

Академия наук СССР

ISSN 0042-1294

Успехи физических наук

Журнал основан в 1918 г.

том 160 выпуск 4 апрель 1990

Успехи физических наук

УФН

том **160** выпуск **4**
апрель
1990

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

551.594.2

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО СОЗДАНИЮ ШАРОВОЙ МОЛНИИ
ПРИ ПОМОЩИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА
И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ФРАКТАЛЬНЫЕ КЛАСТЕРЫ**

К. Л. Корум, Дж. Ф. Корум

(«Cogum and Associates, Inc.», Уиндзор, шт. Огайо,
«Battelle Columbus Division», Колумбус, шт. Огайо, США)

(Доклад, присланный на 3-й Всесоюзный семинар
по шаровой молнии. Москва, ноябрь — декабрь 1989 г.)

«Не только глубокие размышления и интуиция требуются ученому, но также смелое воображение».

П. Л. Капица (17 мая 1966 г.)

Мы сообщаем об успешном экспериментальном создании шаровой молнии в открытом воздухе. Описание этого процесса было обнаружено в недавно опубликованных лабораторных тетрадях Н. Теслы за 1899 г. Представлен фотографический материал и проводится обсуждение экспериментальной техники. На основе анализа работ Б. М. Смирнова по аэрогельной (фрактальной) модели шаровой молнии сделан вывод, что его теоретическая модель дает описание, согласующееся с видом огненных шаров, которые создавал Тесла и которые мы наблюдали.

Введение. Точно следуя высокочастотной методике Николы Теслы, описание которой было обнаружено в его записях, мы в августе 1988 г. начали создавать в воздухе электрические огненные шары диаметром ~ 2 см [1—5]. Работа Теслы была выполнена 89 годами ранее, летом 1899 г. и, как следует из открытой литературы, никогда не была повторена или проверена. Хотя создание огненных шаров повторялось в лаборатории, зафиксировано большим числом фотографий [6] и видеозаписями, скрытая за их образованием и развитием физика была для нас в то время недостаточно ясна. Имея высоковольтную высокочастотную методику создания этого явления по желанию, мы не могли четко объяснить природу образования и эволюции огненных шаров, полученных этим способом.

В детальных, замечательных наблюдениях Теслы в 1899 г. [7] было выдвинуто несколько гипотез о природе огненных шаров, но мы ощущали, что нужно нечто большее для ясного понимания явления, чем представления физики столетней давности. Любой прогресс в технике получения огненных шаров требует понимания, выраженного на языке самой современной физики. Несмотря на то, что мы были хорошо зна-

© К. Л. Корум, Дж. Ф. Корум, Ph. D., 1989

© Перевод на русский язык,

Академия наук СССР,

«Успехи физических наук», 1990

комы с трудами Капицы и большим числом публикаций по шаровой молнии западных ученых за последние 150 лет, тем не менее мы не использовали возможность проанализировать последние достижения советских исследователей.

Последние успехи советских ученых. В июне этого года нам стало известно о значительных успехах в создании теории шаровой молнии, результаты которой были опубликованы в советской научной печати. Большая часть последних советских работ содержит такое же число неудовлетворительных и странных абстрактных теоретизирований по шаровой молнии, как и работы, появляющиеся в западной научной литературе. Однако среди них есть ряд интересных публикаций, которые, как мы думаем, описывают метод Теслы для создания шаровой молнии с достаточной определенностью. Мы поместили их в список литературы под номерами [8—28]. Этот прогресс был достигнут в первую очередь благодаря усилиям Б. М. Смирнова и его коллег из Института теплофизики СО АН СССР в Новосибирске. С самого начала Смирнов осознал тщетность всех моделей шаровой молнии, которые не включали в себя внутренний источник химической энергии. Он также ясно представлял какую роль могут играть аэрозоли, аэрогели, нитевидные структуры, плазмохимия и горение частиц пыли. С появлением понятия фрактала и физики агрегации, ограниченной диффузией [29—36], Смирнов смог с конца 70-х и до середины 80-х годов сильно развить аэрогельную теоретическую модель, в которой активное вещество шаровой молнии представляет собой электрически заряженную структуру, состоящую из переплетенных субмикронных нитей, т. е. пористый фрактальный кластер с большой химической емкостью. Почти весь каркас такой аэрогельной структуры занят свободными порами.

Высвобождение энергии из химически заряженного фрактального кластера может быть описано многоступенчатым процессом горения. В качестве примера такого процесса Смирнов предлагает многоступенчатое горение фрактального кластера из древесно-угольной пыли в озоне, поглощенном самим кластером, как модельный процесс в шаровой молнии:



где α и β — константы скоростей наиболее медленных стадий процесса зависят от температуры, при которой происходит насыщение угля озоном и, согласно его расчетам, характерные значения времени достаточно велики. Горение древесного угля в адсорбированном озоне одновременно — интенсивный и медленный процесс тепловыделения. Предсказанные температуры и времена жизни согласуются с наблюдениями шаровой молнии. В этой модели цвет и свечение шаровой молнии создаются путем, подобным тому, как это происходит в пиротехнике благодаря присутствию светящихся компонентов состава. Указанная теоретическая модель Смирнова способна удовлетворительно объяснить разные свойства шаровой молнии.

Фрактальные явления и первопричина шаровой молнии. «Химическая история свечи» была источником удивления и восхищения с того времени, когда в середине XIX в. Фарадей выступил с Рождественскими лекциями в Королевском институте. Его известные беседы являются великолепным введением в основные принципы горения и доступны в современных изданиях [37]. Именно Фарадей указал на главную роль частиц сажи и углерода в свечении пламени.

Современное развитие науки о кластерах углубило наше понимание процессов образования пыли, сажи, коллоидов и конденсированных

аэрозолей. Изучение роста фракталов позволило по новому взглянуть на рост сажи при добавлении частиц углерода в процессе хаотической коагуляции.

Интересной во многих отношениях и, может быть, даже положившей начало новому направлению, связывающему фракталы и дым, была публикация результатов замечательного экспериментального исследования, сделанного Форрестом и Уиттенем [30]. Они наблюдали сверхвысокодисперсные частицы дыма (диаметром порядка 80 Å) и обнаружили, что частицы прилипают друг к другу и образуют цепочечные агрегаты. Их лабораторные эксперименты показали, что фрактальные структуры действительно образуются в течение нескольких десятков миллисекунд после теплового взрыва материалов.

Установка Форреста и Уиттена состояла из вольфрамовой нити с нанесенным на нее гальваническим способом железом или цинком. Нить быстро нагревалась при прохождении по ней короткого сильноточного импульса, нанесенный материал испарялся с нити и образовывал плотный газ (металлический пар), распространение которого в окружающую атмосферу было ограничено диффузией. Плотный газ состоял из более — менее однородных сферических частиц. Горячие частицы, быстро двигавшиеся от нагретой нити, останавливались из-за столкновений в окружающей среде и формировали сферический ореол на расстоянии порядка 1 см от нити. На этом расстоянии частицы начинали конденсироваться и слипаться, формируя агрегаты типа цепочек, которые затем оседали на предметном стекле электронного микроскопа. Последующее изучение конденсированной фазы показало, что она обладает фрактальными свойствами. (Анализируя это направление исследования, необходимо отметить и раннюю работу Бейшера, который показал, что дым окиси магния в дуговом разряде содержит цепочечные агрегаты, в то время как в дыме при отсутствии дуги из сверхвысокодисперсных частиц образуется просто плотный аэрозоль [38].)

Глубокая проницательность Смирнова состояла в том, чтобы осознать, что этот фрактальный кластер можно привлечь для объяснения структуры и свойств шаровой молнии. Ошеломляющим подтверждением представлений Смирнова и его коллег являются слова из его недавней работы [21]: «Мы будем исходить из того, что шаровая молния имеет структуру фрактального кластера». Нет сомнений в том, что глубокие исследования Смирнова и его анализ дают наилучшее физическое объяснение шаровой молнии из имеющихся в современной науке.

Высокочастотная установка для создания шаровых молний. Существует много работ, посвященных описанию и анализу генератора Теслы, начиная с классической работы Обербека, вышедшей в 1895 г. [39]. Однако, по нашему мнению, все из этих описаний основаны на ошибочной теоретической модели и оставляют желать лучшего с технической точки зрения. (Так, они рассматривают установку как сосредоточенную цепь и упускают из вида тот факт, что распределение тока на стадии резонатора является четвертьволновой синусоидой с $I_{\max}(V_{\min})$ внизу и $I_{\min}(V_{\max})$ наверху.) До тех пор, пока мы не воспользовались концепцией «усредненного характеристического сопротивления» Шелкунова и не применили к резонаторам Теслы линейную теорию распространения медленных волн, мы не могли точно предсказать действие высоковольтного, высокочастотного генератора и, соответственно, создавать огненные шары. Наша модель достаточно надежна при использовании ее для анализа данных лабораторных тетрадей Теслы за 1899 г.

Основная часть установки Теслы для создания огненных шаров состоит из четвертьволнового спирального резонатора замедляющей волны, расположенного над проводящей, заземленной плоскостью. Наш ре-

зонатор магнитно связан с искровым разрядным генератором высокой пиковой мощности (примерно 70 кВт), работающим с частотой 67 кГц. Фактическая средняя мощность, поступающая на высоковольтный электрод, была порядка 3,2 кВт (при этом создавался 7,5-м ВЧ разряд). Используемая Теслой мощность была, конечно, в 100 раз больше той, которую потребляли мы на нашем достаточно скромном оборудовании.

Действие установки. Искровой разрядный генератор производил 800 импульсов в секунду, а продолжительность искры составляла 100 мкс. Вторичная обмотка высокочастотного резонатора имела измеренное время когерентности 72 мкс. Это означает, что индуцированные некогерентные полихроматические колебания занимают 72 мкс для того, чтобы создать стоячую волну и образовать высокое напряжение в верхней части резонатора:

$$V_{\max} = SV_{\min}, \quad (2)$$

где S — коэффициент замедления спирального резонатора. Схема Смита может быть использована для удобной демонстрации работы высоковольтной секции установки. (Теория работы установки детально развита в [40—42]. Работа [43] представляет собой руководство с использованием компьютера.)

Установки Теслы имеют несколько важных преимуществ перед другими высоковольтными устройствами (такими, как генераторы ван де Графа и Маркса). В них не только достигается высокая энергия, но также разрешены циклы в напряженных режимах, т. е. высокие частоты повторения и работа с высокой средней мощностью. Согласно инструкциям Теслы короткий кусок толстого медного провода или угольный электрод выходит из боковой части высоковольтного электрода. Когда указанный электрод разряжается, ВЧ резонатор выделяет энергию быстро, импульсом. (Тесла отмечал во многих местах записей, что для появления огненных шаров требуется создание «быстрых и мощных» разрядов.) Всплеск выделенной энергии проявляется в виде сферического шара или того образования, которое может быть фрактальным «пузырем». Этот метод создания огненных шаров определяется релаксацией испаренного металла или частиц угля, причем образуемые кластеры не отличаются от появляющихся в результате агрегации, ограниченной диффузией Форреста и Уиттена. Полезными являются указания Теслы по использованию покрытого резиной кончика кабеля или медного провода для того, чтобы «облегчить зажигание искры» [7]. Мы предполагаем, что диффузионно-ограниченная агрегация проходила либо в парах меди, либо в парах угля (в результате испарения либо провода, либо его изоляции). Как и в случае с SiO_2 , при таких условиях конденсированный CuO_2 тоже может образовывать аэрогель. Образование фрактального шара не сильно отличается от того, что наблюдали Форрест и Уиттен (за исключением того, что он заряжался высоковольтным электродом). Между прочим, резиновая изоляция старого образца покрывалась сажей.

Но, как указывает Смирнов, простое образование пористого фрактального кластера еще не будет достаточным условием для появления шаровой молнии с временем жизни большим нескольких миллисекунд. Фрактальное образование получалось из сажи еще в свечах Фарадея, но для образования шаровой молнии, живущей несколько секунд и более, необходимы и другие составляющие. Подчеркнем, что установка Теслы является источником озона и других химически активных частиц. Мы полагаем, что эти, а может, и другие частицы быстро поглощаются заряженным пористым фрактальным кластером. Температура плазмы в

районе разряда, где формируется структура, достаточна для того, чтобы вызвать многоступенчатый процесс горения.

Экспериментальные наблюдения. Используя установку, схема которой представлена на рис. 1, мы наблюдали большое число огненных шаров диаметром от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Времена жизни огненных шаров типично продолжались от половины до нескольких секунд, их цвет изменялся от темно-красного до ярко-белого. Исчезновение некоторых из огненных шаров сопровождалось громким звуком, в то время как другие появлялись и затухали.

Иногда производить запись явления на фотопленку на доступной нам технике было сложно. В некоторых случаях видеозапись оказывалась прекрасной. Продолжительность могла быть оценена по скорости кадров видеоаппаратуры. Но для стандартных фильмов как скорость кадров, так и выдержка, были слишком медленными. Однако фотографии часто получались адекватными изображению. В замечательной последовательности фотографий можно наблюдать появление огненных шаров с противоположной стороны оконного стекла [2, 5].

На фотографии-рис. 2 видно, как огненный шар плавно скользит справа налево и вверх. (На самом деле, огненный шар сначала сформировался, а затем в него ударил стример. В результате появилось изображение, на котором огненный шар пронизан стримером.) Белый огненный шар имел диаметр порядка 2 см. Электрод изготовлен из медного провода, при съемке использована выдержка $1/125$ с. Длина стримера превышала 1,5 м. Другие светящиеся области и яркие точки видны слабо.

При съемке фотографии рис. 3 было видно невооруженным глазом много огненных шаров, но лишь один из них был пойман фотокамерой. Видно, как он поднимается слева направо по отношению к центральной части стримера. Обратите внимание на яркие и темные области стримера. Диаметр огненного шара был около 2 см, а длина стримера, справа, превышала 2 м. Электродом служил медный провод, использована выдержка $1/125$ с. На фотографии рис. 4 находятся два огненных шара, образовавшиеся близко друг от друга. Скользя вправо, они столкнулись с разными стримерами. Использована выдержка $1/4$ с.

На фотографии рис. 5 видно пять больших огненных шаров (около 2 или 3 см в диаметре), несколько светящихся точек и ярко светящийся участок стримера длиной около 30 см. Использована выдержка $1/4$ с. (Красное свечение в нижнем левом углу фотографии возникло благодаря интенсивному нагреву у основания дуги.)

В наших лабораторных экспериментах огненные шары обычно формировались около высоковольтного резонатора и проносились снаружи от стримера либо выше, либо ниже его. Это представляется удовлетворяющим названию «Kugelblitz» — шаровая молния. (В противоположность ему четочная молния или «Perlschnurblitz» представляет собой такое явление, когда разрядный канал разрывается на несколько коротких светящихся фрагментов, не связанных между собой, которые продолжают существовать дольше, чем разрядный канал. Ясно, что четочная молния не то явление, которое мы наблюдали.)

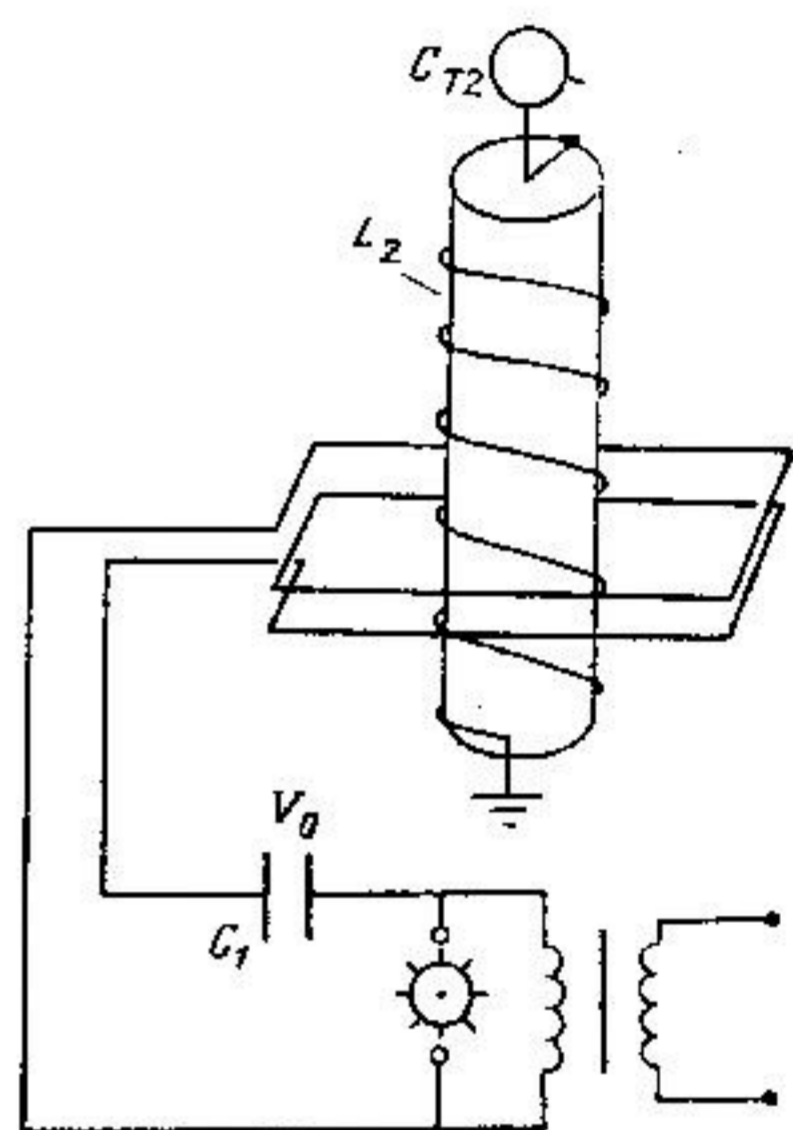


Рис. 1. Установка Теслы, использованная при получении фотографий. На рисунке представлена схема действия открытого спирального резонатора замедляющей волны.

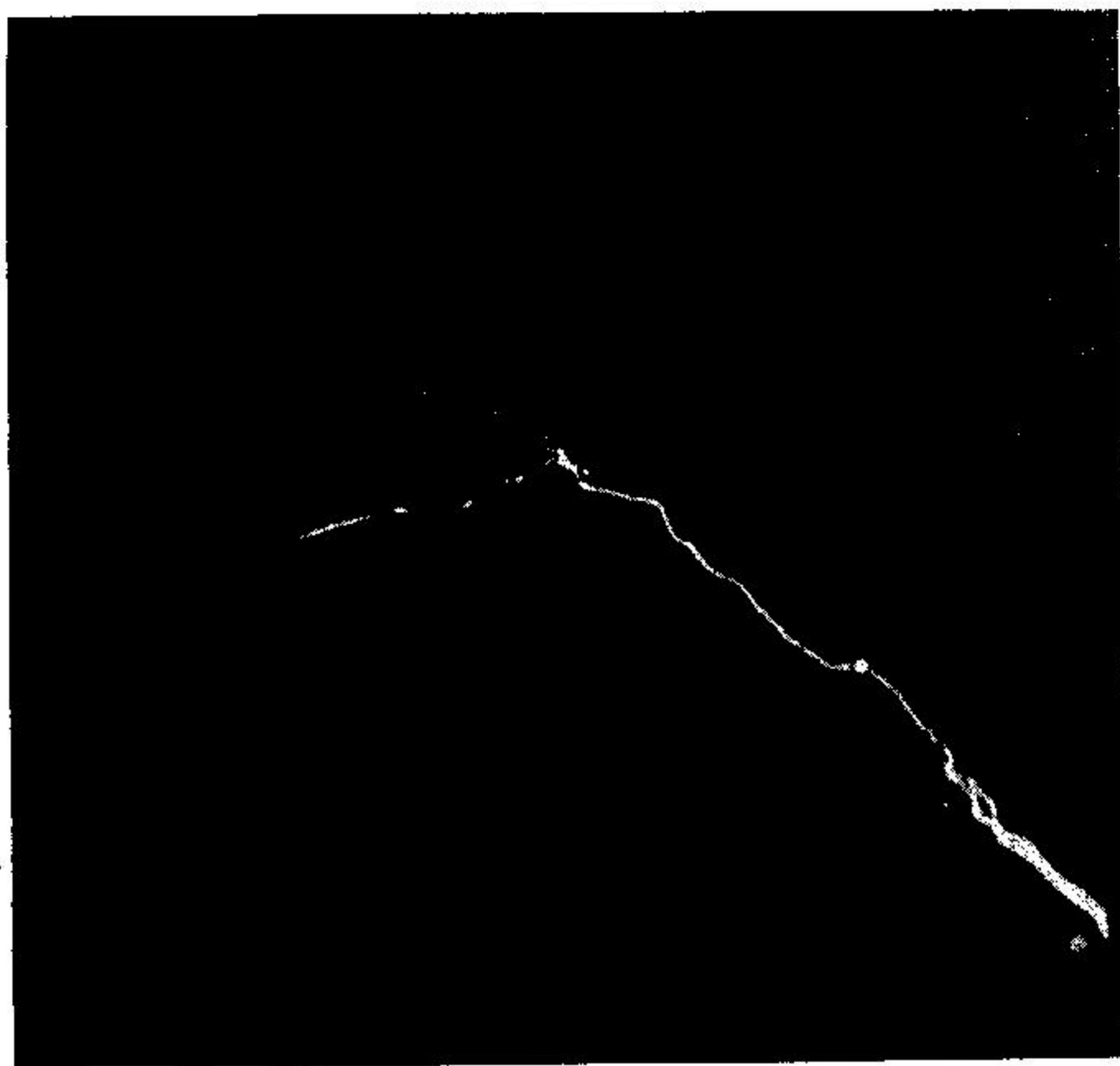


Рис. 2

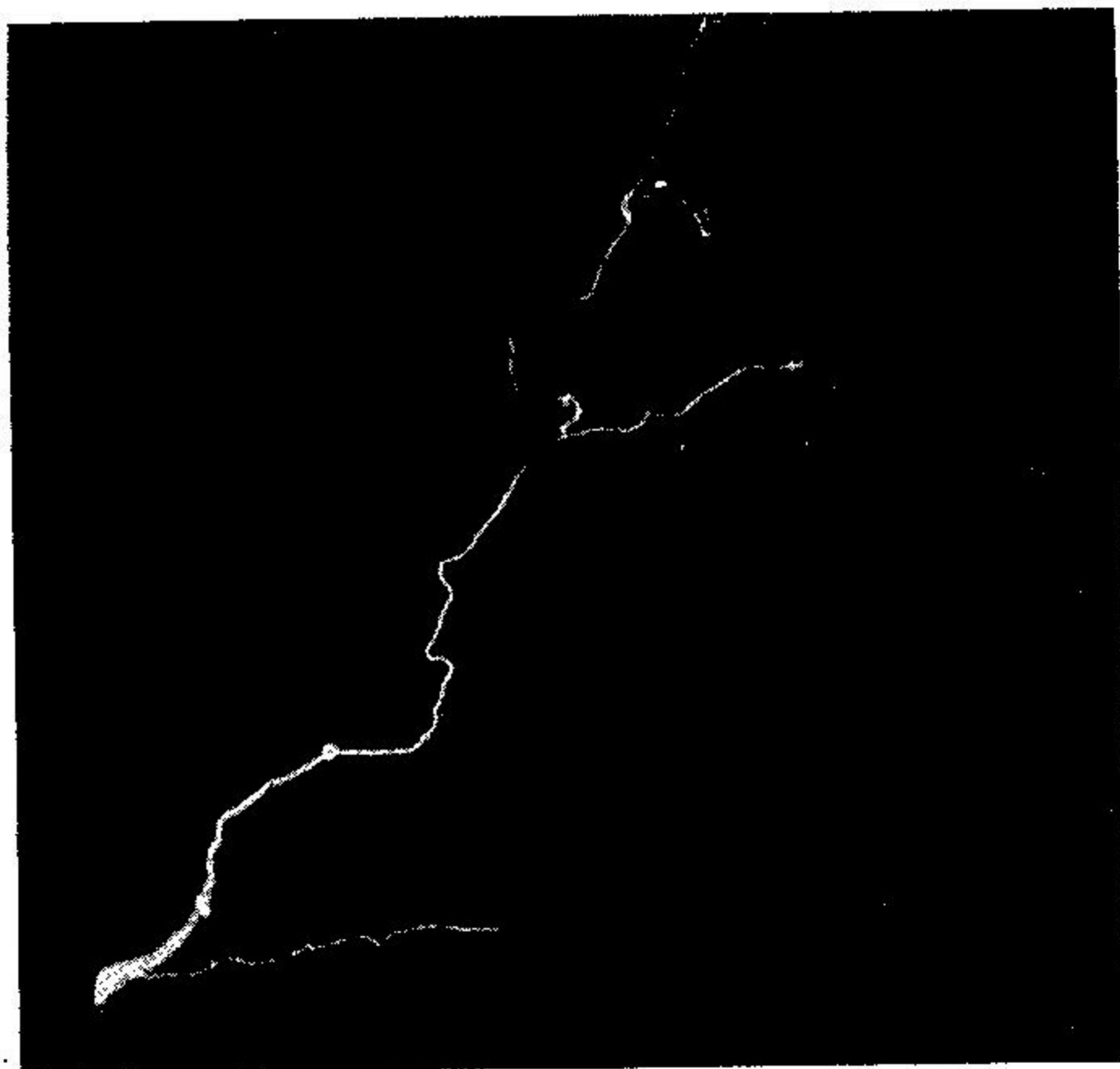


Рис. 3

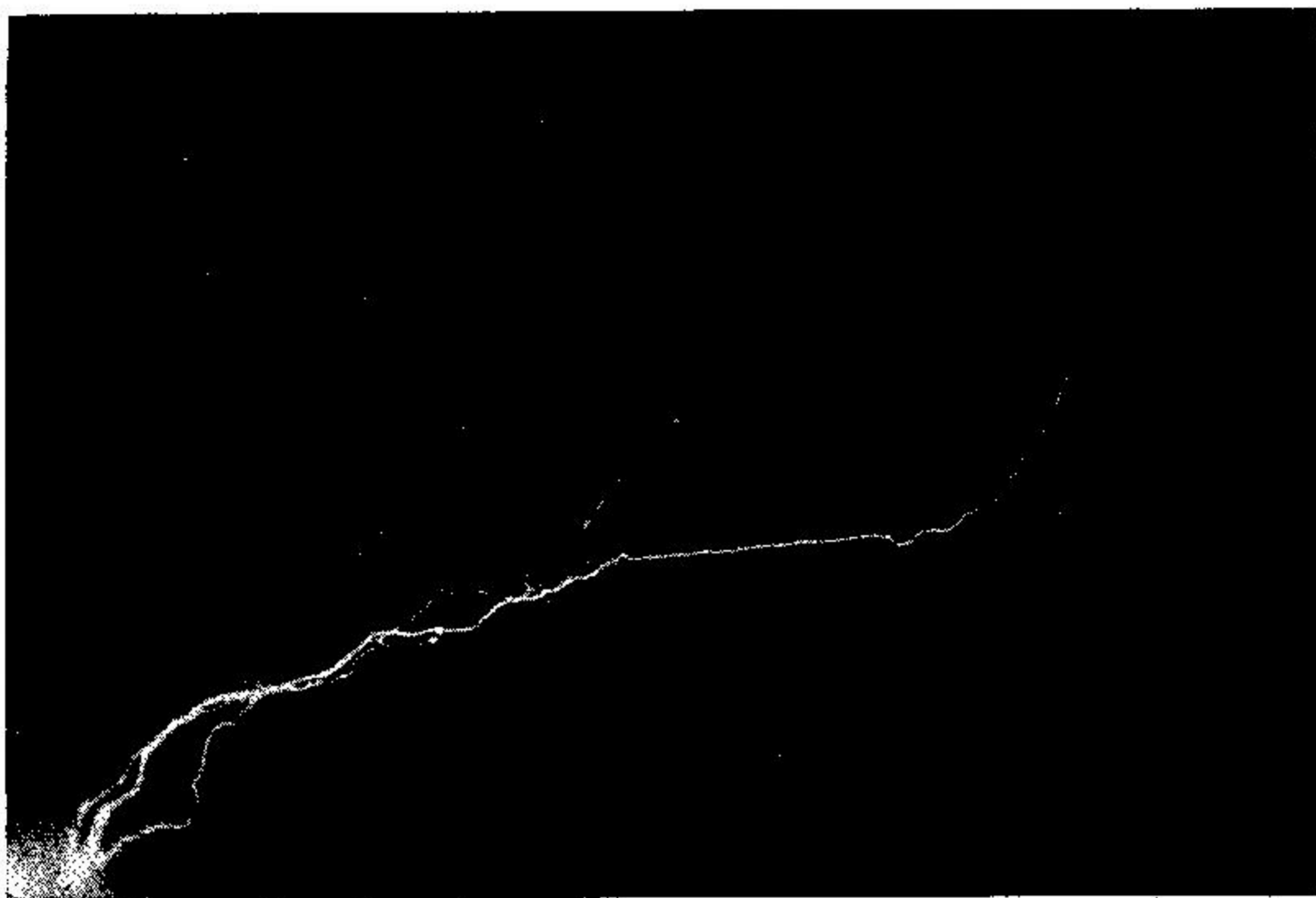


Рис. 4



Рис. 5

Видеозаписи эволюции огненных шаров указывают на то, что огненные шары возникают вблизи электрода, а затем в них ударяют стримеры. Первоначально они бывают величиной со сферу в 6 мм, которая затем начинает расти. Кажется, что шарик застыл, плавая в объеме, а стример тем временем гаснет. Затем в плавающий шар ударяет новый стример, и он становится больше. Мы наблюдали, как в один шар последовательно попали шесть разрядов, при этом он каждый раз увеличивался. Наблюдался огненный шарик, который вырос из первоначальной 6 мм сферы в огненно-красную глобулу диаметром 5 см за время в 1 с. Иногда было видно, как вращаются некоторые шары с движущимися пятнами (как пятна на солнце). Некоторые огненные шары кажутся прозрачными рядом с разрядами, пронизывающими их. Мы наблюдали несколько светящихся образований, которые в течение эволюции изменяли цвет и в конце концов взрывались как сверхновая. При этом в соответствии с указанным ранее предположением помещение восковой свечи на высоковольтный резонатор усиливает появление огненных шаров.

Фотография рис. 6 увеличена для того, чтобы показать глобульную структуру одиночного большого яркого изолированного электрического огненного шара. В действительности огненный шар был диаметром приблизительно в 1 см. Огненные шары имеют сферическую структуру, и это наводит на мысль, что поверхностное натяжение должно играть какую-то роль в эволюции шаровой молнии. Легкое, но заметное потемнение лимба и почти твердое изображение указывают на то, что шаровая молния оптически плотна. Электродом служил провод, намотанный на восковую свечу, использована выдержка $1/4$ с.

Фотография рис. 7 была сделана при видеосъемке образования огненного шара вблизи высоковольтного электрода. После сортировки кадров на дисплее был перефотографирован отдельный кадр на цветном мониторе.

Последовательность событий была весьма примечательна. Сначала кажется, что огненный шар появился из «ничего» (так как его не было на предыдущем кадре). На следующих кадрах стример уходит и исчезает, оставляя шаровую молнию несколько увеличенной в размере и более горячей, как это показано на фотографии рис. 7. (Наблюдение за стримерами тоже очаровывающее занятие — стримеры часто появляются такими, будто они состоят из яркого жидкого вещества, которое видно как впрыскивается и движется в их направлении. Это вещество, очевидно, добавляется к веществу шаровой молнии и увеличивает ее размер.)

Из последовательности видеозаписей становится понятным, что снимок может дать неправильное представление, ибо огненные шары выглядят вместе со стримерами как мячики для гольфа, нанизанные на шпагу. В действительности же установка (делающая 800 прерываний в секунду) производит в секунду очень большое число разрядов. Эти разряды попадают в огненные шары достаточно часто за время выдержки и дают на фотографиях изображение образования шаровой молнии в стримере. На самом деле стримеры прыгают от шаровой молнии к шаровой молнии, ослепительно высвечиваясь. На фотографиях в инфракрасном свете огненные шары значительно ярче стримеров. Это означает, что они значительно горячей, чем стримеры.

Видеоснимки дают еще одну возможность — наблюдать слабые вариации распределения свечения поперек диска шаровой молнии. В одном частном случае шаровая молния была действительно окружена светящейся оболочкой аналогично звезде М-52 (кольца Небулы в созвездии Лиры). Усиление результирующего сигнала открывает большое истинное свечение сферической оболочки шаровой молнии. В астрофизике такое случается только с особо горячими звездами типа О и В.

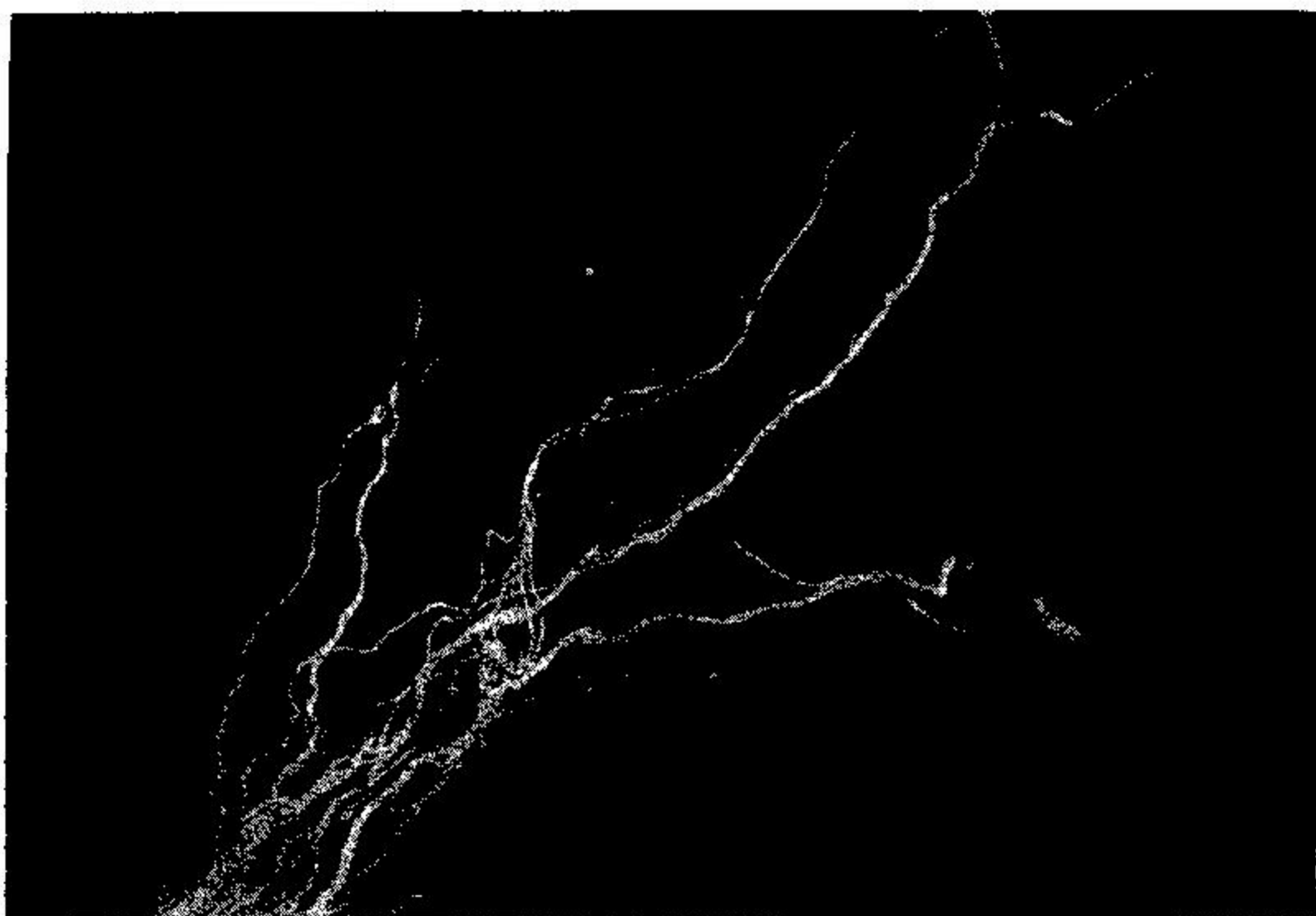


Рис. 6

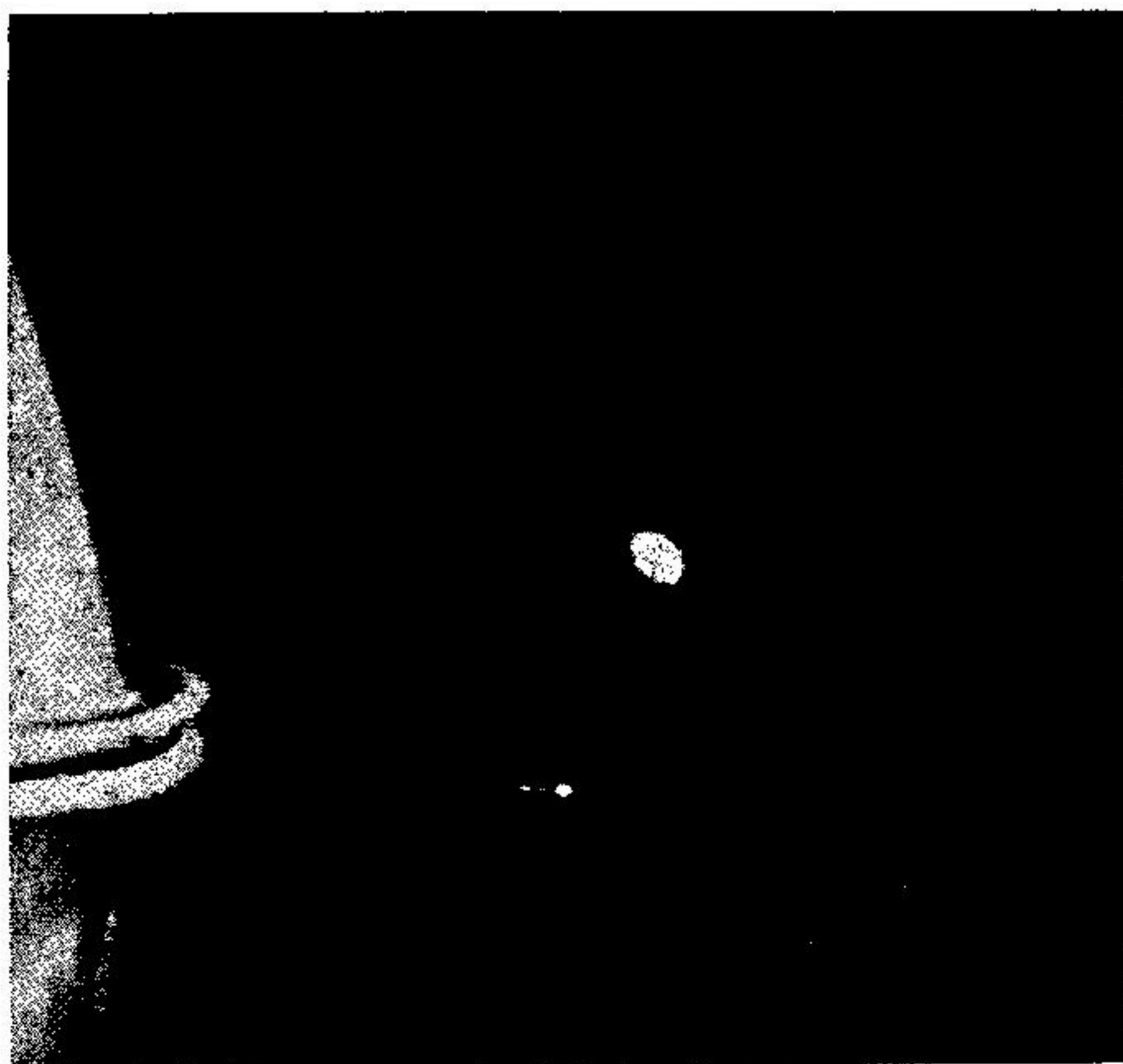


Рис. 7

Фотография (рис. 8) может вызвать волнение. Изображение содержит дюжину больших сферических глобул, находящихся в одном ряду и на разных стадиях развития, когда в них попадает один и тот же стример. Огненные шары, начиная с красных карликов, проходят состояния с различными цветами и размерами к гигантской бело-голубой стадии. Кажется, что некоторые из них взорвутся как сверхновая, тогда как другие охладятся, как красные гиганты. Выдержка 1/4 с. Штырь из древесного угля использован вместо покрытого резиной медного провода для «зажигания искры» Теслы. Высоковольтный электрод диаметром 30 см виден слева.

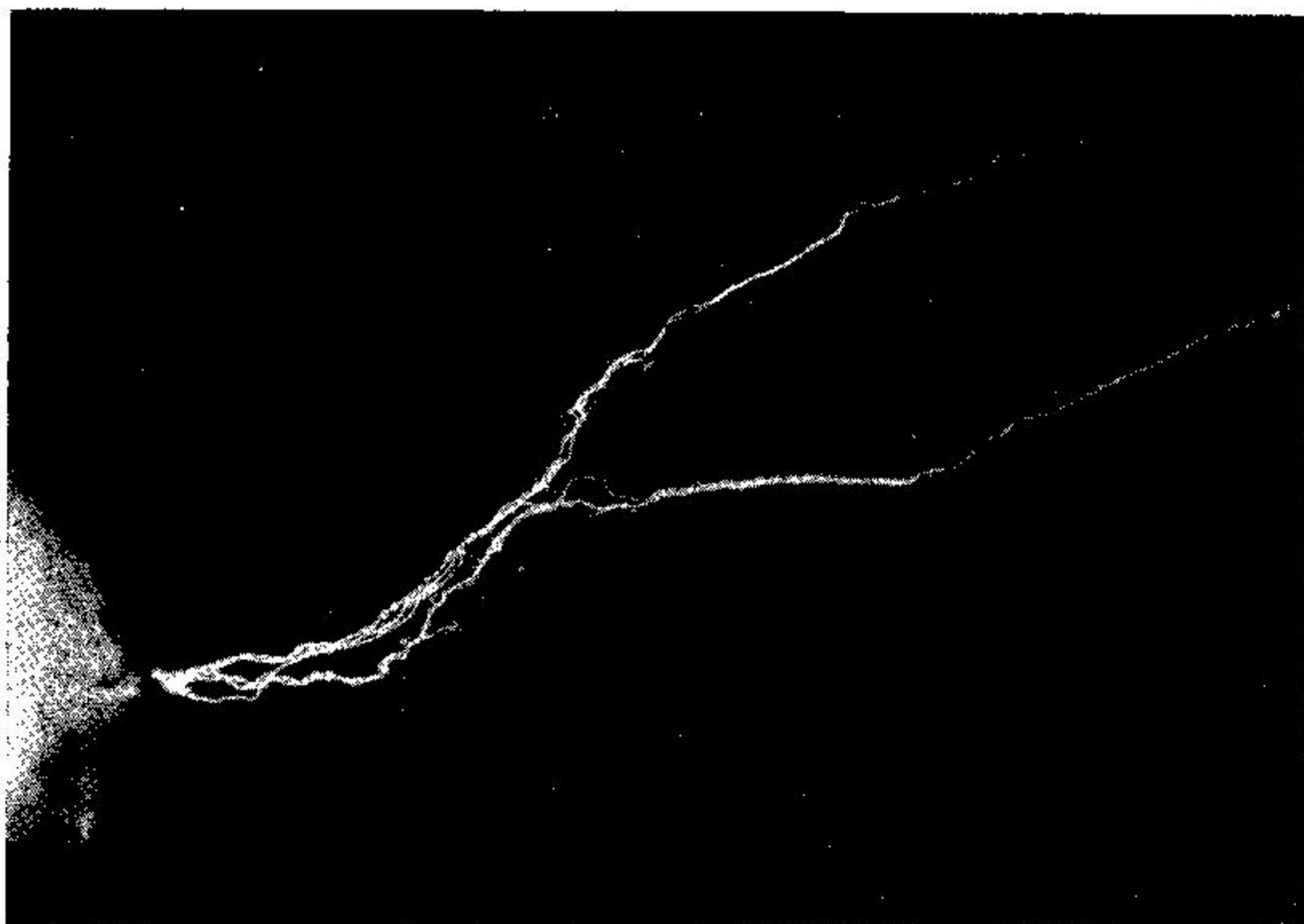


Рис. 8

В работах [2, 3 и 5] мы фотографически подтверждаем «прохождение шаровых молний через оконное стекло» в наших лабораторных экспериментах. Мы также сообщаем об альтернативных электрических устройствах для получения тех же результатов.

Выводы. Анализируя полученные результаты, мы считаем, что, как и в установке Форреста и Уиттена, в рассматриваемом случае сильноточные импульсы, исходящие из медного провода и древесно-угольных электродов на высоковольтном электроде, могут создавать фрактальные сгустки, которые быстро адсорбируют озон и другие химически активные компоненты из приэлектродной области. Образующиеся электрически заряженные аэрогельные структуры проявляют характерные свойства шаровых молний. Эта фрактальная природа электрохимических шаровых молний была впервые предложена и теоретически исследована советским ученым Б. М. Смирновым. Нет никакого сомнения в аналогичности этих огненных шаров, полученных в высоковольтном генераторе, и шаровых молний, появляющихся естественным путем в атмосферных электрических грозах.

Мы также отмечаем, что эти результаты тщательно подтверждают исторические эксперименты Теслы по созданию шаровой молнии. Не может и быть сейчас вопроса о достоверности его записей 1899 г. и правдивости его наблюдений шаровой молнии.

Заключительные замечания. У Теслы не было двойственного отношения к наблюдению и лабораторному созданию электрических шаровых молний. Описывая исследования 1899 г. по шаровой молнии, он говорил: «Мне удалось определить способ их образования и создать их искусственно» [44]. К несчастью в течение жизни он не выбрал пути ознакомления широкой научной общественности со своей экспериментальной техникой. Нам повезло, что он оставил после себя такую подробную интересную документацию. Как раз накануне закрытия его лаборатории в Колорадо-Спрингс Тесла записал в дневнике: «Наилучшее изучение этого явления может быть проведено при продолжении экспериментов с более мощными установками, которые в существенной степени разработаны и будут сконструированы, как только время и средства мне позволят» [7]. Причина записи заключалась в том, что он возвратился в Нью-Йорк, начал строить большую передающую станцию на Лонг-Айленд, преследовался кредиторами и потерпел финансовое банкротство прежде, чем смог закончить создание аппаратуры.

Время прошло, теперь шаровые молнии могут быть тщательно изучены в лабораторной контролируемой среде. Мы думаем, что работа, которую Тесла оставил незавершенной, может быть сейчас возобновлена. С развитием техники и концепций, доступных современным ученым, будет непременно достигнут быстрый прогресс в этом направлении.

Цитата в начале работы взята из доклада Капицы «Воспоминания о Лорде Резерфорде» на заседании Королевского общества в 1966 г. Капица, который сам инспирировал много работ по шаровой молнии, продолжает: «Основными чертами мышления Резерфорда были большая независимость и большая смелость». Эти качества являются характеристиками всех тех, кто хоть что-то вложил в поступательное движение цивилизации. Однако, как указывал Капица, нигде это не выглядит так критично, как в научных вопросах. Конечно, эти отважные черты присутствовали и в жизни Николы Теслы — физика-экспериментатора, инженера и изобретателя.

Нам кажется уместным закончить работу собственными мыслями Теслы, пришедшими ему в первые часы XX в. и записанными в дневник всего за несколько дней до отъезда в Нью-Йорк из его лаборатории в Колорадо-Спрингс, покрытой снегом и пронизанной одиночеством: «Это является фактом, что данное явление может быть теперь искусственно создано, и будет нетрудно узнать больше о его природе» (Н. Тесла, 3 января 1900 г.).

К несчастью для современной цивилизации эти удаленные исследовательские устройства на земле Скалистых Гор были закрыты навсегда в январе 1900 г., и электрические чудеса, сделанные в этих стенах, оставались тайной вплоть до нашего поколения.

(Перевод с англ. В. Л. Бычкова)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Corum J. F., Corum K. L. Laboratory Generation of Electric Fire Balls (принято в печать), 7 с. (издание не указано).
2. Corum J. F., Corum K. L. Further Experiments with Ball Lightning (принято в печать), 9 с. (издание не указано).

3. *Corum K. L., Corum J. F.*//Production of Electric Fireballs (принято в печать), 7 с. (издание не указано).
4. *Corum J. F., Corum K. L.*//The Laboratory Production of Electric Fireballs (принято в печать), 54 с. (издание не указано).
5. *Corum K. L., Corum J. F.*//Tesla Coil Builder's Association News. 1989. V. 8. P. 13.
6. *Corum K. L., Edwards J. D., Corum J. F.* Fire Balls: A Collection of Laboratory Photographs.—Corum and Associates, 1988.
7. *Tesla N.* Colorado Springs Notes: 1899—1900/Ed. A. Marincic.—Beograd: Nolita, 1978.
8. *Гиндин Л. Г., Вольпян*//Усп. химии. 1968. Т. 1. С. 130.
9. *Зайцев А. В.*//ЖТФ. 1972. Т. 42. С. 213.
10. *Смирнов Б. М.*//ДАН СССР. 1976. Т. 226. С. 806.
- [11] *Смирнов Б. М.*//УФН. 1975. Т. 116. С. 731.
12. *Голубев Е. М., Подмошенский И. В.*//Письма ЖТФ. 1977. Т. 3. С. 509.
13. *Афанасьев В. П., Дорофеев С. Б., Сеницын В. И., Смирнов Б. М.*//ЖТФ. 1981. Т. 51. С. 2355.
14. *Александров В. Я., Бородин И. П., Киченко Е. В., Подмошенский И. В.*//ЖТФ. 1982. Т. 52. С. 818.
15. *Александров В. Я., Голубев Е. М., Подмошенский И. В.*//ЖТФ. 1982. Т. 52. С. 1987.
16. *Крайнов В. П., Смирнов Б. М., Шматов И. П.*//ДАН СССР. 1985. Т. 283. С. 361.
17. *Войцеховский Б. В., Войцеховский М. Б.*//Ibidem. 1986. Т. 287. С. 331.
18. *Плюхин В. Г., Смирнов Б. М.*//Ibidem. С. 836.
19. *Смирнов Б. М.*//УФН. 1986. Т. 149. С. 177.
20. *Крайнов В. П., Лебедев Г. П., Назарян А. О., Смирнов Б. М.*//ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 1791.
- [21] *Смирнов Б. М.*//ДАН СССР. 1987. Т. 292. С. 1363.
22. *Смирнов Б. М.*//УФН. 1987. Т. 152. С. 133.
23. *Смирнов Б. М.* Загадка шаровой молнии — М.: Наука, 1987.
24. *Войцеховский Б. В., Войцеховский М. Б.*//ДАН СССР. 1987. Т. 295. С. 580.
25. *Smirnov B. M.*//Phys. Rept. 1987. V. 152. P. 177.
26. *Смирнов Б. М.* Проблема шаровой молнии.— М.: Наука, 1988.
27. *Ter Haar D.*//Phys. Scripta. 1989. V. 39. P. 735.
28. *Григорьев А.*//Сов. Литва. 1989. Н. 179. С. 4.
29. *Mandelbrot B. B.* Fractals: Form, Chance and Dimension.— San Francisco: Freeman, 1977.
30. *Forrest S. R., Witten T. A.*//J. Phys. Ser. A 1979. V. 12. L. 109.
- [31] *Witten T. A., Sander L. M.*//Phys. Rev. Ser. B. 1983. V. 27. P. 5686.
32. *Meakin P.*//Phys. Rev. Lett. 1983. V. 51. P. 1119.
33. *Mandelbrot B. B.* The Fractal Geometry of Nature.— New York: Freeman, 1983.
34. *Niemeyer L., Pietronero L., Wiesmann H. J.*//Phys. Rev. Lett. 1984. V. 52. P. 1033.
35. *Hurd A. J.*//Amer. J. Phys. 1988. V. 56. P. 969.
36. *Douady A.*//The Beauty of Fractals/Eds H. O. Peitgen, P. H. Richter.— Berlin a. o.: Springer-Verlag, 1986.— P. 161.
37. *Фарадей М.* История свечи.— Н.: Наука. 1980.
38. *Beischer D.*//Zs. Electrochem. 1938. Bd 44. S. 375.
39. *Oberbeck A.*//Wied. Ann. 1895. Bd 55. S. 623.
40. *Corum K. L.*//Proc. of the 2nd Intern. Tesla Symposium.— Colorado Springs, Col., 1986.— Ch. 2. P. 1.
- [41] Proc. of the 19th Southeastern Symposium on System Theory.— Clemson University, South Carolina, 1987.— P. 45.
42. *Corum J. F., Corum K. L.* Vacuum Tesla Coils.— Corum and Associates, 1988.
43. *Corum J. F., Edwards D. F., Corum K. L.* TCTVTOR: A Personal Computer Analysis of Spark Gap Tesla Coils.— Corum and Associates, 1988.
44. *Tesla N.*//Electrical World and Engineer. 1904, March 5. P. 429.