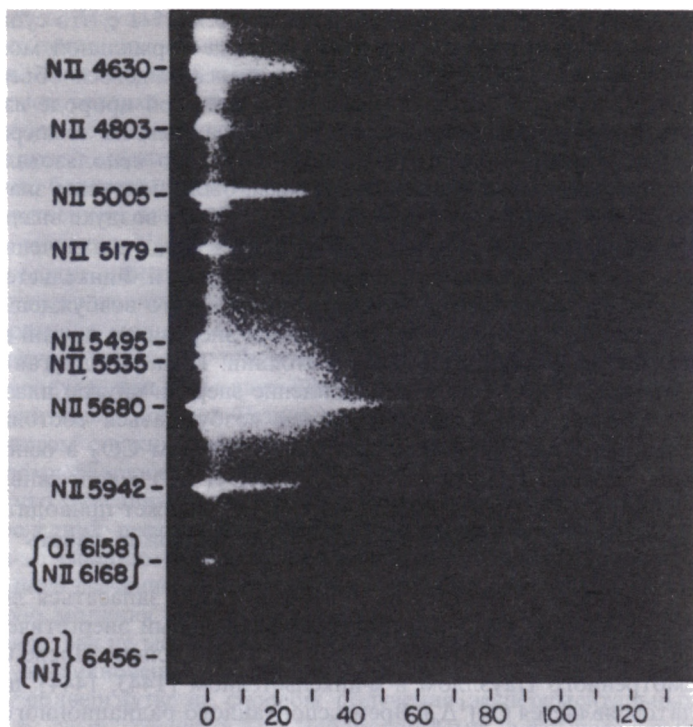


Рис. 7.17. Спектр излучения нормального грозового разряда, из которого следует, что свечение обусловлено наличием атомов. Записаны также зависимости интенсивностей линий от времени. Фотография показывает, что характер излучения грозового разряда вовсе не такой, как в случае продолжительного свечения массы воздуха, возбужденной высокочастотным разрядом. Воспроизводится из [1324] с разрешения Орвилла и журнала Science, Вашингтон.

ответствующими характеристиками разряда естественной молнии. Пример временной развертки спектра свечения молнии представлен на рис. 7.17 [1324].

Спектр излучения молнии состоит в основном из линий нейтральных и однократно ионизованных атомов кислорода и азота. Отметим, что атомарные линии не присущи спектру излучения воздуха, возбуждаемого высокочастотным разрядом. Обычно при этом такие линии в спектре излучения воздуха не наблюдаются.

Как следует из полученных в [1324] данных о спектре излучения линейной молнии, наиболее интенсивной была линия излучения атомарного азота 5680 А с длительностью почти 100 мкс. Характер временных зависимостей излучения линейной молнии не таков, как в случае высокочастотного возбуждения воздуха. Свечение воздуха, возбужденного

высокочастотным разрядом, продолжается 0,5–1 с, что существенно превосходит длительность свечения разряда нормальной молнии.

Результаты измерений температуры светящегося объекта в воздухе не согласуются с предположением о тепловой природе излучения. При измерении температуры методом, основанным на температурной зависимости сопротивления, в качестве которого использовалась вольфрамовая проволока диаметром 75 мкм, были получены значения от 2000 до 2500 К. При этом, хотя содержание CO_2 в воздухе значительно меньше 1%, молекулы CO_2 вносили основной вклад в излучение. Для описания процесса нетеплового излучения Пауэлл и Финкельштейн ввели термин «электролюминесценция», предполагая, что возбуждение CO_2 может осуществляться в результате передачи энергии от другой молекулы, находящейся в метастабильном состоянии. Тогда эта другая молекула может быть ответственна за накопление энергии внутри плазмоида. Предполагалось, что в разряде может возбуждаться состояние $\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+)$ с последующей передачей энергии молекулам CO_2 в основном состоянии ($^1\Sigma_g$), приводящей к образованию $\text{O}_2(^3\Sigma_u^-)$ и долгоживущего состояния $\text{CO}_2(^3B_2)$. Распад состояния $\text{CO}_2(^3B_2)$ может приводить к образованию $\text{CO}_2(^3B_1)$, которое в свою очередь может давать наблюдаемый континуум.

Вообще говоря, энергия в воздухе может запасаться любой молекулой, имеющей долгоживущий метастабильный энергетический уровень, который может заселяться в разряде типа молнии. После $\text{CO}_2(^3B_2)$, рассмотренного Пауэллом и Финкельштейном [1443, 1444], первым кандидатом является $\text{O}_2(^1\Delta_g)$. Время спонтанного радиационного полураспада изолированной молекулы $\text{O}_2(^1\Delta_g)$ около 45 мин. Дважды запрещенный переход $^1\Delta_g \rightarrow ^3\Sigma_g^-$ в O_2 экспериментально исследовался в работе [323], где установлена зависимость времени радиационного распада от давления. В воздухе при стандартных температуре и давлении время полураспада может уменьшиться до нескольких минут. При наличии в возбужденном воздухе колебательно-возбужденных молекул число каналов распада увеличивается, так что время радиационного полураспада может оказаться еще меньше.

Полосы (0–0) и (1–0) системы $\text{O}_2(^1\Delta_g \rightarrow ^3\Sigma_g^-)$ соответствуют длинам волн 1260 и 1065 нм. Эти переходы наблюдались в дневном и ночном свечении нормальной атмосферы. Хотя состояние $\text{O}_2(^1\Delta_g)$ является метастабильным и переход $^1\Delta_g \rightarrow ^3\Sigma_g^-$ дважды запрещен, при определенных условиях заселенность этого состояния в воздухе может быть значительной. Например, было установлено [1456], что в микроволновом разряде около 10% молекул O_2 может быть возбуждено в состояние $^1\Delta_g$.

Таким образом, можно ожидать, что сильный коронный или молниевый разряд в воздухе приведет к существенному заселению метастабильного состояния $\text{O}_2(^1\Delta_g)$. Мы предполагаем также, что выделению энергии, запасенной молекулами, может способствовать наличие примесей в воздухе или контакт возбужденной области с твердым материалом.

Эти результаты Пауэрла и Финкельштейна [1443, 1444] представляют собой наиболее детальное экспериментальное исследование явления шаровой молнии. Они окончательно подтвердили, что возбуждение небольших объемов воздуха может привести к образованию долгоживущего светящегося объекта. Внешний вид этого объекта соответствует описаниям шаровой молнии. Он имеет относительно низкую температуру и энергию, близкую к той, которая приписывается шаровой молнии. Непосредственное влияние на внешний вид явления оказывают концентрации молекул N_2 , O_2 , CO_2 и N_2O в воздухе. Концентрации этих молекул могут изменяться под влиянием разряда молнии. Цвет и яркость могут определяться концентрацией молекул NO_2 , образуемых в результате разряда молнии. В силу малых значений плотности энергии и температуры плотность объекта оказывается равной плотности нормального воздуха; при этом движение может вызываться электрическими или магнитными полями. Резкое охлаждение, обусловленное ветром или контактом с каким-либо посторонним предметом, может привести к быстрому разрушению объекта.

Я считаю, что описанные результаты подтверждают основное предположение последних нескольких столетий, согласно которому возбуждение каким-то способом воздуха может привести к возникновению продолжительного свечения. Из того факта, что явление свечения, похожее на шаровую молнию, можно воспроизвести с помощью высококачественного разряда, мы не можем заключить, что подобный механизм ответствен и за возникновение естественной шаровой молнии. Проверке должны быть подвергнуты не способы получения экспериментальных результатов, а сами результаты. Лабораторными методами был воспроизведен светящийся, подвижный, долгоживущий, шарообразный объект, который исследовался в контролируемых условиях. При этом решающее значение имеет не то, какая техника была использована для концентрирования энергии в объеме воздуха, а то, что такое явление наконец было воспроизведено.

7.6. Заключительные замечания

Различные эксперименты показали, что, сообщая энергию небольшим объемам нормального воздуха или воздуха с добавлением других газов, можно заставить эти объемы светиться и оставаться устойчивыми в течение конечного времени. При этом важно отметить, что способ введения энергии в небольшой воздушный или квазिवоздушный объем не играет существенной роли. Необходимо лишь осознать, что этот объем остается светящимся и устойчивым, проявляя общие свойства шаровой и четочной молнии, наблюдаемые в естественных условиях.

Мы обсудили три различных лабораторных и (или) управляемых процесса, которые позволяют сконцентрировать энергию в малом объеме воздуха при атмосферном давлении и воспроизвести долгоживущий устойчивый самосветящийся объект сферической формы. Это: 1) лока-

лизированный процесс горения, для протекания которого требуется наличие горючих газов; 2) локализованный процесс нагрева, требующий присутствия испаряющихся материалов, и 3) локализованное возбуждение молекул воздуха в метастабильные состояния, приводящее к накоплению энергии. Однако считать, что описанные процессы могут быть в естественных условиях вызваны разрядом молнии,—чисто умозрительная гипотеза.

Концентрация электрической и тепловой энергии в локальном объеме осуществляется в природном явлении, которое наблюдается чаще, чем шаровая молния. Общеизвестно, что в природе существует явление, называемое огнями св. Эльма и представляющее собой слабый точный коронный разряд при высоком напряжении. Атомы и молекулы воздуха возбуждаются электронами и затем испускают излучение в видимой и ближней инфракрасной области спектра. Кроме того, в работе [875] показано, что лидер быстро движущегося по направлению к земле канала молнии заполняет весьма ограниченный объем, в котором может происходить локальное накопление энергии. Головка лидера обладает определенным электрическим потенциалом и поэтому сильно подвержена влиянию непосредственного окружения.

Исследования разрядов молнии на горные вершины и окружающие их участки [371] показали, что имеются каналы разрядов, распространяющихся как вверх, так и вниз. Их свойства зависят от окружающей среды. Разряды, распространяющиеся вниз, обусловлены наличием мощных пространственных зарядов в атмосфере и в области, примыкающей к границе разряда. Путь этого разряда определяется в значительной степени случайным, нелинейным и непостоянным распределением пространственного заряда. По-видимому, пространственный заряд зависит от топографии местности, ветра и проводимости воздуха и не зависит от проводимости земли.

Грозовые разряды, распространяющиеся вверх, в большей степени зависят от величины электрического поля вблизи точки возникновения. Считается, что основную роль в развитии разряда играют проводимость земли и пространственный заряд. В отличие от разряда, распространяющегося вниз, для которого характерны короткие импульсы тока, поднимающийся разряд начинается довольно продолжительным импульсом тока порядка 100 А.

В работе [768] анализируются вопросы, связанные с головкой лидера распространяющегося вниз разряда, с развитием тока и с изменением электрического поля между головкой лидера и землей. Ток разряда молнии может возрастать от нуля до пикового значения за несколько микросекунд, а затухает гораздо медленнее, вероятно за несколько сотен микросекунд. Скорость возрастания напряжения между землей и головкой лидера описывается соотношением

$$\frac{dV}{dt} = 1,8 \cdot 10^7 \frac{q}{vt^2} \exp(-\beta vt), \quad (7.6)$$

где q – заряд канала, равный обычно 1 Кл (заряд электрона равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), $\beta \approx 10^{-5}$, v – скорость распространения лидера, равная, скажем, $1,5 \cdot 10^7$ см/с, $h \equiv vt$ – высота головки над землей в момент времени t . На высоте $h = 100$ м скорость возрастания напряжения оказывается равной 24 кВ/мкс. Напряжение пробоя нормального воздуха составляет примерно 12 кВ/см. Поэтому можно ожидать, что при движении лидера вниз пробой воздуха происходит достаточно быстро.

Если вследствие уменьшения пространственного заряда в атмосфере или на почве напряженность электрического поля не достигает пробойного значения, то может иметь место темный разряд. При этом не ясно, в каком направлении обычно распространяются темные разряды – вверх или вниз. По-видимому, темные разряды происходят быстро и переносят довольно большие токи. В работах [1782–1784] обсуждается случай возникновения темного разряда, который послужил причиной смерти многих людей и животных. Находящиеся поблизости наблюдатели никакого разряда не заметили. Тем не менее обследование окрестностей подтвердило факт сильноточного разряда.

Сильноточные разряды, поднимающиеся вверх от земли, были обнаружены также при исследованиях искусственно инициируемой молнии [658]. Разряды были видимыми, причем после окончания основного разряда возникало послесвечение. Было отмечено, что характер послесвечения определяется геометрией и состоянием поверхности земли. Аналогичное послесвечение описано в [1314]. Наблюдался светящийся шар, эволюция которого привела к возникновению распространяющегося вниз разряда.

Вряд ли следует отрицать вероятность того, что локализованный разряд может привести к возникновению явления свечения подобно тому, как это имело место в экспериментах [1443, 1444] с высокочастотными разрядами. Основываясь на своих результатах, авторы этих работ предложили механизм образования естественной шаровой молнии в атмосфере. При концентрации энергии в малом объеме воздуха в результате прохождения разряда молнии и накопления ее в электронно-возбужденных молекулах образуется светящийся шар, аналогичный тому, который наблюдался в эксперименте. В послеразрядном поле напряженностью 1–2 кВ/см такой шар может приобрести положительный заряд. Время его существования может достигать 1 с.

Если бы электрическое поле было направлено к земле, то электрогидродинамическая сила могла бы заставить положительно заряженный шар двигаться вниз или против ветра. Пространственный заряд положительных ионов мог бы притягиваться к расположенным поблизости проводникам, вызывая движение шара и, возможно, его проникновение в отверстия или окна. Взрывное разрушение могло бы быть результатом резкого нагрева малой части шара, обусловленного внезапным возрастанием электронного тока при контакте с проводником.

Согласно описанию Пауэлла и Финкельштейна [1443, 1444], светящийся объект состоит из трех областей. Центральная область, где про-

исходит таунсендовское размножение свободных электронов, характеризуется довольно однородным распространением температуры и, по-видимому, является источником видимого излучения. В промежуточной области, или пограничном слое, температура которого в радиальном направлении спадает, происходит переход между ядром и окружающим воздухом. Третья область представляет собой окружающий воздух. Схема этой модели показана на рис. 7.18.

Внутри шара происходит таунсендовское размножение электронов, в результате которого образуются электронно-ионные пары. Под действием электрического поля, направленного наружу, вне шара будет

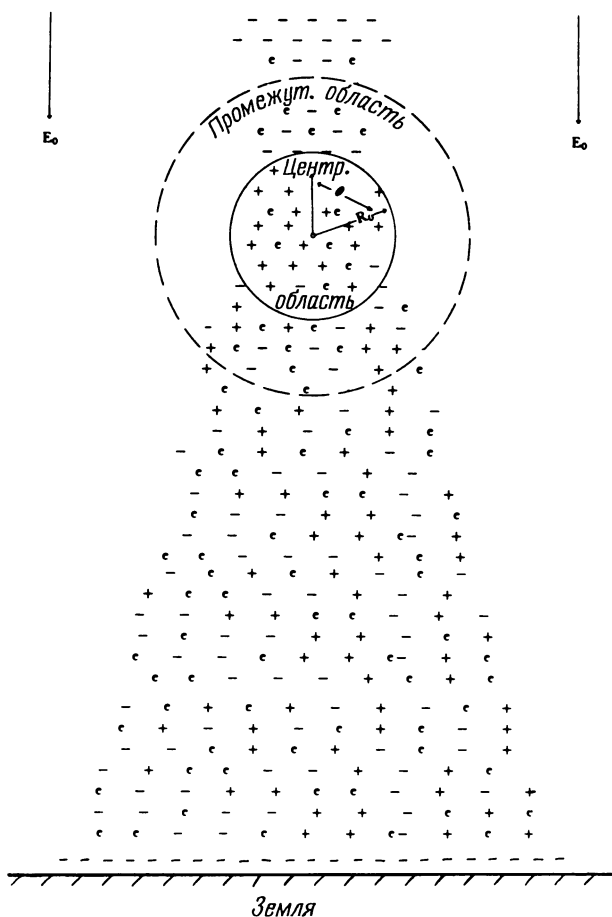


Рис. 7.18. Иллюстрация модели, предложенной Пауэллом и Финкельстейном [1443] для объяснения явления продолжительного свечения, похожего на шаровую молнию, которое возникает при фокусировании высокочастотной энергии. Воспроизводится с разрешения из [1443], опубликовано также в [1444].

развиваться ток положительных ионов и электронов. Поскольку подвижность у электронов больше, чем у ионов, суммарный заряд вскоре станет положительным. При этом в шар из окружающего пространства могут быть каналированы дополнительные электроны. Возбуждение молекул электронным ударом может восполнить потери внутренней энергии, связанные с распадом возбужденных молекул при излучении.

Сделав определенные предположения о параметрах такого светящегося шара, можно оценить концентрацию возбужденных молекул. Пусть ядро шара имеет диаметр 10 см и испускает однородное по объему излучение желтого цвета (длина волны 6000 А) мощностью 50 Вт в течение 1 с. Для этого требуется концентрация возбужденных молекул порядка $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. В нормальном воздухе концентрация молекул CO_2 составляет примерно 10^{16} см^{-3} . Поскольку источником видимого излучения может быть именно эта молекула, становится ясным, что требуется непрерывное возбуждение молекул CO_2 из резервуара энергии. Если бы такой передачи энергии не происходило, мы получили бы более короткую длительность излучения ($\sim 0,1$ с).

Пауэлл и Финкельштейн подсчитали, что для того, чтобы шар непрерывно испускал излучение мощностью порядка 100 Вт, необходимо протекание тока около 20 мА при напряженности поля 2000 В/см. Считается, что существование столь малых токов легко поддержать. Так, подобные токи могут возникать в результате прохождения коронного или продолжительного грозового разрядов.

Коронный разряд при силе тока 30 мкА с небольшого куста высотой 46 см, помещенного в электрическое поле напряженностью 240 В/см, наблюдался в работе [631]. В поле напряженностью 2000 В/см может достигаться ток силой 10 мА. Свойства разряда определяются главным образом величиной напряженности поля в точке возникновения разряда и не зависят от величины пространственного заряда. Для случая множества точечных разрядов величина разрядного тока выражается соотношением

$$I = V \sum_{r=1}^n K_r (V - V_{0r}). \quad (7.7)$$

Здесь V_{0r} — потенциал, при котором начинается эмиссия в точке r , K_r — коэффициент, зависящий от расположения точки относительно электрического поля и от величины подвижности ионов.

Как установлено в [423], токи грозового разряда могут существовать и после окончания основного разряда молнии. Через 0,3 с после удара молнии протекали токи величиной 38–130 А. Средняя величина заряда, передаваемого на землю, составила 34 Кл в случае гибридной вспышки и 19 Кл для дискретных вспышек.

По мнению многих исследователей, экспериментальные результаты Пауэлла и Финкельштейна [1443, 1444] оказались наиболее значительными в истории исследований подобного рода. Эти результаты с определенностью подтвердили возможность существования шаровой молнии

как явления естественного свечения. Наиболее важный результат состоит в установлении возможности возбуждения нормального воздуха при атмосферном давлении, накопления энергии его молекулами и продолжения существования светящегося объекта в течение некоторого времени после отключения источника энергии.

Однако, насколько известно автору данной книги, до сих пор не сообщалось, что с помощью разряда постоянного тока можно создавать такое же локализованное свечение, какое наблюдается в экспериментах с высокочастотным возбуждением воздуха. По-видимому, естественное возбуждение описывалось в работе [625], хотя при этом длительность свечения составляла не 0,5–1 с, а 20–40 мс. Хорошо известно, что в разряде постоянного тока при низких и атмосферном давлении происходит возбуждение колебательных состояний молекулы CO_2 , которое обеспечивает действие определенных типов лазеров на CO_2 . В результате возникает излучение не в видимой области спектра, а на длине волны 10 мкм. Предметом дальнейших экспериментальных исследований должен стать процесс передачи энергии, в результате которого может возникать видимое излучение.

Несмотря на все эти оговорки, было бы неблагоразумно исключить из рассмотрения такой возможный источник возбуждения, как локализованный атмосферный разряд. Такой разряд может быть достаточно локализован и иметь размеры, которые, вероятно, ненамного превышают размеры нормального канала. Согласно измерениям [1826], поперечные размеры канала грозового разряда концентрируются вблизи двух значений: 2–5 мм и 2–5 см. Если в объеме с такими размерами рассеивается энергия в несколько джоулей, то можно ожидать возбуждения как молекул O_2 , так и CO_2 .

Модель молекулярного возбуждения, разработанная Пауэллом и Финкельстейном, подобна более ранним моделям [493, 663, 960, 962] и др. Модель, предложенная Капицей [960, 962], широко обсуждалась многими исследователями и послужила значительным стимулом для изучения шаровой молнии в последние несколько десятилетий. Капица предположил, что одной из причин существования светящегося шара в атмосфере в течение времени, близкого к периоду существования шаровой молнии, может служить поглощение энергии от внешнего источника. В качестве такого источника рассматривались естественные интенсивные высокочастотные волны.

Аргументация Капицы основывалась на его понимании характера взаимодействия между плазмой и электромагнитным полем. Плазменное облако может поглощать электромагнитные колебания в том случае, если существует резонанс между длиной волны и диаметром шара. При этом длина волны должна быть связана с диаметром шара соотношением

$$\lambda \leq 3,65 d. \quad (7.8)$$

Если электромагнитные волны падают на проводящую поверхность, то может иметь место отражение и образование стоячей волны. Пучно-

сти стоячей волны должны устанавливаться в определенных точках, отделенных друг от друга расстояниями $m\lambda/4$ (m – нечетное число). В точках пучностей напряженность поля должна быть максимальной.

Вопрос о том, в узле или в пучности находится плазмод, послужил предметом дебатов. Математический анализ проблемы [1896] показал, что плазмод должен находиться не в пучности, а в узле поля. Рассмотрение баланса между атмосферным давлением и излучением [1790] привело к заключению, что, хотя начальная ионизация газа происходит в области пучности, равновесное состояние шара соответствует узловой области. Автору работы [317] удалось с помощью электромагнитного поля зажигать и поддерживать разряды как в узле, так и в пучности поля. Некоторые математические соотношения, связанные с этим вопросом, приводятся и обсуждаются в работах [1627, 1628, 1632].

Капица предположил, что вначале объем плазмоида мал по сравнению с величиной $d^3/6$, где d – конечный диаметр шара, равный примерно 10 см. В результате резонансного взаимодействия плазмоида с электрическим полем степень ионизации газа внутри шара возрастает. Это вызывает возрастание эффективности поглощения энергии плазмодом, что в свою очередь приводит к расширению шара. Вследствие расширения шара происходит отклонение от условий резонанса; при этом плазмод охлаждается, и его диаметр вновь приближается к своему резонансному значению. Условие резонанса стабилизирует диаметр шара.

Поскольку диаметр естественной шаровой молнии близок к 10 см, длина волны естественного электромагнитного излучения, необходимого для формирования такого шара, должна составлять примерно 35 см, что соответствует частоте около $0,9 \cdot 10^9$ Гц. Излучение естественной молнии в узких полосах исследовалось в работах [965, 1018, 1019, 1474]. При этом было обнаружено сравнительно узкополосное излучение на частотах в диапазоне $(0,1-0,2) \cdot 10^9$ Гц. Колебания возникали через 0,1–0,4 с после появления лидера грозового разряда и продолжались в среднем около 50 нс. Спектральная плотность мощности была низкой, порядка $10^{-12}-10^{-10}$ Вт/(м²·Гц) на расстоянии 1 км от молнии. Полученные результаты не подтверждают предположения Капицы о том, что подобные колебания, существующие в природе, обладают достаточной интенсивностью для создания огненного шара. Однако было высказано предположение, что мощность высокочастотного излучения будет достаточно высокой в близкой окрестности ионизованного канала молнии.

Хотя модель, включающая внешний источник энергии, детально разработана Капицей [960, 962], аналогичное предположение, хотя и в общей форме, было сделано около 1930 г. Маршаном. Оно появилось в результате попытки объяснить наблюдения шаровой молнии в помещении. Согласно наблюдению, шаровая молния возникла вблизи круглой дверной ручки в комнате и оставалась неподвижной. Было замечено, что вне дома вдоль двух стен комнаты и вблизи двери проходили телефонные провода. Маршан предположил, что грозовой разряд в проводах индуцировал высокочастотные стоячие волны. Он заключил, что если между проводом и дверной ручкой электромагнитное давление

оказалось минимальным, то в этой точке могла бы образоваться шаровая молния.

Аналогичное предположение о связи шаровой молнии с колебаниями некоего естественного электромагнитного поля в помещении было выдвинуто в работе Черилло [493], которая, однако, до конца 50-х годов не получила широкой известности. Согласно сообщению профессора Лоджа, в работах [924–926] также упоминается концепция стоячих электромагнитных волн. Работа Капицы появилась в то время, когда благодаря прогрессу науки стало возможным экспериментальное исследование, поэтому она была расценена как существенно новый вклад в рассматриваемое направление исследований.

В заключение, основываясь на существующих сегодня данных и фактах, я выражаю уверенность в том, что явления атмосферного свечения, называемые «шаровая молния» и «четочная молния», реально существуют. Я считаю, что как лабораторные эксперименты, так и наблюдения в контролируемых условиях в воздухе подтверждают возможность возникновения самоподдерживающихся светящихся долгоживущих образований в воздухе или в воздухе с примесями, обладающих известными из описаний очевидцев характеристиками шаровой молнии и четочной молнии. Я считаю, что несколько фотографий естественных и искусственных атмосферных электрических явлений были правильно интерпретированы и представляют надежное доказательство существования явлений шаровой молнии и четочной молнии. Я считаю, что эти явления характеризуются относительно низкой температурой. Их нельзя рассматривать как классическую плазму с характеристиками, присущими полностью ионизованному веществу. Концентрация электронов и ионов должна быть довольно низкой. Я считаю, что энергия, необходимая для поддержания явления, запасается на метастабильных уровнях молекул, что и определяет относительно большую длительность существования явления. При этом может быть применим термин «молекулярная электролюминесценция». Я считаю, что явление имеет электрическую природу в том смысле, что его образование, вероятнее всего, связано с атмосферными электрическими разрядами.

Я признаю, что эти утверждения могут быть опровергнуты в результате проведения будущих исследований и анализа новых данных. Однако я надеюсь, что эта работа послужит поддержкой для дальнейших исследований и экспериментов, связанных с возникновением, созданием и стабильностью рассмотренных явлений.

Библиография

8.1. Журналы и периодические издания

Большинство сообщений, упоминаний и обсуждений, которые касаются явлений шаровой молнии и четочной молнии, было найдено в многочисленных научных журналах, а также периодических изданиях, опубликованных в течение последних 300 лет. Эти журналы представляют основной источник информации для исследований указанных явлений. Многие из этих журналов имеются в библиотеках крупных университетов и потому легко доступны. Другие найти труднее из-за изменений в индексации, названиях, а также вследствие объединения различных изданий. Сокращения названий, используемые многими авторами и журналами, не всегда принимаются последующими исследователями, поскольку на протяжении многих лет не происходит согласованного использования стандартных сокращений. Многие из использованных сокращений не согласуются с Chemical Abstracts Service Index Standard.

Многие из журнальных сокращений, которые встретились в процессе работы над книгой, оказались неизвестными, что привело к некоторым затруднениям при нахождении ссылок. Приведем некоторые из них, чтобы облегчить труд других исследователей.

Журнал *Annalen der Physik*, который часто упоминают в ссылках как *Ann. Poggendorff*, *Poggendorff's Annalen*, *Wied. Ann.*, *Wiedemann's Annalen*, *Drude's Annalen*, обозначается здесь как *Ann. Physik*. Для издания *Bulletin de la Societe Astronomique de France*, которое в связи с изменением названия в 1911 г. упоминается также как *L'Astronomie*, используется сокращение *Bull. Assoc. Sci. Fr.* Многие недоразумения возникают в результате ошибочных или несогласованных упоминаний года и тома цитированного издания. При цитировании издания *Revue des Science et leurs Applications*, *Paris*, которое также упоминается как *Kosmos* и *Le Monde*, используется название *Le Cosmos*. Этот журнал не следует путать с изданием *Kosmos – Handweiser für Naturfreunde*. При цитировании журнала *Elektrotechnische Zeitschrift*, на который иногда ссылаются как на *ETZ* или *Elekt. Zeit*, используется сокращение *Elektro. Zeit*. Однако ссылки на *Elek. Zeit.*, датированные ранее чем 1880 г., не имеют отношения к *Elektrotechnische Zeitschrift*. *Gao* или *Gaea* отсылают к изданию *Der Ursprung der Meteoriten Geo (Gaea)*; *Isis – Gesellschaft Isis in Dresden*.

Journal de Physique имеет несколько названий: Journal de Physique, Teoretique et Appliquel, Journal de Physique et le Radium, причем используются сокращения каждого из этих названий. Для издания Klein's Wochenschrift für Astronomie, Meteorologie und Geographie использовалось сокращение Klein's Wochen. При цитировании издания Schweizerische Astronomische Gesellschaft, Society Astronomique de Suisse использовалось сокращение Orion. Sitz. Acad. Wiss. отсылает к изданию Sitzungsberichte Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse; Syman's Met. Mag.—к журналу Meteorologische Magazine. Для ссылки на Zeitschrift der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, еще одним правильным названием которого является Meteorologische Zeitschrift, используется сокращение Zeit. Deut. Met. Ges. Для ссылок на «Журнал Русского физико-химического общества» используется сокращение Zh. Russ. Fiz. Khim. Obsh.

8.2. Шаровая молния, четочная молния и соответствующие ссылки

Представленная ниже библиография служит нескольким целям и функциям. Она содержит список всех известных автору упоминаний о шаровой и четочной молнии, а также используемые в различных разделах книги ссылки, не имеющие отношения к этим явлениям. Список упоминаний о шаровой и четочной молниях представляет собой наиболее полную из библиографий подобного рода и совершенно необходим для исследовательской работы. Чтобы подобрать ключ к истинной природе явления, которое в целом плохо изучено и время от времени является предметом ложных толкований, необходимо проводить исследования, полагаясь на прошлые сообщения и наблюдения.

Большинство упоминаний о шаровой молнии и четочной молнии имеют форму сообщений от первого лица, дискуссий, научного анализа или описаний эксперимента. Многие из этих упоминаний появились в различных периодических изданиях, отдельных публикациях или в научной литературе в течение последних 300 лет. Некоторые из этих публикаций легко доступны, другие нет. Ниже собрано и перечислено свыше 1600 упоминаний о шаровой молнии и четочной молнии. Большинство из них было просмотрено и проверено лично автором данной книги.

Некоторые из ссылок, впервые упоминаемые в старых журналах, оказались неполными. Многие из этих ссылок признаются другими авторами как аутентичные, однако автор данной книги не имел их в своем распоряжении для личной проверки. Эти непроверенные ссылки помечены словами Unavailable—title unknown или звездочкой (в том случае, если название известно) и включены в библиографию для полноты. Другие исследователи могут обратиться к подобным журналам, не

имеющимся в распоряжении автора, повысив тем самым полезность библиографии.

В библиографию были включены также все ссылки, используемые в тексте. Некоторые из них, разумеется имеют отношение к шаровой молнии и четочной молнии, другие нет. Ссылки, не имеющие отношения к шаровой молнии и четочной молнии, необходимы для полноты обсуждения и для развития повествования. Эти ссылки включены в библиографию и во избежание недоразумения помечены буквами (NBL).

Я сохранил библиографическую картотеку на перфокартах и в диске памяти компьютера, и буду постоянно пополнять список литературы. Я буду рад добавлениям или поправкам.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Abbot C.G.* Remarkable Lightning Photographs. Smithsonian Miscellaneous Collections, **92**, No. 12, 1934.
2. *Adamson D.F.* Notes on a Curious Lightning Flash. *Electrician*, **25**, 1890, p. 445.
3. *Alcantara P.* Prie Communiquer Academie Chute Foudre Globulaire, Minas, 16 Septembre. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **109**, 1889a, p. 496.
4. *Alcantara P.* La Foudre en Boule. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **111**, 1890b, p. 496.
5. *Alcantara P.* Unavailable—Title Unknown. *Naturwiss. Rund.*, **22**, 1890, p. 284.
6. *Alexander W.H.* A Possible Case of Ball Lightning. *Mon. Weather Rev.*, **35**, 1907.
7. *Algeo J.* and *T. Pyles.* Comments in the Anglo-Saxon Cronicle, Jan. 793 A.D. As Referenced in Problems in the Origin and Development of the English Language. Harcourt, Brace and World, Inc., New York, 1966, p. 126.
8. *Aliverii G.* and *G. Lovera.* Ueber Einige in Operitalien Berichtete Kugelblitze, *Arkiv foer Meteorol. Geophysik und Bioklimat*, **A3**, 1950, p. 77.
9. *Allibone T.E.* Multiple Lightning Strokes. *Amer. Meteorol. Soc. Q.J.*, **70**, 1944, p. 161.
10. *Alt E.* Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **18**, 1901, p. 573.
11. *Altschuler M.D.* Atmospheric Electricity and Plasma Interpretations of UFO's, in *Scientific Study of Unidentified Flying Objects*. E. U. Condon, ed., E. P. Dutton, New York, 1969, Chap. 7, p. 723.
12. *Altschuler M.D., L.L. House* and *E. Hildner.* Is Ball Lightning a Nuclear Phenomenon? *Nature*, **228**, 1970, p. 545.
13. *Andersen W.H.* Energy Source for Ball Lightning. *J. Geophys. Res.*, **70**, 1965, p. 1291.
14. *Andersen W.H.* Reply. *J. Geophys. Res.*, **71**, 1966, p. 680.

15. *Anderson F.J. and G.D. Freier. A Report on Ball Lightning. J. Geophys. Res., 77, 1972, p. 3928.*
16. *Anderson R., S. Bveinbjorn, D.C. Blanchard, S. Gathman, S. Jonasson, C.B. Modre, H.J. Survilas, and B. Vonnegut. Electricity in Volcanic Clouds. Science, 14, 1965, p. 1179 (NBL).*
17. *Andrew W.L. Ball Lightning at Cattewater. Meteorol. Mag., 62, 1927, p. 186.*
18. *Андреианов А.М., Синицын В.И. Использование эрозионного разряда для моделирования одного из возможных видов шаровой молнии. Препринт № ИАЭ-2719 Ин-та атомной энергии им. Курчатова, М., 1976.*
19. *Andrianov A.M. and V.I. Sinitsyn. Erosion-Discharge Model for Ball Lightning. Sov. Phys. Tech. Phys., 22(11), 1977a, p. 1342.*
20. *Андреианов А.М., Синицын В.И. Использование эрозионного разряда для моделирования одного из возможных видов шаровой молнии. ЖТФ, 47, 1977, с. 2318.*
21. *Angstrom C.A. Unavailable—Title Unknown. Ovforsigt Kongl. Vetenskaps-Akadem. Forhandl. (Stockholm), 40, 1885, p. 87.*
22. *Aniol R. Der Kugelblitz, Eine Bibliographie. Meteorol. Rund., 7, 1954, p. 220.*
23. *Anon. A Narrative of Divers Odd Effects of a Dreadful Thunder-Clap, at Strallund in Pomerania, 19/29 June 1670. Roy. Soc. Lond. Phil. Trans., 5, 1670, p. 2084.*
24. *Anon. Some Remarkable Effects of a Great Storm of Thunder and Lightning at Portsmouth, Oct., 23, 1685. Roy. Soc. Lond. Phil. Trans., 16, 1692, p. 1212.*
25. *Anon. An Account of the Death of Mr. George William Richmann, Professor of Experimental Philosophy, a Member of the Imperial Academy of Sciences at Petersburg. Translated from High Ditch. Roy. Soc. Lond. Phil. Trans., 49, 1755, p. 61.*
26. *Anon. Unavailable—Title Unknown. Cour. Phys. Expr. Math., 3, 1769, p. 405.*
27. *Anon. Unavailable—Title Unknown. Roy. Soc. Lond. Phil. Trans., 2, 1773, p. 231.*
28. *Anon. A Short View of the New Electrical Experiments Performed by Dr. Van Marum. Phil. Mag., 8, 1800, p. 313.*
29. *Anon. Unavailable—Title Unknown. Naturwiss., 3, 1836, p. 264 (*).*
30. *Anon. Feuerkugeln. (Summary.) Fortschr. Phys., 2, 1846, p. 202.*
31. *Anon. Beobachtete Phanomene-Feuerkugeln. (Summary.) Forstchr. Phys., 3, 1847, p. 169.*
32. *Anon. Unavailable—Title Unknown. Annals of Nottinghamshire, 2, 1853, p. 47.*
33. *Anon. Unavailable—Title Unknown. Annals of Nottinghamshire, 2, 1853, p. 157.*
34. *Anon. Unavailable—Title Unknown. Klima. Beit. Ges. Stur. Berlin, 7, 1857, p. 221.*

35. *Anon.* Cas de Foudre en Boule a Brighton. *Cosmos*, **17**, 1860a, p. 29 (*).
36. *Anon.* Coups de Foudre Mysterieux; Foudre en Boule. *Cosmos*, **17**, 1860b, p. 718 (*).
37. *Anon.* Cas de Foudre en Boule a Brighton. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **16**, 1860c, p. 624.
38. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Le Cosmos*, **16**, 1860d, p. 281.
39. *Anon.* Unavailable—Title Unknown, *Le Cosmos*, **18**, 1861a, p. 1.
40. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Le Cosmos*, **18**, 1861b, p. 758.
41. *Anon.* Coups de Foudre Mysterieux; Foudre en Boule. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **16**, 1864, p. 624.
42. *Anon.* Coups de Foudre Mysterieux; Foudre en Boule. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **16**, 1864, p. 625.
43. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Le Cosmos*, **21**, 1866, p. 199.
44. *Anon.* Ball Lightning, *Nature*, **15**, 1877, p. 539.
45. *Anon.* Beobachtungen uber Kugelblitze. *Ausland*, **51**, 1878a, p. 771 (*).
46. *Anon.* Kugelblitz Beobachtet in Danemark. *GAEA*, **14**, 1878b, p. 61. (*).
47. *Anon.* Kugelblitz Beobachtet in Danemark. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **34**(6), 1878c, p. 1156.
48. *Anon.* Beobachtungen uber Kugelblitze. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **34**(6), 1878d, p. 1163.
49. *Anon.* Globular Lightning. *J. Franklin Institute*, **105**, 1878e, p. 203.
50. *Anon.* Singular Phenomenon at Lower Cumber. Londonderry Sentinel, June 1, 1878. *Royal Meteorol. Soc. Q. J.*, **4**, 1878f, p. 281.
51. *Anon.* Globular Lightning. *Electrician*, **5**, 1880, p. 1.
52. *Anon.* La Foudre en Boule. *Ciel et Terre*, **5**, 1884a, p. 115.
53. *Anon.* La Foudre en Boule. *Ciel et Terre*, **5**, 1884b, p. 365.
54. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *English Mech.*, 1 April, 1884c.
55. *Anon.* Physical Notes. *Nature*, **30**, 1884d, p. 569.
56. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Ver. Kayser. Monat. Berlin Akad.*, Nov. 1884e, p. 613.
57. *Anon.* Summary of "Ueber den Gegenwartigen Stand der Kugelblitz-Frage" from *Meteorol. Zeit.*, March, 1885, p. 118. *In Amer. J. Meteorol.*, **2**, 1885a, p. 142.
58. *Anon.* Special Correspondence. *Electrician*, **14**, 1885b, p. 433.
59. *Anon.* Un Cas Curieux de Foudre en Boule. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **41**(3), 1885c, p. 652.
60. *Anon.* Globular Lightning. *J. Franklin Institute*, **119**, 1885d, p. 143.
61. *Anon.* Un cas Curieux de Foudre en Boule. *La Nature*, **8**, 1885e, p. 190 (*).

62. *Anon.* Artificial Ball Lightning. *Meteorol. Mag.*, **20**, 1885f, p. 26.
63. *Anon.* Mass of Fire Falls into Sea. *Science*, **5**, 1885g, p. 242.
64. *Anon.* Feu Saint-Elme. *Ciel et Terre*, **6**, 1885/86, p. 70 (NBL).
65. *Anon.* Globular Lightning. *Electrician*, **17**, 1886a, p. 293.
66. *Anon.* Fatal Discharge of Globular Lightning. *Electrician*, **17**, 1886b, p. 333.
67. *Anon.* La Foudre Globulaire. *L'Astronomie*, **5**, 1886c, p. 310 (*).
68. *Anon.* Foudre en Boule. *L'Astronomie*, **5**, 1886d, p. 432 (*).
69. *Anon.* La Foudre Globulaire. *Meteorologie*, **34**, 1886e, p. 310.
70. *Anon.* Literaturbericht. *Meteorol. Zeit.*, **3**, 1886f, p. 515.
71. *Anon.* Fei Saint-Elme. *Ciel et Terre*, **7**, 1886/87, p. 407 (NBL).
72. *Anon.* Note sur un Coup de Foudre. *Bull. Soc. Electr.*, 1887a, p. 350 (*).
73. *Anon.* Note sur un Coup de Foudre. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **104**, 1887b, p. 143.
74. *Anon.* Globe Lightning in France. *Electrician*, **19**, 1887c, p. 134.
75. *Anon.* Globular Lightning. *Electrician*, **19**, 1887d, p. 325.
76. *Anon.* Curious Effects of Lightning. *Electrician*, **19**, 1887e, p. 431.
77. *Anon.* Note sur un Coup de Foudre. *Elett. Milano*, 1887f, p. 474 (*).
78. *Anon.* Note sur un Coup de Foudre. *Fortschr. Elektr.*, **1**, 1887g, p. 392 (*).
79. *Anon.* Note sur un Coup de Foudre. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **43**(3), 1887h, p. 573.
80. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *L'Astronomie*, **6**, 1887i, p. 107.
81. *Anon.* Note sur un Coup de Foudre. *La Lumiere Electrique*, **24**, 1887j, p. 476 (*).
82. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *La Nature*, **15**, 1887k, p. 90.
83. *Anon.* Perlenblitz. *La Nature*, 3 Sept. 1887l.
84. *Anon.* Foudre en Boule. *Meteorologie*, **35**, 1887m, p. 18.
85. *Anon.* Foudre en Boule. *Meteorologie*, **35**, 1887n, p. 19.
86. *Anon.* Ancien Exemple de Foudre en Boule. *Meteorologie*, **35**, 1887o, p. 221.
87. *Anon.* Ball Lightning. *Nature*, **37**, 1887p, p. 187.
88. *Anon.* Globular Lightning. *Nature*, **37**, 1887q, p. 324.
89. *Anon.* Note sur un Coup de Foudre. *Rev. Intern. Electr.*, **4**, 1887r, p. 107 (*).
90. *Anon.* Globular Lightning. *Science*, **10**, 1887s, p. 324.
91. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **4**, 1887t, p. 137.
92. *Anon.* Strange Lightning Phenomenon at Geneva. *Electrician*, **22**, 1888a, p. 5.
93. *Anon.* Globe Lightning. *Electrician*, **22**, 1888b, p. 117.
94. *Anon.* Eclairs en Boule a Saint-Petersbourg. *La Nature*, Oct. 1888c, p. 350 (*).

95. *Anon.* Eclair en Boule Observe a Montivilliers en 1720. *La Nature*, **16**, Dec. 1888d, p. 6 (*).
96. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Le Cosmos*, **37**, 1888e, p. 95.
97. *Anon.* Foudre Globulaire. *Meteorologie*, **36**, 1888f, p. 173.
98. *Anon.* Bemerkenswerthe Blitzschlage. *Meteorol. Zeit.*, **5**, 1888g, p. 158.
99. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Mitt. Naturwiss. Ver., Steiemark*, **25**, 1888h, p. 228.
100. *Anon.* Notes. *Nature*, **38**, 1888i, p. 238.
101. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Sitz. Genfer Phys. Gesell.*, **20**, Dec., 1888j.
102. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **5**, 1888k, p. 94.
103. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **5**, 1888l, p. 165.
104. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **5**, 1888m, p. 166.
105. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **5**, 1888n, p. 204.
106. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **5**, 1888o, p. 208.
107. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **5**, 1888p, p. 214.
108. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Anhdlg. Natur. Ver. Bremen*, **13**, 1889a, p. 312.
109. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Arch. Sci. Phys. Natur.*, **21**, 1889b.
110. *Anon.* Globular Lightning. *Electrician*, **22**, 1889c, p. 271.
111. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Elektro. Zeit.*, **1**, 1889d, p. 7.
112. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Elektro. Zeit.*, **1**, 1889e, p. 23.
113. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Elektro. Zeit.*, **1**, 1889f, p. 28.
114. *Anon.* Sur un cas de Foudre Globulaire. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **45**(3), 1889g, p. 505.
115. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Kosmos*, **38**, 1889h, p. 142.
116. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Kosmos*, **38**, 1889i, p. 182.
117. *Anon.* Foudre en Boule. *L'Astronomie*, **8**, 1889j, p. 312 (*).
118. *Anon.* Sur un cas de Foudre Globulaire. *La Lumiere Electrique*, **33**, 1889k, p. 143 (*).
119. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *La Nature*, **17**, 1889l, p. 1.
120. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *La Nature*, **17**, 1889m, p. 334.
121. *Anon.* Foudre Globulaire a Montfort–L'Amaure. *La Nature*, **17**, 1889n, p. 383 (*).
122. *Anon.* Eclairs en Boule a Saint-Petersbourg. *Meteorologie*, **37**, 1889o, p. 23.

123. *Anon.* Foudre Globulaire a Montfort L'Amaury. *Meteorologie*, **37**, 1889p, p. 192.
124. *Anon.* Coups de Foudre en Belgique en 1887. *Meteorologie*, **37**, 1889q, p. 228.
125. *Anon.* Notes. *Nature*, **41**, 1889r, p. 303.
126. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. Staat. Wurt. Friedrichshafen, 163, 16 Juli, 1889s.
127. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Uber Land und Meer*, **32**, 1889t, p. 127.
128. *Anon.* Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **6**, 1889u, p. 68.
129. *Anon.* Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **6**, 1889v, p. 69.
130. *Anon.* Meteorologische Notizen und Korrespondenzen. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **6**, 1889w, p. 119.
131. *Anon.* Reproduction du Phenomene de la Foudre en Boule. *Ciel et Terre*, **11**, 1890a, p. 424.
132. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Ebenda*, **2**, 1890b, p. 298.
133. *Anon.* Notes. *Electrician*, **26**, 1890c, p. 2.
134. *Anon.* A Shower of Lightning. *Electrician*, **5**, 1890d, p. 74.
135. *Anon.* Globular Lightning Experiments. *Electrician*, **26**, 1890e, p. 194.
136. *Anon.* Globular Lightning. *Electrician*, **22**, 1890f, p. 413.
137. *Anon.* Foudre Globulaire. *La Nature*, **18**, 1890g, p. 167.
138. *Anon.* Foudre en Boule. *Meteorologie*, **38**, 1890h, p. 246.
139. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Mittlg. Natur. Ver. Steinheim*, **28**, 1890i, p. 348.
140. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Mittlg. Natur. Ver. Steinheim*, **27**, 1890j, p. 423.
141. *Anon.* Notes (the Caucasus Papers). *Naturem*, **42**, 1890k, p. 458.
142. *Anon.* Meteorologische Notizen und Korrespondenzen. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **7**, 1890l, p. 192.
143. *Anon.* Meteorologische Notizen und Korrespondenzen. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **7**, 1890m, p. 212.
144. *Anon.* *Uber die Kugelblitz. Erscheinungen des Tornados von Saint-Claude.* *Zeit. Angew. Meteorol.*, **7**, 1890n, p. 288.
145. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Zeit. Elektro.*, **8**, 1890o, p. 487.
146. *Anon.* Blitzschlag in die Kirche zu Preetz. *Elektr. Zeit.*, **51**, 1891a, p. 5 (*).
147. *Anon.* Reproduction de l'Eclair en Boule. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **47**(3), 1891b, p. 360.
148. *Anon.* Kugelblitz in Berga bei Schlieber. *GAEA*, **27**, 1891c, p. 627.
149. *Anon.* Foudre Globulaire A Montfort l'Amaury. *L'Astronomie*, **5**, 1891d, p. 77 (*).
150. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *L'Astronomie*, **5**, 1891e, p. 299.

151. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *L'Astronomie*, **5**, 1891f, p. 357.
152. *Anon.* Reproduction de l'Eclair en Boule. *La Nature*, **19**, 1891g, p. 122 (*).
153. *Anon.* Foudre Globulaire a Montfort L'Amaury. *Meteorologie*, **39**, 1891h, p. 99.
154. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Mitt. Naturwiss. Ver., Steiermark*, **28**, 1891i, p. 334.
155. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Mitt. Naturwiss. Ver., Steiermark*, **28**, 1891j, p. 349.
156. *Anon.* Notes. *Nature*, **44**, 1891k, p. 327.
157. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **8**, 1891l, p. 165.
158. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **8**, 1891m, p. 166.
159. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **8**, 1891n, p. 214.
160. *Anon.* Unavailable–Title Unknown, *Electr. Engr.*, Dec. 25, 1892a.
161. *Anon.* Kugelblitz in Berga bei Schlieber. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **48**(3), 1892b, p. 367.
162. *Anon.* Foudre Globulaire. *La Nature*, Oct., 1892c, p. 286 (*).
163. *Anon.* Eclairs en Chapelet. *Le Cosmos*, Juin, 1892d, p. 319 (*).
164. *Anon.* La Foudre Globulaire. *Le Cosmos*, Juin, 1892e, p. 319 (*).
165. *Anon.* Eclairs en Chapelet. *Meteorologie*, **40**, 1892f, p. 217.
166. *Anon.* Foudre Globulaire. *Meteorologie*, **40**, 1892g, p. 252.
167. *Anon.* A Lightning Story. Ball Lightning. *Meteorol. Mag.*, **28**, 1891h, p. 188.
168. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Mitt. Naturwiss. Ver., Steiermark*, **29**, 1892i, p. 427.
169. *Anon.* Note. *Nature*, **46**, 1892j, p. 548.
170. *Anon.* Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **10**, 1893a, p. 157.
171. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Tidskr. Phys. Chem.*, **2**, 1893b, p. 242.
172. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Kosmische Phys.*, 1894a, p. 80.
173. *Anon.* Eclair en Boule. *La Nature*, Juin, 1894b, p. 47 (*).
174. *Anon.* Eclair en Boule. *Meteorologie*, **42**, 1894c, p. 200.
175. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Zeit. Elektro.*, **12**, 1894d, p. 73.
176. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Ver. Kgl. Meteorol. Inst. Berlin*, 1895, p. 24.
177. *Anon.* Beobachtung uber Kugelblitze. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **52**(3), 1896a, p. 299.
178. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Le Cosmos*, **45**, 1896b, p. 387.

179. *Anon.* Eclair en Boule. *Meteorologie*. **42**, 1896c, p. 200.
180. *Anon.* Beobachtung uber Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **13**, 1896d, p. 36 (*).
181. *Anon.* Beobachtung uber Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **13**, 1896e, p. 97 (*).
182. *Anon.* Beobachtung uber Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **13**, 1896f, p. 215 (*).
183. *Anon.* Beobachtung uber Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **13**, 1896g, p. 216 (*).
184. *Anon.* Beobachtung uber Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **13**, 1896h, p. 262 (*).
185. *Anon.* Beobachtung uber Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **13**, 1896i, p. 263 (*).
186. *Anon.* Beobachtung uber Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **13**, 1896j, p. 264 (*).
187. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Le Cosmos*, **46**, 1897a, p. 547.
188. *Anon.* Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **14**, 1897b, p. 34.
189. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Mittlg. Natur. Ver. Steinheim*, **34**, 1897c, p. 175.
190. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Mittlg. Natur. Ver. Steinheim.*, **34**, 1897d, p. 176.
191. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Verhdlgn. Nat. Ver. Brunn*, **36**, 1897e, p. 41.
192. *Anon.* Zwei Seltsame Blitzschlage. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **14**, 1897f, p. 93 (*).
193. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **14**, 1897g, p. 144.
194. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **14**, 1897h, p. 166.
195. *Anon.* Ein Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **14**, 1897i, p. 167 (*).
196. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **14**, 1897j, p. 252.
197. *Anon.* Gewitter. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **54**(3), 1898a, p. 313.
198. *Anon.* Kugelblitz. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **54**(3), 1898b, p. 314.
199. *Anon.* Kugelblitz. *Naturgeschichte Mecklenburg*, **52**, 1898c, p. 100 (*).
200. *Anon.* Gewitter. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **15**, 1898d, p. 70.
201. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. *Mittlg. Natur. Ver. Steinheim*, **36**, 1899, p. 228.
202. *Anon.* Ueber die Blitz. *Astr. Rund.*, **2**, 1900a, p. 24 (*).
203. *Anon.* Foudre en Boule. *Bull. Soc. Astron. Er.*, **14**, 1900b, p. 510.
204. *Anon.* L'Eclair en Boule. *Cosmos*, Septembre, 1900c, p. 287 (*).
205. *Anon.* Notes – Globular Lightning. *Electrician*, **45**, 1900d, p. 587.

206. *Anon.* Ueber die Blitz. (Summary.) Fortschr. Phys., **56**(3), 1900e, p. 253.
207. *Anon.* Uber den Kugelblitz. Meteorol. Zeit., **17**, 1900f, p. 382.
208. *Anon.* Notes. Nature, **62**, 1900g, p. 350.
209. *Anon.* A Short View of the New Electric Experiments Performed by Dr. Van Marum. Phil. Mag., **8**, 1900h, p. 193.
210. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. Zeit. Angew. Meteorol., **17**, 1900i, p. 191.
211. *Anon.* L'Eclair en Boule. (Summary.) Fortschr. Phys., **57**(3), 1901e, p. 266.
212. *Anon.* Verheerung durch Einen Kugelblitz. (Summary.) Fortschr. Phys., **57**(3), 1901b, p. 266.
213. *Anon.* Verheerung durch Einen Kugelblitz. GAEA, **37**, 1901c, p. 634.
214. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. La Nature, **29**, 1901d, p. 2.
215. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. La Nature, **29**, 1901e, p. 561.
216. *Anon.* L'Eclair en Boule. Meteorologie, **49**, 1901f, p. 53.
217. *Anon.* Observation de Foudre en Boule. Meteorologie, **49**, 1901g, p. 353.
218. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. Zeit. Angew. Meteorol., **18**, 1901h, p. 24.
219. *Anon.* Kugelblitz in Altenburg. (Summary.) Fortschr. Phys., **58**(3), 1902a, p. 304.
220. *Anon.* Kugelblitzbeobachtung. Meteorol. Zeit., **19**, 1902b, p. 335.
221. *Anon.* Kugelblitz in Altenburg. Zeit. Angew. Meteorol., **19**, 1902c, p. 239 (*).
222. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. Ann. Hydro. Marit. Meteorol., **32**, 1904a, p. 390.
223. *Anon.* Foudre en Boule. L'Astronomie, **18**, 1904b, p. 378 (*).
224. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. Zeit. Angew. Meteorol., **21**, 1904c, p. 118.
225. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. Zeit. Angew. Meteorol., **21**, 1904, p. 119.
226. *Anon.* Sonderbare Wirkungen Eines Kugelblitzes. GAEA, **4**, 1905a, p. 57 (*).
227. *Anon.* La Foudre en Boule. La Nature, **32**, 1905, p. 258 (*).
228. *Anon.* Foudre en Boule. Bull. Soc. Astron. Er., **20**, 1906a, p. 100.
229. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. Kosmos, **56**, 1906b, p. 309.
230. *Anon.* Nochmals der Kugelblitz 1896, Remscheid. Prometheus, **18**, 1907, p. 576 (*).
231. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. La Mat. Fulm., **7**, 1908a, p. 113.
232. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. Naturwiss. Rund., **8**, 1908b, p. 62.
233. *Anon.* Unavailable–Title Unknown. Umschau, **19**, 1908c, p. 304.
234. *Anon.* Eclair en Boule. Ciel et Terre, **29**, 1908/09, p. 399.

235. *Anon.* Fireballs. *English Mechanic*, Aug. 13, 1909a (*).
236. *Anon.* Kugelblitz bei Treptow. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **65**(3), 1909b, p. 283.
237. *Anon.* Foudre en Boule. *Rev. Nepholog.*, **47**, 1909c, p. 370 (*).
238. *Anon.* Kugelblitz bei Treptow. *Weltall*, **9**, 1909d, p. 300 (*).
239. *Anon.* Foudre en Boule. *Ciel et Terre*, **30**, 1909/10, p. 417.
240. *Anon.* Foudre en Boule. *Ciel et Terre*, **31**, 1910a, p. 385.
241. *Anon.* Foudre en Boule. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **66**(3), 1910b, p. 364.
242. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Le Cosmos*, **59**, 1910c, p. 30.
243. *Anon.* Foudre en Boule. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **25**, 1911a, p. 262.
244. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Le Cosmos*, **60**, 1911b, p. 19.
245. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Le Cosmos*, **60**, 1911c, p. 692.
246. *Anon.* Les Eclairs Globulaires. *Rev. Nepholog.*, **6**, 1911d, p. 539 (*).
247. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Ver. Kel. Meteorol. Inst. Berlin*, **231**, 1911e, p. 72.
248. *Anon.* Unavailable—Title Unknown, *Zeit. Angew. Meteorol.*, **28**, 1911f, pg. 161.
249. *Anon.* Un Cas Remarquable de Foudre en Boule. *Ciel et Terre*, **33**, 1912a, p. 199.
250. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **29**, 1912b, p. 199.
251. *Anon.* Meteorologische Notizen und Korrespondenzen, *Zeit. Angew. Meteorol.*, **30**, 1913, p. 213.
252. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Umschau*, **25**, 1914a, p. 762.
253. *Anon.* Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **31**, 1914b, p. 215.
254. *Anon.* Das Wesen der Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **32**, 1915a, p. 416.
255. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Umschau*, **26**, 1915b, p. 229.
256. *Anon.* Ball Lightning. *Electr. Exp.*, Jan. 1916a, p. 68 (*).
257. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Le Cosmos*, **65**, 1916b, p. 341.
258. *Anon.* Ball Lightning at Salina, Kansas. *Mon. Weather Rev.*, **47**, 1919a, p. 728.
259. *Anon.* Globular Lightning. *Roy. Astro. Soc. Canada J.*, **13**, 1919b, p. 299.
260. *Anon.* Ball Lightning Seen at St. John's Wood. *Meteorol. Mag.*, **56**, 1921, p. 195.
261. *Anon.* Unavailable—Title Unknown, *Umschau*, **26**, 1922, p. 587.
262. *Anon.* Nature of Ball Lightning. *Meteorol. Mag.*, **58**, 1923, p. 259.

263. *Anon.* Onweder Optische Verschijnselen. Nz in Nederland. Amsterdam, No. 81, 1924a (*).
264. *Anon.* Ball Lightning. Scientific American, **130**, 1924b, p. 242.
265. *Anon.* Ball Lightning. Roy Astron. Soc. Canada J., **19**, 1925, p. 213.
266. *Anon.* Untitled – Book Review – Roy. Ned. Meteorol. Inst. No. 81, 1924; Meteorol. Mag., **61**, 1926a, p. 197.
267. *Anon.* Kugelblitze und Fohn in der Krim. Meteorol. Zeit., **43**, 1926b, p. 33.
268. *Anon.* Kugelblitz. Meteorol. Zeit., **44**, 1927, p. 188.
269. *Anon.* Electrical Phenomenon Near Weymouth. Nature, **126**, 1930a, p. 262.
270. *Anon.* Historic Natural Events. Nature, **126**, 1930b, p. 262.
271. *Anon.* Ball Lightning. Science, **74**, Suppl. No. 1908, 1931, p. 10.
272. *Anon.* Unavailable – Title Unknown. Soc. Fran. Elect. Bull., **2**, 1932, p. 865.
273. *Anon.* Ball Lightning Phenomenon. Science, **78**, Suppl. No. 2026, 1933, p. 9.
274. *Anon.* Ball Lightning – Three Discharges. Roy. Astro. Soc. Canada. **28**, 1934, p. 144.
275. *Anon.* On the Problem of Ball Lightning. Roy. Meteorol. Soc. Q.J., **65**, 1939, p. 532.
276. *Анон.* Техника – молодежи, № 8, 1942.
277. *Anon.* Nabetrachting over de Bolbliksem van Lutjewolde. (Reconsideration of the Ball Lightning at Lutjenolde.) Hamel en Dampkring, **49**(9), 1951, p. 158 (*).
278. *Anon.* Thunderbolts: the Electric Phenomenon of Thunderstorms. Meteorol. Mag., **81**, 1952, p. 146.
279. *Anon.* Unavailable – Title Unknown. Zeit. Angew. Meteorol., **9**, 1955a, p. 62.
280. *Anon.* Unavailable – Title Unknown. Zeit. Angew. Meteorol., **9**, 1955b, p. 378.
281. *Anon.* Unavailable – Title Unknown. Civil Aviation – Russ., **9**, 1958, p. 32.
282. *Anon.* Interesting Observation of Lightning. Meteorol. Mag., **89**, 1960a, p. 235.
283. *Анон.* Правда, 30 окт. 1960.
284. *Анон.* Шаровые молнии. Природа, № 5, 1962, с. 71.
285. *Анон.* Авиация и космонавтика, № 47(10), 1964, с. 94.
286. *Anon.* Kugelblitz Trifft Flugzeug. Naturwiss. Rund., **17**, 1964b, p. 482.
287. *Anon.* New Theoretical Model for Ball Lightning. Science News Lett., **86**, 1964c, p. 199.
288. *Anon.* Ball Lightning due to a Leak in Storke at Joint. Science News Lett., **86**, 1964d, p. 392.
289. *Anon.* Ball Lightning. Popular Science, **192**, No. 6, 1968, p. 14.

290. *Anon.* Unavailable—Title Unknown. *Ind. Ocean Mar. Obs.*, **42**, 1972, p. 52.
291. *Anon.* Unusual Weather: Ball Lightning in a February Thunderstorm Down East in Maine. *Weatherwise*, **29**, 1975, p. 84.
292. *Anon.* Fireballs, Some Firey, Some Dark. *J. Meteorol.*, **1**(10), 1976, p. 312.
293. *Anon.* Ball Lightning in Canada. *J. Meteorol.*, **3**(31), 1978, p. 212.
294. *Арабаджиги В.И.* Гроза и грозовые явления. Изд-во Минского гос. ун-та им. Ленина, 1960.
295. *Arabalji W.I.* On the Problem of Ball Lightning. *J. Geophys. Res.*, **81**(36), 1976, p. 6455.
296. *Arabadji W.I.* Reply. *J. Geophys. Res.*, **82**(24), 1977, p. 3500.
297. *Arabadzhi V.I.* On the Electricity of Thunderstorms. *Priroda*, No. 7, 1947, p. 12 (*).
298. *Арабаджиги В.И.* К теории атмосферного электричества. Тр. Минского гос. ун-та, № 5, 1956, с. 77.
299. *Arago G.* Sur le Tonnerre. *Annuaire au Roi par le Bureau des Longitudes*, 1838. *Notices Scientifiques*, p. 221 (*).
300. *Arago F.* *Oeuvres Completes*. Gide et J. Baudry, eds., Paris., 1854, Tome 4, Le Tonnere, p. 38, 50, 211.
301. *Arago F.* Thunder and Lightning. Paris, 1859 (*).
302. *Argenteuil M.* Unavailable—Title Unknown. *Le Cosmos*, **14**, 1859, p. 672.
303. *Argyle E.* Ball Lightning as an Optical Illusion. *Nature*, **230**, 1971, p. 179.
304. *Argyle M.* On Thunder and Lightning. *Edinburgh New Phil. J.*, **26**, 1838, p. 81.
305. *Arrhenius S. A.* *Lehrbuch der Kosmischen Physik I.* S. Hirzel. Leipzig, 1903, p. 772.
306. *Арцимович Л. А.* Элементарная физика плазмы. М., Атомиздат, 1969, изд. 3.
307. *Ashby D. E. T. F. and G. Whitehead.* Is Ball Lightning Caused by Antimatter Meteorites? *Nature*, **230**, 1971, p. 180.
308. *Ashmore S. E.* On the Problem of Ball Lightning. *Roy. Meteorol. Soc. Q. J.*, **66**, 1940, p. 194.
309. *Аскаръян Г. А., Рабинович М. С., Савченко М. М., Степанов В. К.* Оптический пробой в фокусе лазерного луча. Письма в ЖЭТФ, т. 5, вып. 5, 1967, с. 150.
310. *Aspden H.* Ball Lightning Enigma. *New Scientist*, **57**, 1973, p. 42.
311. *Assmann J.* Wirbelgewitter. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **59**(3), 1902, p. 279.
312. *Assmann J.* Wirbelgewitter. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **20**, 1903a, p. 1 (*).
313. *Assmann J.* Wirbelgewitter. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **20**, 1903b, p. 21 (*).

314. *Atkinson B.W.* Riddle of Ball Lightning. *Geographical Mag.*, **41**, 1968, p. 204.
315. *Audoin M.* Kugelblitz. Beobachtet in der Tschadsee-Region. *Meteorol. Zeit.*, **30**, 1913, p. 148.
316. *Аулов А.* О пути следования шаровой молнии. *Известия*, 28 июля 1973.
317. *Babat G.I.* Electrodeless Discharges and Certain Problems Associated with Them. *Vestnik Elektropromyshlennosti*, 2/3, 1942 (*).
318. *Babat G.I.* Electrodeless Discharges and Some Allied Problems. *Inst. Elect. Engr. J. (London)*, **94**, RT. 3, 1947, p. 27.
319. *Babat G.I.* Vysokochastotnoye plama. *Yunyi Tekhnik*, No. 7, 1957, p. 56 (*).
320. *Babick M.* Kugelblitzbeobachtung in Cottbus. *Zeit. Meteorol.*, **9**, 1955, p. 378.
321. *Babinet M.* Sur un cas de Foudre Globulaire. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **35**, 1852, p. 1.
322. *Babinet M.* Cours de Physique. Jamin et Barry, eds. Paris, Gauthier – Villars, 1881, p. 320 (*).
323. *Bacha M.* Meteorologische Notizen und Korrespondenzen. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **7**, 1890, p. 192.
324. *Badger R.M., A.C. Wright and R.F. Whitlock.* Absolute Intensities of the Discrete and Continuous Absorption Bands of Oxygen Gas at 1.26 and 1.065 μm and the Radiative State of the (O_3) State of Oxygen. *J. Chem. Phys.*, **43**, 1965, p. 4345 (NBL).
325. *Bagote A.* Eclairs en Boule. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **33**, 1919, p. 284.
326. *Baker-Blocker A., T.M. Donahue and K.H. Mancy.* Methane Flux from Wetland Areas. *Tellus*, **29**(3), 1977, p. 245 (NBL).
327. *Bailey B.H.* Ball Lightning. *Weatherwise*, **30**(3), 1977, p. 99.
328. *Bailey T.* Events. *Ann. Nottinghamshire, History – County Nottingham Including the Borough, Simpkin, Marshall and Co.*, London, **4**, 1775, p. 47 (*).
329. *Bailey T.* Events. *Ann. Nottinghamshire, History – County Nottingham Including the Borough. Simpkin, Marshall and Co.*, London, **4**, 1794, p. 157 (*).
330. *Baldit A.* Sur un Eclair en Boule. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **158**, 1914, p. 1542.
331. *Baljasni W.* Wiederholung Plante'scher Versuche. *Beibl. Ann. Phys.*, **23**, 1899a, p. 843.
332. *Baljashi W.* Wiederholung Plante'scher Versuche. *J. Elektr.*, **7**, 1899b, p. 106 (*).
333. *Baltin P.* Unavailable – Title Unknown. *Photogr. Mill.*, **39**, 1902, p. 390.
334. *Балыбердин В.В.* Оценка энергии шаровой молнии. Самолетостроение и техника воздушного флота, № 3, 1965, с. 102.

335. Balyberdin V.V. Internal Energy of Ball Lightning. Foreign Science Bull., 2(4), 1966, p. 48.
336. Бальбердин В.В. Исследование механизма образования ионизованного вихря в атмосфере. Самолетостроение и техника воздушного флота, № 5, 1966, с. 3.
337. Бальбердин В.В. Проверка случая зарождения шаровой молнии. ПМТФ, 16, № 6, 1976, с. 132.
338. Baratoux M. Sur une Observation de Foudre en Boule Fait en Avion. Meteorologie. 16, 1952, p. 164.
339. Barette H. Foudre Globulaire du Lundi 17 Juillet 1865. (Summary.) Fortschr. Phys., 21, 1865a, p. 64.
340. Barette H. Foudre Globulaire du Lundi 17 Juillet 1865. Mondes., 8, 1865b, p. 726 (*).
341. Barry J.D. Ball Lightning, a Natural Phenomenon in Atmospheric Physics. M.S. Thesis, Calif. State College, Los Angeles, California, 1966.
342. Barry J.D. Ball Lightning. J. Atmos. Terr. Phys., 29, 1967a, p. 1095.
343. Barry J.D. A Model for Ball Lightning. Wiss. Zeit. Elektro., 9, 1967b, p. 202.
344. Barry J.D. Laboratory Ball Lightning. J. Atmos. Terr. Phys., 30, 1968a, p. 313.
345. Barry J.D. Fireball, Ball Lightning and St. Elmo's Fire. Weatherm., 23, 1968b, p. 180.
346. Barry J.D. Ball Lightning in the Laboratory. Wiss. Zeit. Elektro., 12, 1968c, p. 7.
347. Барри Дж.Д. Лабораторная шаровая молния. Природа, № 12, 1969, с. 62.
348. Barry J.D. A Comprehensive Bibliography of Ball Lightning Reports. Air Force Avionics Lab Technical Report, Afal-TR-73-348, Jan. 1974a, Wright-Patterson AFB, OHIO.
349. Barry J.D. Bibliography of Ball Lightning Reports. J. Atmos. Terr. Phys., 32, 1974b, p. 1577.
350. Barry J.D. Frequency of Ball Lightning Reports. J. Geophys. Res., 84(C1), 1979, p. 308.
351. Barry J.D., W.E. Boney and J.E. Brandelik. Laser Emission from He-Air-CH₄ and He-Air-C₃H₈ Mixtures. Appl. Phys. Lett., 18, 1971, p. 14 (NBL).
352. Bass R.W. and R.K. Golka. Nikola Tesla's Theory of Ball Lightning (Coloured Springs, 1899). Eyring Research Institute, Provo, Utah, Unpublished, 1976.
353. Battan L.J. The Thunderstorm. New American Library, New York, 1964, p. 101.
354. Bauer C. Eine Blitzaufnahme. Umschau, 42, 1938, p. 710.
355. Bauman G. Photographische Aufnahme Einer Blitzkugel in Riga. Meteorol. Zeit., 54, 1937, p. 192.

356. *Bay I.* Sur un cas de Foudre en Boule Observe le 26 Mai 1907. Bull. Soc. Astron. Fr., **22**, 1908a, p. 232.
357. *Bay I.* Observation de Foudre en Boule. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **146**, 1908b, p. 554.
358. *Bay I.* Kugelblitz. Meteorol. Zeit., **25**, 1908c, p. 468.
359. *Bay I.* Kugelblitzbeobachtung. Prometheus, **20**, 1908d, p. 48 (*).
360. *Bayet L.* La Foudre en Boule. Ciel et Terre, **5**, 1884/85a, p. 115.
361. *Bayet L.* Foudre en Boule. Ciel et Terre, **5**, 1884/85b, p. 365.
362. *Beadle D.G.* A Curious after Effect of Lightning. Nature, **137**, 1936, p. 112.
363. *Beasley W.H., M.A. Uman, B.C. Edgar and B.N. Turman.* Correlated Satellite Optical and Ground-Based Electrical and Magnetic Field Observations of Lightning. Presented at the AGU Spring Meeting, April 17–21, 1978, MIAMI Beach, FLA, Abstract in EOS-Trans. AGU, **59**(4), 1978, p. 284 (NBL).
364. *Beck F.X.* Das Gewitter in Saarbrücken am 26 Juni 1928. Meteorol. Beobachtungen der Wetterwarte Saarbr., **11**, 1920, p. 2 (*).
365. *Beck F.X.* Nachleuchten eines Blitzes als Perlschnur. Zeit. Angew. Meteorol., **44**, 1927, p. 141.
366. *Bacquerel M. and E. Becquerel.* Traite d'Electricite et de Magnetisme. Paris, **1**, 1855, p. 415 (*).
367. *Behn U.* Über Photographien von Perlschnurblitzen. Meteorol. Zeit., **20**, 1903, p. 379.
368. *Bellay M.Du.* Unavailable—Title Unknown. L'Astronomie, **5**, 1886, p. 311.
369. *Bendorf G.* Atmosphernoye elektrichestvo. Leningrad, 1934 (*).
370. *Benedicks C.* Theory of the Lightning—Balls and Its Application to the Atmospheric Phenomenon Called Flying Saucers. Arkiv foer Geofysik, **2**, 1954, p. 1.
371. *Berg H.* Beobachtung Eines Perlschnurblitzes. Zeit. Angew. Meteorol., **47**, 1930, p. 315.
372. *Berger K.* Novel Observations on Lightning Discharges: Results of Research on Mount San Salvatore. J. Franklin Institute, **283**, 1967, p. 478 (NBL).
373. *Berger K.* Kugelblitz und Blitzforschung. Naturwiss., **60**, 1973, p. 485.
374. *Bergstrom A.* Electromagnetic Theory of Strong Interaction. Phys. Rev., D, **3**, 1973, p. 4394.
375. *Berlage H.P.* Van Bliksemballen Naar Lichtgevende Aardappels en Weer Terug. Hamel en Dampkring, **53**, 1955, p. 65 (*).
376. *Bertholon M.* De l'Electricite des Meteores. Lyon, **2**, 1787, p. 27 (*).
377. *Besnou M.* De l'Etat de l'Iode dans l'Atmosphere, et de la Possibilite de la Formation de l'Iodure d'Azote dans les Orages. Mem. Soc. Sci. Nat. Cherbourg., **1**, 1852, p. 103 (*).

378. *Bigelow P.* Electrical Storm in Southern California. *Mon. Weather Rev.*, **35**, 1907, p. 228.
379. *Bjarne-Solas M.* Foudre en Boule. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **73**, 1959, p. 16.
380. *Blackhouse T.W.* Remarkable Lightning Flashes. *Nature*, **60**, 1899, p. 520.
381. *Blackman G.D'Arcy.* A Waterspout with Fireballs. *Meteorol. Mag.*, **57**, 1922, p. 250.
382. *Blair A.J.F.* Magnetic Fields, Ball Lightning and Campanology. *Nature*, **243**, 1973, p. 512.
383. *Blake R.* The Wizard of Wendover. *Mountain West Magazine*, Nov. 1977, p. 25.
384. *Blanc E.* Observation d'Eclairs en Boule, se Formant et Eclatant Sans Bruit Au-Dessus d'une Couche de Mirages. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **84**, 1877a, p. 666.
385. *Blanc E.* Ball Lightning. *Nature*, **15**, 1877b, p. 539.
386. *Blumhof F.* Kugelblitz bei Hagelwetter. (Summary). *Fortschr. Phys.*, **61**(3), 1905a, p. 324.
387. *Blumhof F.* Eigentumliche Lighterscheinung. *Meteorol. Zeit.*, **22**, 1905b, p. 132.
388. *Bogos E.M.* Ball Lightning. *Mon. Weather Rev.*, **26**, 1898, p. 565.
389. *Boll K.* Feuerkugel. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **30**, 1913, p. 214.
390. *Boll K.* Beobachtung von Kugel- und Perlschnurblitzen zu Jambol (Bulgarien). *Zeit. Angew. Meteorol.*, **35**, 1918, p. 130.
391. *Boll K.* Schnellbewegte Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **37**, 1920, p. 191.
392. *Bon G.Le.* L'Evolution de la Matiere. Paris, 1905, p. 154 (*).
393. *Bonacina L.C.W.* The Widecombe Calamity of 1638. *Weather*, **1**, 1946, p. 122.
394. *Bonney A.* Appearance of Air Bubbles at Remenham, Berkshire, January, 1871. *Amer. Meteorol. J.*, **4**, 1888a, p. 149.
395. *Bonney A.* Appearance of Air Bubbles at Remenham Berkshire, January, 1871. *Electrician*, **19**, 1887b, p. 179.
396. *Bonney A.* Appearance of Air Bubbles at Remenham, Berkshire, January, 1871. *Meteorol. Zeit.*, **22**, 1887c, p. 88.
397. *Boot H.A.H., S.A. Self, and R. Shersby-Harris.* Containment of a Fully Ionized Plasma by RF Fields. *J. Elect. and Control*, **4**, 1958, p. 434.
398. *Borlase W.* An Account of a Storm of Thunder and Lightning, Near Ludgran in Cornwall. *Roy. Meteorol. Soc. Phil Trans.*, **48**, 1753, p. 86.
399. *Bort M.T.De.* Eclair en Chapelet. *Meteorologie*, **44**, 1896, p. 66.
400. *Botley C.M.* A Fireball in 1792. *Meteorol. Mag.*, **59**, 1925, p. 185.
401. *Botley C.M.* The Air and Its Mysteries. Bell Publ., London, Plate X, 1938 (*).

402. *Botley C.M.* The Widecombe Calamity. *Weather*, **21**, 1966, p. 318.
403. *Botley C.M.* Tornadoes and Ball Lightning. *J. Meteorol.*, **2**(21), 1977, p. 271.
404. *Botley C.M.* Ball Lightning. *J. Meteorol.*, **3**(31), 1978, p. 215.
405. *Bottlinger K.F.* Zur Frage nach der Natur der Kugelblitze. *Naturwiss.*, **16**, 1928, p. 220.
406. *Bougon D.* Meteorologie. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **11**, 1897, p. 430.
407. *Bougon D.* Coups de Foudre. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **15**, 1901, p. 303.
408. *Bougon D.* Communications Diverses—un Curieux cas de Foudre Globulaire. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **16**, 1902a, p. 264.
409. *Bougon D.* Foudre Globulaire. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **16**, 1902b, p. 420.
410. *Bouin M.* Unavailable—Title Unknown, *Le Cosmos*, **18**, 1861, p. 758.
411. *Bowman J.E.* ST Elmo's Fire Near Glencoe. *Weather*, **4**, 1949, p. 197. (NBL).
412. *Boys H.A.* Remarkable Lightning Flash. *Meteorol. Mag.*, **45**, 1910, p. 108.
413. *Brand W.* Jahrliche Horbarkeitsperiode des Geschutzdonners und Seine Grossten Bisherigen Reichweiten. *Meteorol. Zeit.*, **17**, 1917, p. 58.
414. *Brand W.* Der Kugelblitz. Probleme der Kosmischen Physik, 11/111, H. Grand, Hamburg, 1923.
415. *Brand W.* Ball Lightning National Aeronautics and Space Administration, Technical Translation, F-13228, Feb. 1971, B. Benny, Washington D.C.
416. *Brasch A.* Vorlaufige Versuche zur Erzielung Extremer Elektrischer Potentiale Mittels der Atmosphaerischen Gewitterelektrizitat. *Naturwiss.*, **16**, 1928, p. 115.
417. *Bremen H.* Unavailable—Title Unknown. *Abhandl. Naturwiss. Ver. Bremen*, **13**, 1896, p. 312.
418. *Brereton O.S.* Account of the Violent Storms of Lightning at East-Bourn, in Sussex, Sept. 17, 1780. *Roy. Soc. Lond. Phil Trans.*, **71**, 1781, p. 42.
419. *Brester A.* Unavailable—Title Unknown. *Rev. Generale Sci.*, **21**, 1910, p. 385.
420. *Brevdel A.* Nature Intime de l'Electricite, du Magnetisme et des Radiations. Bruxelles—Paris, 1904, p. 20 (*).
421. *Brew W.* A Particular Discharge of Lightning. *Nature*, **48**, 1893, p. 370.
422. *Bromley K.A.* Ball Lightning. *Nature*, **226**, 1970, p. 253.
423. *Brook M., G. Armstrong, R.P.H. Winder, B. Vonnegut and C.B. Moore.* Artificial Initiation of Lightning Discharges. *J. Geophys. Res.*, **66**, 1961, p. 3967 (NBL).
424. *Brook M., N. Kitagawa and E.J. Workman.* Quantitative Study

- of Strokes and Continuing Currents in Lightning Discharges to Ground. *J. Geophys. Res.*, **67**, 1962, p. 649 (NBL).
425. *Brooks C.F.* A Case of Ball Lightning. *Amer. Meteorol. Soc. Bull.*, **47**, 1946, p. 342.
 426. *Broughton S.* Ball Discharge in Thunderstorms. *Chem. News*, **27**, 1873a, p. 172 (*).
 427. *Broughton S.* Ball Discharge in Thunderstorms. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **29**, 1873b, p. 1003.
 428. *Broughton S.* Manchester, Literary and Philosophical Society, Communications. *Nature*, **7**, 1873c, p. 415.
 429. *Broughton S.* Ball Discharge in Thunderstorms. *Proc. Manchester Soc.*, **4/3**, 1873d (*).
 430. *Brovetto P., V. Maxia and G. Bussetti.* On the Nature of Ball Lightning. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **38**, 1976, p. 921.
 431. *Brown G.H.* Ball Lightning. *Meteorol. Mag.*, **86**, 1957, p. 375.
 432. *Brown J.* Unavailable—Title Unknown. *London Times*, 1 Dec. 1858 (*).
 433. *Brown S.C.* High Frequency Gas Discharge Breakdown. *Proc. IRE*, **39**, 1951, p. 1493.
 434. *Browne I.* Account of a Thunderstorm on June 28, 1665. In *The Miscellaneous Writings of Sir Thomas Browne*. Farer and Faber Ltd., London, 1964, p. 195.
 435. *Bruce C.E.R.* Ball Lightning, Stellar Rotation, and Radio, Galaxies. *Engineer*, **216**, 1963a, p. 1047.
 436. *Bruce C.E.R.* Ball Lightning. *Inst. Elect. Engr. J. (London)*, **9**, 1963b, p. 357.
 437. *Bruce C.E.R.* Ball Lightning. *Nature*, **202**, 1964, p. 996.
 438. *Bruce C.E.R.* Lightning. *Research*, **2**, 1967, p. 12.
 439. *Bruce C.E.R. and R.H. Golde.* The Lightning Discharge. *Inst. Electr. Engr. J. (London)*, **88**, 11, 1941, p. 487.
 440. *Bruce H.* Unavailable—Title Unknown. *Electr. Rev.*, **167**, 1960, p. 1070.
 441. *Bruchsal H.* Unavailable—Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **17**, 1900, p. 191.
 442. *Bruley-Mosley M.* Boule de Feu. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **22**, 1908a, p. 528.
 443. *Bruley-Mosley M.* Meteorologie. *L'Astronomie*, **22**, 1908b, p. 528 (*).
 444. *Brzak W.* Kugelblitz. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **48**(3), 1892a, p. 360.
 445. *Brzak W.* Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **9**, 1892b, p. 355.
 446. *Buchwalder H.* Unavailable—Title Unknown. *Naturwiss.*, **1**, 1832, p. 327 (*).
 447. *Buchwalder H.* Unavailable—Title Unknown. *Lehbruch Meteorol.*, 1891, p. 327.
 448. *Budde E.* Schnellbewegte Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **37**, 1920, p. 87.

449. *Burckhardt F.* Ein Blitzstrahl Von 14. Juli 1894. (Summary). Fortschr. Phys., **51**(3), 1895a, p. 400.
450. *Burckhardt F.* Ein Blitzstahl Von 14. Juli 1894. Verh. Naturf. Ges. Basel., **11**, 1895b, p. 134 (*).
451. *Burger K.* Kugelblitz und Blitzforschung. Naturwiss., **60**, 1973, p. 485.
452. *Burgess C.R.* Meteorology for Seamen. Brown, Son and Ferguson Publishers, Glasgon, 1950, p. 55.
453. *Butti M.* Foudre Globulaire a Milan, en 1841 (Juin?). C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **35**, 1852a, p. 193.
454. *Butti M.* Foudre Globulaire a Milan en 1841. Cosmos, **1**, 1852b, p. 350 (*).
455. *Butz J.S.* Great Balls of Fire. Air Force Mag., April 15, 1968, p. 149.
456. *Cabellero E.* Foudre en Boule. Ciel et Terre, **11**, 1890a, p. 250.
457. *Caballero E.* Globular Lightning at Pontevedra. Electrical Engineer, **9**, 1890b, p. 187.
458. *Caballero E.* Globular Lightning. Electrician, **24**, 1890c, p. 414.
459. *Caballero E.* Kugelblitz in Pontevedra. Elektr. Zeit., **11**, 1890d, p. 66 (*).
460. *Caballero E.* Kugelblitz in Pontevedra. (Summary.) Fortschr. Phys., **46**(3), 1890e, p. 425.
461. *Caballero E.* Unavailable—Title Unknown. La Nature, **18**, 1890f, p. 167.
462. *Caballero E.* Foudre en Boule. Meteorologie, **38**, 1890g, p. 245.
463. *Caballero E.* Ball Lightning. Meteorol. Mag., **25**, 1890h, p. 99.
464. *Caballero E.* Kugelblitz. Meteorol. Zeit., **7**, 1890i, p. 158.
465. *Caballero E.* Ball of Fire. Nature, **41**, 1890j, p. 303.
466. *Caballero E.* Unavailable—Title Unknown. Naturwiss. Rund., **22**, 1890k, p. 284.
467. *Caballero E.* Kugelblitz in Pontevedra. Rev. Intern. Elect., **6**, 1890l, p. 202.
468. *Caballero E.* Kugelblitz in Pontevedra. Rev. Sci., **46**, 1890m, p. 286 (*).
469. *Cabane L.* Unavailable—Title Unknown. L'Astronomie, **6**, 1887, p. 459.
470. *Cade C.M.* Thunderbolts as the X-Weapon. Discovery, **23**, 1962, p. 23.
471. *Cade C.M.* Radiation—the New Weapon. Science Progress, **52**, 1964, p. 232.
472. *Cade C.M.* and *D. Davis.* Taming of the Thunderbolts. Abelard—Schuman Ltd., New York, 1969.
473. *Cadenat M.* Uber die Kugelblitz—Erscheinungen des Tornados von Saint-Claude. Zeit. Angew. Meteorol., **7**, 1890, p. 285.
474. *Cailleux M.* Foudre en Boule, Bull. Soc. Astron. Fr., **46**, 1932, p. 569.

475. *Callahan P.S. and R.W. Mankin.* Insects as Unidentified Flying Objects. *Applied Optics*, **17**(21), 1978, p. 3355.
476. *Callahan P.S.* Insects as Unidentified Flying Objects: Author's Reply to Comment; 1, *Applied Optics*, **18**(16), 1979, p. 2724.
477. *Callaud A.* *Trait des Paratonnerres.* Paris, 1874 (*).
478. *Cancani M.* Sopra un Caso di Duplice Fulminazione Avvenuto a Canterano IL 26. Aprile 1889 e sul'Esistenza dei Fulmini Globulari. *ATTI Pontif. Accad. Rom. D. Nuovi Lincei*, **5**, 1889a, p. 796 (*).
479. *Cancani M.* Sopra un Caso di Duplice Fulminazione Avvenuto a Canterano IL 26. Aprile 1889 e sul'Esistenza dei Fulmini Globulari. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **45**(3), 1889b, p. 514.
480. *Capron J.R.* Ball Lightning. *Meteorol. Mag.*, **18**, 1883/84a, p. 57.
481. *Capron J.R.* Globe Lightning. *Meteorol. Mag.*, **18**, 1883/84b, p. 57.
482. *Carlheim-Cylenskold V.* Des Foudres en Boule. *Berich. Internat. Meteorol. Direktorenkonf Innsbruck.* 1905a, APP. XXIII, p. 1 (*).
483. *Carlheim-Gylenskold V.* Unavailable—Title Unknown. *Kgl. Zeit. Meteorol. Geodyn. Suppl.*, 1905b, p. 113 (*).
484. *Carpenter D.G.* Plasma Theory Applied to Ball Lightning. Thesis, Iowa State University, 1962.
485. *Carpenter D.G.* Ball Lightning as a Plasma Phenomenon. *AIAA Student J.*, **1**, 1963, p. 25.
486. *Carre C.* Unavailable—Title Unknown. *La Lumiere Electrique*, **33**, 1889, p. 143.
487. *Carruthers J. and B.D.P. Foster.* Ball Lightning. *Meteorol. Mag.*, **72**, 1947, p. 210.
488. *Cartwright B.W.* Lightning. *Life Mag.*, **3**, Aug. 23, 1938, p. 77.
489. *Cartwright J.* Unavailable—Title Unknown. *J. Soc. Tel. Engr.*, **1**, 1872, p. 372.
490. *Cawood W. and H.S. Patterson.* A Curious Phenomenon Shown by Highly Charged Aerosols. *Nature*, **128**, 1931a, p. 637 (NBL).
491. *Cawood W. and H.S. Patterson.* Ball Lightning, Old Puzzle to Science, Made Out of Smoke. *Science News Lett.*, **20**, 1931b, p. 366.
492. *Cecchini S., G. Diocco and N. Mandolesi.* Positron Annihilation in Eas and Ball Lightning. *Nature*, **250**, 1974, p. 637.
493. *Cecil H.* Fireball. *Nature*, **30**, 1884, p. 289.
494. *Cerrillo M.* Sobre las Posibles Interpretaciones Electromagneticas del Femoneno de las Centellas. *Comision Implusora y Coordinadora de la Investieacion Cientifica.* 1 Anuario, 1943, p. 151, English Translation, Concerning the Possible Electromagnetic Interpretation of the Phenomenon of Lightning Balls. Unpublished Report, Raytheon Company, Wayland. Mass., 1960.

495. *Chalmers J. A.* Atmospheric Electricity. Oxford, at the Clarendon Press, England, 1949, p. 152.
496. *Chalmers J. A.* Atmospheric Electricity. Pergamon Press, New York, 1957, p. 255.
497. *Chalmers J. A.* Atmospheric Electricity. Pergamon Press, London, 1976, p. 390.
498. *Chalmers L. E.* An Account of an Extraordinary Fireball Bursting at Sea. Phil. Trans. Roy. Soc. London, **46**, 1751, p. 366.
499. *Chalmers L.* Unavailable—Title Unknown. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., **10**(2), 1888, p. 481 (*).
500. *Chameides W. L., D. H. Stedman, R. R. Dickerson, D. W. Rush and C. J. Cicerone.* NO—Production in Lightning. J. Atmos. Sci., **34**, 1977, p. 143 (NBL).
501. *Chandler M.* Violent Lightning Stroke in South Devon. Meteorol. Mag., **31**, 1896, p. 5.
502. *Charlier L. A.* Kugelblitz—Beobachtung in Vorarlberg. Wetter und Leben, **18**, 1966, p. 204.
503. *Charman W. N.* Perceptual Effects and Reliability of Ball Lightning Reports. J. Atmos. Terr. Phys., **33**, 1971a, p. 1973.
504. *Charman W. N.* After Images and Ball Lightning. Nature, **230**, 1971b, p. 576.
505. *Charman W. N.* The Enigma of Ball Lightning. New Scientist, **56**, 1972, p. 632.
506. *Charman W. N.* Ball Lightning Photographed. New Scientist, **69**, 1976, p. 444.
507. *Charman W. N.* Ball Lightning. Phys. Reports, **54**(4), 1979, p. 261.
508. *Chattock A. P.* Globular Lightning Discharge. Nature, **109**, 1922, p. 106.
509. *Chattock H.* Unavailable—Title Unknown. Brit. Assoc. Adv. Sci., 1898, p. 801.
510. *Chauveau B.* Electricite Atmospherique. Paris, Librairie Octave Doin, G. Doin,—ed., 1922.
511. *Cheetham G. R.* St. Elmo's Fire. Marine Observer. **26**(172), 1965, p. 81.
512. *Child W.* On the Effects of Lightning at Dorkin in Surrey. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., **49**, 1755, p. 309.
513. *Чирвинский П. Н.* Материалы о наблюдениях шаровой молнии. Климат и погода, № 11, 1936, с. 5.
514. *Чирвинский П. Н.* Материалы по наблюдениям над шаровой молнией, собранные В. К. Черкасом. Климат и погода, № 5, 1936, с. 49.
515. *Чирвинский П. Н.* Климат и погода, № 6, 1936, с. 68.
516. *Чирвинский П. Н.* К теории шаровой молнии. Метеорология и гидрология, № 7, 1936, с. 78.
517. *Чирвинский П. Н.* Шаровые молнии. Природа, № 6, 1949, с. 14.

518. *Чирвинский П.Н.* Первые наблюдения шаровой молнии. Природа, № 8, 1954, с. 116.
519. *Chown J.B., W.E. Scharfman and T. Marita.* Voltage Breakdown Characteristics of Microwave Antennas. Proc. IRE, **47**, 1959, p. 1331.
520. *Clare P.* An Account of Some Thunderstorms and Extraordinary Electrical Phenomena that Occurred in the Neighbourhood of Manchester on Tuesday the 16th of July 1850. Phil. Mag., **37**, 1850, p. 329.
521. *Clark L.* Unavailable—Title Unknown. J. Soc. Tel. Engr., **1**, 1872, p. 372.
522. *Clark R.* Ball Lightning. Weather, **20**, 1965, p. 134.
523. *Claubry G.De.* Sur le Tonnerre en Boule. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **79**, 1874a, p. 137.
524. *Claubry G.De.* Sur le Tonnerre en Boule. (Summary.) Fortschr. Phys., **30**, 1874b, p. 1177.
525. *Claubry G.De.* Sur le Tonnerre en Boule. Inst. Sci. Soc. Fr., **2**, 1874c, p. 241 (*).
526. *Claubry G.De.* Sur le Tonnerre en Boule. Mondes, **34**, 1874d, p. 50 (*).
527. *Clavel J.* Coup de Foudre Interessant. Ciel et Terre, **22**, 1901, p. 302.
528. *Cocking A.* Fireball. Nature, **30**, 1884, p. 269.
529. *Comanesti G.* Foudre en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **52**, 1938, p. 265.
530. *Cooke B.* Fire—Ball Seen Dec. 11, 1741. Roy. Soc. Lond. Phil. Trans., **42**, 1742/43, p. 25.
531. *Corliss W.* Handbook of Unusual Natural Phenomena. Sourcebook Project, Glen Arm, MD., 1977.
532. *Coroniti S.C.* Evaluation of Kapitza's Article on the Nature of Ball Lightning. Unpublished. Report RD-2-29-2-6. AVCO Corp., Boston, Mass., 1959.
533. *Coroniti (Editor) S.C.* Problems of Atmospheric and Space Electricity. International Conference Proceedings, Montreux, Switzerland, 5–10 May 1963. Elsevier, Amsterdam.
534. *Courtrai R.* Unavailable—Title Unknown. Le Cosmos, **16**, 1860, p. 281.
535. *Covington A.E.* Ball Lightning. Nature, **226**, 1970, p. 252.
536. *Cowan E.W.* Globular Lightning. Electrician, **22**, 1889, p. 720.
537. *Craggs J.D., W. Hopwood and J.M. Meek.* On the Localized Afterglows Observed with Long Sparks in Various Gases. J. Appl. Phys., **18**, 1947, p. 919.
538. *Craige H.* Observations of Lightning. Science, **72**, 1930, p. 344.
539. *Crawford W.* Lightning-Chain Formation. Nature, **53**, 1895, p. 5.
540. *Crawford J.F.* Antimatter and Ball Lightning. Nature, **239**, 1972, p. 395.
541. *Crew E.W.* Ball Lightning. New Scientist, **56**, 1972, p. 764.

542. *Crew E.W.* Atmospheric Mysteries and Lightning. *Electr. Rev.*, **199**(24), 1976a, p. 21 (NBL).
543. *Crew E.W.* Fall of a Large Ice Lump After a Violent Stroke of Lightning. *J. Meteorol.*, **1**(10), 1976b, p. 312.
544. *Crooks W.* Unavailable—Title Unknown. *Chem. News*, **65**, 1892, p. 301.
545. *Cross G.A.* Météorologie—un Cas de Foudre Globulaire. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **40**, 1926, p. 504.
546. *Crossley A.W.* Ball Lightning. *Nature*, **114**, 1924, p. 10.
547. *Crotsenburg C.N.* Ball Lightning. *Mon. Weather Rev.*, **26**, 1898, p. 358.
548. *Culafic M.R.* Grom i zastita od njeg. Izdavacko Preduzece, Gredevinska, Knjiga, Beograd, 1965, p. 76 (*).
549. *Cunisset-Carnot M.* La Foudre en Boule. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **11**, 1897, p. 299.
550. *D'Abbadie A.* Rapport sur une Communication de M. Antoine d'Abbadie Relative aux Orages d'Ethiopie. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **34**, 1852, p. 894.
551. *Дяердаевский Б.Л.* Редкий снимок молнии. *Природа*, № 4, 1957, с. 113.
552. *Daguin L.* Unavailable—Title Unknown. *La Nature*, 3 Sept. 1887.
553. *Dale H.D.* Ball Lightning. *Meteorol. Mag.*, **58**, 1923, p. 258.
554. *Daloz P.* Unavailable—Title Unknown. *La Montagne*, **24**, No. 210, 1928, p. 81 (*).
555. *Datlov J.* The Inverted Ion Magnetron Principle and Its Usefulness in Laboratory Plasma Physics and Cosmic Electrodynamics. *Czech. J. Phys.*, **B15**, 1965, p. 858.
556. *Dauvillier A.* Foudre Globulaire et Reactions Thermonucleaires. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **245**, 1957, p. 2155.
557. *Dauvillier A.* Sur la Nature de la Foudre Globulaire. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **260**, 1965, p. 1707.
558. *Dauvillier A.* Sur le Mecanisme de la Foudre Globulaire. *Rev. Gen. Elect.*, **79**, 1970, p. 433.
559. *Давыдов Б.В.* Редкая фотография шаровой молнии. *Природа*, № 6, 1967, с. 98.
560. *Davies B.* Ball Lightning Phenomena. *Nature*, **115**, 1925, p. 640.
561. *Davies P.C.W.* Ball Lightning or Spots Before the Eyes? *Nature*, **230**, 1971, p. 576.
562. *Davies P.C.W.* Ball Lightning. *Nature*, **260**, 1976, p. 573.
563. *Davies D.W. and R.B. Standler.* Ball Lightning. *Nature*, **240**, 1972, p. 144.
564. *Dawson G.A. and R.C. Jones.* Model for Ball Lightning. In *Planetary Electrodynamics*. S.C. Coroniti and J. Hughes, eds. Gordon and Breach, New York, Volume 2, 1968a, p. 193.
565. *Dawson G.A. and R.C. Jones.* Ball Lightning as a Radiation Bubble. Fourth International Conference on the Universal

- Aspects of Atmospheric Electricity, Tokyo, Japan, May, 1968b.
566. Dawson G. A. and R. C. Jones. Ball Lightning as a Radiation Bubble. *Pure and Applied Geophysics*, **75**, 1969, p. 247.
 567. Decerfz C. Sur un Cas de Foudre qui a Frappe la Prison de la Chatre. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **25**, 1847, p. 85.
 568. Decharme C. Notes Relatives a un Orage qui a Eclair a Amiens. Le 24 Fevrier Dernier. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **98**, 1884a, p. 606.
 569. Decharme C. Memoires Presentes—Foudre Globulaire. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **98**, 1884b, p. 658.
 570. Decharme C. Unavailable—Title Unknown. *La Lumiere Electrique*, **11**, 1884c, p. 551.
 571. Decker F. Beobachtung von Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **38**, 1921, p. 183.
 572. Dember H. and U. Meyer. Kugelblitz AM 12. Mai 1912 bei Dresden. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **68**(3), 1912a, p. 310.
 573. Dember H. and U. Meyer. Kugelblitz AM 12 Mai 1912 bei Dresden. *Meteorol. Zeit.*, **29**, 1912b. p. 384.
 574. Denning W. F. Meteors and Electrical Phenomenon. *Meteorol. Mag.*, **29**, 1894, p. 18.
 575. Derham W. Of the Meteor Called Ignis Fatuus, from Observations Made in England. *Roy. Meteorol. Soc. Phil. Trans.*, **26**, 1729, p. 204.
 576. Dessens J. Quelques Tornades Francaises Recentes. *J. Recherches Atmospheriques*, **2**, 1965, p. 91.
 577. Dewan E. M. Eyewitness Accounts of Kugelblitz. Air Force Cambridge Research Lab Paper, AFCRL-125, March 1954.
 578. Dewan E. M. Attempted Explanations of Ball Lightning. Air Force Cambridge Research Lab. Paper No. 67, AFCRL-64-927, Nov. 1964.
 579. Dibner B. Benjamin Franklin. In *Lightning*. R. H. Golde, ed. Academic Press, New York, 1, 1977, p. 47.
 580. Dijkhuis G. C. Thermonuclear Energy from Ball Lightning. Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. 14th Boston, MA, August 5–10, 1979, Vol. 2, p. 1614.
 581. Dixon F. E. *Lightning*. The Peterborough Citizen, London, 27, Sept. 1934.
 582. Dixon F. E. Photography and Ball Lightning. *Weather*, **10**, 1955, p. 98.
 583. Дмитриев М. Т. Шаровая молния во время зимней грозы. *Природа*, № 7, 1956, с. 109.
 584. Dmitriev M. I. Chemical Analysis of Ball Lightning. *Foreign Science Bull.*, **3**, No. 9, 1967a, p. 30.
 585. Дмитриев М. Т. Природа шаровой молнии. *Природа*, № 6, 1967, с. 98.

586. *Дмитриев М. Т.* Механизм устойчивости шаровой молнии. ЖТФ, т. 39, № 2, 1969, с. 387.
587. *Dmitriev M.I.* New Data on Ball Lightning. *Wissensch. Zeit. Tech. Hochsch. Ilm.*, **16**, 1970, p. 87 (*).
588. *Dmitriev M.I.* Ball Lightning: New Observations and New Hypotheses. NASA-TT-F-13, 931, Sept., 1971a.
589. *Дмитриев М. Т.* Шаровые молнии: новые наблюдения и новые гипотезы. *Природа* № 6, 1971, с. 50.
590. *Дмитриев М. Т.* Новые проблемы шаровой молнии. *Природа*, № 4, 1973, с. 60.
591. *Дмитриев М. Т., Дерюгин В. М., Калинин Г. А.* Об оптическом излучении шаровой молнии. ЖТФ, т. 42, 1972, с. 2187.
592. *Dmitriev M. T., V.M. Deryugin and G. A. Kalinkevich.* Optical Emission from Ball Lightning. *Sov. Phys.-Tech. Phys.*, **17**, No. 10, 1973, p. 1724, Translation of *Zh. Tekhn. Fiz.*, **42**, No. 10, 1972, p. 2187.
593. *Дмитриев М. Т., Емельянов В. Н., Кашинцев М. А. и др.* О нелинейном восприятии ИК-излучения в диапазоне 800–1355 нм глазом человека. *Квантовая электроника*, т. 9, вып. 4, 1979, с. 803.
594. *Dobelmann V.* Foudre en Boule. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **25**, 1911, p. 262.
595. *Dobson H. J. E.* Ball Lightning at Norwood. *Meteorol. Zeit.*, **60**, 1925, p. 162.
596. *Dolbear A. E.* Globular Lightning. *Nature*, **11**, 1887, p. 38.
597. *Dolbear A. E.* Globular Lightning. *Science*, **11**, 1888, p. 38.
598. *Dolezalek H.* Einige Kugelblitz-Beobachtungen. *Geophys. Pure Appl. (Milan)*, **20**, 1951, p. 183.
599. *Dolezalek H.* Comment on 'on the Problem of Ball Lightning' by W.I. Arabadji. *J. Geophys. Res.*, **82**(24), 1977, p. 3498.
600. *Долгополов Н.* Будущее шаровой молнии. *Знание – сила*, № 3, 1957, с. 17.
601. *Doublet J. M. G.* Unavailable–Title Unknown. *L'Eclairage Electrique*, **20**, 1899a, p. 393.
602. *Doublet J. M. G.* Unavailable–Title Unknown. *L'Eclairage Electrique*, **21**, 1899b, p. 143.
603. *Ducros M. H.* Foudre, Orages. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **18**, 1904, p. 476.
604. *Dudley L. P.* Lightning and Kindred Phenomena. *Electrician*, **129**, 1942, p. 507.
605. *Dufay J. and T. Mao-Lin.* Spectra of Lightning. *Ann. Geophys.*, **5**(2), 1949, p. 137.
606. *Dumas M.* Unavailable–Title Unknown. *Bull. Soc. Encouragement*, **13**, 1866, p. 153.
607. *Dunn M.* Les Nouveautes Photographiques. *Libraire Illustre*, Paris, 1894, p. 253–259 (*).

608. *Dyck C. Van.* Globular Lightning. *Nature*, **11**, 1887, p. 110.
609. *Dyck C. Van.* Globular Lightning. *Science*, **11**, 1888, p. 110.
610. *Eaton H.S.* Note on a Display of Globular Lightning at Ringstead Bay, Dorset, on August 17, 1876. *Electrician*, **19**, 1887a, p. 179.
611. *Eaton H.S.* Note on a Display of Globular Lightning at Ringstead Bay, Dorset, on August 17th, 1876. *Electrician*, **19**, 1887a, p. 179.
612. *Eaton H.S.* Note on a Display of Globular Lightning at Ringstead Bay, Dorset, on August 17th, 1876. *Amer. J. Meteorol.*, **4**, 1888, p. 148.
613. *Eckardt B.* Merkwürdige Blitzform. *Meteorol. Zeit.*, **31**, 1914, p. 548.
614. *Edlund M.* Unavailable—Title Unknown. *Ofver. Kongl. Vet. Akad. Forh.*, **40**, 1883, p. 86.
615. *Ekval H.N.* Cougnard Deionizers: New Mystery in Lightning Protection. *Electrical World*, **147**, PT.2, 11 March, 1957, p. 11.
616. *Eleccion M.* Ball Lightning. *IEEE Trans. Aero. Elect. Sys.*, **6**, 1970, p. 83.
617. *Eliot L.* Account of the Effects of Lightning at Steeple Ashton and Holt, in the County of Wilts, on the 20th of June, 1772. *Roy. Soc. Lond. Phil. Trans.*, **68**, 1773, p. 231.
618. *Елусеев А. А.* М. В. Ломоносов. Л., Hayka, 1941.
619. *Elliot G.* Ball Lightning. *Meteorol. Mag.*, **39**, 1904, p. 133.
620. *Endean V.G.* Ball Lightning as Electromagnetic Radiation. *Nature*, **263**, 1976, p. 753.
621. *Endean V.G.* Ball Lightning. 5th International Conference on Gas Discharges, Liverpool, England, 11–14 Sept., 1978, p. 116.
622. *Epinal M.* Unavailable—Title Unknown. *Ann. Chem. Phys.*, **19**, 1821, p. 86 (*).
623. *Epstein H.* Unavailable—Title Unknown. *Zeit. Physik.*, **71**, 1911, p. 28.
624. *Eriksson A.J.* Video-Tape Recording of a Possible Ball Lightning Event. *Nature*, **268**, 1977a, p. 35.
625. *Eriksson A.J.* An Unusual Lightning Flash. *Weather*, **32**, 1977b, p. 102.
626. *Errera L. and A. Uecle.* Un Cas Interessant D'Eclair en Boule. *L'Astronomie*, **18**, 1904, p. 99 (*).
627. *Esnault G.* Etude du Coup de Foudre Globulare du 29 Avril 1930 sur la Ferme de l'Echellerie Commune de Weil-Bauge Pres Bauge (Maine-et-Loire). *La Meteorologie*, **10**, 1934, p. 552 (*).
628. *Espee M. De.* Correspondance. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **35**, 1852, p. 400.
629. *Esper M.* Tonnerre en Boule. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **35**, 1852, p. 192.
630. *Ette A.I.I.* Laboratory Studies of Point-Discharge from Multiple Points in Irregular Configuration. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **38**, 1966, p. 982 (NBL).

631. *Evenson K.M.* Ball Lightning Research at Highland Lookout, Mountain. Douglas Missile and Space Systems Division Paper, Dac-60941, 51-1-R8, Jan. 1968.
632. *Evershed S.* Globular Lightning. *Electrician*, **22**, 1889, p. 443.
633. *Evrard F.* Note sur les Observations des Coups de Foudre en Belgique. *Nouvemnt Industriel Belge*, **3**, 1885, p. 21 (*).
634. *Evrard F.* Coups de Foudre en Belgique—Pendant l'Annee 1887. *Ciel et Terre*, **10**, 1889/90, p. 270.
635. *Evrard F.* and *L. Lambotte*. Cinquieme note sur les Observations des Coups de Foudre en Belgique. *Bull. Soc. Belge Electr.*, **6**, 1889, p. 34 (*).
636. *Evrard F.* and *L. Lambotte*. Sur les Observations des Coups de Foudre en Belgique. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **47**(3), 1891a, p. 355.
637. *Evrard d.* and *L. Lambotte*. Sur les Observations des Coups de Foudre en Belgique. *La Lumiere Electrique*, **41**, 1891b, p. 192 (*).
638. *Evrard F.* and *L. Lambotte*. Sur les Observations des Coups de Foudre en Belgique. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **8**, 1891 c, p. 319 (*).
639. *Fahrig E.* Globular Lightning. *Meteorol. Mag.*, **24**, 1889, p. 10.
640. *Fahrig E.* Globular Lightning. *Electrician*, **22**, 1890, p. 413.
641. *Falkner M.F.* An Occurrence of Ball Lightning. *Meteorol. Mag.*, **93**, 1964, p. 95.
642. *Faraday M.* Experimental Researches in Electricity. *Roy. Soc. Lond. Phil. Trans.*, **123**, 1833, p. 23.
643. *Faraday M.* Experimental Researches in Electricity. *B. Quaritch*, London, **1**, 1839, p. 523.
644. *Fay M.H.* Globular Lightning. *Electrician*, **26**, 1890, p. 5.
645. *Faye H.* Unavailable—Title Unknown. *Annuaire au Roi par le Bufeau des Longitudes*, 1877, p. 483.
646. *Faye H.* Sur les Boules de Feu ou Globes Electriques du Tornado de Saint-Claude, d'Apres le Rapport de M. Cadanet. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **111**, 1890a, p. 492.
647. *Faye H.* Sur les Boules de Feu ou Globes Electriques du Tornado de Saint-Claude. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **46**(3), 1890b, p. 424.
648. *Faye H.* Unavailable-Title Unknown. *L'Astronomie*, **10**, 1891a, p. 22.
649. *Faye H.* Unavailable—Title Unknown. *GAEA*, **27**, 1891b, p. 185.
650. *Fehr U.* Ball of Fire, a Laboratory Illuminated Cloud Phenomenon. Masters Thesis, Hebrew University, Jerusalem, Israel, 1963.
651. *Felsher M.* Ball Lightning. *Nature*, **227**, 1970, p. 982.
652. *Ferguson R.M.* Electricity. London and Edinburgh J., 1866, p. 97 (*).
653. *Ferran A.* Foudre en Boule. *Le Cosmos*, Oct. 1896a, p. 354 (*).
654. *Ferran A.* Foudre en Boule. *Meteorologie*, **44**, 1896b, p. 236.

655. *Fessenden R.A.* Nature of the Lightning Discharge. *Electrical World and Engineer*, **35**, 1899, p. 551.
656. *Fieux R.* and *P. Hubert.* Triggered Lightning Hazards. *Nature*, **260**, 1976, p. 188 (NBL).
657. *Fieux R.*, *G. Gary*, and *P. Hubert.* Artificially Triggered Lightning above Land. *Nature*, **257**, 1975, p. 212.
658. *Figuier L.* *Les Grandes Inventions.* Paris, 1870 (*).
659. *Figuier L.* *Meraviglie e Conquiste Delle Scienza l'Elettricità e le Sue Applicazioni.* Volume Primo, Milan, 1884 (*).
660. *Findeisen W.* Über Die Entstehung der Gewitter Elektrizität. *Meteorol. Zeit.*, **57**, 1940, p. 201 (NBL).
661. *Finkelstein D.* Research Directed Toward Understanding Behavior and Detection of Plasmas in Magnetic Fields. AFCRL-68-0210, 1968.
662. *Finkelstein D.* and *J. Rubinstein.* Ball Lightning. *Phys. Rev.*, **135**, 1964, p. A390.
663. *Fitzgerald M.* Notes on the Occurrence of Globular Lightning and Waterspouts in Co. Donegal, Ireland. *Roy. Meteorol. Soc. Q.J.*, **4**, 1878, p. 160.
664. *Flammarion C.* *The Atmosphere.* J. Glaisher, ed. Harper and Brothers, New York, 1874, p. 426 and 440.
665. *Flammarion C.* Les Victimes de la Foudre et ses Caprices. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **13**, 1899, p. 145.
666. *Flammarion C.* Les Victimes de la Foudre et ses Caprices. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **18**, 1904a, p. 153.
667. *Flammarion C.* Foudre en Boule. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **18**, 1904b, p. 378.
668. *Flammarion C.* Les Caprices de la Foudre. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **18**, 1904c, p. 421.
669. *Flammarion C.* Les Mysteres de la Foudre. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **22**, 1908, p. 440.
670. *Flammarion C.* Foudre en Boule. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **25**, 1911, p. 262.
671. *Flammarion C.* Les Phenomenes de la Foudre. Paris, 1927, p. 117 (*).
672. *Fleming S.J.* and *M.J. Aitken.* Radiation Dosage Associated with Ball Lightning. *Nature*, **252**, 1975, p. 220.
673. *Flint H. T.* Ball Lightning. *Roy. Meteorol. Soc. Q.J.*, **65**, 1939a, p. 532.
674. *Flint H. T.* A Note a Theory Proposed by Th. Neugebauer. *Roy. Meteorol. Soc. Q.J.*, **65**, 1939b, p. 532.
675. *Floyd F. G.* Globular Lightning. *English Mech.*, **45**, 1887, p. 159.
676. *Fontenay G. De.* Coups de Foudre. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **15**, 1901, p. 303.
677. *Fontvielle W. De.* Eclairs et Tonnerre. Hachette et Cie. Paris, 1867, p. 51 & 67 (*).
678. *Fontvielle W. De.* Thunder and Lightning. Sampson, Low, Son.

- and Marston. London, 1868, p. 32 (*).
679. *Forster I.* Researches about Atmospheric Phaenomena. Harding, Mavor and Lepard, London, 1823, p. 214.
 680. *Foster B.D.P.* Ball Lightning. Meteorol. Mag., **72**, 1947, p. 210.
 681. *Fouchet J.* Le Mecanisme Complete de l'Eclair et le Mystere de la Foudre en Boule. La Nature, **92**, No. 3347, 1964, p. 81 (*).
 682. *Fougeres G.* Dictionnaire des Antiquites Grecques et Romaines. Ch. Daremberg et Edm. Saglio, Paris, p. 1896 (*).
 683. *Francois H.* Meteorologie—Curieux Coup de Foudre en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **25**, 1911, p. 333.
 684. *Франк-Каменецкий Д. А.* Плазма—четвертое состояние вещества. М., 1963.
 685. *Franklin B.* A Letter of Benjamin Franklin, ESQ, to Mr. P. Collinson, F.R.S., Concerning and Electrical Kite. Roy. Soc. Lond, Phil. Trans., **47**, 1752, p. 565 (NBL).
 686. *Freier G.D.* The Electric Field of a Large Dust Devil. J. Geophys. Res., **65**, 1960, p. 3504 (NBL).
 687. *Freiherr J. A.* Kugelblitz in Carlskrona. Meteorol. Zeit., **13**, 1896, p. 476.
 688. *Fremholt G.* Ein Kugelblitz in Danemark. (Summary.) Fortschr. Phys., **33**, 1877a, p. 1289.
 689. *Fremholt G.* Ein Kugelblitz in Danemark, GAEA, **13**, 1877b, p. 565 (*).
 690. *Френкель Я. И.* О природе шаровой молнии. ЖЭТФ, т. 10, 1940, с. 1424.
 691. *Френкель Я. И.* Теория явлений атмосферного электричества. М.-Л., ГИТТЛ, 1949.
 692. *Friedrich W.* Elmsfeuerbeobachtung auf dem Kahlen-Asten. Meteorol. Zeit., **43**, 1926, p. 229 (NBL).
 693. *Friesenhof G.* Ein Merkwurdiger Blitz. Meteorol. Zeit., **27**, 1910, p. 560.
 694. *Fritsch V.* Der Machweis und die Geoelektrische Untersuchung Eines Blitznestes. Gerlands Beitrage zur Geophysik, **71**, 1962, p. 300 (NBL).
 695. *Fromholt H.* Unavailable—Title Unknown, Koln. Zeit., 17 Apro. 1884.
 696. *Fry E.* A Remarkable Lightning Discharge. Nature, **74**, 1906, p. 198.
 697. *Fuess P.* Kugelblitz. Zeit. Angew. Meteorol., **48**, 1931, p. 255.
 698. *Funder L.* Ermittlung, Ursachen und Bedeutung des Ionengehaltes der Gruben Wetter. Beitr. zur Geophys., **54**, 1939, p. 370.
 699. *Gabrakov S.* Kulbovidnata Mulniia. Khid. Meteorol., **15**, 1966, p. 59 (*).
 700. *Gaillard D.* Phenomenes Electriques dans la Region du Tchad. Bull. Soc. Astron. Fr., **26**, 1912, p. 436.
 701. *Galli I.* Kugelblitz. Zeit. Angew. Meteorol., **7**, 1890, p. 238.

702. *Galli I.* Unavailable—Title Unknown. Mem. R. Accad. Sci. Ist. Bologna, **1**, 1891, p. 315.
703. *Galli I.* Unavailable—Title Unknown. Zeit. Angew. Meteorol., **19**, 1902, p. 239.
704. *Galli I.* Comunicazione Relativa at Parafulmini ed ai Fulmini Ascendenti e Globulari. Atti. Pontif. Accad. Rom. d. Nuovi Lincei, 1907 (*).
705. *Galli I.* Della Protezione Offera dai Parafulmini ed Alcuni Quesiti Sulla Natura del Fulmine. Mem. Pontif. Accad. Rom. D. Nuove. Lincei, 1908, p. 36 (*).
706. *Galli I.* Di un Recente Fulmine a Roccagorga e di Altri Casi Equalmente Notevoli. ATTI Pontif. Accad. Rom. D. Nuove Lincei, 1909a (*).
707. *Galli I.* Di Alcuni Fulmini Recenti e Antichi nel Lazio e Roma. ATTI Pontif. Accad. Rom. D. Nuovi Lincei, 1909b (*).
708. *Galli I.* Notizie di Alcuni Fulmini. ATTI Pontif. Accad. Rom. D. Nuovi Lincei, 1910a (*).
709. *Galli I.* Di una Recente Fulminazione a Cori, Con Appendica di Osservazioni sur Lampi. ATTI Pontif. Accad. Rom. D. Nuovi Lincei, 1910b (*).
710. *Galli I.* Principali Caretteri dei Fulmini Globulari. Mem. Pontif. Accad. Rom. D. Nuovi Lincei, **28**, 1910c, p. 54 (*).
711. *Galli I.* Raccolta e Classifieazione di Fenomeni Luminosi Osservati nei Terremoti. Boll. Soc. Sismol. Ital., **14**, 1910d, p. 69 (*).
712. *Galli I.* Raccolta e Classificazione di Fenomeni Luminosi Asservati nei Terromoti. Boll. D. Soc. SIS. Ital., **14**, 1910e, p. 221 (*).
713. *Galli I.* Principali Caratteri dei Fulmini Globulari. Ciel et Terre, **32**, 1911a, p. 238.
714. *Galli I.* Gli Effetti Meccanici dei Fulmini Globula I. Mem. Pontif. Accad. Rom. D. Nuovi Lincei, **29**, 1911b, p. 9 (*).
715. *Galli I.* Ein Zylinderblitz. Rev. Nepholog., **6**, 1911c, p. 538 (*).
716. *Galli I.* Ein Zylinderblitz. Zeit. Angew. Meteorol., **28**, 1911d, p. 161 (*).
717. *Galli I.* Gli Effetti Fisici e Chim ci dei Fulmini Globulari. Mem. Pontif. Accad. Rom. D. Nuovi Lincei, **30**, 1912, p. 17 (*).
718. *Galli I.* Altri Fulmini Globulari Inediti. Atti Pontif. Accad. Rom. D. Nuovi Lincei, **66**, 1913a, p. 11 (*).
719. *Galli I.* Effetti dei Fulmini Globulari Sugli Alberi e Sulle Erbe. Mem. Pontif. Accad. Rom. D. Nuovi Lincei, **31**, 1913b, p. 225 (*).
720. *Galli I.* Altri Fulmini Globulari Inediti. (Summary.) Fortschr. Phys., **69**(3), 1913c, p. 320.
721. *Galli I.* Fulmini Globulari nel 1914. ATTI Pontif. Accad. Rom. D. Nuovi Lincei, **68**, 1914, p. 177 (*).
722. *Galli I.* Fulmini Globulari Nell' Anno 1915. ATTI Pontif. Accad.

- Rom. D. Nuovi Lincei, **69**, 1915a, p. 59 (*).
723. *Galli I.* Effetti dei Fulmini Globulari Sugli Alberi e Sulle Erbe. (Summary). Fortschr. Phys. **71**(3), 1915b, p. 255.
 724. *Galli I.* Osservazioni Inedite o Quasi Sconosciute di Fulmuni Globulari e di Effetti Rari. ATTI Pontif. Accad. Rom. D. Nuovi Lincei, 16 March 1916a (*).
 725. *Galli I.* Fulmini Globulari nel 1914. (Summary). Fortschr. Phys., **72**, 1916b, p. 274.
 726. *Galli I.* Fulmini Globulari Nell' anno 1915. (Summary.) Fortschr. Phys., **73**(3), 1917, p. 136.
 727. *Galli I.* Osservazioni Italiane di Fulmine Globulare di Lampi Rari nel 1917 e 1918: Nota XXI. ATTI Pontif. Accad. Rom. D. Nuovi Lincei, 15 June 1919 (*).
 728. *Galli I.* La Foudre Globulaire. Ciel et Terre, **36**, 1920a, p. 73.
 729. *Galli I.* Osservazioni Inedite o Quasi Sconosciute di Fulmuni Globulari e di Effetti Rari. Ciel et Terre, **36**, 1920b, p. 76.
 730. *Galli I.* La Foudre Globulaire et les Travaux. Ciel et Terre, **36**, 1920c, p. 140.
 731. *Gallop J.W., T.L. Dutt and H. Gibson.* Forces on Charged Particles of a Plasma in a Cavity. Nature, **188**, 1960, p. 397.
 732. *Galton E.M.G.* Ball Lightning. The Times (London), No. 58, May 17, 1971, p. 13 (*).
 733. *Garfield E.* When Citation Analysis Strikes Ball Lightning. Current Comments, No. 20, 1976, p. 5.
 734. *Garreau R.* Academie des Sciences—Coup de Foudre Violent. Bull. Soc. Astron. Fr., **53**, 1939a, p. 424.
 735. *Garreau R.* Observation d'en Coup de Foudre en Boule. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **209**, 1939b, p. 60.
 736. *Gathemann H.* Eigenartiger Blitzschlag. Ann. Hydro. Marit. Meteorol., **17**, 1889, p. 39.
 737. *Gathemann H.* Kugelblitz. Zeit. Angew. Meteorol., **6**, 1889, p. 90.
 738. *Gavache M.R.* Foudre Globulaire? Bull. Soc. Astron. Fr., **65**, 1951, p. 474.
 739. *Geddes A.E.M.* Meteorology. Blackie and Son, London, 2nd ed., 1939.
 740. *Geerk J. and H. Kleinwachter.* Gasentladung in Brennpunkt eines Radar Paraboloids. Zeit. Phys., **159**, 1960, p. 378 (NBL).
 741. *Geist F.* Eine Kugelblitzbeobachtung in Oberbayern. Umschau, **19**, 1949, p. 255.
 742. *Geller R. and M. Lucarain.* Oscillations Ioniques Stationnaires dans les Plasmoides de Haut Frequence en Absence de Champ Magnetique. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **253**, 1961, p. 1542 (NBL).
 743. *Genz H.* Unavailable—Title Unknown. Zeit. Erd. Unter., **4**, 1952, p. 186.
 744. *Герасименко Т.Ф.* Шаровая молния во время зимней грозы. Природа, № 7, 1956, с. 109.

745. Gerharz R. Coffers re-Opened. *Optical Spectra*, **13**(17), 1979, p. 13.
746. Gerlach W. Uber die Beobachtung eines Kugelblitzes. *Naturwiss.*, **15**, 1927, p. 522.
747. Gersten A. Plasma Ball of Fire. Thesis. Hebrew University of Israel, 1963.
748. Gervais M. R. V. Meteorologie—la Foudre en Boule. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **48**, 1934, p. 277.
749. Гезехус Н. А. Шаровидные и пламенообразные молнии как особые типы разрядов атмосферного электричества. Спб, 1899.
750. Гезехус Н. А. Электрическое пламя и шаровая молния. *Ж. физ.-хим. об-ва*, т. 32, 1900, с. 127.
751. Гезехус Н. А. О шаровой молнии. Спб., 1900.
752. Gibbs-Smith C. H. On Fireballs. *Nature*, **232**, 1971, p. 187.
753. Gilbert O. Die Meteorologischen Theorien des Griechischen Altertums. Leipzig, 1907, p. 619 (*).
754. Gilmore G. Globular Lightning. *Nature*, **103**, 1919, p. 284.
755. Гладков К. Загадка шаровой молнии. *Техника—молодежи*, № 2, 1958, с. 28.
756. Gobel P. Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **6**, 1889a, p. 68.
757. Gobel P. Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **6**, 1889b, p. 237.
758. Gockel A. Gas Gewitter. *Gorres-Gesellschaft. Bonn*, 1895 (*).
759. Gockel A. Uber Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **26**, 1909, p. 458.
760. Gockel A. Das Gewitter. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **61**(3), 1905a, p. 318.
761. Gockel A. Das Gewitter. *Naturwiss. Rund.*, **20**, 1905b, p. 447 (*).
762. Goderus A. Foudre en Boule. In Anon, *Les Orages. Ciel et Terre*, **9**, 1889/90, p. 193.
763. Godlonton R. A Remarkable Discharge of Lightning. *Nature*, **53**, 1896, p. 273.
764. Godwin-Austin W. H. Lightning Phenomenon. *Nature*, **28**, 1883, p. 173.
765. Gold E. Thunderbolts: the Electric Phenomenon of Thunderstorms. *Nature*, **169**, 1952, p. 561.
766. Golde R. H. Thunderstorms. *Inst. Electr. Engr. J.*, **8**, 1962, p. 242.
767. Golde R. H. The Lightning Conductor. *J. Franklin Institute*, **283**, 1967, p. 451 (NBL).
768. Golka R. K. and R. W. Bass. Tesla's Ball Lightning Theory, a BGK-Wave Solution-Pair Langmuir-Debye Sheath Surface—Tension Hypothesis. The Farmsworth Effect, and the "Hydrotron" Electrostatic-Internal Self-Contained Plasmoid Concept. Annual Controlled Fusion Theory Conference, Paper J3, San Diego, CA, May 4–6, 1977.
769. Goodlet G. L. Lightning. *Inst. Electr. Engr. J.*, **81**, 1937, p. 1.
770. Gordon W. Account of a Fireball Seen Dec. 11, 1741. *Roy. Soc. Lond. Phil. Trans.*, **42**, 1742/43, p. 58.

771. *Gouw M. J. E.* Ter. Boule de Feu. Bull. Soc. Astron. Fr., **21**, 1907, p. 313.
772. *Gposu S.* Unavailable—Title Unknown. Electrotechnica, **8**(2), 1960, p. 57.
773. *Graf-Pfeil L.* Der Ursprung der Meteoriten. GAEA, **22**, 1886a, p. 229 (*).
774. *Graf-Pfeil L.* Die Hirschberger Kugelblitze. GAEA, **22**, 1886b, p. 474 (R).
775. *Gray D. E.* American Institute of Physics Handbook. Coordinating Editor, McGraw-Hill, New York, 1957, p. 2–125 (NBL).
776. *Greaves C.* Discussions on Waterspouts and Globular Lightning. Roy. Meteorol. Soc. Q. J., **4**, 1878, p. 165.
777. *Grefen H.* Unavailable—Title Unknown. Schr. Nat. Ver. Sch. Holst., **6**, 1884, p. 613.
778. *Grobe G.* Wieder ein Kugelblitz auf dem Brocken. Meteorol. Zeit., **44**, 1927a, p. 312.
779. *Grobe G.* Eine Kugelblitzartige Erscheinung. Meteorol. Zeit., **44**, 1927b, p. 391.
780. *Gronemann J.* Twee Merkwaardige Bliksems (Summary). Fortsch. Phys., **52**(3), 1896a, p. 301.
781. *Gronemann J.* Twee Merkwaardige Bliksems. Nat. Tijdschr. Ned. Indie, **3**, 1896b, p. 269 (*).
782. *Grossmann D.* Feuerkugeln. (Summary.) Fortschr. Phys., **5**, 1849, p. 455.
783. *Grunsky C. E.* Electric Storm in Southern California. Mon. Weather Rev., **35**, 1907, p. 228.
784. *Губичев В. А.* Возможный механизм образования шаровой молнии. Уч. зап. Ульяновск. пед. ин-та, сер. техн., т. 20, № 4, 1966, с. 203.
785. *Gubichev W. A.* A New Theory of Ball Lightning. Foreign Science Bull., **4**(6), 1968, p. 27.
786. *Gicinski H.* Observation of Ball Lightning. Weatherwise, **31**(4), 1978, p. 167.
787. *Guillemin A.* Unavailable—Title Unknown. Le Monde Physique, **3**, 1883, p. 492.
788. *Guillon M.* Foudre en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **62**, 1948, p. 323.
789. *Gunther S.* Unavailable—Title Unknown. Geophysik., Stuttgart, 1897 (*).
790. *Гуревич А. В., Путаевский Л. П.* Коэффициент рекомбинации в плотной низкотемпературной плазме. ЖЭТФ, т. 46, 1964, с. 1281.
791. *Haag D.* Kugelblitz. Zeit. Angew. Meteorol., **31**, 1914, p. 240.
792. *Hagenau M.* Rathselhafte Blitzerscheinungen. Gartenlaube, **24**, 1896a, p. 395 (*).
793. *Hagenau M.* Rathselhafte Blitzerscheinungen. (Summary.)

- Fortschr. Phys., **52**(3), 1896b, p. 299.
794. *Hagenguth J.H.* The Lightning Discharge. In Compendium of Meteorology. Amer. Meteorol. Soc., T.F. Malone, ed., Boston, 1951, p. 136.
 795. *Hagenguth J.* and *J.G. Anderson.* Unavailable—Title Unknown, A.I.E.E.E., **71**, pt. 3, 1952, p. 641.
 796. *Hahn P.* Eigenthumlicher Kugelblitz. Ann. Hydro. Marit. Meteorol., **20**, 1892, p. 257.
 797. *Haidinger W.Von.* Elektrische Meteore am 20. October 1868 in Wien Beobachtet. Sitzber. Math. Naturwiss. KGL. Akad. Weiss. Wien, **11**, 58, 1868a, p. 761.
 798. *Haidinger W.Von.* Die Sudwestlichen Blitzkugeln am 20. Oktober 1868. Sitzber. Math. Naturwiss. KGL. Akad. Wiss., Wien, **11**, 58, 1868b, p. 955 (*).
 799. *Haidinger W.Von.* Ein Kugelformiger Blitz. Am. 30. August 1865 Gesehen zu Feistritz bei Peggau in Steiermark, Sitzberg. Math. Naturwiss. KGL. Akad. Wiss. Wien., **11**, 58, 1868c, p. 1045.
 800. *Haidinger W.Von.* Ein Kugelformiger Blitz am 30 August 1865 Gesehen zu Feistritz bei Peggau in Steiermark (Summary). Fortschr. Phys., **25**, 1969a, p. 961.
 801. *Haidinger W.Von.* Elektrische Meteore am 20. Oktober 1868 in Wien Beobachtet. (Summary.) Fortschr. Phys., **25**, 1969b, p. 961.
 802. *Haidinger W.Von.* Die Sudwestlichen Blitzkugeln am 20. Oktober 1868. (Summary.) Fortschr. Phys., **25**, 1869c, p. 969.
 803. *Haidinger W.Von.* Elektrische Meteore am 20. Oktober 1868 in Wien Beobachtet. Inst. Sci. Soc. Fr., **37**, 1869d, p. 88 (*).
 804. *Haidinger W.Von.* Ein Kugelformiger Blitz am 30 August 1865 Gesehen zu Feistritz bei Peggau in Steiermark. Inst. Sci. Soc. Fr., **37**, 1869e, p. 112 (*).
 805. *Haidinger W.Von.* Unavailable—Title Unknown. Photogr. Mitt., **39**, 1902, p. 761.
 806. *Halluitte K.* Orage sur Mer. Bull. Soc. Astron. Fr., **23**, 1909a, p. 461.
 807. *Halluitte K.* Orage sur Mer. C.R. Hebd. Seances Acad. Sc., **148**, 1909b, p. 1066.
 808. *Halluitte K.* Orage Remarquable sur l'Atlantique sud dans la Nuit du 17 au 18 Fevrier 1909 par 33 Degre Lat. S. et 48 Degre Long. (Summary). Fortschr. Phys., **65**(3), 1909c, p. 284.
 809. *Halluitte K.* Orage Remarquable sur l'Atlantique-Sud. Meteorologie, **57**, 1909d, p. 99.
 810. *Halluitte K.* Gewitter auf dem Meere. Meteorol. Zeit., **26**, 1909e, p. 380.
 811. *Haltermann H.* Uber Elmsfeuer auf See. Jahrbuch der Astronomie und Geophysik, **7**, 1896, p. 374.
 812. *Haltermann H.* Le Feu st Elme en Mer. Ciel et Terre, **17**, 1896/97, p. 482.
 813. *Hamilton C.W.* Sustained, Localized, Pulsed-Microwave Discha-

- rge in *Air. Nature*, **188**, 1960, p. 1098 (NBL).
814. *Hamilton G.* Merkwürdige Blitzschläge in Schweden I. *Meteorol. Zeit.*, **13**, 1896, p. 475.
 815. *Hamilton W.* An Account of the Late Eruption of Mount Vesuvius. *Roy. Soc. Lond. Phil. Trans.*, **85**, 1795, p. 73.
 816. *Handel P. H.* A Maser Approach to Ball Lightning. Unpublished, Dept. Phys., Univ. Missouri, St. Louis, MO., 1974.
 817. *Hands A.* Ball Lightning. *Roy Meteorol. Soc. Q.J.*, **35**, 1901, p. 301.
 818. *Hands A.* Fireballs. *English Mech.*, **90**, 1909, p. 40.
 819. *Hann J.* Unavailable—Title Unknown. *Naturwiss.*, **2**, 1906, p. 481 (*).
 820. *Hann J. Von.* *Lehbruch der Meteorologie*. Verlag von Chr. Herm. Tauchnitz. Leipzig, 1926, p. 661.
 821. *Hapke L.* Merkwürdige Blitz. *Meteorol. Zeit.*, **10**, 1893, p. 227.
 822. *Hare A. T.* Globular Lightning. *Electrical Engineer.*, **8**, 1889a, p. 443.
 823. *Hare A. T.* Globular Lightning. *Nature*, **40**, 1889b, p. 415.
 824. *Hare C.* Globular Lightning. *Nature*, **19**, 1878, p. 5.
 825. *Hare R.* On the Causes of the Inadequate Protection Afforded by Lightning Rods, in Some Cases, and the Means of Insuring their Perfect Competency: also, a Refutation of the Prevalent Idea, that Metals are Peculiarly Attractive of Electricity. *Amer. J. Sci.*, **13**, 1828, p. 322.
 826. *Hare R.* Notices of Tornadoes. *Amer. J. Sci. Arts.*, **38**, 1840, p. 73.
 827. *Harrison E. R.* Spherical Plasmoids in Low Pressure Electrodeless Discharges. *J. Electron. Control*, **5**, 1958, p. 319 (NBL).
 828. *Hasenauer L.* Perlschnurblitz. *Meteorol. Zeit.*, **30**, 1913, p. 350.
 829. *Hatch A. J.* Plasma Studies in a Low Pressure High Frequency Discharge. Second International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, Proceedings, Controlled Fusion Devices, **32**, 1958, p. 333 (NBL).
 830. *Hawkins A. C.* An Observation of Ball Lightning. *Amer. J. Meteorol.*, **25**, 1944, p. 364.
 831. *Hawkins A. C.* An Observation of Ball Lightning. *Amer. J. Meteorol.*, **47**, 1946, p. 5.
 832. *Hayden E.* Globular Lightning. *Science*, **11**, 1888, p. 110.
 833. *Hebert M.* Cas de Foudre en Boule. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **25**, 1847, p. 34.
 834. *Heen P. De.* Probleme de la Theorie Mecanique de l'Electricite. Bruxelles, 1903, p. 36 (*).
 835. *Heidke P.* Perlschnurblitz in Hamburg am 13 Juli 1932. *Meteorol. Zeit.*, **49**, 1932, p. 437.
 836. *Helmholtz H. Von.* Unavailable—Title Unknown. *Vort. Reden*. Braunschweig, **1**, 1896, p. 289.

837. *Helmont J.B. Von.* Ortus Medicinae. Amsterdam, Elzevir, 1652, p. 74 (*).
838. *Hennig R.* Ueber Ungewöhnliche Blitzentladungen. (Summary). Fortschr. Phys., **51**(3), 1895a, p. 398.
839. *Hennig R.* Ueber Ungewöhnliche Blitzentladungen. Naturwiss. Woch., **10**, 1895b, p. 65 (*).
840. *Herman J.* On the Electrical Properties of Blowing Snow. Annales de Geophysique Paris, **20**(3), 1964, p. 235 (NBL).
841. *Hernquist K.G.* Discharge Mechanism of Mercury Pool Arcs. J. Appl. Phys., **27**, 1956, p. 1226.
842. *Hernquist K.G.* and *E.O. Johnson.* Retrograde Motion in Gas Discharge Plasmas. Phys. Rev., **98**, 1955, p. 1576.
843. *Herrich E.* Ein Kugelblitz—Erlebnis. Kosmos, **50**, 1954, p. 265.
844. *Hertz H.* Versuche über die Glimmentladung. Ann. Physik., **255**, 1883, p. 782.
845. *Hesehus N.* Unavailable—Title Unknown. Zh. Fiz. Khim. Obsh., **8**, 1876a, p. 311.
846. *Hesehus N.* Unavailable—Title Unknown. Zh. Fiz. Khim. Obsh., **8**, 1876b, p. 356.
847. *Hesehus N.* Über den Kugelblitz. Natschnoje Obosienija. No. 7, 1899, p. 1373 (*).
848. *Hesehus N.* Über den Kugelblitz. Beibl. Ann. Phys., **24**, 1900a, p. 200.
849. *Hesehus N.* Ueber den Kugelblitz. (Summary.) Fortschr. Phys., **56**(3), 1900b, p. 253.
850. *Hesehus N.* Über den Kugelblitz. Meteorol. Zeit., **17**, 1900c, p. 38.
851. *Hesehus N.* Über den Kugelblitz. Prometheus, **12**, 1900d, p. 207 (*).
852. *Hesehus N.* Kugel- und Flammenblitz als Besondere Entladungsformen der Atmosphärischen Elektrizität. Physik. Zeit., **2**, 1901, p. 578.
853. *Hesehus N.* Sur la Nature de l'Eclair en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **17**, 1903, p. 101.
854. *Hildebrandsson H.H.* Kugelblitz. (Summary.) Fortschr. Phys., **39**(3), 1883, p. 518.
855. *Hildebrandsson H.H.* Unavailable—Title Unknown. GAEA, **21**, 1884a, p. 604.
856. *Hildebrandsson H.H.* Foudre Globulaire. La Nature, **12**, 1884b, p. 302 (*).
857. *Hildebrandsson H.H.* Foudre Globulaire. Meteorologie, **31**, 1885, p. 364.
858. *Hildebrandsson H.H.* Merkwürdige Blitzschläge in Schweden, No. 1, Meteorol. Zeit., **13**, 1896a, p. 475.
859. *Hildebrandsson H.H.* Merkwürdige Blitzschläge in Schweden, No. 3, Meteorol. Zeit., **13**, 1896b, p. 476.
860. *Hildebrandsson H.H.* Perlschnurblitz. Meteorol. Zeit., **26**, 1909, p. 44.

861. *Hill E.* Globular Lightning. *Nature*, **56**, 1897, p. 293.
862. *Hill E.L.* Ball Lightning as Physical Phenomenon. *J. Geophys. Res.*, **65**, 1960, p. 1947.
863. *Hill E.L.* The Physical Nature of Ball Lightning. AIAA Paper No. DP-61-574, AIAA Great Lakes District Meeting, Minneapolis, Minn., 19 Apr. 1961.
864. *Hill E.L.* Ball Lightning. *Amer. Scientist*, **58**, 1970, p. 479.
865. *Hill E.R.* and *F.D. Sowby*. Radiation from Ball Lightning. *Nature*, **228**, 1970, p. 1007.
866. *Hill R.H.* Determination of Charges Conducted in Lightning Strokes. *J. Geophys. Res.*, **68**, 1963, p. 1365 (NBL).
867. *Hillinger C.* Lightning Tested as New Energy Source. *Los Angeles Times*, Sunday, April 29, 1979, Part I, p. 4.
868. *Hofmann U.* Kugelblitzbeobachtung. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **36**, 1919, p. 126.
869. *Hohn W.* Beobachtung Eines Kugelblitzes. *Wetter und Leben*, **18**, 1966, p. 56.
870. *Hohr A.* Zwei Merkwürdige Kugelblitzer-Scheinungen. *Meteorol. Zeit.*, **20**, 1903, p. 570.
871. *Holl H.* Kugelblitz. (Summary). *Fortschr. Phys.*, **56**(3), 1900a, p. 253.
872. *Holl H.* Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **17**, 1900b, p. 191 (*).
873. *Holmes M.* Three Discharges of Ball Lightning. *Nature*, **133**, 1934a, p. 179.
874. *Holmes M.* Ball Lightning—Three Discharges. *Roy. Astron Soc. Canada J.*, **28**, 1934b, p. 144.
875. *Holtzer R.E.* and *E.J. Workman*. Photographs of Unusual Discharges Occurring During Thunderstorms. *J. Appl. Phys.*, **10**, 1939, p. 659.
876. *Holtzer R.E.*, *E.J. Workman*, and *L.B. Snoddy*. Photographic Study of Lightning. *J. Appl. Phys.*, **9**, 1938, p. 134.
877. *Homma H.* Feuerkugel. *Meteorol. Zeit.*, **18**, 1901, p. 576.
878. *Hoppe E.* Über Atmosphärische und Gewitter-Elektrizität. *Meteorol. Zeit.*, **2**, 1885, p. 100.
879. *Horn F.* and *C. Tillman*. Beobachtungen über Gewitter in Bayern, Württemberg und Baden Während des Jahres 1889. *Beob. Meteorol. Stat. König. Bayern*, **11**, 1889a, p. 25 (*).
880. *Horn F.* and *C. Tillman*. Beobachtungen über Gewitter in Bayern, Württemberg und Baden Während des Jahres 1889. *Deutsch. Meteorol. Jahrb. Bayern*, 1889b (*).
881. *Horn F.* and *C. Tillman*. Beobachtungen über Gewitter in Bayern, Württemberg und Baden Während des Jahres 1889. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **46**(3), 1890, p. 412.
882. *Horner O.W.* Ball Lightning. *Meteorol. Mag.*, **39**, 1904, p. 111.
883. *Horstmann W.* Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **50**, 1933, p. 508.

884. *Horton R.E.* Unusual Lightning. *Mon. Weather Rev.*, **49**, 1921, p. 242.
885. *Howland M.* Freak Lightning Ball Injures 29 in Colchester. *The Times Argus, Barre-Montpelier, Vt.*, Monday, August 6, 1979.
886. *Hubert P.* Tentative pour Observer la Foudre en Boule dans le Voisinage d'Eclairs Declenches Artificiellement, Rapport DPH/EP/76/349, 5 Mai 1975a. Commissariat a l'Energie Atomique, Service d'Electronique Physique, Center d'Etudes Nucleaires de Saclay, France.
887. *Hubert P.* Recherche sur la Foudre au Moyen d'Eclairs Declenches Artificiellement. *Meteorologie*, **6**, 1975b, p. 9 (NBL).
888. *Huc C.* Tonnerre en Boule. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **119**, 1894, p. 474.
889. *Hugueny M.* Sur une Trombe Observee a Dijon le 25 Juillet 1845. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **21**, 1845, p. 443.
890. *Humboldt A.Von.* Kosmos, Entwurf einer Physichen Weltbeschreibung. Stuttgart, J.G. Gottascher, 1845 (*).
891. *Humboldt A.Von.* Cosmos. A Sketch of a Physical Description of the Universe. Translation by E.C. Otte, London, H.G. Bohn, 1864, p. 345.
892. *Humphreys W.J.* Physics of the Air. Franklin Institute, Philadelphia, 1920.
893. *Humphreys W.J.* Ball Lightning. *Science*, **60**, 1924, p. 135.
894. *Humphreys W.J.* Wanted-Reports of Ball Lightning Observations. *Science News Lett.*, **20**, 1931, p. 73.
895. *Humphreys W.J.* Ball Lightning. *Amer. Phil. Soc. Proc.*, **76**, 1936, p. 613.
896. *Humphreys W.J.* Physics of the Air. McGraw Hill, New York, 1940, p. 369.
897. *Humphreys W.J.* Ways of Weather. Jacques Cattell Press. Lancaster, PA., 1942, p. 242.
898. *Hunneman M.E.* A Fire-Ball. *Science*, **86**, 1937, p. 244.
899. *Indrikson T.* Kugelformige Elektrische Funken. *Beibl. Ann. Phys.*, **23**, 1900a, p. 706.
900. *Intrikson T.* Sharoobrazenya elektricheskaya iskry. *Zh. Fiz. Khim. Obsh.*, **32**, 1900b, p. 53.
901. *Israel H.* Das Gewitter, Ergebnisse und Probleme der Modernen Gewitterforschung, Probleme der Kosmischen Physik, Akademische Verlagsgesellschaft, Geest und Portig, K.-G., Leipzig, 1950, p. 232.
902. *Israel H.* Atmosphaerische Elektrizitat. Akademische Verlagsgesellschaft, Geest und Portig, K.-G., Leipzig, 1957 (NBL).
903. *Israel H.* Blitzphotographie. *UMSCHAU*, **58**, 1958, p. 586.
904. *Israel H.* Kugelblitz-Aufnahmen. *Physik. Blatter*, **16**, 1960, p. 348.
905. *Israel H.* Atmospheric Elektriccity. Keter Press, Jerusalem, 1971 (NBL).

906. *Israel H., M. Toepler and O. Trier.* Uber Fragen des Kugelblitzes. Phys. Blatter, **16**, 1960, p. 348.
907. *Iur'ev A.* Secret of the Burning Ball. Komsom. Pravda, Oct. 30, 1960, p. 3, English Translation in AFCRL-21, USA Government Publication, AD-251773, 1961.
908. *Iwanovsky A.* The Energy of Ball Lightning. Foreign Science Bull., **1**, No. 12, 1965a, p. 19.
909. *Iwanovsky A.* Soviet Research on Ball Lightning. Foreign Science Bull., **1**, No. 10, 1965b, p. 30.
910. *Iwanovsky A.* A New Theory of Ball Lightning. Foreign Science Bull., **4**, No. 6, 1968, p. 21.
911. *Jackel W.* Kugelblitz in Laesgen. Kreis Grunberg in Schlesien am 23. April 1904. (Summary.) Fortschr. Phys., **60**(3), 1904a, p. 310.
912. *Jackel W.* Kegelblitz in Laesgen Dreis Grunberg in Schlesien am 23. April 1904. Zeit. Angew. Meteorol., **21**, 1904b, p. 119 (*).
913. *Jaeger A.* Kugelblitz uber Oberschefflenz Kreis Mosbach/Baden am 16 Mai 1960, UM 22 uhr 30. Meteorol. Rund., **14**, 1961, p. 31.
914. *Jager F.* Uber Einige Elektrische Erscheinungen. meteorol. Zeit., **9**, 1892, p. 359.
915. *Jamin M.* Unavailable—Title Unknown. Cours de Physique Experimentale et Mathematique. Sigaud de la Ford, Leyden, **1**, 1774, p. 470 (*).
916. *Janezic E.* Interessanter Kugelblitz. Meteorol. Zeit., **25**, 1908, p. 42.
917. *Jans C.De.* Les Tentatives d'Explication de la Foudre Globulaire. Bruxelles, 1909a, p. 16 (*).
918. *Jans C.De.* Les Tentatives d'Explication de la Foudre Globulaire. Bull. Soc. Electr. Belge, **26**, 1909b, p. 123 (*).
919. *Jans C.De.* Coup d'Oeil Retrospectif sur les Essais d'Explication de la Foudre Globulaire. Ciel et Terre, **31**, 1910, p. 499.
920. *Jans C.De.* Coup d'Oeil Retrospectif sur les Essais d'Explication de la Foudre Globulaire. Ciel et Terre, **32**, 1911a, p. 155.
921. *Jans C.De.* Coup d'Oeil Retrospectif sur les Essais d'Explication de la Foudre Globulaire. Ciel et Terre, **32**, 1911b, p. 255.
922. *Jans C.De.* Coup d'Oeil Retrospectif sur les Essais d'Explication de la Foudre Globulaire. Ciel et Terre, **32**, 1911c, p. 301.
923. *Jans C.De.* Coup d'Oeil Retrospectif sur les Essais d'Explication de la Foudre Globulaire. (Summary.) Fortschr. Phys., **67**(3), 1911d, p. 342.
924. *Jans C.De.* Coup d'Oeil Retrospectif sur les Essais d'Explication de la Foudre Globulaire. Bruxelles, 1912a, p. 8 (*).
925. *Jans C.De.* Coup d'Oeil Retrospectif sur les Essais d'Explication de la Foudre Globulaire. Ciel et Terre, **33**, 1912b, p. 18.
926. *Jans C.De.* Coup d'Oeil Retrospectif sur les Essais d'Explication de la Foudre Globulaire. Ciel et Terre, **33**, 1912c, p. 143.

927. *Jans C.De.* Un Cas Remarquable de Foudre en Boule. Ciel et Terre, **33**, 1912d, p. 299.
928. *Jans C.De.* Coup d'Oeil Retrospectif sur les Essais d'Explication de la Fourde Globulaire. (Summary.) Fortschr. Phys., **68**(3), 1912e, p. 318.
929. *Jenrenard H.* and *D. Burnand.* Feuerkugel. (Summary.) Fortschr. Phys., **62**(3), 1906, p. 287.
930. *Jeanrenard H., D. Burnard* and *A. Von Bolzheim.* Feuerkugeln. Meteorol. Zeit., **23**, 1906, p. 330.
931. *Jefferson G.T.* A Photograph of a Sub-Sun. Meteorol. Mag., **92**, 1963, p. 254 (NBL).
932. *Jeffreys H.* Results of the Ball Lightning Enquiry. Meteorol. Mag., **56**, 1921, p. 208.
933. *Jennings R.C.* Path of a Thunderbolt. New Scientist, **13**, 1962, p. 156.
934. *Jennison R. C.* Ball Lightning. Nature, **224**, 1969, p. 895.
935. *Jennison R. C.* Ball Lightning and After-Images. Nature, **230**, 1971, p. 576.
936. *Jennison R. C.* Ball Lightning. Nature, **236**, 1972, p. 278.
937. *Jennison R. C.* Can Ball Lightning Exist in a Vacuum? Nature, **245**, 1973, p. 95.
938. *Jensen J. C.* Ball Lightning. Physics (Now J. Appl. Phys.), **4**, 1933a, p. 372.
939. *Jensen J. C.* Ball Lightning. Sci. Monthly, **37**, 1933b, p. 190.
940. *Jensen J. C.* Ball Lightning. Nature, **133**, 1934, p. 95.
941. *Jesse O.* Blitz von Ausserordentlich Grossem Durchmesser. Meteorologie, **42**, 1892a, p. 295.
942. *Jesse O.* Blitz von Ausserordentlich Grossem Durchmesser. Meteorol. Zeit., **9**, 1892b, p. 434.
943. *Johnson E.O.* Studies of Externally Heated Hot Cathode Arcs, Part I. The Low-Voltage Form of the Ball-of-Fire Mode (the Low-Voltage Arc). RCA Review, **16**, 1955, p. 499 (NBL).
944. *Johnson J. C.* Lightning Forms. In Physical Meteorology. MIT Press, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1954, p. 300–315.
945. *Johnson L.H.* Ball Lightning. Marine Observer, **28**, 1958, p. 11.
946. *Johnson P.O.* Ball Lightning and Self-Containing Electromagnetic Fields. Amer. J. Phys., **33**, 1965, p. 119.
947. *Johnstone J.* Note. Electrician, **25**, 1890, p. 472.
948. *Jolivet C.* Eclairs en Boule. Le Cosmos, **31**, 1895a, p. 167 (*).
949. *Jolivet C.* Eclairs en Boule. Meteorologie, **43**, 1895b, p. 171.
950. *Jones A. T.* A Laboratory Illustration of Ball Lightning. Science, **31**, 1910, p. 114.
951. *Jones H.S.* Ball Lightning. London Daily Mail, 5 Nov. 1936.
952. *Jones I.* Giant Ball Lightning. J. Meteorol., **2**(21), 1977, p. 271.
953. *Jones W.N.* Ball Lightning. Nature, **130**, 1932, p. 545.
954. *Joubert J.* Unavailable—Title Unknown. Trait. Elem. Elect., 1881, p. 586.

955. *Joule B.J.B.* On a Remarkable Flash of Lightning. *Nature*, **18**, 1878, p. 260.
956. *Joule J.P.* On a Remarkable Appearance of Lightning. *Phil. Mag.*, **37**, 1850, p. 127.
957. *Kahler K.* Unavailable—Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **41**, 1924, p. 95.
958. *Kaiser J.* Ball Lightning. *Science*, **60**, 1924, p. 293.
959. *Kales J.W.* Unavailable—Title Unknown. *Western Electrician*, **26**, 1900, p. 129.
960. *Каница П.Л.* О природе шаровой молнии. Докл. АН СССР, т. 101, 1955, с. 245.
961. *Kapitza P.L.* Uber die Natur des Kugelblitzes. *Phys. Blatter*, **14**, 1958, p. 11.
962. *Kapitza P.L.* The Nature of Ball Lightning. In *Ball Lightning*. D.J. Ritchie, ed., Consultants Bureau, New York, 1961.
963. *Каница П.Л.* Электроника больших мощностей. Успехи физ. наук, т. 78, 1962, с. 181.
964. *Каница П.Л.* Шаровая молния и радиоизлучение линейных молний. ЖТФ, т. 38, 1968, с. 1829.
965. *Kapitza P.L.* Ball Lightning and Radio Emission from Linear Lightning. *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **13**(11), 1969, p. 1475.
966. *Kapitza P.L.* Free Plasma Filament in a High Frequency Field at High Pressure. *Sov. Phys. JETP*, **30**, 1970, p. 973.
967. *Kapitza P.L.* A Thermonuclear Reactor with Plasma Filament Freely Floating in a High Frequency Field, *Sov. Phys. JETP*, **31**, 1970, p. 199.
968. *Kapuscha C.* Merwurdige Blitz. *Meteorol. Zeit.*, **13**, 1896, p. 279.
969. *Karve A.De.* Unavailable—Title Unknown. *Trait. Electr. Th. Appl.*, **3**, 1858, p. 197.
970. *Kassner C.* Kugelblitz? *Zeit. Angew. Meteorol.*, **60**, 1943, p. 59.
971. *Kaubler R.* Beobachtung Eines Kugelblitzes. *Physik. Blatt.*, **19**, No. 8, 1963, p. 374.
972. *Kayser H.* Unavailable—Title Unknown. *Monat. Ber. Berlin Akad.*, Nov. 1884a, p. 613.
973. *Kayser H.* Unavailable—Title Unknown. *Sitz. Konigl. Preuss. Akad. Wiss. Berlin*, 1884b, p. 1119.
974. *Kayser H.* Ueber Blitzphotographien. *Ann. Physik*, **25**, 1885, p. 131 (NBL).
975. *Keil K.* Handwörterbuch der Meteorology. F. Knapp, Frankfurt A.M., 1950, p. 306.
976. *Kekez A.M.* and *P. Savic.* The Glow (Spark) Discharge Electrolysis—Combustion Concept of Ball Lightning. *Proc. 13th International Conf. Phenomena in Ionized Gases*, Pt. 1, Berlin, DDR, 12–17 Sept. 1977, p. 395.
977. *Kelvin M.* Unavailable—Title Unknown. *Proc. Glasgow Phil Soc.*, **26**, 1895, p. 233.

978. *Kenyan G.* The Tragedy of Pelee. The Outlook, New York, **71**, 1902, p. 115 (*).
979. *Kerkhoff L.* Ein Beitrag zum Kapitel Kugelblitz. Zeit. Angew. Meteorol., **30**, 1913, p. 286.
980. *Khalatow S. and D. Khalatow.* Eclair en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **21**, 1907, p. 452.
981. *Хазен А. М.* Шаровая молния – стационарное состояние, подвод энергии, условия возникновения. Докл. АН СССР, т. 235, 1977, с. 288.
982. *Khazen A. M.* Ball Lightning: Stationary State Energy Supply, Conditions of Occurrence. Sov. Phys. Dokl., **22**(7), 1977b, p. 371, Translation of Dokl. Nauk SSSR, 235, 1977, p. 288.
983. *Kilburn-Scott M.* Globular Lightning. Nature, **112**, 1923, p. 760.
984. *Kilinski K. Von.* Lehrbuch der Lufterlektrizitat, Akademische Verlags-Gesellschaft, Geest und Portig, K.-G., Leipzig, 1958.
985. *Kimpapa A.* Electromagnetic Energy Radiated from Lightning. In Problems of Atmospheric and Space Electricity. S. C. Coroniti, ed. Elsevier, Amsterdam, 1965, p. 352.
986. *King E.* Account of the Effects of Lightning at Steeple Ashton, and Holt in the County of Milts on the 20th of June 1772. Roy. Meteorol. Soc. Phil. Trans., **63**, 1773, p. 231.
987. *King M. B.* Energy Source Implication of a Helicon Toroid Model for Ball Lightning. VERC-QPR, No. 18, August, 1976a, p. 109.
988. *King M. B.* An Experiment to Create Ball Lightning. VERC-QPR, No. 22, 1976b, p. 70.
989. *Kingston H. R.* Another Case of Ball Lightning. Roy. Astron. Soc. Canada J., **25**, 1931, p. 420.
990. *Kircherus A.* O Onderaardse Weereld. Amsterdam, **1**, 1682, p. 279.
991. *Klass P. J.* Plasma Theory May Explain Many UFO's. Aviation Week and Space Technology, Aug. 22, **75**(23), 1961, p. 52.
992. *Klass P. J.* Many UFO'S are Identified as Plasmas. Aviation Week and Space Technology, Oct. 3, **85**(14), 1966, p. 54.
993. *Klass P. A.* UFO's: Identified. Random House, New York, 1968.
994. *Klein J.* Ratheselhafte Blitzerscheinungen. Zeit. Angew. Meteorol., **14**, 1897, p. 166 (*).
995. *Kleiner H.* Kugelblitz in Mullersdorf, 2 April 1904. (Summary). Fortschr. Phys., **60**(3), 1904a, p. 311.
996. *Kleiner H.* Kugelblitz in Mullersdorf, 2 April 1904. Zeit. Angew. Meteorol., **21**, 1904b, p. 118 (*).
997. *Klose J.* Beschreibung eines Kugelblitzes. Zeit. fur Meteorol., **4**, 1950, p. 91.
998. *Knoche W.* Uber Elektrische Entladungen in der Kordillere. Meteorol. Zeit., **26**, 1909, p. 355.
999. *Knoche W.* Unavailable – Title Unknown. Ann. Soc. Cient. Argentina, **134**, 1942, p. 237.

1000. *Koch T.* Meteorologische Notizen und Korrespondenzen. Zeit. Angew. Meteorol., **7**, 1890, p. 165.
1001. *Koechlin J.* Unavailable—Title Unknown. La Nature, No. 2628, 1924.
1002. *Коган-Белецкий Г.И.* К вопросу о природе шаровой молнии. Природа, № 4, 1957, с. 71.
1003. *Kogan-Beletskii G.I.* On the Question of the Nature of Ball Lightning. Air Force Cambridge Research Lab Report, AFCRL-TN-59-795, 1959.
1004. *Kogan-Beletskii G.I.* The Nature of Ball Lightning, In Ball Lightning. D.J. Ritchie, editor. Consultants Bureau, New York, 1961.
1005. *Kohl T.* Unavailable—Title Unknown. GAEA, **18**, 1882, p. 569.
1006. *Kohl T.* Ueber den Kugelblitz. (Summary.) Fortschr. Phys., **40**(3), 1884, p. 663.
1007. *Kohl T.* Kugelblitz. (Summary.) Fortschr. Phys., **41**(3), 1885, p. 651.
1008. *Kohlberg O.A.* Kugelblitz. (Summary.) Fortschr. Phys., **57**(3), 1901a, p. 260.
1009. *Kohlberg O.A.* Kugelblitz. Zeit. Angew. Meteorol., **18**, 1901b, p. 24 (*).
1010. *Koldamasov A.* Ball Lightning in Liquids. Tekh. Molod., No. 8, 1972, p. 24 (*).
1011. *Kollert H.* Unavailable—Title Unknown. Elektro. Zeit., **10**, 1889.
1012. *Колобков Н.В.* Грозы и шквалы. М., Гостехиздат, 1951, с. 47 (*).
1013. *Koloc P.M.* A New Model for Ball Lightning. Neophysics Research. Ltd, Box 222, College Park, MD, 20740, Unpublished, 1977.
1014. *Konieczny J.* New Weapon X—Ball Shaped Thunder (Globular Fire-Balls). Przegląd Lotniczy, **2**, 1963, p. 72 (*).
1015. *Koppen W.* Bermerkenswerthe Blitzschlage. Meteorol. Zeit., **5**, 1888a, p. 158.
1016. *Koppen W.* Bermerkenswerthe Blitzschlage. Meteorol. Zeit., **5**, 1888b, p. 202.
1017. *Koppen W.* Kugelblitz und Fohn in der Krim. Meteorol. Zeit., **43**, 1926, p. 33.
1018. *Kosarev E.L., Yu.G. Serezhkin,* Narrow Band Decimeter Radiation from Lightning, Sov. Phys. Tech. Phys., **19**(2), 1974, p. 229.
1019. *Kosarev E.L., Vaganov A.B., Zakirov B.S., a.o.* Results of an Expedition to Study Radio Emission in the Decimeter Range Accompanying Linear Lightning. Sov. Phys. Tech. Phys., **14**, 1969, p. 1477.
1020. *Koslov B.N.* Princiles of the Relaxation Theory of Ball Lightning. Sov. Phys. Dokl., **20**(4), 1976, p. 261.

1021. *Козлов Б.Н.* О максимальном энерговыделении шаровой молнии. Докл. АН СССР, т. 238, 1978, с. 61.
1022. *Козлов Б.Н.* Теория шаровой молнии. Физика плазмы, т. 4, 1978, с. 159 (*).
1023. *Kozlov B.N.* A Theory of Ball Lightning. Sov. J. Plasma Phys., 4, 1978c, p. 91 (*).
1024. *Kozlov B.N.* Maximum Energy Liberated by Ball Lightning. Sov. Phys. Dokl., 23(1), 1978d, p. 41, Translation of Dokl. Akad. Nauk SSSR, 238(1–3), 1978, p. 61.
1025. *Kraemer H.* Die Entstehung eines Gewitters. In Weltall und Menschheit. Metzger und Wittig, Leipzig, Insert Bild IV, Opposite p. XII.
1026. *Krebs W.* Les Eclairs en Boule et la Question de la Protection Contre la Foudre. Ciel et Terre, 33, 1912, p. 257.
1027. *Krider E.P., C.D. Weidman and R.C. Noggle.* The Electric Field Produced by Lightning Stepped Leaders. J. Geophys. Res., 82(6), 1977, p. 951 (NBL).
1028. *Krírsky L.* Zare po Blescich u Vzdalene Vourky. Meteorologicke Zpravy (Prague), 11(16), 1958, p. 167.
1029. *Krummel H.* Ueber das Auftreten von Kugelblitzen bei dem Gewitter am 21 Juli 1965 in Marquardt bei Potsdam. Zeit. Meteorol., 19, 1966, p. 112.
1030. *Kruskal M. and M. Schwarzschild.* Some Instabilities of a Completely Ionized Plasma. Proc. Roy. Soc. (London), A223, 1954, p. 348.
1031. *Кудрявцев В.В.* М.В. Ломоносов. М., 1955, 1961.
1032. *Kuhn E.* Ein Kugelblitz auf einer Moment-Aufnahme? Naturwiss., 38, 1951, p. 518.
1033. *Kuschewitz H.* Kugelblitz. Elektro. Zeit., 26(35), 1905, p. 829.
1034. *Lacroix A.* La Montagne Pelee et ses Eruptions. Paris, Masson et Cie, 1904, chapter 10 (*).
1035. *Ладиков Я.П.* Магнитовихревые кольца. Изв. АН СССР, № 4, 1960, с. 7.
1036. *Lalande M.De.* Fails Observes a la Station de Beuzeville Pendant l'Orage du 17 Mai. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., 35, 1852, p. 24.
1037. *Lalung A.* Correspondance—Curieux cas de Foudre en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., 13, 1899a, p. 471.
1038. *Lalung A.* La Foudre Globulaire aux Bureaux du Cable Francais. Bull. Soc. Astron. Fr., 13, 1899b, p. 500.
1039. *Lancaster A.* Unavailable—Title Unknown, Ann. Obser. Roy. Bruxelles, 1878, p. 279.
1040. *Lancaster A.* Les Orages. Ciel et Terre, 9, 1888/89, p. 193.
1041. *Lancaster A.* Coups de Foudre. Ciel et Terre, 26, 1905, p. 241.
1042. *Lane F.W.* The Elements Rage. Chilton, New York, 1965.
1043. *Langmuir I.* Lightning Phenomena. Mon. Weather Rev., 35, 1907, p. 357.

1044. *Lardry M.* Deux cas de Foudre Globulaire. *La Meteorologie*, **5**, 1929, p. 278.
1045. *Laskowski B.R.* Ball Lightning. *Tycos*, **17**, 1927, p. 16 (*).
1046. *Latham J.* The Electrification of Snowstorms and Sandstorms. *Roy. Meteorol. Soc. Q.J.*, **90**, 1964, p. 91 (NBL).
1047. *Laugier A.* Effets Produits par un coup de Foudre a Ramboullet. *C.R. Held. Seances Acad. Sci.*, **97**, 1883a, p. 1160.
1048. *Laugier A.* Effets Produits par un Coup de Foudre a Ramboullet. (Summary). *Fortschr. Phys.*, **39**(3), 1883b, p. 523.
1049. *Lazarides M.* Lightning Balls. *Nature*, **231**, 1971, p. 134.
1050. *Leconte L.* Observation de Foudre en Boule. *Meteorologie*, **39**, 1891, p. 353.
1051. *Leduc S.* Wandernde Kugelformige Funken. *Beibl. Ann. Phys.*, **23**, 1899a, p. 680.
1052. *Leduc S.* Etincelle Globulaire Ambulante. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **129**, 1899b, p. 37.
1053. *Leduc S.* Unavailable—Title Unknown. *L'Eclairage Electrique*, **21**, 1899c, p. 142.
1054. *Leduc S.* Unavailable—Title Unknown. *L'Eclairage Electrique*, **29**, 1901, p. 54.
1055. *Leduc S.* Etincelle Globulaire Ambulante. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **16**, 1902, p. 546; *L. Leconte. Observation de Foudre en Boule. La Nature*, Nov. 1891, p. 408 (*).
1056. *Lemonnier M.* Foudre en Boule. *Le Cosmos*, Juin, 1891a, p. 282 (*).
1057. *Lemonnier M.* Foudre en Boule. *Meteorologie*, **39**, 1891b, p. 200.
1058. *Леонов Р. А.* Загадка шаровой молнии. *М., Наука*, 1965 (*).
1059. *Leonov R. A.* The Riddle of Ball Lightning. *U.S. Dept. Commerce*, TT-66-33253, JPRS: 36823, 3 Aug. 1965b.
1060. *Leonov R. A.* The Enigma of Ball Lightning. Report on Zagadka sharovoy molnii. *Moscv, Izd-vo Nauka*, 1965; in *Foreign Science Bull.*, **2**, No. 5, 1966, p. 47.
1061. *Lepel F. Von.* Ueber die Feuchten Funkenrohren und die Gewitterblitz. *Meteorol. Zeit.*, **6**, 1889, p. 216.
1062. *Lepel F. Von.* Unavailable—Title Unknown. *Elektro. Zeit.*, **10**, 1890a, p. 487.
1063. *Lepel F. Van.* Ueber Wandernde Funken. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **46**(3), 1890b, p. 420.
1064. *Lepel F. Von.* Ueber Wandernde Funken. *Meteorol. Zeit.*, **7**, 1890c, p. 297.
1065. *Lepel F. Von.* Ueber Wandernde Funken. *Meteorologie*, **40**, 1892, p. 165.
1066. *Less E.* Kugelblitz uber Wolken. *Meteorol. Zeit.*, **18**, 1901, p. 39.

1067. *Letzmann H.* Kugelblitz in Estland. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **55**, 1938, p. 341 (*).
1068. *Leveille H.* La Foudre en Boule. *Le Cosmos*, Dec. 1891, p. 4 (*).
1069. *Leveille H.* La Foudre en Boule. *Meteorologie*, **40**, 1892, p. 64.
1070. *Lewis B.* and *G. Von Elbe.* Combustion, Flames, and Explosions of Gases. Academic Pres, New York, 1961 (NBL).
1071. *Lewis H. W.* Ball Lightning. *Scientific American*, **208**, 1963, p. 107.
1072. *Lilienfeld P.* Ball Lightning. *Nature*, **226**, 1970, p. 253.
1073. *Lindberg L.* Experiments with Plasma Rings. *Nature*, **185**, 1960, p. 452.
1074. *Lindemann G.* Verletzungen durch Kugelblitze. *Kosmos*, **47**, 1951, p. 380.
1075. *Lindholm F.* Eine Kugelblitzartige Erscheinung. *Meteorol. Zeit.*, **44**, 1927, p. 391.
1076. *Lining J.* Extract of a Letter from John Lining, M.D. of Charles Town, in South Carolina, to Charles Pinckney, ESQ.: In London: with his Answers to Several Queries sent to him Concerning his Experiments of Electricity with a Kite. *Roy. Meteorol. Soc. Phil. Trans.*, **48**, 1754, p. 757.
1077. *Lippman A.* Unavailable—Title Unknown. *Aeronautik*, **1**, 1911, p. 160.
1078. *List K.* Elektrische Erscheinungen bei den Vulkanausbrüchen in Mittelamerik. *Meteorol. Zeit.*, **22**, 1905, p. 139.
1079. *Livens G. H.* The Theory of Electricity. Cambridge University Press, 1918 (NBL).
1080. *Lockyer W. J. S.* Beaded or Pearl Lightning with a Moving Camera. *Knowledge Sci. News*, **4**, 1907a, p. 121 (*).
1081. *Lockyer W. J. S.* Beaded or Pearl Lightning with a Moving Camera. *Knowledge Sci. News*, **4**, 1907b, p. 145 (*).
1082. *Lockyer W. J. S.* Beaded or Pearl Lightning Flashes; Ribbon or Band Lightning. *Knowledge Sci. News*, **5**, 1908a, p. 53 (*).
1083. *Lockyer W. J. S.* Beaded or Pearl Lightning Flashes: Ribbon or Band Lightning. *Knowledge Sci. News*, **5**, 1908b, p. 117 (*).
1084. *Lockyer W. J. S.* Unavailable—Title Unknown. *Knowledge Sci. News*, **5**, 1908c, p. 151.
1085. *Lodge H.* Unavailable—Title Unknown. *Elektro. Zeit.*, **1**, 1880, p. 430.
1086. *Lodge O.* Globular Lightning. *Electrician*, **29**, 1892a, p. 603.
1087. *Lodge O.* Lightning Conductors and Lightning Guards. London, 1892b, p. 138 (*).
1088. *Lodge O.* Unavailable—Title Unknown. *L'Eclairage Electrique*, **26**, 1901, p. 58.
1089. *Lodge O.* Lightning Research. *Electrician*, **55**, 1905, p. 174.
1090. *Loeb L. B.* Electrical Coronas. University of California Press, Berkeley, 1965 (NBL).

1091. *Loeb L.B.* Comments on a Paper by W.H. Andersen. 'Energy Source for Ball Lightning'. J. Geophys. Res., **71**, 1966, p. 676.
1092. *Loeb L.B.* and *A.F. Kip*. Electrical Discharges in Air at Atmospheric Pressure. The Nature of the Positive and Negative Point-to-Plane Coronas and the Mechanism of Spark Propagation. J. Appl. Phys., **10**, 1939, p. 142 (NBL).
1093. *Logan E.A.* What are Fireballs? Electr. Rev. London, **138**, 1946, p. 381.
1094. *Ломоносов М.В.* Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих. Спб., 1753.
1095. *Long M.* A Ball Lightning Report from Kent. J. Meteorol., **3**(31), 1978, p. 210.
1096. *Lowke J.J.*, *M.A. Uman*, and *R.W. Liebermann*. Toward a Theory of Ball Lightning. J. Geophys. Res., **74**, 1969, p. 6887.
1097. *Ludgunt M.* Unavailable—Title Unknown. B.A. Magni. Ratisb. Fr. Operum., **2**, 1651, p. 44 (*).
1098. *Luizet D.* Electricite Atmospherique. Bull. Soc. Astron. Fr., **11**, 1897, p. 298.
1099. *Luizet D.* Observation d'un Eclair en Chapelet. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **145**, 1907, p. 780.
1100. *Luizet D.* Perlschnurbliitz. Meteorol. Zeit., **25**, 1908, p. 43.
1101. *Lynn W.T.* Correspondence. Proc. Meteorol. Soc. Lond., **4**, 1869, p. 374.
1102. *Mack K.* Blitz mit Deutlich Erkennbarer Fortpflanzungsrichtung. Meteorol. Zeit., **18**, 1901, p. 427.
1103. *Maclean M.* Unavailable—Title Unknown. Proc. Glasgow Phil. Soc., **21**, 1890, p. 22.
1104. *Maclear J.P.* Ball Lightning. Meteorol. Mag., **39**, 1904, p. 187.
1105. *Максименко В.* Выстрел шаровой молнии. Военные знания, № 7, 1964, с. 37.
1106. *Malan D.J.* Unusual Types of Lightning. Annales de Geophysique, **17**, 1961, p. 388.
1107. *Malan D.J.* Physics of Lightning. England Univ. Press, London, 1963, p. 6.
1108. *Malone T.M.* Compendium of Meteorology. American Meteorology Society, Boston, 1951, p. 141.
1109. *Malsch W.* Beobachtung einer Schwachen Trombe und eines Kugelblitzes. Meteorol. Rund., **9** (7, 8), 1956a, p. 150.
1110. *Malsch W.* Beobachtung einer schwachen Trombe und eines Kugelblitzes. Meteorol. Rund., **9** (9, 10), 1956b, p. 138.
1111. *Malter L.*, *W.M. Webster* and *E.O. Johnson*. Studies of Externally Heated Hot Cathode Arcs. RCA Review, **12**, 1951, p. 415 (NBL).
1112. *Mancini E.* Sopra un Fenomeno Analogo al Fulmine Globulare Provocato per Induzione. ATTI D. Real. Accad. Lincei, **1**, 1892, p. 308 (*).
1113. *Mancini E.* Ein Kugelblitzformige Erscheinung, die durch

Induktion Enstanden Ist. Jahrbuch der Astronomie und Geophysik, **4**, 1893a, p. 345.

- 1114. *Mancini E.* Kugelblitz. Meteorologie, **43**, 1893b, p. 322.
- 1115. *Mancini E.* Kugelblitz. Meteorol. Zeit., **10**, 1893c, p. 15⁷
- 1116. *Mancini E.* Ueber ein dem Kugelblitz Ahnliches Pharomen, da Durch Induction Entstanden. Naturwiss. Rund., **8**, 1893d, p. 6. (*).
- 1117. *Mankin R.W.* Insects as Unidentified Flying Objects: Author's Reply to Comments; 2. Applied Optics, **18**(16), 1979, p. 2725.
- 1118. *Mantel G.* Bermerkenswerthe Blitzschlage. Meteorol. Zeit., **2**, 1885, p. 18.
- 1119. *Marcel M.D.* Reproduction Artificielle des Eclairs. Meteorologie, **2**, 1854, p. 57.
- 1120. *Marcet W.* On Atmospheric Electricity. Roy. Meteorol. Soc. Q.J., **14**, 1888, p. 197.
- 1121. *Marcuse A.* Erdphysik – die Atmosphere. In Weltall und Menschheit. Meizer und Wittig, Leipzig, p. 450.
- 1122. *Margs G.* Kugelblitz. Meteorol. Rund., **9**, 1956, p. 72.
- 1123. *Marsh O.C.* Globular Lightning. Nature, **53**, 1895, p. 152.
- 1124. *Marsh O.C.* Note on Globular Lightning. Amer. J. Sci. Arts, **151**, 1896a, p. 13.
- 1125. *Marsh O.C.* Globular Lightning. (Summary.) Fortschr. Phys., **52**(3), 1896b, p. 301.
- 1126. *Marsh O.C.* Kugelblitz. Meteorol. Zeit., **13**, 1896c, p. 189.
- 1127. *Marsh O.C.* Globular Lightning. Naturwiss. Rund., **11**, 1896d, p. 235.
- 1128. *Marsh O.C.* Kugelblitz. Meteorologie, **47**, 1899, p. 171.
- 1129. *Marsh O.C.* Unavailable – Title Unknown. Zeit. Angew. Meteorol., **19**, 1902, p. 239.
- 1130. *Martin T.C.* The Inventions, Researches and Writings of Nikola Tesla. The Electrical Engineer, D. Van Nostrand Co., New York, 1894, p. 167, 171.
- 1131. *Martin T.H.* La Foudre, l'Electricite et la Magnetisme chez les Anciens. Paris, 1866, p. 178, 187, 288 (*).
- 1132. *Мартынов Ю.Л.* Окисление азота и шаровая молния. Препринт, 1970.
- 1133. *Marun D.* Van. Tweede Verlolg der Proefneemingen Gadaan met Teeyler's Electric Machine. Haarlem, 1795 (*).
- 1134. *Mascart E.* Unavailable – Title Unknown. Trait. Elect. Statique, **2**, 1876, p. 563.
- 1135. *Mascart M.* Sur l'Existence du Tonnerre en Boule. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **111**, 1890, p. 496.
- 1136. *Mascart J.* Communications Verbales – l'Observations de Feux St. Elme. Bull. Soc. Astron. Fr., **24**, 1910, p. 524 (NBL).
- 1137. *Mason B.J.* Clouds, Rain and Rainmaking. Cambridge University Press, London, Chapter 7, 1962, p. 112 (NBL).
- 1138. *Mason C.* Fire-Ball Seen in the Air, and a Great Explosion

- Heard, Dec 11, 1741. Roy. Soc. Lond. Phil. Trans., **42**, 1742/43, p. 1.
1139. *Mason D.* Lightning Strikes on Aircraft—II, St. Elmo's Fire. Weather, **19**, 1964, p. 254.
1140. *Mathias E.* La Matiere Fulminante. Paris, **7**, 1908, p. 113 (*).
1141. *Mathias E.* Sur Trois Observations d'Eclairs en Boule Faites au Sommet du Puy de Dome. Ann. Physique, **5**, 1916a, p. 365.
1142. *Mathias E.* Sur Trois Observations d'Eclairs en Boule Faites au Sommet du Puy de Dome. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **162**, 1916b, p. 642.
1143. *Mathias E.* Ball Lightning on Puy de Dome. Mon. Weather Rev., **44**, 1916c, p. 516.
1144. *Mathias E.* Sur les Formes Terminales des Eclairs Fulgurants. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **179**, 1924a, p. 136.
1145. *Mathias E.* Sur le Bruit de l'Eclair. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **179**, 1924b, p. 372.
1146. *Mathias E.* Retour sur la Theorie de l'Eclair Fulgurant. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **179**, 1924c, p. 550.
1147. *Mathias E.* Traite d'Electricite Atmospherique et Tellurique. Univ. France Press Paris, 1924d, p. 296.
1148. *Mathias E.* Contribution a l'Etude de la Matiere Fulminante: I. Les Heterogeneites Thermiques. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **181**, 1925a, p. 1038.
1149. *Mathias E.* Contribution a l'Etude de la Matiere Fulminante: la Couleur. Heterogeneites Chimiques. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **181**, 1925b, p. 1111.
1150. *Mathias E.* Contribution a l'Etude de la Matiere Fulminante: les Globes Noirs et Blancs sans Lumiere Propre. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **182**, 1926a, p. 32.
1151. *Mathias E.* Contribution a l'Etude de la Matiere Fulminante: L'Energie par Centimetre Cube et par Gramme au Moment de l'Explosion. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **182**, 1926b, p. 194.
1152. *Mathias E.* La Foudre, ses Differentes Formes, La Matiere Fulminante. Ann. Post. Teleg. Telep., **16**, 1927a, p. 965 (*).
1153. *Mathias E.* Contribution a l'Etude de la Matiere Fulminante. Decomposition Spontanee et sans Bruit Sensible de Certains Eclairs Spheriques de Grand Diameter. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **184**, 1927b, p. 312.
1154. *Mathias E.* Contribution a l'Etude de la Matiere Fulminante: Exemples de Decomposition Spontanee. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **184**, 1927c, p. 565.
1155. *Mathias E.* Contribution a l'Etude de la Matiere Fulminante. Celle-Ci Est-Elle Chaude ou Froide? C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **184**, 1927d, p. 633.
1156. *Mathias E.* Unavailable—Title Unknown. Ann. Post. Teleg. Telep., Juillet, 1928a (*).
1157. *Mathias E.* Sur une Curieuse Photographie d'Eclair Obtenue

- dans la Region du Luc des Quatre-Cantons. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **186**, 1928b, p. 1334.
1158. *Mathias E.* Contribution a l'Etude de la Matiere Fulminante; son Explosion par Choc. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **188**, 1929a, p. 1208.
1159. *Mathias E.* Contribution a l'Etude de la Matiere Fulminante: la Tension Superficielle. Partage d'un Globe en Plusieurs Autres sans l'Influence d'un Choc ou d'un Rebondissement. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **189**, 1929b, p. 512.
1160. *Mathias E.* Contribution a l'Etude de la Matiere Fulminante. Abaissement de sa Tension Superficielle par des Impuretes. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **189**, 1929c, p. 607.
1161. *Mathias E.* Contribution a l'Etude de la Matiere Fulminante. Les Formes Serpentinees. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **189**, 1929d, p. 813.
1162. *Mathias E.* Contribution a l'Etude de la Matiere Fulminante. Les Gouffres Excavateurs. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **189**, 1929e, p. 1049.
1163. *Mathias E.* La Foudre Globulaire. Bull. Mens. Soc. Fr. Electr., **10**, 1930a, p. 22 (*).
1164. *Mathias E.* La Foudre et ses Differentes Forms. Bull. Soc. Astron. Fr., **44**, 1930b, p. 416.
1165. *Mathias E.* Monographie de l'Eclair Fulgurant. Complementes Relatifs a ses Formes Terminales. Remarques sur la Pression Electrostatique des Foudres Spheriques. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **191**, 1930c, p. 393.
1166. *Mathias E.* De la Matiere Fulminante. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **191**, 1930d, p. 1420.
1167. *Mathias E.* Sur l'Existence ou la Non-Existence du Filet des Eclairs en Chapelet. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **192**, 1931a, p. 653.
1168. *Mathias E.* Sur l'Eclair en Chapelet avec Grains. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **193**, 1931b, p. 1140.
1169. *Mathias E.* Sur les Eclairs en Chapelet avec Traits. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **193**, 1931c, p. 1375.
1170. *Mathias E.* Variation de la Tension Superficielle de la Matiere Fulminante en Fonction de la Temperature et du Poids Moleculaire. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **194**, 1932a, p. 413.
1171. *Mathias E.* Les Eclairs Globulaires et Ascendants dans les Montagnes et les Plateaux Eleves. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **194**, 1932b, p. 2257.
1172. *Mathias E.* Unavailable—Title Unknown. Soc. Fran. Elect. Bull., **2**, 1932c, p. 729.
1173. *Mathias E.* Les Eclairs en Chapelet avec Grains. Bull. Soc. Astron. Fr., **47**, 1933a, p. 82.
1174. *Mathias E.* Electricite Atmospherique. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **196**, 1933b, p. 654.

1175. *Mathias E.* Sur la Realite du Reste d'Eclair Spherique. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **197**, 1933c, p. 962.
1176. *Mathias E.* Sur les Foudres Globulaires Bleues. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **199**, 1934a, p. 505.
1177. *Mathias E.* La Notion d'Impurete dans les Foudre Globulaires Bleues. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **199**, 1934b, p. 1083.
1178. *Mathias E.* Au Sujet des Foudres Bleues. Ciel et Terre, **50**, 1934c, p. 300.
1179. *Mathias E.* Unavailable—Title Unknown. Mem. Meteorol. Natur., No. 24, 1934d.
1180. *Mathias E.* La Theorie de Dauzere sur la Conductibilite de l'Air dans les Regions Exposees a la Foudre. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **201**, 1935a, p. 314.
1181. *Mathias E.* La Foudre et la Forme Globulaire. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **201**, 1935b, p. 535.
1182. *Mathias E.* La Foudre et sa Forme Globulaire. Memorial de l'Office National Meteorologique de France, No. 24, Paris, 1935c (*).
1183. *Mathouillot H.* Deux Photographies de Foudre Globulaire. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **146**, 1908, p. 603.
1184. *Matopa H.M.* Ball Lightning. Priroda, No. 1–6, 1962, p. 71.
1185. *Mathias B.T.* and *S.J. Buchsbaum.* Pinched Lightning. Nature, **194**, 1962, p. 327.
1187. *Matts E.* A Fire Ball? Weather, **19**, 1964, p. 228.
1187. *Maudemain A.* Eclairs en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **33**, 1919, p. 284.
1188. *Maurain C.* Eclairs en Boule. In La Foudre. Librairie Armand Colin, 1948, p. 100.
1189. *Mavrogordato M.* Bolides ou Foudre en Boule. L'Astronomie, **5**, 1886a, p. 309 (*).
1190. *Mavrogordato M.* Bolides ou Foudre en Boule. Meteorologie, **34**, 1886b, p. 310.
1191. *Maxwell C.* Flame of the Heaven: an Anthology of Ball Lightning. London; Davis, Delphine, and Cade—Ed., Unavailable (*).
1192. *McCann R.* and *P. Koloc.* Energy of Ball Lightning. Bull. Amer. Phys. Soc., **22**(9), 1977, p. 1176.
1193. *McClelland J.A.* Globular Lightning. Nature, **103**, 1919, p. 284.
1194. *McCrosky R.E.* Phenomenology of a Bead (?) Lightning Event. Unpublished Report, Smithsonian Institution Astrophysical Observatory, Nov. 1971.
1195. *McCrosky R.E.* and *H. Boeschstein.* The Prarie Meteorite Network. Smithsonian Astrophysical Observatory. Special Report, No. 173, 1964 (NBL).
1196. *McDunough T.* Globular Lightning. Nature, **11**, 1887, p. 62.
1197. *Mceachron K.B.* Unavailable—Title Unknown. Electr. Rec., **60**, 1941, p. 885.

1198. *Mcintosh D.H.* Lightning Damage. *Weather*, **28**, 1973, p. 160.
1199. *McMillan W.G.* On the Phenomenon of the Lightning Discharge, as Illustrated by the Striking of a House in Gossipore, Calcutta. *Nature*, **40**, 1889, p. 295.
1200. *McNally J.R.* Ball Lightning—a Survey. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, **6**, 1961, p. 202.
1201. *McNally J.R.* Preliminary Report on Ball Lightning. OAK Ridge National Lab Report, ORNL-3938, May 1966.
1202. *Meaden G.T.* Four Storm Stories from Steeple Aston. 1670, 1772 and 1973. *Weather*, **28**, 1973, p. 520.
1203. *Meaden G.T.* Remarkable Occurrence of Unusually-Shaped Ball Lightning, 15 August 1975. *J. Meteorol. (Trowbridge, England)*, **1**(10), 1976, p. 310 (*).
1204. *Meek J.M. and J.D. Graggs.* Electrical Breakdown of Gases. Oxford Press, London, 1953, p. 242.
1205. *Meek J.M. and F.R. Perry.* The Lightning Discharge. *Phys. Soc. London, Rpt. Prog. Phys.*, **10**, 1946, p. 314.
1206. *Meese A.D. and E.H. Evans.* Charge Transfer in the Lightning Stroke as Determined by the Magnetograph. *J. Franklin Institute*, **273**, 1962, p. 375 (NBL).
1207. *Meinardus W.* Ueber das Wetterleuchten. *Meteorol. Zeit.*, **12**, 1894, p. 14.
1208. *Meissner A.* Uber Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **47**, 1930, p. 17.
1209. *Mendenhall T.C.* On Globular Lightning. *Amer. J. Meteorol.*, **6**, 1890, p. 437.
1210. *Menin H.* Unavailable—Title Unknown. *Les Mondes*, **56**, 1881, p. 387.
1211. *Меншуткин Б.Н.* Михайло Васильевич Ломоносов. Жизнеописание. Спб., 1911.
1212. *Menshutkin B.N.* Russia's Lomonosov. Princeton University Press., Princeton, New Jersey, 1952.
1213. *Menzel D.H. and L.G. Ford.* The World of Flying Saucers. Doubleday, New York, 1965.
1214. *Mercanton P.L.* De Quelques Eclairs Rares. *Lausanne Bull. Soc. Vaud. Sci. Natur.*, **63**, 1945, p. 153 (*).
1215. *Merhaut O.* Eine Bemerkenswerte Blitzaufnahme. *Naturwiss.*, **32**, 1944, p. 212.
1216. *Mettetal M.* Observation d'un Phenomene Electrique. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **121**, 1895a, p. 596.
1217. *Mettetal M.* Unavailable—Title Unknown. *La Nature*, **23**, 1895b, p. 407.
1218. *Mettetal M.* Kugelblitz. *Naturwiss. Rund.*, **11**, 1895c, p. 64 (*).
1219. *Mettetal M.* Kugelblitz. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **52**(3), 1896, p. 309.
1220. *Meunier A.* Double cas de Foudre en Boule Observe dans un Tres—Court Espace de Temps. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **35**, 1852a, p. 195.

1221. *Meunier A.* Double cas de Foudre en Boule Observe dans un Tres-Court Espace de Temps. *Cosmos*, **1**, 1852b, p. 351 (*).
1222. *Meunier S.* Substance Singuliere Recueillie a la Suite d'un Meteore Rapporte a la Foudre. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **103**, 1886, p. 837.
1223. *Meunier S.* Unavailable – Title Unknown. *L'Astronomie*, **6**, 1887, p. 104.
1224. *Meunier S.* Bemerkenswerthe Blitzschlage. *Meteorologie*, **37**, 1888, p. 167.
1225. *Meusburger D.* Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **21**, 1904, p. 283.
1226. *Mey A.* Kugelblitze. *Meteorol. Zeit.*, **44**, 1927, p. 188.
1227. *Meyer J.* Kugelblitz am 22 Mai 1897 in Hamburg Beobachtet. *Ann. Hydro. Marit. Meteorol.*, **25**, 1897, p. 257.
1228. *Milham W.I.* *Meteorology*. MacMillan, New York, 1918, p. 470.
1229. *Mills A.A.* Ball Lightning and Thermoluminescence. *Nature*, **233**, 1971, p. 131.
1230. *Mills A.A.* Will-O'-The-Wisp. *Chem. Britain*, **16**(2), 1980, p. 69.
1231. *Mimno H.R.* Ball Lightning. *IEEE Trans. Aero. Elect. Sys.*, **6**, 1970, p. 846, p. 254.
1232. *Minchin G.M.* Personal Injury from a Fire-Ball. *Nature*, **53**, 1895a, p. 5.
1233. *Minchin G.M.* A Fire Ball. *Scientific American*, **73**, 1895b, p. 374.
1234. *Минин В.Ф., Бейбулатов Ф.К.* Природа четочной молнии. Докл. АН СССР, т. 118, 1969, с. 795.
1235. *Mohn H.* Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **25**, 1908, p. 314.
1236. *Mohr F.B.* A Truly Remarkable Fly. *Science*, **151**, 1960, p. 634.
1237. *Moigno F.* Unavailable – Title Unknown. *Le Cosmos*, **14**, 1859, p. 672.
1238. *Moller F.* Der Geheimnisvolle Kugelblitz. *UMSCHAU*, **49**, 1949, p. 458.
1239. *Moller F.* Unavailable – Title Unknown. *Hamel en Dampkring*, **49**, 1951a, p. 158.
1240. *Moller F.* Was ist ein Kugelblitz? *Kosmos*, **47**, 1951b, p. 86.
1241. *Moncel T.Du.* Nouveau Systeme d'Inflammation a Distance de Substance Inflammables par le Courant d'une Pile de Daniell et des Conducteurs Tresfins. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **37**, 1853, p. 953.
1242. *Moncel T.Du.* Note sur les Eclairs en Boule. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **38**, 1854a, p. 408.
1243. *Moncel T.Du.* Theorie des Eclairs. *Mem. Soc. Sci. Nat. Cherbourg*, **2**, 1854b, p. 49 (*).
1244. *Moncel T.Du.* Unavailable – Title Unknown. *Mem. Soc. Sci. Natur. Cherbourg*, **2**, 1854c, p. 85.
1245. *Moncel T.Du.* Reproduction Artificielles des Eclairs. *Meteorologie*, **2**, 1854d, p. 57.

1246. *Moncel T. Du.* Notice Historique et Theorique sur le Tonnerre et les Eclairs. Paris, 1857, p. 54 (*).
1247. *Moncel T. Du.* Eclairs en Boule. Bull. Soc. Encourag., Nov. 7, 1881 (*).
1248. *Moncel T. Du.* Eclairs en Boule. (Summary.) Fortschr. Phys., **38**(3), 1882a, p. 556.
1249. *Moncel T. Du.* Eclairs en Boule. La Lumiere Electrique, **6**, 1882b, p. 145 (*).
1250. *Moncel T. Du.* Unavailable–Title Unknown. La Lumiere Electrique, **6**, 1882c, p. 169.
1251. *Monnot M.* Foudre en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **62**, 1948, p. 323.
1252. *Moon F. D.* Ball Lightning. Marine Observer, **2**, 1925, p. 129.
1253. *Morre M.* Machine Makes Lightning. Brevard Today, Brevard County Newspaper, Cocoa Beach, Fla., July 18, 1977.
1254. *Moorsel J. Van.* Globular Lightning. Electrician, **22**, 1889, p. 520.
1255. *Morgan J. H. W.* Ball Lightning. Meteorol. Mag., **57**, 1922, p. 46.
1256. *Morris W.* A Thunderstorm Mystery. London Daily Mail, 5 Nov. 1936.
1257. *Mortley W. S.* Ball Lightning Enigma. New Scientist, **57**, 1973, p. 42.
1258. *Mott F. T.* Curious Electrical Phenomenon. Nature, **22**, 1880, p. 193.
1259. *Moureaux T.* Ancien Exemple de Foudre en Boule. La Nature Bull., No. 562, 1887a (*).
1260. *Moureaux T.* Ancien Exemple de Foudre en Boule. Meteorologie, **35**, 1887b, p. 221.
1261. *Moureaux T.* Foudre Globulaire. La Nature, Juin, 1892a, p. 33 (*).
1262. *Moureaux T.* Foudre Globulaire. Meteorologie, **40**, 1892b, p. 215.
1263. *Moussette C.* Theorie Mecanique de la Foudre. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **107**, 1884, p. 435.
1264. *Moussette C.* La Foudre en Spirale. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **103**, 1886a, p. 30.
1265. *Moussette C.* La Foudre en Spirale. (Summary.) Fortschr. Phys. **42**(3), 1886b, p. 654.
1266. *Moussette C.* La Foudre en Spirale. La Lumiere Electrique, **21**, 1886c, p. 123 (*).
1267. *Moussette C.* Orages du 12 Mai 1886, La Foudre en Spirale. Meteorologie, **34**, 1886d, p. 298.
1268. *Moussette C.* La Foudre en Spirale. Rev. Electr., **2**, 1886e, p. 109 (*).
1269. *Moussette C.* Unavailable–Title Unknown. La Lumiere Electrique, **25**, 1887, p. 534.

1270. *Muhleisen R.* Der Kugelblitz – ein Plasmazustand? *Kosmos*, **68**, 1972, p. 159.
1271. *Muirhead H.* Globe Lightning. *Electrician*, **12**, 1883, p. 50.
1272. *Muirhead H.* Globe Lightning. *Meteorol. Mag.*, **18**, 1883/84, p. 57.
1273. *Muller M.* Unavailable – Title Unknown. *La Nature*, **16**, 1888, p. 415.
1274. *Muller-Hillebrand D.* Unavailable – Title Unknown. *Tekn. Zeit.*, **85**, 1955, p. 541.
1275. *Muller-Hillebrand D.* Zur Frage des Kugelblitzes. *Elektrie*, **17**, 1963, p. 211.
1276. *Muller-Hillebrand D.* Lightning Protection. In *Problems of Atmospheric and Space Electricity*. S.C. Coroniti, ed. Elsevier, Amsterdam, 1965a, p. 407.
1277. *Muller-Hillebrand D.* Ball Lightning. In *Problems of Atmospheric and Space Electricity*. S.C. Coroniti, ed. Elsevier, Amsterdam, 1965b, p. 455.
1278. *Muratov M.* Lomonosov. Izdatel'stvo. Moscow, 1960.
1279. *Murchie G.* Song of the Sky. Riverside Press, Cambridge, 1954, p. 218.
1280. *Muschenbroek P. Van.* Unavailable – Title Unknown. *Cours de Physique Experimentale et Mathematique*. Sigaud de la Fond, Leyden, **3**, 1769, p. 405 (*).
1281. *Musya K.* On the Luminous Phenomenon that Attended the Idu Earthquake, November 26th, 1930. *Tokyo Univ. Earthquake Res. Bull.*, **9**, 1931, p. 177.
1282. *Naber H.* Kugelblitz. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **53**(3), 1897, p. 300.
1283. *Naber H.* Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **14**, 1897, p. 144 (*).
1284. *Nartmann D.* Unavailable – Title Unknown. *L'Astronomie*, **8**, 1889, p. 90.
1285. *Nasse E.* Un Exemple de Foudre Globulaire Observe a Brives, le Vendredi 17 Mai. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **74**, 1872a, p. 1384.
1286. *Nasse E.* Foudre Globulaire a Brives, le Vendredi 17 Mai. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **28**, 1872b, p. 852.
1287. *Nasse E.* Foudre Globulaire a Brives. Le Vendredi 17 Mai. *Mondes*, **28**, 1872c, p. 280 (*).
1288. *Nauer H.* Modellversuche zum Kugelblitz. *Zeit. Angew. Phys.*, **5**(12), 1953, p. 441.
1289. *Nauer H.* Wie Entsteht ein Kugelblitz? *Umschau*, **56**, 1956, p. 75.
1290. *Neesen F.* Gewitter und Blitzableiter. *Himmel und Erde*, **13**, 1900, p. 151 (*).
1291. *Neesen F.* Unavailable – Title Unknown. *Himmel und Erde*, **13**, 1901, p. 145.

1292. *Nernst H.* Unavailable—Title Unknown. *Theor. Chem.*, **6**, 1909, p. 679.
1293. *Neugebauer T.* Zu dem Problem des Kugelblitzes. *Zeit. Phys.*, **106**(7, 8), 1937, p. 474.
1294. *Neugebauer T.* The Theory of Ball Lightning. *Fiz. Szle. (Hungary)*, **25**(2), 1975, p. 49 (*).
1295. *Neugebauer T.* Zu der Quantenmechanischen Theorie des Kugelblitzes. *Acta Physica*, **42**(1), 1977, p. 29 (*).
1296. *Neuntenfl J.* Wintergewitter, St. Elmsfeuer, und Kugelblitz. *Wetter und Leben*, **3**, 1951, p. 49.
1297. *Newman M. M.* Thunderstorm Electrical Discharges Intercepted by Aircraft and Related Ball Lightning and Spherics Phenomena. *J. Geophys. Res.*, **65**, 1960, p. 1966.
1298. *Newman M. M.* Use of Triggered Lightning to Study the Discharge Process in the Channel. *In Problems in Atmospheric and Space Electricity*. American Elsevier, New York, 1965, p. 482.
1299. *Newman M. M.* Lightning Discharge Simulation and Triggered Lightning. *In Planetary Electrodynamics*, S. C. Coroniti and J. Hughes, editors. Gordon and Breach, New York, **2**, 1968, p. 213 (NBL).
1300. *Newman M. M.*, *J. R. Stahman*, *J. D. Robb*, *E. A. Lewis*, *S. G. Martin* and *S. V. Zinn*. Triggered Lightning Strokes at very close Range. *J. Geophys. Res.*, **72**, 1967, p. 4761 (NBL).
1301. *Newman W.* and *A. O. Kemppainen*. High-Voltage Installation of the Precipitation-Static Project. *Proc. IRE*, **34**, 1946, p. 247.
1302. *Nichols J. R.* *Bells Thro' the Ages*. London, Chapman and Hall, 1928, p. 277.
1303. *Nicholson M.* An Account of a Storm of Lightning Observed on the 1st of March, 1774, Near Weakfield, in Yorkshire. *Roy Meteorol. Soc. Phil. Trans.*, **64**, 1774, p. 350.
1304. *Niese H.* Unavailable—Title Unknown. *Start*, **16**, 1948, p. 7.
1305. *Niessl G. Von.* Kugelblitzbeobachtung. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **54**(3), 1898a, p. 313.
1306. *Niessl G. Von.* Kugelblitzbeobachtung. *Verh. Naturf. Ver. Brunn*, **36**, 1898b, p. 41 (*).
1307. *Niessl G. Von.* Elektrische Lichtphanomene an den Leitungsdrähten. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **57**(3), 1901a, p. 260.
1308. *Niessl G. Von.* Elektrische Lichtphanomene an den Leitungsdrähten. *Verh. Naturf. Ver. Brunn*, **40**, 1901b (*).
1309. *Nippoldt M.* Kugelblitz mit Nachfolgenden Blitzstrahl. *Meteorol. Zeit.*, **33**, 1916, p. 475.
1310. *Nixon J.* A Letter from the Rev. Mr. John Nixon, ERS to the President, Serving to Accompany a Letter from Mr. William Smith to Mr. Nixon, Giving a Very Particular Account of the Earthquake Felt on Sept. 30, 1750. *Roy. Soc. Lond. Phil. Trans.*, **46**, 1750, p. 727.

1311. *Noad H. M.* Unavailable—Title Unknown. Manual of Electricity, **1**, 1855, p. 204.
1312. *Nonhebel G., J. Colvin, H. S. Patterson, and R. Whytlaw-Gray.* The Coagulation of Smokes and the Theory of Smoluchowski. Roy. Soc. Lond. Proc., **116**, 1927, p. 540.
1313. *Norinder H.* Unavailable—Title Unknown. Tekn. Tidskrift (Stockholm), **33**, 1923, p. 190 (*).
1314. *Norinder H.* Om Blixens Natur. Kungliga Ventenskapssocietetens Arsbok, **94**, 1939, p. 39.
1315. *Norinder H.* On the Measurement and Nature of Atmospheric, Produced by Electric Discharges in Snow Squalls and from Other Sources. Tellus, **1**(2), 1949, p. 1 (NBL).
1316. *Norinder H.* Comments. In Problems of Atmospheric and Space Electricity. S. C. Coroniti, ed. Elsevier, Amsterdam, 1965, p. 455.
1317. *Norinder H. and R. Siksna.* Experiments Concerning Electrification of Snow. Arkiv foer Geofysik, **2**, 1953, p. 59.
1318. *Obermayer A. Von.* Ueber die bei Beschreibung von Elmsfeuer Notwendigen Angaben. Meteorol. Zeit., **5**, 1888, p. 224 (NBL).
1319. *Obermayer A. Von.* St. Elmsfeuer Beobachtungen. Jahrbuch der Astronomie und Geophysik, **3**, 1892, p. 325 (NBL).
1320. *Ollendorf H.* Unavailable—Title Unknown. Ark. Elektr., **27**, 1933, p. 169.
1321. *Oltramare G.* Explication du Bolide de Geneve du 7 Juin 1879. C. R. Hebd. Seances Acad. Sci., **88**, 1879, p. 1319.
1322. *O'Neill J. J.* Prodigious Genius, the Life of Nikola Tesla. Ives Washburn Inc, David Mckay Co., Inc., New York, 1971.
1323. *Oriel A.* Foudre en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **15**, 1901, p. 303.
1324. *Orville R. E.* High Speed, Time Resolved Spectrum of a Lightning Stroke. Science, **157**, 1966, p. 451 (NBL).
1325. *Orville R. E.* Lightning Between Clouds and Ground. Weatherwise, **25**, 1972, p. 108 (NBL).
1326. *Osborne J.* Ball Lightning. J. Meteorol., **3**(31), 1978, p. 215.
1327. *Oswalt P.* Foudre en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **29**, 1915, p. 437.
1328. *Otto M.* L'Eclair en Boule. La Nature, **29**, 1901, p. 361 (*).
1329. *Owen R.* Ball, or Globe Lightning. Amer. J. Meteorol., **3**, 1886, p. 383.
1330. *Owens A. L.* Ball Lightning. Marine Observer, **1**, 1924, p. 117.
1331. *Painter B. F.* Reproducing Ball Lightning, QST, Dec. 1920, p. 59.
1332. *Palazzo L.* Kugelblitz. Meteorol. Zeit., **20**, 1903, p. 188.
1333. *Palmer J.* An Account of the Effects of Lightning at Southmolton in Devonshire. Roy. Soc. Phil. Trans., **47**, 1752, p. 330.

1334. *Paneth F. A.* The Frequency of Meteorite Fall Throughout the Ages. *Vistas in Astronomy*, **2**, 1956, p. 1681.
1335. *Paradise W.* Account of the Effects of Lightning at Steeple Ashton and Holt, in the County of Wilts, on the 20th of June, 1772. *Roy. Soc. Lond. Phil. Trans.*, **63**, 1773, p. 240.
1336. *Parent E.* Sur les Effets Produits par la Foudre, a Troyes, le 26 Juillet 1873; Observations de Nombreux Globes de Feu. *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **77**, 1873a, p. 370.
1337. *Parent E.* Sur les Effets Produits par la Foudre a Troyes, le 26 Juillet 1873; Observations de Nombreux Globes de FEU. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **29**, 1873b, p. 1002.
1338. *Parent E.* Sur les Effets Produits par la Foudre a Troyes, le 26 Juillet 1873; Observations de Nombreux Gl oves de FEU. *Mondes*, **31**, 1873c, p. 716 (*).
1339. *Parisot M.* Sur Quelques Phenomenes de Meteorologie Observees a Epinol, dans le Departement des Vosges, en Aout 1821. *Ann. Chim. Phys.*, **19**, 1821, p. 86.
1340. *Parry A.* Soviet Affairs. Missiles and Rockets, **3**(4), April, 1958, p. 136.
1341. *Parry A.* Soviet Affairs. Missiles and Rockets, **3**(6), June, 1958b, p. 159.
1342. *Patterson H. S., R. Whytlaw-Gray, and W. Cawood.* The Process of Coagulation in Smokes. *Roy. Soc. Lond. Proc.*, **124**, 1929a, p. 502. (NBL).
1343. *Patterson H. S., R. Whytlaw-Gray, and W. Cawood.* The Structure and Electrification of Smoke Particles. *Roy. Soc. Lond. Proc.*, **124**, 1929b, p. 523 (NBL).
1344. *Paw-U K. T.* Insects as Unidentified Flying Objects: Comment. *Applied Optics*, **18**(16), 1979, p. 2723.
1345. *Пчолко И. Г.* Авиационная метеорология. Л., Гидрометеоиздат, 1963, с. 239.
1346. *Peake N. B.* Anti-Bubble Ball Lightning. *New Scientist*, **13**, 1962, p. 334.
1347. *Pellissier G.* Les Eclairs en Chapelet. *Na Nature*, **22**, 1894, p. 323 (*).
1348. *Pelletier L.* Les Formes Etranges de la Foudre. *Rev. Ciel. Bourges*, 1934 (*).
1349. *Pilleux L.* Sur le Aurores Boreales et les Eclairs en Boule. *Meteorologie*, **43**, 1895, p. 249.
1350. *Pelzl E.* Anleitung fur die Beobachter an den Wetterbeobachtungsstellen des Meteorologischen und Hydrologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik, Veroffentlichungen des Meteorologischen und Hydrologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik, Akademie Verlag, Berlin, Nr. 7, 1953, p. 136.
1351. *Peppler W.* Eine Merkwurdige Kugelblitartige Elektrische Entladung. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **36**, 1919 p. 29.

1352. *Peroux E.* Eclair en Boule. Bull. Soc. Astron. Er., **21**, 1907, p. 453.
1353. *Perrin P.* Etude sur les Eclairs. Paris, 1873, p. 77 (*).
1354. *Peterbaude H.* Unavailable—Title Unknown. Prog. Gymn. Hirschberg, 1888, p. 6.
1355. *Petersen H.* Ball Lightning. Geophysica, **5**, 1954a, p. 49.
1356. *Petersen H.* Ball Lightning. Weather, **9**, 1954b, p. 73.
1357. *Petersen H.* Photography and Ball Lightning. Weather, **9**, 1954c, p. 321.
1358. *Petrie W.M.F.* Slow Lightning. Nature, **24**, 1881, p. 284.
1359. *Petržilka V.A.* Ball Lightning. Prague, Institute of Plasma Physics, Czechoslovak Academy of Science, 1967 (*).
1360. *Petržilka V.A.* A Possible Explanation of Ball Lightning Motions. Ceskoslov. Casopis Fysiku, **19**, 1969, p. 160.
1361. *Pfeil H.* Die Hirschberger Kugelblitze. (Summary.) Fortschr. Phys., **42**(3), 1886a, p. 670.
1362. *Pfeil H.* Die Hirschberger Kugelblitze. GAEA, 1886b, p. 5 (*).
1363. *Pflegel R.* Beobachtung eines Kugelblitzes. Zeit. Meteorol., **10**(11), 1956, p. 347.
1364. *Phillips R.* On Atmospheric Electricity. London, Hardeicke, Piccadilly, 1863, p. 45 (*).
1365. *Phillips R.* Globular and Other Forms of Lightning. Nature, **41**, 1889, p. 58.
1366. *Pierce E. T., R.M. Nadile and P.J. McKinnon.* An Investigation of Negative Point-Plane Corona and its Relation to Ball Lightning. Air Force Cambridge Research Lab Report, AFCRL-TR-60-354, 24 Oct. 1960.
1367. *Pierce S. and E.M. Carlstead.* Observation of a Curious Electrical Phenomenon in Hawaii. Mon. Weather Rev., **94**, 1966, p. 272.
1368. *Pilaye M.De.* Foudre en Boule. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **17**, 1843, p. 630.
1369. *Pilleux L.* Sur les Aurores Boreales et les Eclairs en Boule. Le Cosmos, **31**, 1895, p. 420 (*).
1370. *Piren M.C.* De. Foudre en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **25**, 1911, p. 284.
1371. *Pittock A.B.* Comment on 'On the Problem of Ball Lightning' by W.I. Arabadji. J. Geophys. Res., **82**(24), 1977, p. 3499.
1372. *Plante G.* Unavailable—Title Unknown. Bibl. Univ. Geneve., **7**, 1860, p. 332.
1373. *Plante G.* Les Courants Secondaires et Leurs Applications. Ann. Chim. Phys., **5**, 1858, p. 5.
1374. *Plante G.* Sur l'Emploi des Courants Secondaires pour Accumuler ou Transformer les Effects de la Pile Voltaïque. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **74**, 1872, p. 592.
1375. *Plante G.* Suite de Recherches sur les Courants Secondaires. et

- Leurs Applications. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., 77, 1873, p. 466.
1376. *Plante G.* Recherches sur les Phenomenes Produits dans les Liquides par des Courants Electriques de Haute Tension. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., 80, 1875a, p. 1133.
 1377. *Plante G.* Recherches sur les Phenomenes Produits par des Courants Electrique de Haute Tension, et sur leus Analogies avec les Phenomenes Naturels. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., 81, 1875b, p. 185.
 1378. *Plante G.* Sur la Formation de la Grele. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., 81, 1875c, p. 616.
 1379. *Plante G.* Sur la Formation de la Grele. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., 81, 1875d, p. 618.
 1380. *Plante G.* Ueber Eine den Kugelblitzen Anaboge Erscheinung. (Summary.) Fortschr. Phys., 31, 1875e, p. 913.
 1381. *Plante G.* Ueber eine den Kugelblitzen Anaboge Erscheinung. Zeit. Oster. Ges. Meteorol., 10, 1875f, p. 303 (*).
 1382. *Plante G.* Sur les Trombes. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci. 82, 1876a, p. 220.
 1383. *Plante G.* Sur la Formation de la Grele. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., 83, 1876b, p. 314.
 1384. *Plante G.* Sur la Foudre Globulaire. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., 83, 1876c, p. 321.
 1385. *Plante G.* Eclairs en Chapelet. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., 83, 1876d, p. 484.
 1386. *Plante G.* Unavailable—Title Unknown. Elektr. Ersch., 1, 1876e, p. 25.
 1387. *Plante G.* Rosenkranzformige Blitz. (Summary.) Fortschr. Phys., 32, 1876f, p. 1216.
 1388. *Plante G.* Sur la Foudre Globulaire. (Summary.) Fortschr. Phys., 32, 1876g, p. 1216.
 1389. *Plante G.* Sur la Foudre Globulaire. Mondes, 40, 1876h, p. 623 (*).
 1390. *Plante G.* Rosenkranzformige Blitz. Mondes, 40, 1876i, p. 762 (*).
 1391. *Plante G.* Rosenkranzformige Blitz. Naturforscher, 8, 1876j, p. 424 (*).
 1392. *Plante G.* Lumiere Electrosilicique. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., 84, 1877a, p. 914.
 1393. *Plante G.* Machine Rheostatique. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., 85, 1877b, p. 294 (NBL).
 1394. *Plante G.* Suite de Recherches sur les Effets Produits par des Courants Electriques de Haute Tension, et sur leurs Analogies avec les Phenomenes Naturels. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., 85, 1877c, p. 619.
 1395. *Plante G.* Machine Rheostatique. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., 85, 1877d, p. 795 (NBL).

1396. *Plante G.* Wandernde Elektrische Funken. Beibl. Ann. Phys., **2**, 1878a, p. 620.
1397. *Plante G.* Sur les Effets de la Machine Rheostatique. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **86**, 1878b, p. 761 (NBL).
1398. *Plante G.* Etincella Electroque Ambulante. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **87**, 1878c, p. 325.
1399. *Plante G.* Recherches sur le Phenomenes Produits par des Courants Electrique de Haute Tension, et sur leurs Analogies avec les Phenomenes Naturels. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **88**, 1879a, p. 442.
1400. *Plante G.* Recherches sur l'Electricite. Paris, 1879b, p. 200 (*).
1401. *Plante G.* Foudre en Boule. Ciel et Terre, **5**, 1884a, p. 365.
1402. *Plante G.* Sur la Foudre Globulaire. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **99**, 1884b, p. 273.
1403. *Plante G.* On Globe Lightning. Electrician, **13**, 1884c, p. 366.
1404. *Plante G.* Sur la Foudre Globulaire. (Summary.) Fortschr. Phys., **40**(3), 1884d, p. 650.
1405. *Plante G.* Sur la Foudre Globulaire. La Lumiere Electrique, **13**, 1884e, p. 286 (*).
1406. *Plante G.* Sur la Foudre Globulaire. La Nature, **12**(2), 1884f, p. 195 (*).
1407. *Plante G.* Sur le Foudre Globulaire. Meteorologie, **32**, 1884g, p. 314.
1408. *Plante G.* Sur la Foudre Globulaire. Naturforscher, **16**, 1884h, p. 369 (*).
1409. *Plante G.* Sur la Foudre Globulaire. Rev. Sci., **34**, 1884i, p. 601 (*).
1410. *Plante G.* On Globe Lightning. Electrician, **14**, 1885a, p. 433.
1411. *Plante G.* Unavailable—Title Unknown. Zeit. Elektro., **3**, 1885b, p. 12.
1412. *Plante G.* Recherches sur l'Electricite. Paris, 1887 (*).
1413. *Plante G.* Les Phenomenes Electriques de l'Atmosphere. Paris, 1888, p. 60 (*).
1414. *Plante G.* Reproduction du Phenomene de la Foudre en Boule. Ciel et Terre, **11**, 1890, p. 424.
1415. *Plante G.* Electrical Phenomena in the Atmosphere. Paris, 1891 (*).
1416. *Plante G.* Unavailable—Title Unknown. La Nature, **29**, 1901, p. 562.
1417. *Pockels F.* Merkwurdige Blitze. Meteorol. Zeit., **10**, 1893, p. 73.
1418. *Pockels F.* Ein Versuch, die bei Blitzschlagen Erreichte Maximale Stromstarke zu Schatzen. Meteorol. Zeit., **15**, 1898, p. 41.
1419. *Poey M.* Des Caracteres Physiques des Eclairs en Boules et de Leurs Affinite Avec L'Etat Spheroidal de la Matiere. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **40**, 1855, p. 1183.
1420. *Poey M.* Sur l'Origine et la Nature des Eclairs sans Tonnerre et

- des Tonnerres sans Eclairs. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **43**, 1856a, p. 985.
1421. *Poey M.* Sur l'Origine et la Nature des Eclairs sans Tonnerre et des Tonnerres sans Eclairs. Cosmos, **9**, 1856b, p. 536 (*).
1422. *Poiterin H.* Effets de la Foudre en Boule. Cosmos, **15**, 1859a, p. 58 (*).
1423. *Pieterin H.* Effets de la Foudre en Boule. (Summary.) Fortschr. Phys., **15**, 1859b, p. 62.
1424. *Pollock R.E.* Not Ball Lightning. Mon. Weather Rev., **26**, 1898, p. 363.
1425. *Pollog C.H.* Ein Kugelblitz. Meteorol. Zeit., **47**, 1930, p. 79.
1426. *Polychronakis M.C. Ven.* Remarquable Coup de Foudre en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **22**, 1908, p. 479.
1427. *Ponnamperuma C. and F. Weller.* Differences in the Character of C-to C-Hydrocarbons from Gaseous Methane in Low Frequency Electric Discharges. Nature, **203**, 1964, p. 272 (NBL).
1428. *Понов Ю.А.* Разряд молнии в фюзеляж самолета. Природа, № 12, 1959, с. 111.
1429. *Potts L.M.* Ball Lightning. Science, **31**, 1910, p. 144.
1430. *Pouillet M.* Coup de Foudre Extraordinaire. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **35**, 1852, p. 400.
1431. *Poulpiquet H.* La Foudre Globulaire. La Nature, **17**, 1889a, p. 39 (*).
1432. *Poulpiquet H.* La Foudre Globulaire. Meteorologie, **37**, 1889b, p. 72.
1433. *Poulpiquet H.* Kugelblitz. Zeit. Angew. Meteorol., **6**, 1889c, p. 69.
1434. *Poulpiquet H.* Unavailable—Title Unknown. Zeit. Angew. Meteorol., **6**, 1889d, p. 179.
1435. *Poulpiquet H.* Kugelblitz. Jahrbuch Naturwiss., **5**, 1889/90, p. 254.
1436. *Poulpiquet H.* Globular Lightning. Electrician, **22**, 1890, p. 390.
1437. *Poulter R.M.* Lightning Photographs. Meteorol. Mag., **70**, 1935, p. 289.
1438. *Poulter R.M.* Photography and Ball Lightning. Weather, **9**, 1954a, 121.
1439. *Poulter R.M.* Ball Lightning. Weather, **9**, 1954b, p. 321.
1440. *Poumier M.* La Foudre en Boule. La Astronomie, **5**, 1886a, p. 348 (*).
1441. *Poumier M.* La Foudre en Boule. Meteorologie, **34**, 1886b, p. 343.
1442. *Powell J.R. and R. Domish.* Ball Lightning and Experimental Near-Spherical Flames in DC Fields. Bull. Amer. Phys. Soc., **14**(11), 1969, p. 1026.
1443. *Powell J.R. and D. Finkelstein.* Structure of Ball Lightning. In Advances in Geophysics. H.E. Landsberg and J. Van Mieghem, eds., Academic Press, New York, **13**, 1969, p. 141.

1444. *Powell J.R. and D. Finkelstein.* Ball Lightning. *American Scientist*, **58**, 1970, p. 262.
1445. *Powell J.R., D. Finkelstein, M.S. Zucker and J.R. Manwaring.* Laboratory Production of Self-Sustained Atmospheric Luminosities. *American Physical Society*, 8th Annual Meeting, Division of Plasma Physics, 1966.
1446. *Powell J.R., M.S. Zucker, J.F. Manwaring and D. Finkelstein.* Laboratory Production of Self-Sustained Atmospheric Luminosities. *Brookhaven National Laboratory*, Report 10625, 1965; Unpublished.
1447. *Powell J.R., M.S. Zucker, J.F. Manwaring and D. Finkelstein.* Laboratory Production of Self-Contained Atmospheric Luminosities. Abstract 2C-2, *Bull. Amer. Phys. Soc.*, **12**, 1967, p. 751.
1448. *Pozwolski A.E.* The Ball Lightning. *Indian J. Meteorol. Hydrol. Geophys.*, **28**(1), 1977, p. 74.
1449. *Pratt C.E.* Ball Lightning. *Marine Observer*, **31**, 1961, p. 127.
1450. *Preaubert E.* Note sur un Eclair a Propagation Lente. *Meteorologie*, **52**, 1904, p. 270.
1451. *Preece W.H.* On Lightning and Lightning Conductors. *J. Soc. Teleg. Engr.*, **1**, 1872a, p. 333.
1452. *Preece W.H.* Lightning and Lightning Conductors – Discussions. *J. Soc. Teleg. Engr.*, **1**, 1872b, p. 362.
1453. *Pringle C.S.* Ball Lightning. *Meteorol. Mag.*, **39**, 1904, p. 153.
1454. *Prinz W.* Etude de la Structure des Eclairs par la Photographie. *Bull. Acad. Roy. Belgique*, III, **16**, 1888, p. 244 (*).
1455. *Prinz W.* Observations d'Eclairs. *Ciel et Terre*, **26**, 1905/1906, p. 249.
1456. *Pritt A.T., R.D. Coombe, D. Pilipovich, R.I. Wagner, D. Benard and C. Dymek.* Chemical Generation of a Population between the Spin-Orbit States of Atomic Iodine. *Appl. Phys. Lett.*, **31**(11), 1977, p. 745 (NBL).
1457. *Prochnow O.* Erdball und Weltall. *Hugo Bermuhler Verlag*, Berlin – Lichterfelde, 1928 (*).
1458. *Prochnow O.* Zur Blitzforschung. *Physik. Zeit.*, **31**, 1930a, p. 335.
1459. *Prochnow O.* Ein Perlenschnurblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **47**, 1930b, p. 316.
1460. *Prohaska K.* Ein Merkwurdiges St. Elmsfeuer. *Jahrbuch der Astronomie und Geophysik*, **31**, 1892, p. 326 (NBL).
1461. *Prohaska K.* Elmsfeuer am Schafberg. *Meteorol. Zeit.*, **10**, 1893, p. 222 (NBL).
1462. *Prohaska K.* Blitzschaden in Steiermark und Karnten im Jahre 1899. *Meteorol. Zeit.*, **17**, 1900, p. 331.
1463. *Prohaska K.* Feuerkugel in Pollou, Steiermark. *Meteorol. Zeit.*, **18**, 1901, p. 94.
1464. *Prohaska K.* Uber Blitzschaden und Bemerkenswerte Entladu-

- ngsformen der Atmospharischen Elektrizitat im Jahr 1901. Meteorol. Zeit., **20**, 1903, p. 315.
1465. *Prokh L.Z.* Sharovaya molniya vo vremya zimney grozy v Kiev. Meteorol. I. Gidrol., No. 5, 1972, p. 103 (*).
1466. *Puhringer A.* Comments. in Problems of Atmospheric and Space Electricity. S. C. Coroniti, ed. Elsevier, Amsterdam, 1965, p. 460.
1467. *Puhringer A.* Beobachtung eines Kugelblitzes im Salzkammergut und ein Erklarungsversuch. Wetter und Leben, **19**, 1967, p. 57.
1468. *Raab O.* Unavailable—Title Unknown. Bildmessg. und Luftbildwes., **15**, 1940, p. 57.
1469. *Raasche L.* Unavailable—Title Unknown. Korr. Natur. Ver. Rifi, **39**, 1896, p. 70.
1470. *Racine E.* Curieux Coup de Foudre. Bull. Soc. Astron. Fr., **23**, 1909, p. 461.
1471. *Rahir M.E.* Curieux Coup de Foudre. Ciel et Terre, **22**, 1901, p. 155.
1472. *Raillard M.* Sur les Eclairs sans Tonnerre et les Tonnerres sans Eclairs. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **43**, 1856a, p. 816.
1473. *Raillard M.* Sur les Eclairs sans Tonnerre et les Tonnerres sand Eclairs. (Summary.) Fortschr. Phys., **12**, 1856b, p. 589.
1474. *Randjelovic J.* Ball Lightning and Electromagnetic Radiation from Linear Lightning Dischargers. Foreign Science Bull., **5**, No. 2, 1969, p. 65.
1475. *Ratcliffe J.A.* Physics of the Upper Atmosphere. Academic Press. New York, 1960 (NBL).
1476. *Rayle W.D.* Ball Lightning Characteristics. NASA Tech. Note, NASA-TN-D-3188, 1966.
1477. *Raymond G.* Un Coup de Foudre Remarquable. La Nature. Marsh, 1887a, p. 227 (*).
1478. *Raymond G.* Un Coup de Foudre Remarquable. Meteorologie, **35**, 1887b, p. 221.
1479. *Reichenbach E.* Meteorologische Notizen und Korrespondenzen. Zeit. Angew. Meteorol., **6**, 1889, p. 119.
1480. *Reid W.* An Attempt to Develop the Laws of Storms. London, 1838, p. 402 (*).
1481. *Reimann D.* Beobachtung von Kugelblitzen zu Hirschberg in Schleisien. (Summary.) Fortschr. Phys., **42**(3), 1886a, p. 654.
1482. *Reimann D.* Beobachtung von Kugelblitzen zu Hirschberg I. Schl. Meteorol. Zeit., **3**, 1886a, p. 510.
1483. *Reimann D.* Weitere Berichte uber Gewittererscheinungen im Schlesische Gebirge. Meteorol. Zeit., **4**, 1887, p. 164.
1484. *Reimann D.* Kugelblitz. Zeit. Angew. Meteorol., **13**, 1896, p. 25 (*).
1485. *Reimann D.* Kugelblitz. Zeit. Angew. Meteorol., **14**, 1897a, p. 167 (*).

1486. *Reimann D.* Kugelblitz. Zeit. Angew. Meteorol., **14**, 1897b, p. 263 (*).
1487. *Reimann D.* Ein vom wind Bewegter Blitz. Meteorol. Zeit., **22**, 1905, p. 360.
1488. *Reiners F.* Aus den Reisenberichten des kapt. R. Reiners von der Deutschen Bark 'Aeolus', 1. Kugelblitz. Ann. Hydro. Marit. Meteorol., **10**, 1882a, p. 582.
1489. *Reiners F.* Kugelblitz. (Summary.) Fortschr. Phys., **38**(3), 1882b, p. 544.
1490. *Reisch-Perkallen H.* Eigenthumliche Elektrische Erscheinung. Zeit. Angew. Meteorol., **13**, 1896, p. 143 (*).
1491. *Remscheid M.* Unavailable—Title Unknown. Umschau, **18**, 1907, p. 576 (*).
1492. *Rendorf O.* Atmosfernoye elektrichestvo. Leningrad, 1934 (*).
1493. *Renoue E.* Sur Quelques Particulaires de la Foudre. C. R. Hebd. Seances Acad. Sci., **83**, 1876, p. 1002.
1494. *Reynolds W.C.* Globular Lightning. Nature, **112**, 1923, p. 903.
1495. *Renolds W.C.* Globular Lightning. Nature, **125**, 1930, p. 413.
1496. *Reynolds W.C.* Charged Aerosols and Ball Lightning, Nature. **128**, 1931, p. 584.
1497. *Rhghi M.* La Foudre Globulaire. Le Cosmos, Juin, 1896a, p. 353 (*).
1498. *Rhghi M.* La Foudre Globulaire. Meteorologie, **44**, 1896b, p. 116.
1499. *Richter P.* Gewitter. Zeit. Angew. Meteorol., **29**, 1912, p. 233 (*).
1500. *Richter P.* Kugelblitz. Zeit. Angew. Meteorol., **30**, 1913, p. 21.
1501. *Richter P.* Kugelblitz. (Summary.) Fortschr. Phys., **70**(3), 1914a, p. 230.
1502. *Richter P.* Kugelblitz. Zeit. Angew. Meteorol., **31**, 1914b, p. 215.
1503. *Riecke E.* Unavailable—Title Unknown. Gotting. Nachr., 1895, p. 418.
1504. *Riggenbach-Burckhardt A.* Perlschnur-Blitz. Meteorol. Zeit., **14**, 1897, p. 62.
1505. *Righi A.* Sulle Scintille Costituite da Masse Luminose in Moto. Atti. D. Rom. Acad. Lincei, Rend., IV, 7, 1891a, p. 330 (*).
1506. *Righi A.* Unavailable—Title Unknown. La Lumiere Electrique, **13**, 1891b, p. 47.
1507. *Righi A.* Unavailable—Title Unknown. La Lumiere Electrique, **13**, 1891c, p. 501.
1508. *Righi A.* Unavailable—Title Unknown. La Lumiere Electrique, **13**, 1891d, p. 604.
1509. *Righi A.* Sopra una Specie di Scintille Elettriche nelle Quali la Luminosita si Propaga Gradatamente da un Elettrodo all Altro. Mem. R. Accad. Sci. Ist. Bologna, **1**, 1891e, p. 315 (*).
1510. *Righi A.* Ricerche Sperimentali Intorno a Certe Scintille

- Elettriche Costituite da Masse Luminose in Moto. Mem. R. Accad. Sci. Ist. Bologna, V, 1, 1891f, p. 679 (*).
1511. *Righi A.* Unavailable—Title Unknown. Mem. R. Accad. Sci. Ist. Bologna, 2, 1892, p. 379.
 1512. *Righi A.* Unavailable—Title Unknown. Mem. R. Accad. Sci. Ist. Bologna, 5, 1895, p. 445.
 1513. *Righi A.* Unavailable—Title Unknown. Eclairage Electrique, 1896a.
 1514. *Righi A.* Nachahung von Kugelblitzen. (Summary.) Fortschr. Phys., 52 (3), 1896b, p. 300.
 1515. *Righi A.* Nachahung von Kugelblitzen. Prometheus, 7, 1896c, p. 687.
 1516. *Righi A.* Nachahung von Kugelblitzen. Rev. Sci., 6 Juni 1896d (*).
 1517. *Rigollet C.* Meteorologie—l'Eclair en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., 19, 1905, p. 267.
 1518. *Rihanek M., M. Ladislav and J. Postranecky.* Unavailable—Title Unknown. Naklad. Ceskos. Adad. Ved., 1957, p. 90, 463.
 1519. *Ritchie D.J.* Red Lightning—are the Soviets Using Ball Lightning as an Anti-Missile Weapon?. Bendix Aviation Corp., Research Lab. Div., Data Sheet, Aug.–Sept. 1959a (*).
 1520. *Ritchie D.J.* Reds May Use Lightning as Weapon. Missiles and Rockets, August 24, 1959, 5, 1959b, p. 13.
 1521. *Ritchie D.J.* Ball Lightning—A Collection of Soviet Research in English Translation. Consultants Bureau, New York, 1961.
 1522. *Ritchie D.J.* Ball Lightning in Nature and in the Laboratory. Inst. Electr. Engr. J. (London), 9, 1963, p. 202.
 1523. *Ritchie D.J. and B.G. Southward,* editors. The Nature of Ball Lightning. Plenum Press, New York, 1964.
 1524. *Rive A.* De. Traite d'Electricite Theorique et Appliquee. Paris, 3, 1858, p. 197.
 1525. *Robert A.* Note sur un Phenomene Lumineux. Meteorologie, 57, 1909, p. 296.
 1526. *Roche M.* Observations sur la Foudre en Boule Tombee a Autun le 16 Juillet. C.R. Hebd. Seances. Acad. Sci., 139, 1904, p. 465.
 1527. *Roche M.* Wirkungen Eines Kugelblitzes. Jahrbuch der Astronomie und Geophysik, 16, 1905, p. 346.
 1528. *Rodney P.F. and D.R. Tompkins.* A Theory of Ball Lightning. Bull. Amer. Phys. Soc., 20, 1975, p. 659.
 1529. *Rodewald M.* Kugelblitzbeobachtungen. Zeit. Meteorol., 8, 1954, p. 27.
 1530. *Rood O.N.* On the Nature and Duration of the Discharge of a Leyden jar Connected with an Induction Coil. Amer. J. Sci., 48, 1869, p. 153.
 1531. *Rood O.N.* Observations on the Duration and Multiple

- Character of Flashes of Lightning. Amer. J. Sci. Arts, **105**, 1873, p. 163.
1532. *Rossmann M.* St. Elmsfeuer-Beobachtungen. Zeit. Angew. Meteorol., **44**, 1927, p. 262 (NBL).
1533. *Rossmann F.* Blitzbeobachtungen: Wolken- und Erdblitz, Linien und Perlschnur-Blitz. Meteorol. Zeit., **56**, 1939a, p. 194.
1534. *Rossmann F.* Blitz und Hagel (Über die Elektrische Natur des Gewitters). Meteorol. Zeit., **56**, 1939b, p. 372.
1535. *Rossmann F.* Über den Kugelblitz. Wetter und Klima, **2**, 1949, p. 75.
1536. *Rotch L.* Meteorologie—Eclair en Boule dans la Tour Eifel. Bull. Soc. Astron. Fr., **17**, 1903a, p. 483.
1537. *Rotch L.* Eclair en Boule Observe' a Paris. Ciel et Terre, **24**, 1903b, p. 544.
1538. *Rotch L.* Eclair en Boule Observe a Paris. Meteorologie, **51**, 1903, p. 205.
1539. *Roth F.* Beobachtung des Blitzes durch einen von Demselben Getroffenen. Meteorol. Zeit., **6**, 1889, p. 231.
1540. *Rousselot U.* Foudre en Boule Extraordinaire. Bull. Soc. Astron. Fr., **18**, 1904, p. 510.
1541. *Rozema M.* Foudre en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **65**, 1951, p. 55.
1542. *Rozzi N.* Foudre en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **25**, 1911, p. 260.
1543. *Rudski D.* Gewitter und Kugelblitz in Krakau. Meteorol. Zeit., **22**, 1905, p. 284.
1544. *Rumeker G. A. L.* Blitzphotographie. Meteorol. Zeit., **16**, 1899, p. 422.
1545. *Russell A.* Ball Lightning. Nature, **126**, 1930, p. 809.
1546. *Russell A.* Ball Lightning. Mon. Weather. Rev., **33**, 1905, p. 409.
1547. *Russell S. C.* Foudre en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **18**, 1904a, p. 509.
1548. *Russell S. C.* Ball Lightning. Meteorol. Mag., **39**, 1904b, p. 153.
1549. *Rutgers G. A. W.* Ein Kugelblitz. Phys. Blatter, **14**, 1958, p. 417.
1550. *Rutherford E. C.* The Thunderstorm of July 22nd, 1924 (at Working). Meteorol. Mag., **59**, 1925, p. 153.
1551. *Ryan G. M.* Foudre Globulaire. Le Cosmos, **32**, 1895a, p. 191 (*).
1552. *Ryan G. M.* Foudre Globulaire. Meteorologie, **43**, 1895b, p. 303.
1553. *Ryan G. M.* Note. Nature, **52**, 1895c, p. 394.
1554. *Ryan G. M.* Les Caprices de la Foudre. Foudre en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **11**, 1897a, p. 300.
1555. *Ryan G. M.* Unavailable—Title Unknown. Le Cosmos, **46**, 1897b, p. 95.
1556. *Sacc M.* Sur en Coup de Foudre qui a Frappe le Telegraphe

- Electrique entre Montelimart en Lyon. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **53**, 1861, p. 646.
1557. *Sagan C. and T. Page*, editors. UFO's a Scientific Debate. Cornell University Press, Ithaca, New York, 1972.
1558. *Salanave L.E.* Discussions. In Problems of Atmospheric and Space Electricity. S.C. Coroniti, ed. Elsevier, Amsterdam, 1965, p. 464.
1559. *Sauter F.* Ueber Kugelblitz. I. Theil: Theorie der Kugelblitze. (Summary.) Fortschr. Phys., **46**(3), 1890, p. 423.
1560. *Sauter F.* Ueber Kugelblitz, II. Theil: Beispiele von Kugelblitzen. (Summary.) Fortschr. Phys., **48**(3), 1892a, p. 367.
1561. *Sauter F.* Beispiele der Kugelblitze. Programme des Kgl. Real-Fymnasiums in Ulm zum Schlusse de Schuljahres (1891/1892), Ulm, 1892b, p. 20 (*).
1562. *Sauter F.* Ueber Kugelblitz, II. Theil: Beispiele von Kugelblitzen. Prometheus, **5**, 1892c, p. 481 (*).
1563. *Sauter F.* Der Kugelblitz. Jahrbuch der Astronomie und Geophysik, **4**, 1893, p. 314.
1564. *Sauter F.* Ueber Kugelblitze. Meteorol. Zeit., **12**, 1895, p. 241.
1565. *Sauter F.* Ueber Kugelblitz. Sammlung Gemeinverständlicher Wissenschaftlicher Vortrage, ser. 2, **9**, 1896, p. 121.
1566. *Sauter F.* Ueber Kugelblitz. (Summary.) Fortschr. Phys., **53**(3), 1897a, p. 313.
1567. *Sauter F.* Ueber Kugelblitz. Naturwiss. Rund., **12**, 1897b, p. 217 (*).
1568. *Sauter F.* Ueber Kugelblitz. Meteorologie, **46**, 1898, p. 101.
1569. *Scheminzky F. and F. Wolf.* Photographie eines Perlschnurbltzes. Sitzung. Akad. Wiss. Wien, Math.-Naturwiss. Klasse, IIA, 156 (1/2), 1948, p. 1.
1570. *Scheurer F.* Observations de Foudre Globulaire. La Meteorologie, **7**, 1931, p. 249 (*).
1571. *Schiodt F. von.* Kugelquet. (Summary.) Fortschr. Phys., **49**(3), 1893a, p. 384.
1572. *Schiodt F. von.* Kegelelynet. Tidsskrift for Physik Og Chemi, III, 2, 1893b, p. 242 (*).
1573. *Schloer H.* Unavailable—Title Unknown. Natur und Kultur., **45**, 1953, p. 242.
1574. *Schlohbohm K.A.* Blitzschlag und Kugelblitz. Meteorol. Rund., **14**, 1961, p. 93.
1575. *Schmauss A.* Perlschnurb Blitz. Phys. Zeit., **10**, 1909, p. 968.
1576. *Schmauss A.* Perlschnurb Blitz. Meteorol. Zeit., **27**, 1910, p. 83.
1577. *Schmauss A.* Randbermerkungen I. Meteorol. Zeit., **35**, 1918, p. 181.
1578. *Schmauss A.* Kugelblitz. Zeit. Angew. Meteorol., **57**, 1940, p. 238. (*).
1579. *Schmidt E.E.* Unavailable—Title Unknown. Lehbruch Meteorol., 1860, p. 781 (*).

1580. *Schmidt K.E.F.* Unavailable—Title Unknown. *Elektro. Zeit.*, **26**, 1905, p. 903.
1581. *Schneider E.* Tonnerre en Boule. *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **119**, 1894, p. 506.
1582. *Schneidermann K.* Blitzaufnahmen von Linien- und Kugelblitz. *Feuerwehr-Verbands-Zeitung*, **44**(1), 1934, p. 1.
1583. *Schneidermuhl M.* Beobachtung von Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **38**, 1921, p. 183.
1584. *Schonert H.* Auftreten eines Kugelblitzes in Heringsdorf. *Zeit. Meteorol.*, **17**, 1965, p. 61.
1585. *Schonland B.F.J.* The Flight of the Thunderbolts. *Oxford Univ. Press.*, London, 1950.
1586. *Schonland B.F.J.* The Lightning Discharge. *Handbuch der Physik*, Berlin, **22**, 1956, p. 576.
1587. *Schonland B.F.J.* Lightning and the Long Electric Spark. *Advancement of Science*, **19**, 1962a, p. 306.
1588. *Schonland B.F.J.* Lightning and the Long Electric Spark. *Nature*, **195**, 1962b, p. 880.
1589. *Schoute C.* The Term Fireball. *Meteorol. Mag.*, **61**, 1926, p. 238.
1590. *Schrade M. Von.* Auftreten eines Kugelblitzes in Heringsdorf. *Zeit. Meteorol.*, **17**, 1962, p. 61.
1591. *Schrammen M.* Foudre en Boule. *Ciel et Terre*, **11**, 1890, p. 348.
1592. *Schreiber D.* Beitrage zur Hageltheorie. *Meteorol. Zeit.*, **19**, 1901, p. 58.
1593. *Schroth H.* Unavailable—Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **57**, 1940, p. 306.
1594. *Schroth H.* Unavailable—Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **59**, 1942, p. 200.
1595. *Schiltze H.S.*, and *H. Reitz.* Kugelblitz. *Prometheus*, **18**, 1907, p. 416 (*).
1596. *Schumann G.A.* Unavailable—Title Unknown. *Prog. Gymn. Quedlinberg*, 1848, p. 28.
1597. *Schuster A.* L'Electricite Atmospherique. *Ciel et Terre*, **17**, 1896a, p. 318.
1598. *Schuster A.* L'Electricite Atmospherique. *Ciel et Terre*, **17**, 1896b, p. 441.
1599. *Schuster A.* L'Electricite Atmospherique. *Ciel et Terre*, **17**, 1896c, p. 462.
1600. *Schuster A.* Atmospheric Electricity. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **52**(3), 1896d, p. 286.
1601. *Schuster A.* Atmospharische Elektrizitat. *Meteorol. Zeit.*, **13**, 1896e, p. 215.
1602. *Schuster A.* Atmospheric Electricity. *Nature*, **53**, 1896f, p. 207.
1603. *Schuster A.* Atmospheric Electricity. *Naturwiss. Rund.*, **11**, 1896g, p. 133 (*).

1604. *Schuster A.* Atmospheric Electricity. Nat. Rund., **11**, 1896h, p. 145 (*).
1605. *Schwegler H.* Uber der Kugelblitz. Naturwiss. Rund., **4**, 1951, p. 169.
1606. *Scott E. K.* Unavailable—Title Unknown. Letter to Yorkshire Post, 20 Oct. 1923a.
1607. *Scott E. K.* Globular Lightning. Nature, **112**, 1923b, p. 760.
1608. *Scott J. R.* Photography and Ball Lightning. Weather, **10**, 1955, p. 98.
1609. *Scott M.* Newspaper Accounts from M. Michelski, Curious Rhenomenon During the Gale. In London Daily Papers, Oct. 12, 1877; Roy. Meteorol. Soc. Q.J., **4**, 1878a, p. 167.
1610. *Scott M.* Newspaper Accounts, from M. M. Michelski. Singular Phenomenon at Lower Cumber. In Londonderry Sentinel, Junel, 1878; Roy. Meteorol. Soc. Q.J., **4**, 1878b, p. 167.
1611. *Seigner R.* Perlschnurblitz. Wetter und Leben, **18**, 1966, p. 54.
1612. *Seliger H. H., J. B. Buck, W. G. Fastie and W. D. Mcelroy.* The Spectral Distribution of the Firefly Light. J. Gen. Physiology, **48**(1), 1964, p. 95 (NBL).
1613. *Seliger H. H. and R. A. Morton.* A Physical Approach to Bioluminescence. In Photophysiology. Vol. IV, Chap. 13, 1968, p. 253 (NBL).
1614. *Sequier M.* Globe de Feu. C.R. Hebd. Seans Acad. Sci., **34**, 1852, p. 871.
1615. *Sestier F.* De la Foudre, de ses Formes et de ses Effets. Paris, Balliere et Fils, **1**, 1866, p. 7 and 119 (*).
1616. *Seyboth R.* Ball Lightning at Sea. Scientific American, **86**, 1902, p. 36.
1617. *Шафранов В. Д.* О магнитогидродинамических равновесных конфигурациях. ЖЭТФ, т. 33, 1957, с. 710.
1618. *Shafranov V. D.* On Magnetohydrodynamical Equilibrium Configurations. in Ball Lightning. D. J. Ritchie, ed. Consultants Bureau, New York, 1961.
1619. *Шагин И.* Снимок шаровой молнии. Огонек, № 20, 1960, с. 34.
1620. *Shapiro A. R. and W. K. R. Watson.* Three Dimensional Containment of Charged Particles by Orthogonal Standing Waves. Phys. Rev., **131**, 1963, p. 495 (NBL).
1621. *Shapiro M. L.* Shedding Light on UFO's. Optical Spectra, **13**(4), 1979, p. 13.
1622. *Shaw N. and E. Austin.* Manual of Meteorology. Cambridge University Press, Vol. 1, 1926, p. 247 and Vol. 3, p. 393.
1623. *Shipley J. F.* Lightning and Its Symbols. Roy. Meteorol. Soc. Q.J., **67**, 1941, p. 135.
1624. *Shunaman F.* 12-Million Volts. Radio Electronics. 47(6), 1976, p. 32.

1625. *Sie N.* Unavailable—Title Unknown. *Le Cosmos*, **32**, 1895, p. 191.
1626. *Sieberg A.* Unavailable—Title Unknown. *Erdbebenkunde*, Jena, 1923 (*).
1627. *Silberg P. A.* On the Question of Ball Lightning. Internal Report, Raytheon Company, Waltham, Mass., 1961a.
1628. *Silberg P. A.* On the Question of Ball Lightning. *J. Appl. Phys.*, **32**, 1961b, p. 30.
1629. *Silberg P. A.* Ball Lightning and Plasmoids. *J. Geophys. Res.*, **67**, 1962, p. 4941.
1630. *Silberg P. A.* Investigation of the Generation and Propagation of High-Energy Spherical Plasmoids. Aeronautical Systems Division, USAF, ASD-Tech. Document, Report No. ASD-TDR-63-47, Oct. 1963.
1631. *Silberg P. A.* A Standing-Wave Discharge in Air. *J. Appl. Phys.*, **35**, 1964, p. 2264 (NBL).
1632. *Silberg P. A.* A Review of Ball Lightning. *In Problems of Atmospheric and Space Electricity*. S.C. Coroniti, ed. Elsevier, Amsterdam, 1965, p. 436.
1633. *Silberg P. A.* A Note on the Formation of the Fireball Plasma. *J. Appl. Phys.*, **49**(3), 1978, p. 1110.
1634. *Simon K. H.* Der Ratselhafte Kugelblitz. *Naturwiss. Rund.*, **16**, 1963, p. 450.
1635. *Simpson G. C.* Nature and Cause of Ball Lightning. *Mon. Weather Rev.*, **44**, 1916, p. 121.
1636. *Simpson G. C.* Thunderstorms and Globular Lightning. *Nature*, **112**, 1923, p. 727.
1637. *Simpson G. C.* Ball Lightning. *Nature*, **113**, 1924, p. 677.
1638. *Singer S.* The Unsolved Problem of Ball Lightning. *Nature*, **193**, 1963, p. 745.
1639. *Singer S.* Unsolved Problems of Ball Lightning. *In Problems of Atmospheric and Space Electricity*. S.C. Coroniti, ed. Elsevier, Amsterdam, 1965, p. 461.
1640. *Singer S.* Unknown Things in the Sky. *Astronautics and Aeronautics J.*, **6**(3), 1968, p. 12.
1641. *Singer S.* The Nature of Ball Lightning. Plenum Press, New York, 1971.
1642. *Singer S.* Ball Lightning. *In Lightning*. R.H. Golde, ed. Academic Press, **1**, 1977, p. 409.
1643. *Sinitsyn V. I.* Properties of a Low Pressure Spherical Discharge. *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **22**(5), 1977a, p. 576.
1644. *Синицын В. И.* О некоторых свойствах сферического разряда при пониженном давлении. *ЖТФ*, т. 47, 1977, с. 966.
1645. *Skowronek M.* Decharge Filiforme emise par une Pointe Fine Portee a Haut Tension Positive par Rapport a un Plan. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **250**, 1960, p. 1808 (NBL).

1646. *Smirnov B.M.* Analysis of the Nature of Ball Lightning. *Sov. Phys. Usp.*, **18**, 1975a, p. 636. Translation of *Usp. Fiz. Nauk.*, **116**, 1975, p. 731.
1647. *Смирнов Б.М.* Об анализе природы шаровой молнии. *Успехи физ. наук*, т. 116, 1975, с. 731.
1648. *Смирнов Б.М.* Возникновение шаровой молнии. *Докл. АН СССР*, т. 226, 1976, с. 806.
1649. *Smirnov B.M.* Formation of Ball Lightning. *Sov. Phys.-Dokl.*, **21**(2), 1976b, p. 89, Translation of *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, **26**, 1976, p. 806.
1650. *Smirnov B.M.* Ball-Lightning Model. *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **22**(4), 1977a, p. 488, English Translation of *Zh. Tekh. Fiz.*, **47**, 1977, p. 814.
1651. *Смирнов Б.М.* Процессы в шаровой молнии. *ЖТФ*, т. 47, 1977, с. 814.
1652. *Smith B.W.* Remarkable Form of Lightning. *Nature*, **18**, 1878, p. 302.
1653. *Smith P.* Singular Effect of Lightning. *J. Franklin Institute*, **70**, 1860, p. 54.
1654. *Smith W.F.* Ball Lightning. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **36**(3), 1880a, p. 360.
1655. *Smith W.F.* Ball Lightning. *Nature*, **22**, 1880b, p. 267.
1656. *Smith W.G.* Lightning. *Nature*, **30**, 1884, p. 241.
1657. *Smith-Gordon L.* Ball Lightning. *Meteorol. Mag.*, **57**, 1923, p. 336.
1658. *Snigier P.* Fusion Energy—Will Experiments in Ball Lightning Provide the Key? *Electronic Design News*, April 20, 1976, p. 17.
1659. *Snow-Harris W.* On the Nature of Thunderstorms. *J.W. Parker*, London, 1843, p. 36.
1660. *Soudbotine N. De.* Meteorologie—Cas Extraordinaire de Foudre en Boule. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **15**, 1901, p. 476.
1661. *Soudbotine N. De.* Cas de Foudre en Boule. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **16**, 1902, p. 117.
1662. *Soucaze A.* La Description des Effets Produits par un Coup de Foudre, a Campan, le 24 Juillet Dernier. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **99**, 1884a, p. 262.
1663. *Soucaze A.* Effets Produits par un Coup de Foudre a Campan le 24 Joullet. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **40**(3), 1884b, p. 656.
1664. *Sourdillon M.* Etude a la Chambre de Boys de L'Eclair dan l'Air et du Coup de Foudre a Cime Horizontal. *Ann. Geophysique*, **8**, 1952, p. 349.
1665. *Spitzer L. Jr.* Physics of Filly Ionized Gases. Interscience, New York, 1962 (NBL).
1666. *Sprague J.I.* Electricity. London, 1875 (*).
1667. *Stade H.* Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **38**, 1921, p. 314.

1668. *Стаханов И. П.* О природе шаровой молнии. ЖЭТФ, т. 18, 1973, с. 193.
1669. *Стаханов И. П.* Устойчивость шаровой молнии. ЖТФ, т. 44, 1974, с. 1373.
1670. *Стаханов И. П.* Кластерная плазма и излучение шаровой молнии, ЖТФ, т. 46, 1976, с. 82.
1671. *Standler R. B.* How to Report Ball Lightning. *Weatherwise*, **25**, 1972, p. 186.
1672. *Steadworthy M. A.* Les Mysteres de la Foudre. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **31**, 1917, p. 19, p 197 (NBL).
1673. *Steinheim M.* Coup de Tonnerre en Boule. *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **36**, 1853, p. 744.
1674. *Стекольников И. С.* Изучение молнии и грозозащита. М., Наука, 1955.
1675. *Стекольников И. С.* Физика молнии и грозозащита. Изд-во АН СССР, М.–Л., 1943.
1676. *Стекольников И. С.* Природа длинной искры. М.–Л., 1960 (*).
1677. *Stenhoff M.* Ball Lightning. *Nature*, **260**, 1976, p. 596.
1678. *Stokes G. G.* Letters to the Editor. *Nature*, **61**, 1900, p. 343.
1679. *Stolterfoth M. H.* Eclair en Reban Boucle. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **13**, 1899, p. 45.
1680. *Stranz H.* Unavailable–Title Unknown. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **57**, 1940, p. 306.
1681. *Stranz H.* Ein Frontgewitter mit Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **59**, 1942, p. 200 (*).
1682. *Strickland J.* Unavailable–Title Unknown. *English Mech.*, **2**, 1845, p. 125.
1683. *Stohr A.* Kugelblitz. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **68**(3), 1912a, p. 311.
1684. *Stohr A.* Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **29**, 1912b, p. 188 (*).
1685. *Stromeyer C. E.* Remarkable Lightning Flashes. *Nature*, **60**, 1899, p. 520.
1686. *Stuck E.* Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **14**, 1897, p. 214 (*).
1687. *Studer J.* Unavailable–Title Unknown. *Ann. Schweizer. Meteorol. Cent. Aust.*, **22**, 1885, Appendix 3 (*).
1688. *Stunder J.* Elektrische Erscheinungen am Santis 20. Juni 1885 Während Eines Heftigen Gewitters. *Jahrb. Schweizer Alpen-Club*, 1885/86 (*).
1689. *Stunder J.* Elektrische Erscheinungen am Santis 28. Juni 1885 Während Eines Heftigen Gewitters. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **42**(3), 1886a, p. 673.
1690. *Stunder J.* Elektrische Erscheinungen am Santis 28. Juni 1885 Während Eines Heftigen Gewitters. *Oesters. Tour. Zig.*, 1886b, p. 211 (*).

1691. *Stunder P.* Bemerkenswerthe Blitzschlage. Meteorol. Zeit., **5**, 1888, p. 158.
1692. *Stunder P.* Bemerkenswerthe Blitzschlage. Meteorologie, **37**, 1889, p. 167.
1693. *Subramaniam A.H.* Ball Lightning at Madras on 20 October 1962. Ind. J. Meteorol. and Geophys, **14**, 1962, p. 358.
1694. *Sullivan W.* Ball Lightning Studies. Weatherwise, **28**, 1975, p. 220.
1695. *Suring R.* Merkwurdige Blitzwirkung. Meteorol. Zeit., **31**, 1914, p. 90.
1696. *Sviatsky D.* Meteorologie—les Feux Saint-Elme en Russia. Bull. Soc. Astron. Fr., **15**, 1901, p. 476 (NBL).
1697. *Swain W.* Another Case of Ball Lightning. Roy. Astron. Soc. Canada, **27**, 1933, p. 254.
1698. *Swart C.D.* Rare Electrical Phenomenon at Sea. Monthly Weather Rev., **15**, 1887, p. 84 (*).
1699. *Swart C.D.* Rare Electrical Phenomenon at Sea. Amer. J. Meteorol., **4**, 1888, p. 98.
1700. *Swinhoe P.* Ball Lightning. J. Meteorol., **3**(31), 1978, p. 216.
1701. *Symons G.* Unavailable—Title Unknown. J. Soc. Tel. Engr. **1**, 1872, p. 376.
1702. *Symons M.* Discussions on Water Spouts and Globular Lightning. Roy. Meteorol. Soc. Q.J., **4**, 1878, p. 165.
1703. *Szpor S.* Eclair Globulaire, Eclair en Chapelet, Nouvelle Theorie. Acta Geophys. Pol., **25**(4), 1977, p. 327.
1704. *Tait C.* Fireballs at Sea. Scientific American, **73**, 1895, p. 405.
1705. *Tait J.B.* Bolbliksem te warnsveld op 28 November 1951. (Ball Lightning at Warnsveld on 28 November 1951). Hamel en Dampring, **50**(718), 1952, p. 134 (*).
1706. *Tait P.G.* Thunderstorms. Nature, **22**, 1880a, p. 339.
1707. *Tait P.G.* Thunderstorms. Nature, **22**, 1880b, p. 364.
1708. *Tait P.G.* Thunderstorms. Nature, **22**, 1880c, p. 408.
1709. *Tait P.G.* Thunderstorms. Nature, **22**, 1880d, p. 436.
1710. *Tait P.G.* Thunderstorms. Electrician, **13**, 1884, p. 114.
1711. *Tait P.G.* Thunderstorms. In Life and Scientific Work of Peter Guthrie Tait. By C.G. Knott. Cambridge University Press, Supplement, 1911, p. 312.
1712. *Taker L.J.* Flying Saucers and the USAF. Van Nostrand Publ., Princeton, N.J., 1960.
1713. *Talman C.F.* Ball Lightning. American Mercury, **26**, 1932, p. 69.
1714. *Tamura Y.* An Analysis of Electric Field after Lightning Discharge. J. Geomag. and Geoelect., **6**, 1954, p. 34.
1715. *Tanenbaum B.S.* Plasma Physics. McGraw-Hill, New York, Chapter 2, 1967 (NBL).
1716. *Tantor T.L.* Globular Discharge of Lightning. Roy. Astron. Soc. Canada J., **12**, 1913, p. 530.

1717. *Tardy M.* Eclairs en Boule. Le Cosmos. Aout, 1891a, p. 73 (*).
1718. *Tardy M.* Eclairs en Boule. Meteorologie, **39**, 1891b, p. 285.
1719. *Tardy M.* Eclairs en Boule. Meteorologie, **44**, 1896, p. 66.
1720. *Tastes M.De.* L'Orage du ler Fevrier 1884, A Tours' Meteorologie, **32**, 1884, p. 105.
1721. *Tastes M.De.* Das Gewitter. Amer. Meteorol. J., **2**, 1885a, p. 142.
1722. *Tastes M.De.* Das Gewitter vom 1 Februar 1884 in Tours. Meteorol. Zeit., **2**, 1885b, p. 114.
1723. *Taylor J.E.* Photography and Ball Lightning. Weather, **9**, 1954, p. 321.
1724. *Taylor W.D.* Ball Lightning in South Wales. Meteorol. Record, **4**, 1884, p. 4.
1725. *Teich M.* Eine Kugelblitzbeobachtung. Zeit. Meteorol., **9**, 1955, p. 379.
1726. *Teletov G.S.* Ball Lightning. From Priroda, No. 9, 1966, p. 84, in Foreign Science Bull., **2**, No. 12, 1966a, p. 53.
1727. *Teletov G.S.* Ball Lightning. From Priroda, No. 9, 1966, p. 84, in JPRS-39032, U.S. Dept. Commerce, Washington D.C., Dec. 1966b.
1728. *Телетов Г.С.* Шаровая молния. Природа, № 9, 1966, с. 84.
1729. *Terada T.* On Luminous Phenomena Accompanying Earthquakes. Tokyo Univ. Earth-Quake Res. Bull., **9**, 1931, p. 225.
1730. *Tesla N.* Unavailable—Title Unknown. Electrical Engineer (NY), **7**, 1891, p. 548 (NBL).
1731. *Tesla N.* The Transmission of Electrical Energy without Wires. Electrical World and Engineer, **35**, 1904, p. 429.
1732. *Tesla N.* In Nikola Tesla, Lectures—Patents—Articles. Nolit Publishing House, Kultura Press, Beograd, Yugoslavia, 1956, p. A-152.
1733. *Tesla N.* Nikola Tesla, Colorado Spring Notes, 1899–1900. Nikola Tesla Museum, Nolit, Beograd, Yugoslavia, 1978.
1734. *Tessan M.De.* Sur la Foudre en Boule. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **49**, 1859a, p. 189.
1735. *Tessan M.De.* Sur la Foudre en Boule. (Summary.) Fortschr. Phys., **15**, 1859b, p. 62.
1736. *Thate J.B.* Bolbliskem te warnveld op 28 november 1951. Hemel en Dampkring, **50**, 1952, p. 134 (*).
1737. *Theron H.* Les Caprices de la Foudre, Foudre en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **11**, 1897, p. 299.
1738. *Thompson D.* Explosion of a Fireball at Kamaron Island, Red Sea, Roy Meteorol. Soc. Q.J., **71**, 1945, p. 39.
1739. *Thompson E.* Atmospheric Electricity. Science, **30**, 1909, p. 857.
1740. *Thompson E.* Atmospheric Electricity. (Summary.) Fortschr. Phys., **66**(3), 1910, p. 334.
1741. *Thompson J.J.* On the Discharge of Electricity Through

- Exhausted Tubes without Electrodes. Phil. Mag., **32**, 1891, p. 320 and p. 444 (NBL).
1742. *Thompson W.* Discussion on Lightning Conductors. British Asso. Adv. Sci., **58**, 1888, p. 604.
1743. *Thornton W.M.* On Thunderbolts. (Summary.) Fortschr. Phys., **67**(3), 1911a, p. 342.
1744. *Thornton W.M.* Sur la Foudre Globulaire. J. Phys. Rad., Ser. 5, **1**, 1911b, p. 488.
1745. *Thornton W.M.* On Thunderbolts. Naturwiss. Rund., **26**, 1911c, p. 409 (*).
1746. *Thornton W.M.* On Thunderbolts. Phil. Mag., **6**(21), 1911d, p. 630.
1747. *Thornton W.M.* Uber Kugelblitz. (Summary.) Fortschr. Phys., **68**(3), 1912a, p. 317.
1748. *Thornton W.M.* Uber Kugelblitz. Meteorol. Zeit., **29**, 1912b, p. 39.
1749. *Thornton W.M.* Unavailable—Title Unknown, Le Cosmos, **18**, 1913, p. 142.
1750. *Thost E.* Ein Kugelblitz. Meteorol. Zeit., **48**, 1931, p. 269.
1751. *Тухомиров Е.И.* Шаровая молния и ее новая теория. Климат и погода, № 7, 1932, с. 109 (*).
1752. *Tissander G.* Eclair en Chapelet Observe Au-Dessus de Paris. L'Ocean Aerien, G. Mason, Paris, 1884, p. 151 (*).
1753. *Tissandier G.* Un Foudre en Mer. La Nature, Mars, 1887a, p. 254 (*).
1754. *Tissandier G.* Un Foudre en Mer. Meteorologie, **35**, 1887b, p. 221.
1755. *Tissandier G.* Sur le Cyclone de la Martinique du 18 Aout 1891. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **113**, 1891, p. 421.
1756. *Toepler M.* Geschichtete Entladung in Freier Luft. Ann. Physik, **63**, 1897, p. 109.
1757. *Toepler M.* Unavailable—Title Unknown. Abh. Naturwiss. Ges. Isis. Dresden, **1**, 1898a, p. 10.
1758. *Toepler M.* Ueber die Eigenschaften des Geschichteten Buschellichtbogens in Freier Luft. Ann. Physik, **66**, 1898b, p. 660 (NBL).
1759. *Toepler M.* Ueber Gleitende Entladung Langs Einer Glasoberflächen. Ann Physik, **66**, 1898c, p. 1061 (NBL).
1760. *Toepler M.* Verhalten des Buschellichtbogens in Magnetfelde. Ann. Physik, **69**, 1899, p. 680 (NBL).
1761. *Toepler M.* Ueber die Abhangigkeit des Charakters Elektrischer Dauerentladung in Atmospharischer Luft von der Dem Entladungsraume Kontinuuielich Zugefuhrten Elektrizitatsmenge, Nebst Einem Anhang zur Kenntnis der Kugelblitze. Ann. Physik, IV, 307, 1900a, p. 560.
1762. *Toepler M.* L'Eclair en Boule. Le Cosmos, Sept., 1900b, p. 287 (*).

1763. *Toepler M.* Zur Kenntniss der Kugelblitz. Meteorol. Zeit., **17**, 1900c, p. 543.
1764. *Toepler M.* Le Foudre en Boule, Ciel et Terre, **21**, 1900/01, p. 401.
1765. *Toepler M.* Ein Fluss von Diaphragmen auf Elektrische Dauerentladung Durch Luft von Atmospharendruck. Ann. Physik, IV, 6, 1901a, p. 339.
1766. *Toepler M.* Kugelblitz. Jahrbuch der Astronomie und Geophysik, **12**, 1901b, p. 409.
1767. *Toepler M.* Unavailable—Title Unknown. L'Eclairage Electrique, **26**, 1901c, p. 58.
1768. *Toepler M.* L'Eclair en Boule. Meteorologie, **49**, 1901d, p. 53.
1769. *Toepler M.* Fragen zur Erforschung der Kugelblitz. Meteorol. Zeit., **18**, 1901e, p. 533.
1770. *Toepler M.* Grenzpotentialdifferenzen den Elektrischen Entladung in Luft von Atmospharendruck. Ann. Physik, **7**, 1902, p. 477 (NBL).
1771. *Toepler M.* Über Funkenlagen und Anfangsspannungen in Luft von Atmospharendruck. Ann. Physik., **10**, 1903, p. 730.
1772. *Toepler M.* Unavailable—Title Unknown. Abh. Naturwiss. Ges. Isis, Dresden, **8**, 1916, p. 13.
1773. *Toepler M.* Zur Kenntnis der Gesetze der Buldung von Leuchtmassen (Kerlen) bei Perlschnurblitzen. Meteorol. Zeit., **34**, 1917a, p. 225.
1774. *Toepler M.* Unavailable—Title Unknown. Vebrands Mitt. D. Dresdner Elektrotechn. Vereins U.D. Dresdner Bezirksvereins Dtsch. Ing., 22 Feb. 1917b (*).
1775. *Toepler M.* Unavailable—Title Unknown. Mitt. Hermsdorf-Schomberg Isolatorem, **25**, 1926a, p. 18.
1776. *Toepler M.* Unavailable—Title Unknown. Mitt. Hermsdorf-Schomberg Isolatorem, **25**, 1926b, p. 743.
1777. *Toepler M.* Unavailable—Title Unknown. Zeit. Tech. Phys., **10**, 1929, p. 113.
1778. *Toepler M.* Bisher Unbekannte Form des Elmsfeuers. Naturwiss., **1**, 1944, p. 365 (*).
1779. *Toepler M.* Blitz. Naturwiss. Rund., **7**, 1954, p. 326.
1780. *Toepler M.* Kugelblitz, St. Elmfeuer. Phys. Blatter, **15**, 1959, p. 190.
1781. *Toepler M.* Kugelblitz und Elmsfeuer? Phys. Blatter, **16**, 1960, p. 348.
1782. *Tomlinson C.* On Some Effects of Lightning. Phil. Mag., **26**, 1888a, p. 114.
1783. *Tomlinson C.* Remarks on the Weathering of Rocks and Certain Electrical Phenomena, Suggested by Some Statements in a Popular Novel. Phil. Mag., **26**, 1888b, p. 475.
1784. *Tomlinson C.* On the Weathering of Rocks and Certain Electrical Phenomena. Phil. Mag., **26**, 1888c, p. 484.

1785. *Tomlinson C.* On Some Effects of Lightning. *Nature*, **40**, 1889, p. 366.
1786. *Tomlinson C.* The Thunderstorm. *Spek*, 1895, p. 151 (*).
1787. *Tompkins D.R.* and *P.F. Rodney*. Photographic Observations of Ball Lightning. Terren Corp., Unpublished Report, Refugio, Texas, USA, 78377, Oct. 1977.
1788. *Tompkins D.R.*, *P.F. Rodney* and *R. Gooding*. Photographic Observations of Ball Lightning. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, **20**, 1975, p. 659.
1789. *Tompkins D.R.*, *P.F. Rodney* and *R. Gooding*. Photographic Observations of Ball and Bead Lightning. Unpublished Report, University of Wyoming, Dept. of Physics and Astronomy, Laramie, Wioming, 1976.
1790. *Tonks L.* Electromagnetic Standing Waves and Ball Lightning. *Nature*, **187**, 1960, p. 1013.
1791. *Totch L.* Eclair en Boule Observe a Paris. *Ciel et Terre*, **24**, 1903, p. 544.
1792. *Touchet E.* Les Orages d'Aout et Septembre 1899. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **13**, 1899, p. 417.
1793. *Touchet E.* Eclair en Chapelet. *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **45**, 1931, p. 84.
1794. *Touchet E.* Observation d'un Eclair Globulaire (?). *Bull. Soc. Astron. Fr.*, **46**, 1932, p. 490.
1795. *Townsend G.F.* Unavailable—Title Unknown. *Electr. Rev.*, **26**, 1895a, p. 297.
1796. *Townsend G.F.* A Lightning Photograph. *Scientific American*, **72**, 1895b, p. 379.
1797. *Townsend J.S.* The Conductivity Produced in Gases by the Motion of Negatively Charged Ions. *Nature*, **63**, 1900, p. 340 (NBL).
1798. *Townsend J.S.* The Conductivity Produced in Gases by the Motion of Negatively Charged Ions. *Phil. Mag.*, **1**, 1901, p. 198 (NBL).
1799. *Tramborg C.* Kugelblitz auf See. *Ann. Hydro. Marit. Meteorol.*, **32**, 1904, p. 390.
1800. *Trapp E.* Kugel Blitzerscheinung in Wein. *Wetter und Legen*, **1**, 1949, p. 274.
1801. *Trecul A.* Un Effet de Foudre Pendant l'Orage du 18 Aout. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **83**, 1875, p. 478.
1802. *Trecul A.* Cas Remarquable de Tonnerre en Boule; Eclairs Dif-fus Voisins de la Surface du Sol. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **92**, 1881, p. 775.
1803. *Trecul A.* Cas Remarquable de Tonnerre en Boule; Eclairs Dif-fus Voisins de la Surface du Sol. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **37**(3), 1881b, p. 534.
1804. *Trecul A.* Cas Remarquable de Tonnerre en Boule: Eclairs Dif-fus Voisins de la Surface du Sol. *Mondes*, **54**, 1881c, p. 534 (*).

1805. *Trier O.* Kugelblitz-Aufnahmen. *Phys. Blatter*, **16**, 1960, p. 349.
1806. *Tripe J.W.* Remarks about Ball Lightning. In *Remarks on Some Practical Points Connected with the Construction of Lightning Conductors*. By R.J. Mann, Roy. Meteorol. Soc. Q.J., **2**, 1875, p. 431.
1807. *Tripe J.M.* Ball Lightning Seen During a Thunderstorm. On July 11th, 1874. *Electrician*, **19**, 1887a, p. 179.
1808. *Tripe J.W.* Ball Lightning Seen During a Thunderstorm On July 11th, 1874. *Meteorol. Mag.*, **22**, 1887b, p. 88.
1809. *Tripe J.W.* Ball Lightning Seen During a Thunderstorm on July 11th, 1874. *Amer. J. Meteorol.*, **4**, 1888, p. 149.
1810. *Trowbridge J.* Experimental Ball Lightning. *Astrophys. J.*, May 1907a (*).
1811. *Trowbridge J.* Ball Lightning. *Scientific American*, **96**, 1907b, p. 489.
1812. *Trowbridge J.* Lightning and Powerful Electric Discharges. *Mon. Weather Rev.*, **36**, 1908, p. 92.
1813. *Trowbridge J.* Experimental Ball Lightning. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **66**(3), 1910a, p. 358.
1814. *Trowbridge J.* Experimental Ball Lightning. *Knowledge Sci. News*, **7**, 1910b, p. 282.
1815. *Трубников Б.А.* Природа шаровой молнии. Докл. АН СССР, сер. геофиз., т. 203, 1972, с. 1296.
1816. *Чурвинский П.Н.* К теории шаровой молнии. *Метеорология и гидрология*, № 3, 1936, с. 78 (*).
1817. *Tschirwinskij P.N.* Zur Theorie der Kugelblitz. *Ann. Hydro. Marit. Meteorol.*, **67**, 1939, p. 109 (*).
1818. *Tuck J.L.* Ball Lightning—A Status Summary to 1971. Unpublished Report, LA-4847-MS, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico, USA, UC-34, Dec. 1971.
1819. *Turman B.N.* Detection of Lightning Thunderbolts. *J. Geophys. Res.*, **82**, 1977, p. 2566 (NBL).
1820. *Turman B.N., B.C. Edgar and L.N. Friesen.* Global Lightning Distribution at Dawn and Dusk for August–September 1977. Presented at the AGU Spring Meeting, April 17–21, 1978, MIAMI Beach. FLA, Abstract in *EOS–Transl. AGU*, **59**(4), 1978, p. 285 (NBL).
1821. *Turner P.* St. Elmo's Fire. *From Selections from the History of the World, the Natural History of G. Plinius Secundus*. Southern Illinois University Press, Carbondal, Ill., 1962, p. 34 (NBL).
1822. *Turpain M.A.* Curieux Effects d'un Coup de Foudre sur une Antenne Receptrice d'ones Electrique. *J. Phys. Rad.*, Ser. 5, **1**, 1911, p. 372.
1823. *Тверской П.Н.* Атмосферное электричество. М.–Л., 1949 (*).
1824. *Tweney C.F. and C.F. Shirshov*, eds. *Hutchinson's Technical*

- and Scientific Encyclopedia. MacMillan Co., New York, 1, 1936, p. 193.
1825. *Uman M. A.* Bead Lightning and the Pinch Effect. J. Atmos. Terr. Phys., **24**, 1962, p. 43.
 1826. *Uman M. A.* The Diameter of Lightning. J. Geophys. Res., **69**, 1964, p. 583 (NBL).
 1827. *Uman M. A.* Decaying Lightning Channels, Bead Lightning, and Ball Lightning Westinghouse Research Labs, Scientific Paper L7-9E4-HIVOL-P7, Pittsburgh, PA, USA Nov., 1967.
 1828. *Uman M. A.* Some Comments on Ball Lightning. J. Atmos. Terr. Phys., **30**, 1968a, p. 1245.
 1829. *Uman M. A.* Decaying Lightning Channels, Bead Lightning, and Ball Lightning. In Planetary Electrodynamics. S.C. Coroniti and J. Hughes, eds., Gordon and Breach, New York, Volume 2, 1968b, p. 199.
 1830. *Uman M. A.* Lightning. McGraw-Hill, New York, 1969, p. 240.
 1831. *Uman M. A.* and *C. W. Helstrom.* A Theory of Ball Lightning. J. Geophys. Res., **71**, 1966, p. 1975.
 1832. *Uman M. A.* and *R. E. Orville.* The Opacity of Lightning. J. Geophys. Res., **70**, 1965, p. 5491 (NBL).
 1833. *Uman M. A.* and *R. E. Voshall.* Time Interval between Lightning Strokes and the Initiation of Dart Leaders. J. Geophys. Res., **73**, 1963, p. 497 (NBL).
 1834. *Urbanitzky A. Von.* Blitz und Blitz-Schutzvorrichtungen. Elektrotechnische Bibliothek, 1886 (*).
 1835. *Urbanitzky A. Von.* Die Elektrizitat des Himmels und der Erde. Wien-Berlin, 1888, p. 78 (*).
 1836. *Vandepierre G. F.* Unavailable—Title Unknown. Elektrotech. **11**, 1924, p. 271.
 1837. *Vannesson G.* Unavailable—Title Unknown. L'Astronomie, **5**, 1886, p. 431 (*).
 1838. *Varley F.* Some Experiments on the Discharge of Electricity Through Rarified Media and the Atmosphere. Roy. Soc. Lond. Proc., **19**, 1871, p. 236.
 1839. *Varley F.* Unavailable—Title Unknown. J. Soc. Tel. Engr., **1**, 1872, p. 368.
 1840. *Vaughan O. H.* and *B. Vonnegut.* Luminous Electrical Phenomena in Huntsville, Alabama, Tornadoes. Unpublished. NADA/MSEC, 1976 (NBL).
 1841. *Verget M.* Unavailable—Title Unknown. La Nature, **18**, 1890, p. 203 and 303 (*).
 1842. *Viemeister P. E.* The Lightning Book. Doubleday and Co., New York, 1961, p. 130.
 1843. *Villemontee G. G. De.* Sur un Cas de Foudre Globulaire. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **155**, 1912a, p. 1567.
 1844. *Villemontee G. G. De.* Sur un Cas de Foudre Globulaire. Meteorologie, **60**, 1912b, p. 307.

1845. *Violle J.* Sur un Eclair en Boule. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **132**, 1901a, p. 1537.
1846. *Violle J.* La Foudre en Boule. Ciel et Terre, **22**, 1901b, p. 479.
1847. *Violle J.* Kugelblitz. Naturwiss. Rund., **16**, 1901c, p. 504.
1848. *Violle J.* Kugelblitzbeobachtung. Meteorol. Zeit., **19**, 1902, p. 335.
1849. *Virier M.* La Note. C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., **139**, 1904, p. 904.
1850. *Visser S.W.* Twee Blikseballen Bij Laren. Hamel en Dampkring, **55**, 1957a, p. 45 (*).
1851. *Visser S.W.* Unavailable—Title Unknown. Himmel und Erde, **55**, 1957b, p. 54.
1852. *Visser S.W.* Some Remarks on Lightning Flashes and Ball Lightning. Meteorol. Mag., **86**, 1957c, p. 344.
1853. *Vlasov A.A.* Unavailable—Title Unknown. Sci. SINICA, **8**, 1959, p. 266.
1854. *Vlasov A.A.* and *M.A. Yakovlev.* Interaction between Ions Through an Intermediate System (Neutral Gas) and the Problem of the Existence of a Self Maintaining Swarm of Particles (Ball Lightning). Vestn. Mosk. Univ. Fiz. Astron. (USSR), **16**, No. 3, 1975, p. 332 (*).
1855. *Vogel M.* Beobachtung eines Kugelblitzes. Zeit. Angew. Meteorol., **58**, 1941, p. 124 (*).
1856. *Войцеховский Б.В., Войцеховский Б.Б.* Природа шаровой молнии. Докл. АН СССР, сер. физ. и мат., т. 218, 1974, с. 77.
1857. *Voitsekhovskii B.V.* and *B.B. Voitsekhovskii.* The Nature of Ball Lightning. Sov. Phys.—Dokl., **19**, 1975, p. 580, English Translation of Akad. Nauk. SSSR Dokl. Mat. Fiz., **218**, 1974, p. 77.
1858. *Voitsekhovskii B.V.* and *B.B. Voitsekhovskii.* Elektromekhanicheskie efekty v sharovoi molnii. Akad. Nauk SSSR, Sibirskoe otdelenie, Izvestiia, Seria Tekhnicheskikh Nauk., Feb. 1976 (*).
1859. *Voller C.R.* Unavailable—Title Unknown. Elektro Zeit., **9**, 1888, p. 473.
1860. *Volmer C.R.* Ein Kugelblitz in Paderborn. (Summary.) Fortschr. Phys., **52**(3), 1896a, p. 298.
1861. *Volmer C.R.* Unavailable—Title Unknown. Zeit. Angew. Meteorol., **13**, 1896b, p. 185.
1862. *Volmer C.R.* Kugelblitz. Meteorol. Zeit., **14**, 1897, p. 34.
1863. *Vonnegut B.* Electrical Theory of Tornadoes. J. Geophys. Res., **65**, 1960, p. 203 (NBL).
1864. *Vonnegut B.* and *J.R. Weyer.* Luminous Phenomenon in Nocturnal Tornadoes. Science, **153**, 1965, p. 1213 (NBL).
1865. *Vonnegut B., C.B. Moore* and *C.K. Harris.* Stabilization of

- a High Voltage Discharge by a Vortex. *J. Meteorol.* (Now *J. Atmos. Phys.*), **14**, 1960, p. 468 (NBL).
1866. *Wagner A.* Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **56**, 1939, p. 350.
1867. *Wagner C. F.* and *G. C. McCann.* Unavailable—Title Unknown. *Electr. Endr.*, **60**, 1941, p. 374.
1868. *Wagner G. A.* Optical and Acoustic Detection of Ball Lightning. *Nature*, **232**, 1971, p. 187.
1869. *Wainhouse W.* and *R. Pitcairn.* Account of the Effects of Lightning at Steeple Ashton and Holt, in the County of Wilts on the 20th of June 1772, Contained in Several Letters. *Roy. Soc. Lond. Phil. Trans.*, **63**, 1773, p. 234.
1870. *Walter B.* Zur Erklärung der Wolfschen Blitzphotographie. *Ann. Hydro. Marit. Meteorol.*, **30**, 1902, p. 579.
1871. *Walter B.* Über die Wolffsche Blitzphotographie. *Ann. Hydro. Marit. Meteorol.*, **31**, 1903a, p. 65.
1872. *Walter B.* Über die Entstehungsweise der Blitzen. *Ann. Physik*, **10**, 1903b, p. 393.
1873. *Walter B.* Unavailable—Title Unknown. *Jahr. Hamburg—Wiss. Ansl.*, **20**, 1903c.
1874. *Walter B.* Unavailable—Title Unknown. *Handwerk-Buch der Naturwissenschaften*, 1909a (*).
1875. *Walter B.* Über Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **26**, 1909b, p. 217.
1876. *Walter B.* Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **28**, 1911, p. 582.
1877. *Walter B.* Das Wesen der Kugelblitze. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **71**(3), 1915a, p. 250.
1878. *Walter B.* Das Wesen der Kugelblitze. *Prometheus*. **26**, 1915b, p. 408 (*).
1879. *Walter B.* Erdball und Weltall. *H. Bermuhler*, Berlin-Lichterfelde, 1928 (*).
1880. *Walter B.* Über die Suringjche Blitzaufnahme. Sowie über eine neue, Vermeintliche Kugelblitz-Aufnahmen. *Phys. Zeit.*, **30**, 1929, p. 26.
1881. *Wartmann A.* La Foudre Globulaire. *La Nature*, March, 1888a, p. 226.
1882. *Wartmann A.* Coup de Foudre en Boule. *Le Cosmos*, Fevrier 1888b, p. 279 (*).
1883. *Wartmann A.* Ueber Einem Kugelblitz. *Arch. Sci. Phys. Natur.*, **21**(1), 1889a, p. 75 (*).
1884. *Wartmann A.* Ueber einen Kugelblitz. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **45**(3), 1889b, p. 506.
1885. *Wartmann A.* Ueber einen Kugelblitz. *La Nature*, **8**(823), 1889c, p. 226 (*).
1886. *Wartmann A.* Coup de Foudre en Boule. *Meteorologie*, **37**, 1889d, p. 102.
1887. *Wartmann A.* La Foudre Globulaire. *Meteorologie*, **37**, 1889e, p. 148.

1888. *Wartmann A.* Uber Einen Kugelblitz. Meteorol. Zeit., **6**, 1889f, p. 119.
1889. *Wartmann A.* Kugelblitz. Zeit. Angew. Meteorol., **6**, 1889g, p. 90.
1890. *Wartmann A.* Foudre en Boule. Bull. Soc. Astron. Fr., **11**, 1897, p. 29.
1891. *Wasse J.* Two Letters on the Effects of Lightning. Roy. Soc. Lond. Phil. Trans., **33**, 1725, p. 366.
1892. *Watkins D. C., J. D. Cobine and B. Vonnegut.* Electric Discharges Inside Tornadoes. Science, **199**(4325), 1978, p. 171 (NBL).
1893. *Watson W.* A Letter to the Royal Society Concerning the Electrical Experiments in England on Thunder Clouds. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., **47**, 1752a, p. 565 (NBL).
1894. *Watson W.* An Account of Mr. Benjamin Franklin's Treatise, Lately Published, Intituled, Experiments and Observations on Electricity, Made at Philadelphia in America. Roy. Soc. Lond. Phil. Trans., **47**, 1752b, p. 202 (NBL).
1895. *Watson W.* An Answer to Dr. Lining's Query Relating to the Death of Professor Richman. Roy. Soc. Lond. Phil. Trans., **48**, 1754, p. 765.
1896. *Watson W. K. R.* A Theory of Ball Lightning Formation. Nature, **185**, 1960, p. 449.
1897. *Watt A. D.* Characteristics of Atmospheric Noise from 1 to 100 KC. Proc. IRE, **45**, 1957, p. 787.
1898. *Waye B. E.* Globe Lightning. Nature, **155**, 1945, p. 752.
1899. *Webb S.* Letters to the Editor. Nature, **61**, 1900, p. 343.
1900. *Webber H.* A Case of Globular Lightning. J. Roy. Astro. Soc. Canada, **1**, 1907, p. 44.
1901. *Weber L.* Unavailable—Title Unknown. Schr. Nat. Ver. Sch. Holst., **2**, 1879, p. 28.
1902. *Weber L.* Unavailable—Title Unknown. Schr. Nat. Ver. Sch. Holst., **3**, 1880, p. 107.
1903. *Weber L.* Unavailable—Title Unknown. Schr. Nat. Ver. Sch. Holst., **4**, 1881a, p. 48.
1904. *Weber L.* Unavailable—Title Unknown. Schr. Nat. Ver. Sch. Holst., **4**, 1881b, p. 82.
1905. *Weber L.* Unavailable—Title Unknown. Schr. Nat. Ver. Sch. Holst., **4**, 1882, p. 105.
1906. *Weber L.* Unavailable—Title Unknown. Schr. Nat. Ver. Sch. Holst., **5**, 1883a, p. 27.
1907. *Weber L.* Unavailable—Title Unknown. Schr. Nat. Ver. Sch. Holst., **5**, 1883b, p. 41.
1908. *Weber L.* Unavailable—Title Unknown. Schr. Nat. Ver. Sch. Holst., **5**, 1883c, p. 52.
1909. *Weber L.* Ein Merkwürdiger Blitzschlag zu Ribnitz am 30. Juli 1884. Meteorol. Zeit., **1**, 1884, p. 405.

1910. *Weber L.* Ueber den Gegenwertigen stand der Kugelblitz-Frage. *Amer. Meteorol. J.*, **2**, 1885a, p. 142.
1911. *Weber L.* Ueber den Gegenwertigen stand der Kugelblitzfrage. *Electr. Zeit.*, **6**, 1885b, p. 401 (*).
1912. *Weber L.* Ueber den Gegenwertigen stand der Kugelblitzfrage. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **41**(3), 1885c, p. 652.
1913. *Weber L.* Ueber den Gegenwertigen stand der Kugelblitzfrage. *GAEA*, **10**, 1885d. (*).
1914. *Weber L.* Ueber den Gegenwertigen stand der Kugelblitz-Frage. *Meteorol. Zeit.*, **2**, 1885e, p. 118.
1915. *Weber L.* Beobachtung über Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **13**, 1896, p. 36 (*).
1916. *Weber L.* Kugelblitze. *Meteorol. Zeit.*, **28**, 1911, p. 582.
1917. *Weber L.* Kugelblitze. *Meteorol. Zeit.*, **32**, 1915, p. 22.
1918. *Weekes W.H.* Ball Lightning. *Ann. Elect. Magnet. Chem. Guard. Expr. Sci.*, **7**, 1841, p. 243.
1919. *Wegener A.* Literaturbericht; Brand. W.: Der Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **40**, 1923, p. 381.
1920. *Welker P.A.* Electric Storm on Mount Elbert, Colorado. *Science*, **2**(36), 1895, p. 304.
1921. *Welker P.A.* Eine Elektrische Erscheinung auf Mount Elbert. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **13**, 1896, p. 153 (*).
1922. *Wendt O.* Flächenblitz oder Kugelblitz. (Summary.) *Fortschr. Phys.*, **62**(3), 1906a, p. 287.
1923. *Wendt O.* Flächenblitz oder Kugelblitz. *Zeit. Angew. Meteorol.*, **23**, 1906b, p. 41 (*).
1924. *Westpal W.* Beobachtung eines Kugelblitzes. *Naturwiss.*, **19**, 1931, p. 19.
1925. *Westphal W.* Photographierte Blitz. *Phys. Blatter*, **14**, 1958, p. 573.
1926. *Whipple F.J.W.* Ball Lightning Seen at St. John's Wood. *Meteorol. Zeit.*, **56**, 1921, p. 195.
1927. *White E.H., E. Rapaport, H.H. Seliger and T.A. Hopkins.* The Chema- and Bioluminescence of Firefly Luciferin: an Efficient Production of Electrically Excited States. *Bioorganic Chem.*, **1**(1/2), 1971, p. 92 (NBL).
1928. *Wilkinson J.* An Example of Ball Lightning. *Roy. Astron. Soc. Canada J.*, **25**, 1931, p. 322.
1929. *Wilson C.T.R.* A Theory of Thundercloud Electricity. *Roy. Soc. Lond. Proc.*, **236**, 1956, p. 297.
1930. *Wilson J.G.* St. Elmo's Fire. *Marine Observer*, **24**, 1954, p. 10 (NBL).
1931. *Wilson M.* Title Unknown—Unavailable. *J. Roy. Geogr. Soc.*, **35**, 1865 (*).
1932. *Wimbush B.S.* Ball Lightning. *Roy. Astron. Soc. Canada J.*, **18**, 1924, p. 282.

1933. *Winchester G.* A Particular Lightning Phenomenon. *Science*, **70**, 1929, p. 501.
1934. *Wirtz C.* Beobachtung einer Kugelblitzartigen Erscheinung in Kiel. *Ann. Hydro. Marit. Meteorol.*, **48**, 1920, p. 234.
1935. *Wislicenus G.* Ueber Sanct-Elmsfeuer und Kugelblitze auf Hoher See. (Summary.) *Fortsch. Phys.*, **50**(3), 1894a, p. 422.
1936. *Wislicenus G.* Ueber Sanct-Elmsfeuer und Kugelblitze auf Hoher See. *Prometheus*, **6**, 1894b, p. 36 (*).
1937. *Wittmann A.* In Support of a Physical Explanation of Ball Lightning. *Nature*, **232**, 1971, p. 625.
1938. *Wittmann A.* Gibt es Kugelblitz? *Umschau Wiss. Tech.*, **76**(16), 1976, p. 516.
1939. *Wojskowy M.* Untitled Translation. *From Przegląd Lotniczy*, No. 12, 1966, p. 12, in *Foreign Science Bull.*, **2**, No. 4, Appendix 11, 1966, p. 52.
1940. *Wolf F.* Das Gewitter und seine Entladungsformen. I. Teil: Gewitterentstehung und Linienblitz. *Naturwiss.*, **31**(7/8), 1943a, p. 73.
1941. *Wolf F.* Das Gewitter und Seine Entladungsformen. II. Teil: Kugelblitze und Perlschnurblitze. *Naturwiss.*, **31** 1943b, p. 215.
1942. *Wolf F.* Interessante Aufnahme eines Kugelblitzes. *Naturwiss.*, **43**, 1956a, p. 415.
1943. *Wolf F.* Interessante Aufnahme eines Kugelblitzes. *Orion*, **4**, 1956b, p. 589.
1944. *Wolf F.* Photographierte Blitz. *Phys. Blatter*, **14**, 1958, p. 573.
1945. *Wolf K.* Das Wesen der Kugelblitz. *Meteorol. Zeit.*, **32**, 1915a, p. 416.
1946. *Wolf K.* Das Wesen der Kugelblitz. *Prometheus*, **26**, 1915b, p. 229 (*).
1947. *Wolf K.* Das Wesen der Kugelblitze (eine Entgegnung). *Prometheus*, **26**, 1915c, p. 586 (*).
1948. *Wolf K.* The Nature of Ball Lightning. *Sci. American Suppl.*, **80**, 1915d, p. 54.
1949. *Wolff C.* Vernunftige Gedanken von den Wirkungen der Natur. Halle, 1725. p. 471 (*).
1950. *Wood R.W.* Ball Lightning. *Nature*, **126**, 1930a, p. 723.
1951. *Wood R.W.* Plasmoidal High Frequency Oscillating Discharges in Non-Conducting Vacua. *Phys. Rev.*, **35**, 1930b, p. 673.
1952. *Wooding E.R.* Ball Lightning. *Nature*, **199**, 1963, p. 272.
1953. *Wooding E.R.* Laser Analogue to Ball Lightning. *Nature*, **239**, 1972, p. 394.
1954. *Wooding E.R.* Ball Lightning in Smethwick. *Nature*, **262**, 1976, p. 379.
1955. *Woor R.W.* Plasmoidal High Frequency Oscillating Discharges in Non-Conducting Vacua. *Phys. Rev.*, **35**, 1930, p. 673 (NBL)
1956. *Wordingham C.H.* Globe Lightning. *Electrician*, **22**, 1888, p. 56.

1957. *Workman E.J. and R.E. Holtzer.* An Anomalous Lightning Photograph. *Phys. Rev.*, **51**, 1937, p. 149.
1958. *Worlock R.M.* A Proposal for Laboratory Studies of Ball Lightning and Charged Particle Containment. Unpublished, Electro-Optical Systems, Inc., Pasadena, CA, October, 1960.
1959. *Wormell W.T.* Symons Memorial Lecture. *Roy. Meteorol. Soc. Q.J.*, **79**, 1953, p. 474.
1960. *Yaffee M.* Air Transport Lightning Strikes Studies. *Aviation Week and Space Technology*, Dec. 11, 1972, p. 34.
1961. *Yankov V.V.* Behavior of a Conducting Gaseous Sphere in a Quasi-Stationary Electromagnetic Field. *Zh. Ehsp. Teor. Fiz.*, **36**, 1959, p. 560. English Translation in *Ball Lightning*. D.J. Ritchie, ed. Consultants Bureau, New York, 1961a.
1962. *Yankov V.V.* Dynamics of a Conducting Gaseous Sphere in a Quasi-Stationary Electromagnetic Field. *Zh. Eksp.-Teor. Fiz.*, **37**, 1959, p. 224, English Translation in *Ball Lightning*. D.J. Ritchie, ed. Consultants Bureau, New York, 1961b.
1963. *Yates T.P.* Ball Lightning. *Mon. Weather Rev.*, **26**, 1898, p. 565.
1964. *Yeliseyev A.* *Vozniknoveniye nauki ob elektrichestve v Rossii.* Moscow, 1960 (*).
1965. *Young C.J.* Lightning Freaks at Peterborough. The Peterborough Citizen, London, 25 Sept. 1934.
1966. *Young G.A.* A Lightning Strike of an Underwater Explosion Plume. NOLTR-61-43, Naval Surface Weapons Center, White OAK Lab, Silver Spring, MD., 1962.
1967. *Юрьев А.* Секрет шаровой молнии. *Комсомольская правда*, № 3, 1960.
1968. *Зайцев А.В.* Новая теория шаровой молнии. *ЖТФ*, т.42, 1972, с. 213.
1969. *Залесский Ю.М.* Наэлектризованный снег и шаровая молния. *Природа*, № 10, 1958, с. 114.
1970. *Zapletal C.* Kugelblitz Schlins-Jupident. *Wetter und Leben*, **22**, 1970, p. 193.
1971. *Zenger C.V.* Les Figures Electriques Dessinees par l'Eclair. *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, **109**, 1889, p. 294.
1972. *Zimmerman P.D.* Energy Content of Covington's Lightning Ball. *Nature*, **228**, 1970, p. 853.
1973. *Zoege-von-Manteuffel P.* Eine Blitzaufnahme. *Umschau Wiss. Tech.*, **42**, 1938, p. 587.
1974. *Zoege-von-Manteuffel P.* Eine Blitzaufnahme. *Orion*, **4**, 1955, p. 589.
1975. *Zschokke W.* Ein Kugelblitzphotographie? *Prometheus*, **14**, 1903a, p. 234 (*).
1976. *Zschokke W.* Ein Kugelblitzphotographie? *Prometheus*, **14**, 1903b, p. 691 (*).
1977. *Zuccher M. and M. Margolle.* Trombes et Cyclones. Hachetti et Cie, Paris, 1876, p. 101.
1978. *Zurcher M.* Coup de Foudre. *La Nature*, Sept. 1889a, p. 263 (*).
1979. *Zurcher M.* Coup de Foudre. *Meteorologie*, **37**, 1889b, p. 261.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ПЕРЕВОДУ	5
ПРЕДИСЛОВИЕ	8
1. ВВЕДЕНИЕ	13
2. ЧЕТОЧНАЯ МОЛНИЯ	22
3. ШАРОВАЯ МОЛНИЯ	41
4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ШАРОВОЙ МОЛНИИ, ВЫВОДИМЫЕ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ	51
5. ФОТОГРАФИИ ШАРОВОЙ МОЛНИИ	84
6. ОСНОВНЫЕ ВОЗРАЖЕНИЯ	131
7. ШАРОВАЯ МОЛНИЯ В ЛАБОРАТОРИИ	146
8. БИБЛИОГРАФИЯ	197

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и др. просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., дом 2, изд-во «Мир».

Джеймс Дейл Барри

ШАРОВАЯ МОЛНИЯ И ЧЕТОЧНАЯ МОЛНИЯ

Научные редакторы Л. В. Самсоненко,
Э. А. Медушевская

Мл. научный редактор Н. В. Корниенко

Художник В. Н. Конюхов

Художественный редактор М. Н. Кузьмина

Технический редактор З. И. Резник

Корректор Т. П. Пашковская

ИБ № 3535

Сдано в набор 28.01.83.

Подписано к печати 18.07.83.

Формат 60 × 90¹/₁₆.

Бумага офсетная № 1.

Гарнитура таймс. Печать офсетная.

Объем 9 бум. л.

Усл. печ. л. 18. Усл. кр. отт. 36,47.

Уч.-изд. л. 19,63. Изд. № 27/2424.

Тираж 6000 экз. Зак. 112. Цена 3 р. 30 к.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

Москва, 1-й Рижский пер., 2.

Можайский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. г. Можайск, ул. Мира, 93.

МОСКОВСКИЙ ДОМ КНИГИ

предлагает литературу издательства «Мир»
по астрофизике и геофизике

Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы: Пер. с англ.—М.: Мир, 1980.—304 стр.—2 р. 60 к.

Основная задача книги—рассмотрение связи вариаций геомагнитного поля на поверхности земли с процессами в магнитосфере и околоземном космическом пространстве и интерпретация на этой основе данных слежения за состоянием магнитосферы и изменениями параметров солнечного ветра.

Содержание

Воздействие солнечного ветра на геомагнитное поле
Влияние межпланетного поля на поступление энергии в магнитосферу
Взрыв в хвосте магнитосферы
Динамическая структура внутренней магнитосферы
Магнитосфера как изолятор
Литература

Книга рассчитана на специалистов: геофизиков, физиков, астрономов. Однако простота изложения и подробное рассмотрение физической сущности позволяет ее рекомендовать также студентам и аспирантам, специализирующимся в области солнечно-земной физики и смежных дисциплин

Заказывайте указанную книгу по адресу: 121019 Москва, проспект Калинина, 26, п/я 42, магазин № 200 «Московский дом книги».

Книга будет выслана наложенным платежом.

ШАРОВАЯ МОЛНИЯ И ЧЕТОЧНАЯ МОЛНИЯ

В заключение, основываясь на существующих сегодня данных и фактах, я выражаю уверенность в том, что явления атмосферного свечения, называемые "шаровая молния" и "четочная молния", реально существуют. Я считаю, что как лабораторные эксперименты, так и наблюдения в контролируемых условиях в воздухе подтверждают возможность возникновения самоподдерживающихся светящихся долгоживущих образований в воздухе или в воздухе с примесями, обладающих известными из описаний очевидцев характеристиками шаровой молнии и четочной молнии. Я считаю, что несколько фотографий естественных и искусственных атмосферных электрических явлений были правильно интерпретированы и представляют надежное доказательство существования явлений шаровой молнии и четочной молнии.

Дж. Д. Барри

