

МОЛНИЯ И ЕЕ ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА

М. А. Бак и Н. Н. Николаевская, Ленинград

Введение

Электрическое состояние Земли с давних времен является предметом многочисленных наблюдений и исследований широкого круга ученых. Однако серьезное и систематическое изучение этого вопроса началось лишь в последние двадцать лет, в связи с разрешением ряда крупных научных и технических проблем. Хорошо известно постоянное присутствие электрического поля в земной атмосфере и существование двух электрических состояний атмосферы — так называемых состояний хорошей погоды и грозового. Систематические наблюдения градиента электрического поля хорошей погоды в самых разнообразных районах земной поверхности показывают, что статистически в каждом данном участке атмосферы имеется свой характерный ход суточного и годового изменения этого градиента. Вблизи поверхности Земли величина градиента поля в ясную погоду обычно не выходит за пределы интервала $50—300 \text{ V/м}$ при направлении градиента в сторону земной поверхности¹. Наиболее часто встречающийся градиент поля — около 100 V/м — дает среднюю плотность отрицательного электрического заряда на земной поверхности порядка 3 эл. ст. единиц на 1 м^2 . При такой средней плотности общий отрицательный заряд Земли выражается величиной 0,6 мегакулон. Отсюда легко вычислить потенциал Земли относительно бесконечно удаленной точки:

$$V \simeq -10^9 \text{ V.}$$

Постоянное присутствие ионов обоих знаков в атмосфере обу-

отрицательный заряд Земли в течение 10 мин. Однако электрическое поле в атмосфере постоянно существует, и отрицательный заряд Земли не исчезает. Существующее поддержание совершенно определенного градиента поля обуславливается происходящими компенсационными процессами. Попытки обнаружения агентов производящих этот компенсационный процесс производились неоднократно, но полученные результаты нельзя считать достаточно убедительными (см. гл. 1). Фундаментальная проблема циркуляции электричества в атмосфере остается пока открытой.

Состояние атмосферного электричества в грозовое время, равным образом, представляет большой интерес не только с практической, но и с чисто физической точки зрения. Изучение процесса грозообразования, т. е. выяснение механизма дополнительного образования ионов в атмосфере, раздвижения этих ионов на большие расстояния и концентрации ионов одинаковых знаков в некоторых объемах грозового облака, является предметом многих экспериментальных работ и теорий. Величественное и грандиозное явление природы — молния, представляющая электрический пробой громадного естественного и весьма своеобразного конденсатора — оказывается в действительности очень сложным явлением, природа которого в сущности до сих пор не выяснена, несмотря на обилие соответствующих работ (см. гл. 3). Загадкой является природа шаровой молнии и так называемой четочной (или бусинной) молнии.

Не будем долго останавливаться на совершенно ясной для всех практической важности научного рассмотрения электрических процессов вблизи земной поверхности в атмосфере. Укажем лишь, что почти 50% всех аварий в крупнейших электростанциях и линиях передач составляют аварии вследствие ударов молнии; тысячи людей ежегодно гибнут вследствие грозových разрядов. Защитные средства от грозových разрядов создаются почти всегда из чисто эмпирических соображений и зачастую не оправдывают своего назначения².

Не лишним будет привести общие статистические данные относительно количества гроз, происходящих на всем земном шаре. Одновременно в атмосфере всего земного шара в среднем происходит примерно 1800 гроз³, что дает около 100 молний в 1 сек. Количество гроз в различных местах земной поверхности различно, так, например, наибольшее число их имеет место в экваториальной Африке и в тропиках вообще, где оно достигает для каждого данного пункта указанных широт примерно 200 в год, тогда как в районах побережья Каспийского моря наблюдается всего лишь 5—10 гроз в год³. В некоторых малогрозových районах грозы подчас бывают даже не каждый год. Вообще количество гроз в том или ином районе не определяется географической широтой его, несмотря на отсутствие гроз в полярных областях и максимальное их число в тропиках, а зависит, повидимому, лишь от местных климатических и прочих условий⁴. Условия образования грозы в данном месте весьма разнообразны, и соответственно этому происходит тот или

иной тип грозы. Несмотря на многообразие типов гроз, обычно все исследования, связанные с изучением облака, производятся при тепловом или при фронтальном типе грозы. Эти два типа гроз происходят в подавляющем большинстве случаев и кроме того наиболее просты при экспериментальном изучении процессов, связанных с грозой, как-то: распределения потенциалов в грозовом облаке, измерения токов, изучения полярности отдельных частей облака и т. д. Тепловой тип грозы создается вследствие интенсивного местного нагрева района лучами Солнца. Фронтальный тип грозы создается при подъеме нагретого влажного воздушного потока на склоне наступающего низкоидущего холодного тока воздуха (рис. 1 и 2).

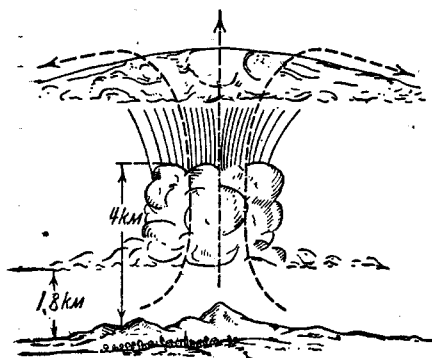


Рис. 1. Схема образования тепловой грозы

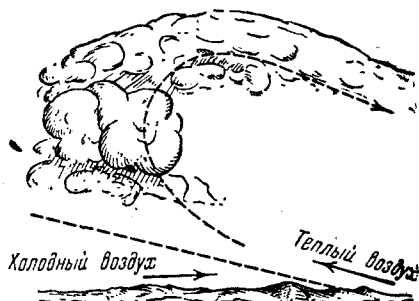


Рис. 2. Схема образования фронтальной грозы

При построении теории грозообразования также рассматривается тепловой тип грозы (см. гл. 1).

Специфичность условий изучения гроз и особенно молний потребовала разработки несколько особой методики исследования. Создание в лабораторных условиях обстановки, более или менее правильно отображающей естественно происходящее явление, чрезвычайно затруднено и, по существу, до сих пор не получено. Все это, разумеется, отразилось на степени знания вопросов грозообразования и природы грозового разряда. Этим повидимому можно объяснить ту недостаточную систематизацию экспериментального материала, которая существует сейчас по этому вопросу.

Основной целью настоящей статьи является стремление более или менее систематично изложить вопросы, касающиеся грозообразования, грозовых разрядов, механизма и природы молнии, на основании имеющихся оригинальных работ в этой области.

Данный обзор разбивается на четыре отдельные части в следующем порядке: I. Теории образования грозовых облаков. II. Методика изучения грозового разряда. III. Молния и ее физическая природа. IV. Основные параметры молнии.

I. ТЕОРИИ ОБРАЗОВАНИЯ ГРОВОВЫХ ОБЛАКОВ

Изучение различных грозовых явлений необходимо начать с объяснения процессов образования электрических полей, связанных с грозой. Существующие во время грозы электрические поля в облаках, а, следовательно, и между облаками или между облаком и землей, являются результатом образования и концентрации огромного количества электрических зарядов в различных частях облака. Электризация грозовых облаков происходит очевидно из-за: 1) создания ионов обоих знаков из электрически нейтральных молекул воды и газов, составляющих воздух, 2) раздвижения этих ионов на сравнительно большие расстояния (основная масса ионов не имеет поэтому возможности рекомбинироваться) и, кроме этого, 3) концентрации зарядов одинаковых знаков в различных частях облака; все это требует затраты определенного количества энергии. Обнаружение агента, за счет которого совершается указанная работа, выяснение действительного механизма получения требуемой энергии — вот что, по существу, должна объяснить теория образования грозовых облаков. Довольно большой экспериментальный материал по изучению метеорологических и электрических явлений в атмосфере будет надежным критерием справедливости той или иной теории.

Перейдем к рассмотрению теорий грозообразования; отметим, что все теории рассматривают из общего разнообразия гроз лишь тепловой тип грозы, предполагая, что во всех остальных случаях главные процессы такие же и лишь несколько усложнены рядом внешних факторов, так что полученные выводы легко распространяются и на другие типы гроз.

1. Теория Симпсона — теория «дробления капель»⁵

Быстро восходящие потоки нагретого и влажного воздуха и сила тяжести являются, по этой теории, основными агентами, создающими большие запасы электрической энергии в грозовом облаке. Теория базируется на известном экспериментальном факте электризации капель воды при раздроблении их достаточно быстрым воздушным потоком, причем положительный заряд приобретает крупными каплями, тогда как отрицательный уносится мелкими каплями и воздухом. Поэтому теория Симпсона получила название — «теория дробления капель». Окончательное оформление теории произошло к 1927 г., хотя первоначальные положения были опубликованы еще в 1909 г.

Известно, что падающие в воздухе капли воды любого диаметра под действием силы тяжести (для общего случая — любые предметы, падающие в любой среде) довольно скоро после начала падения приобретут постоянную скорость относительно воздуха. Такая «конечная» скорость зависит, разумеется, от размеров капли; так, например, согласно данным Ленарда⁶, капля воды диаметром в 0,1 см при свободном падении в воздухе приобретает «конечную» скорость 4,4 м в 1 сек., а капля диаметром около 0,5 см — 8 м в 1 сек. Скоростей, больших чем последняя, наблюдать при

данных условиях не удается. Более крупные капли не устойчивы; если же они сохраняются при падении, то, встречая достаточно сильное сопротивление воздуха, вероятно слегка сплющиваются, что вызывает увеличенное сопротивление движению и поэтому меньшую скорость.

Конденсирующиеся в облаке капли воды падают вниз под действием гравитационного поля, встречая довольно сильный воздушный поток, всегда сопровождающий грозообразование. Вертикальная компонента скорости потока зачастую достигает величины порядка 8 м в 1 сек. При таких относительных скоростях происходит дробление крупных капель, а следовательно, и электризация их. Взвешенные в воздушном потоке раздробленные капли поднимаются вверх, причем более мелкие капли уносятся потоком с относительно большими скоростями. Уменьшение скорости воздушного потока с высотой и повторная конденсация в верхних более холодных слоях атмосферы вызывают последующее падение капель воды. Крупные, но уже получившие небольшой заряд, капли снова дробятся, и снова процесс повторяется. Таков в общих чертах механизм создания, разделения и концентрации электрических зарядов, дающий в результате большие запасы положительного заряда в грозовом центре облака и отрицательного — в верхней части облака и в местах, удаленных от грозового центра.

Описанный механизм грозообразования хорошо иллюстрируется на рис. 3, принадлежащем Симпсону⁵. Эта структура грозового облака, данная Симпсоном в 1927 г., претерпела существенные изменения в связи с его более поздними экспериментальными работами⁷.

Такая структура грозового облака приводит к двум важным заключениям, которые оказались для подавляющего большинства случаев несоответствующими действительности (что и послужило причиной создания новых теорий процесса грозообразования). Первое заключение — концентрация зарядов чрезвычайно велика в области грозового центра (В), который заряжен положительно. Наибольшие градиенты образуются в этой части облака, поэтому разряды молнии происходят главным образом из этой области; эти разряды должны быть положительны, т. е. при разряде на землю вид удара молнии будет: облако — плюс, земля — минус. Второе заключение — отрицательный заряд грозового облака (А) лежит над положительно заряженным грозовым центром (см. рис. 3).

В свое время подтверждение своей теории Симпсон получил при сравнении направленности разветвлений молнии с разветвлениями искры, полученной от обычной индукционной машины. Первоначальные опыты Симпсона по изучению разветвлений искрового разряда в лаборатории показали разветвления искры только при разряде от положительного электрода на землю⁸. Так как фотографии удара молнии от облака на землю показывают почти всегда разветвления, направленные к земле, следовательно, согласно Симпсону, молния зарождается в местонахождении положительного заряда. Отсюда получается требуемая по теории положительная полярность грозового центра.

Однако опыты Аллибона и Шонланда⁹ довольно скоро доказали возможность распространения искровых разветвлений при прохождении искры от отрицательного центра. Кроме этого, большинство исследований полярности молнии, особенно при разряде на линию передач^{10,11,12}, показали наличие и даже преобладание

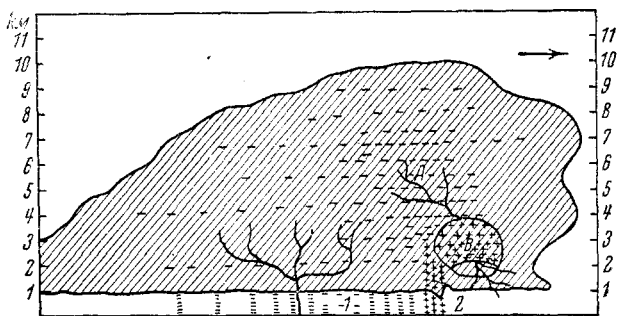


Рис. 3. Структура грозового облака (по Симпсону).
1 — отрицательный дождь, 2 — положительный дождь

отрицательной полярности удара молнии, что серьезно противоречит теории Симпсона.

Последнее, что следует привести в качестве доказательства несостоятельности некоторых положений теории Симпсона, это вопрос распределения зарядов по толще облаков. Оставляя в стороне исследования этого вопроса самим Симпсоном, на которых остановимся подробно несколько ниже, следует отметить достаточно тщательные измерения Вильсона и его школы, показавшие, что верхняя часть облака, как правило, заряжена положительно, тогда как основание облака наделено отрицательным зарядом¹².

Таковы в общих чертах экспериментальные противоречия теории, заставившие Симпсона впоследствии (к 1936 г.)⁷ произвести ряд дополнительных опытов и пересмотреть некоторые части своей теории. Прежде чем разбирать современное состояние вопроса структуры грозового облака, на основании работ, проделанных самим Симпсоном и рядом других исследователей, остановимся на параллельно существовавшей теории грозообразования Эльстера и Гейтеля, а также на теории Вильсона.

2. Теория Эльстера и Гейтеля¹³ — теория «влияния»

В качестве агента, совершающего работу по электризации облаков, принимается, наряду с сильным воздушным потоком и силой тяжести, земное нормальное электрическое поле, направленное, как известно, сверху вниз. Этот добавочный фактор является весьма существенным в теории и позволяет объяснить ряд экспериментальных данных, принципиально не разрешимых в предыдущей теории. Земное электрическое поле поляризует водяные капли, порождая в

них поле, обратное нормальному земному полю хорошей погоды, независимо от направления движения капель (вниз или вверх). Большие падающие капли встречают множество мельчайших капель, быстро несущихся воздушным потоком. При столкновениях больших падающих капель с малыми, летящими вверх, происходит перераспределение зарядов капель, при котором крупные капли приобретают отрицательный заряд, а малые — положительный. Причину такого распределения необходимо искать в следующем: соприкосновение поляризованных капель очень часто не приводит к слиянию¹⁴. Малые капли скользят по поверхности больших и, отделяясь, продолжают свой путь в воздушном потоке. В поляризованной капле низ заряжен положительно, а верх — отрицательно, так что при столкновении встречных капель отрицательный заряд, идущий вверх маленькой капли, компенсируется положительным зарядом большой капли. Так, после столкновения малая капля будет положительно заряжена на величину заряда, потерянного большой каплей. В результате описанного процесса статистическое распределение зарядов в облаке получается таким, что основание облака становится отрицательным, а вершина его положительной.

Такая весьма удачная интерпретация распределения зарядов в толще грозового облака в свое время (1929 г.) была использована Вильсоном¹², который в эту теорию грозообразования внес много принципиально нового и построил последовательно развитую теорию, привлекая к объяснению процесса активную роль воздушных ионов обоих знаков. В связи с этим имеет смысл детально изложить теорию Вильсона и критику этой теории, которая целиком будет относиться и к только что изложенной теории Эльстера и Гейтеля.

3. Теория Вильсона^{12, 15} — «теория влияния и избирательного столкновения капель»

Процесс электризации грозового облака совершается в результате избирательного соприкосновения поляризованных дождевых капель с воздушными ионами, обычно существующими в атмосфере.

Механизм образования грозового облака в общих чертах представляется в следующем виде. Водяной пар, конденсируясь на некоторой высоте, образует водяные капли, которые под действием силы тяжести падают по направлению к Земле. Сильный воздушный поток, всегда сопровождающий грозообразование, препятствует свободному падению капель. Мелкие капли уносятся вверх, часть капель находится во взвешенном состоянии, а крупные капли, преодолевая силу воздушного потока, падают вниз. Всегда существующее нормальное электрическое поле атмосферы оказывает влияние на все образующиеся капли, поляризуя их. Ионизованные молекулы воздуха, движущиеся согласно своим знакам в электрическом поле атмосферы, встречают на своем пути поляризованные водяные капли. Число столкновений капли с ионами воздуха велико, принимая во внимание размеры капли и количество ионов (~ 1000 в $см^3$).

Скорости передвижения ионов воздуха не превышают 3 см в 1 сек., так как максимальной скоростью ионы обладают лишь внутри облака, где градиент поля достигает $\sim 10\,000$ В/см, что соответствует, примерно, скорости 3 см/сек. при подвижности ионов $0,0003$ см²/В/сек. Такие скорости, согласно закону Стокса и соответствующим измерениям Ленарда⁶, развивают капли, свободно падающие в поле силы тяжести, диаметром больше, чем 0,01 см. Огромное количество капель диаметром больше, чем 0,01 см, будут следовательно падать быстрее, чем движущиеся вниз положительные ионы. Количество таких капель значительно больше общего числа «полусантиметровых» капель Симпсона.

В результате взаимодействия крупных и мельчайших поляризованных капель с ионами воздуха, в присутствии сильного воздушного, идущего вверх, потока, получаем отрицательно заряженные крупные капли, расположенные в основании облака, и положительно заряженные мелкие и мельчайшие капли воды на вершине облака по следующим вполне очевидным причинам: падающая поляризованная капля будет притягивать сзади идущие положительные ионы; но, вследствие разностей в скоростях, эти ионы не догонят большую каплю. Положительные ионы, которые будут нагоняться каплей, грубо говоря, будут сторониться ее, так как нижняя часть поляризованной капли имеет наведенный положительный заряд. Идущие навстречу крупным каплям отрицательные ионы будут ими притягиваться. В зависимости от величин скоростей отрицательных ионов и капель (направления скоростей обратные) общий заряд капли будет становиться все более и более отрицательным, по мере того как будет компенсироваться положительный заряд низа капли. Аналогично этому будет происходить с каплями, диаметр которых меньше, чем 0,01 см. Эти капли будут нагоняться положительными ионами и соответственно зарядятся положительно. Воздушный поток отфильтрует крупные капли от мелких, образуя облако с отрицательно заряженным основанием и положительно заряженной вершиной. Такое дипольнообразное распределение зарядов в облаке еще больше увеличит поляризацию еще не распределившихся капель, а это будет способствовать большей электризации капель, вновь приходящих к основанию облака. В результате рассмотрения грозообразования по Вильсону получается быстро развивающийся процесс распределения зарядов в облаке, ускоряющийся во времени и обычно приводящий впоследствии к грозovому разряду — к молнии.

Экспериментальное подтверждение описанного механизма приобретения зарядов водяными каплями, движущимися в электрическом поле плоского конденсатора, произведено Готтом¹⁶.

Измерения распределения зарядов в облаке, проделанные Вильсоном, согласуются с выводами его теории. Однако опыты последних лет (см. ниже) не всегда дают распределение по Вильсону, где основание облака заряжено отрицательно, а вершина — положительно.

Градиенты электрического поля в облаке описанного типа тео-

ретически должны быть относительно велики так, что, например, несмотря на отрицательную поверхностную плотность зарядов на земле при хорошей погоде, градиент под грозовым облаком должен иметь обратное направление. То же можно сказать про области расположения над облаком. Гипотетически в этих областях градиент поля должен иметь направление, обратное направлению градиента при хорошей погоде, т. е. снизу вверх.

На основании вышесказанного можно, по Вильсону, объяснить обычно наблюдаемые положительно заряженные дожди, происходящие в начале гроз. Первая партия крупных падающих дождевых капель имеет преимущественно столкновения с положительными ионами, которые под грозовым облаком идут снизу вверх. Поэтому капля заряжается положительно во время падения.

Не вдаваясь пока в критику основных положений теории Вильсона, укажем, что ряд исследователей, а в особенности сам Вильсон, считает эту теорию способной объяснить поддержание отрицательного заряда Земли и положительного заряда верхних проводящих слоев атмосферы. Существующая гипотеза Виганда — Вильсона, предполагающая, что электрический ток ясной погоды компенсируется токами при грозовых явлениях, берет свое начало в этой теории грозообразования.

Как было указано во введении, нормальный электрический ток из атмосферы на Землю способен в течение 10 мин. нейтрализовать весь отрицательный заряд Земли. Отсутствие этого факта объясняется, согласно гипотезе Виганда — Вильсона, большими электрическими полями в грозовых облаках типа: основание — минус, вершина — плюс. Обратное направление градиентов поля под грозовым облаком и над ним дает начало компенсационным процессам. Сильные электрические поля в районе происходящей грозы чрезвычайно увеличивают плотности обратного тока, которые достигают подчас значений, в тысячи и десятки тысяч раз больших, плотности тока хорошей погоды. Для примера укажем, что токи таких больших плотностей действительно имеют место в течение грозы вблизи верхушки деревьев, мачт кораблей и вообще над выступами на земной поверхности. Эти разрядные точки под грозовыми облаками подчас даже светятся, что сопровождается легким треском (корона). Само явление называют по традиции огнями св. Эльма,

Однако существующие относительно большие плотности токов под грозовыми облаками не всегда по знаку соответствуют теории Вильсона. Например, известны огни св. Эльма при положительно заряженном основании облака, происходящие часто в горах во время снегопада. В этом случае Земля является катодом, а само свечение обычно уже и слабее. Насколько эти случаи редки по сравнению со случаями, подтверждающими теорию Вильсона, статистически неизвестно, но имеются основания считать их не столь уж редкими.

Преимущественное число отрицательных ударов молнии по сравнению с положительными также будет способствовать поддержанию отрицательного заряда Земли в согласии с теорией Виганда — Вильсона.

Поддержание положительного заряда в верхних слоях атмосферы производится, по этой теории, верхним положительным слоем облака, который теоретически должен иметь плотность электрических зарядов большую, чем плотность зарядов, расположенных над ним в атмосфере. Градиент поля велик и направлен от вершины облака вверх, к верхним слоям атмосферы; этот градиент перераспределяет заряды противоположно тому, что происходит в хорошую погоду.

Отметим, что приведенное понимание поддержания поля нормальной погоды по Вильсону, подкрепляется тем фактом, что ежедневное изменение среднего градиента поля хорошей погоды достаточно точно следует ежедневному изменению грозовой активности¹⁷.

Общее статистическое распределение гроз по всей земле и примерный подсчет общего количества электричества, перераспределяющегося со временем, — количественно подтверждает сказанное, если, разумеется, считать справедливыми теорию и ее выводы. Однако здесь требуется большой дополнительный экспериментальный материал, который поможет решить, насколько грозы выполняют функцию поддержания отрицательного заряда Земли и в какой мере число отрицательных ударов молнии преобладает относительно положительных. Часть такого материала в последние годы получена противниками теории Вильсона, и оказалось, что эти данные (см. ниже) достаточно убедительно отрицают не только выводы теории, но и основы самой теории^{7, 11, 12}.

Так, например, экспериментальные данные сравнительно часто дают распределения зарядов в облаке иные, чем у Вильсона, а именно такие, которые приводят к появлению положительных молний. Больше того, число ударов молнии по полярностям хотя и неравновероятно, но процент положительных разрядов достаточно велик (см. гл. 4).

Экспериментальный материал по распределению температур в облаке в значительной степени авторитетно опровергает основные положения теории Вильсона (см. ниже). В связи с этим прежде, чем приступить к обсуждению других существующих теорий грозообразования, необходимо дать представление относительно состояний теории Симпсона и Вильсона к настоящему периоду 1939 г. Это тем более необходимо, что наибольшую популярность имеют эти две теории.

Проводимая в течение ряда лет научная полемика между этими двумя школами до сих пор не приводит к определенному результату, достаточно подтверждающему ту или иную теорию. Ряд выводов из экспериментов одной школы подчас подтверждают некоторую часть взглядов другой теории и т. д. Последняя большая работа Симпсона и Скрэзе⁷ достаточно резко расправляется с теорией Вильсона, но далеко не с «той же резкостью» подтверждает теорию «дробления капель».

Большинство измерений обычно производилось с поверхности Земли и поэтому не могло считаться контрольными для решения вопроса расположения зарядов в грозовом облаке. Поэтому Симпсон в 1937 г. произвел большие исследования действительного

распределения полярности в различных частях грозового облака. Для этой цели использовались воздушные шары — зонды, позволявшие зарегистрировать полярности, изменения полярности, величины градиентов электрического поля, температуры и т. п., начиная с поверхности Земли вплоть до областей, расположенных над вершинами грозовых облаков, т. е. до 8—10 км над уровнем моря. Прибор, производящий регистрацию поля, называется альти-электрографом и основан на принципе стекания зарядов с точечного проводника в виде светящегося разряда при достаточно сильном электрическом поле. Этот прибор в свое время [Уайпл и Сирас (Whipple и Setase), 1936 г.] был использован при измерениях градиентов потенциала на поверхности Земли в течение хорошей погоды и грозы.

Кратко суммируем основные результаты исследований Симпсона⁷. Измерения градиентов поля показали, что вблизи поверхности Земли градиенты сравнительно малы — редко превышают 300 В/см (исключая моменты, следующие за ударом молнии). Не имеется сколько-нибудь сильного увеличения градиента при достижении основания облака. Большие градиенты наблюдались на высотах 5 км и не встречались на высотах ниже 2 км. На этих высотах (5 км) температура воздуха была ниже нуля, так что имеющиеся водяные капли, вероятно, были в замерзшем состоянии.

Полярность в облаке получалась в большинстве случаев «компромиссная» (рис. 4), т. е. на первых порах будто-бы подтверждающая как распределение Симпсона, так и распределение Вильсона. Главное тело облака заряжено отрицательно, верхняя часть облака обычно заряжена положительно. Обнаружена сравнительно часто местная концентрация положительных зарядов в основании облака. Обычно в этом месте рождается тяжелый крупный дождь. Центров или районов с положительным концентрированным зарядом иногда существует несколько. Таким образом под облаком получается отрицательное поле, исключая районы грозового центра. Таковы в общих чертах следствия из последней работы Симпсона, которые хорошо иллюстрируются на рис. 4, где даны соответственно полярности отдельных частей грозового облака и распределение температуры по толще облака.

Резюмируя эти исследования, Симпсон⁷ приводит три положения, подтверждающие его теорию:

- а) наличие областей концентрации положительных зарядов в нижних частях облака;
- б) эти области положительного электричества тесно связаны с активными областями гроз, где восходящие токи воздуха сильно развиты и откуда происходит наибольшее выпадение дождя;
- в) это скопление положительных зарядов найдено в таких частях облака, где температура выше точки замерзания.

Данные, касающиеся остальной массы облака, верхней его части, остаются за рамками теории. Теория «дробления капель» не может объяснить причину нахождения положительных зарядов в верхней части грозового облака.

Критика теории грозообразования Вильсона с точки зрения последних исследований Симпсона ясно вытекает из вышеприведенных выводов. Распределение градиентов и в особенности температур в облаке в очень сильной степени противоречит теории «влияния» Вильсона. В самом деле, рассматривая температурную характеристику облака (рис. 4), Симпсон отмечает, что граница между положительно заряженным верхом облака и нижележащей отрицательно заряженной областью располагается на высотах 4—6 км, где тем-

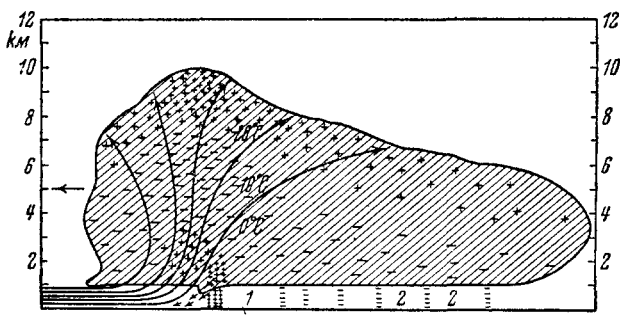


Рис. 4. Структура грозового облака (по Симпсону и Скрезе) 1 — положительный дождь, 2 — отрицательный дождь

пература порядка -10°C , т. е. значительно ниже точки замерзания воды. Следовательно, в этой части дождевые капли не существуют, тогда как по Вильсону именно здесь, на границе дождевые капли заряжаются и распределяются. Правда, может иметь место переохлаждение воды, но при воссоединении капель немедленно наступит замерзание. Итак, вода в верхней части облака и в середине его находится в кристаллическом состоянии в виде ледяных палочек и пластинок, стремящихся располагаться горизонтально при падении под действием силы тяжести.

Известно, что лед является плохим проводником и не поляризуется, кроме того, форма градин, их ориентация и скорости падения не могут привести к образованию индуцированных зарядов, а следовательно, не заряжаются вообще. Все это дает ясное представление о том, что теория Вильсона не объясняет даже процесса разделения зарядов, найденных Симпсоном.

Касаясь роли гроз как основного фактора, поддерживающего отрицательный заряд Земли, а, следовательно, поддерживающего общую циркуляцию электричества в атмосфере, Симпсоновские исследования градиентов потенциала по всей толще облака не подтверждают соответствующего вывода сторонников школы Вильсона. В самом деле, хотя обнаружена положительно заряженная вершина облака, но величина градиентов получилась чрезвычайно малой. Наибольшее поле оказалось порядка -300 V/cm .

Разумеется, дополнительные и более точные измерения смогут яснее ответить на данный вопрос, хотя все, проделанное Симпсо-

нем, весьма серьезно убеждает в том, что грозы, повидимому, не определяют относительного постоянства заряда Земли.

Приведенный подробный разбор двух основных теорий грозообразования показывает, что в действительности разбираемое явление невозможно так просто моделировать. Хотя каждая из теорий кажется весьма простой и законченной, но экспериментальный материал не объясняется ни одной из них. Вряд-ли сколько-нибудь удачная комбинация теорий Симпсона и Вильсона даст правильный ответ.

4. Теория «испарения и конденсации».

Теория, данная Гунном^{17,18}, основывается на давно известном экспериментальном факте электризации капель при конденсации и испарении. В конце XVIII в. Лаплас высказал возможность концентрации электрических зарядов при грозах, вследствие электризации капель воды, связанной с конденсацией и испарением. Оказывается, что происходящая электризация водяной капли получается положительной при испарении и отрицательной при конденсации. Равновесный заряд каждой капли определяется ее радиусом и пропорционален ему. Таким образом, каждая капля и окружающий ее ионизованный водяной пар рассматривается как «электрический концентрационный элемент» (electrical concentration cell). Все ранние исследования игнорировали факт последовательного изменения состояний дождевой капли и важность этого изменения, влияющего на электрические свойства дождя и грозовых облаков. В самом деле, в грозовых облаках и при их образовании влажный воздух подвергается различным температурным воздействиям прежде, чем окончательно оформятся дождевые капли, падающие на поверхность земли. Получается, по мнению Гунна, вполне естественное динамическое равновесие в облаке, в каждой отдельной ячейке его, вместо статического распределения, о котором обычно идет речь в предшествующих теориях. Думается, что нельзя считать полностью статическим равновесием процесс грозообразования по Симпсону и Вильсону, но с точки зрения Гунна это, пожалуй, действительно так.

Сущность теории заключается в том, что взаимодействие различных факторов, как-то: давление, изменение температуры, воздушные потоки, количество водяного пара и т. д., создает определенный динамический процесс в атмосфере. В результате такого взаимодействия получается грозовое облако с отрицательным зарядом в основании.

Однако вероятно присутствие низкого теплового воздушного течения может создать в основании и положительный заряд. Все ориентировочные расчеты ряда величин, как например: разности потенциалов, электрического поля, электрических моментов, токов и т. д., — хорошо согласуются с наблюдениями. Тем не менее в ряде обзорных статей, появившихся после 1935 г., т. е. после опубликования этой теории, а также у Симпсона, Шонландта, Аллибона и др., совершенно отсутствует описание этой теории и критика ее

Последние температурные исследования Симпсона (см. выше) серьезно опровергают основные положения этой теории. Основная часть облака находится при температуре ниже нуля, и поэтому можно рассматривать лишь согласно Гунну нижнюю часть облака, которая включает также положительно заряженные грозовые центры с большими градиентами. Подобное распределение градиентов теории Гунна дать не может.

В одинаковой степени мало известной является теория грозообразования, автором которой считается Дозере.

5. Теория Дозере^{19,20} — «фотоэлектрическая теория»

Автор считает, что действие ультрафиолетовых лучей Солнца на образовавшееся облако вызывает положительную электризацию вершины облака, где находятся кристаллы «сухого» льда. Действительно, фото-эффект с «сухого» льда от воздействия ультрафиолетового излучения относительно велик, с другой стороны, распределение температур в облаке равным образом соответствует присутствию льда на его вершине, но особо убедительных расчетов по этому поводу не приводится. Молния автором рассматривается как средство быстрого и непосредственного переноса зарядов, происходящего между облаками или между облаком и Землей. Полярность молнии зависит от того, в какой части облака зажигается молния. Дождь представляется как тающий град. Все это автор теории считает подтверждающим теорию положительной фотоэлектризации льда на вершине облака лучами Солнца. Исследования Симпсона не обнаружили, как уже указывалось, больших градиентов поля на вершине облака, поэтому нет причины для возникновения грозовых разрядов. С другой стороны, присутствие областей большого положительного заряда в середине и в основании облака едва ли может быть объяснено этой теорией.

Приведенное краткое изложение существующих теорий грозообразования довольно хорошо иллюстрируется в табл. 1, где наглядно дано сравнение этих теорий друг с другом.

Как указывалось, экспериментальные исследования последних лет дали в основании облака отрицательный заряд и на вершине положительный. Кроме этого, обнаружены области с положительным зарядом в основании, которые по Симпсону называются грозовыми центрами. Весьма возможно равным образом присутствие отрицательных центров в основании облака.

Заканчивая изложение теорий образования грозовых облаков, необходимо отметить недостаточно удовлетворительное состояние теории грозы. Это в свою очередь серьезно отражается на понимании механизма грозового разряда — молнии. Последующее изложение вопросов, связанных с механизмом и природой молнии, полностью подтвердит данное заключение.

Таблица 1

Название теории	Автор	Процесс электризации	Агенты	Распределение зарядов в облаке	
				основание	вершина
Теория «дробления капель»	Симпсон	Раздробление дождевых капель	Воздушный поток и сила тяжести	+	—
Теория «влияния»	Эльстер и Гейтель	Столкновение поляризованных капель	Воздушный поток, сила тяжести и электрическое поле в атмосфере	—	+
Теория «влияния и избирательного столкновения»	Вильсон	Избирательное столкновение поляризованных капель с воздушными ионами	Электрическое поле в атмосфере, заряды ионов, возд. поток и сила тяжести	—	+
Теория «испарения и конденсации»	Гунн	Электризация капель при испарении и конденсации	Температура, давление, воздушный поток и сила тяжести	—	+
Теория фотоэффекта	Дозере	Фотоэффект с «сухого» льда	Ультрафиолетовое излучение Солнца, температура, воздушный поток и сила тяжести	—	+

II. МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ГРОВОГО РАЗРЯДА

На ряду с обычными методами изучения импульсного напряжения, которые применяются в лабораторной практике, изучение грозного разряда потребовало разработки совершенно новой методики измерений. Специфичность обстановки, в которой происходит грозовой разряд, и условия, сопровождающие регистрацию эффекта в полевой обстановке; спонтанность молнии и большие колебания параметров разряда (см. гл. IV); сравнительно большой пространственный разброс явления и относительная редкость и кратковременность явления; многообразие вариантов грозного разряда и сложность каждого отдельного варианта (см. ниже) — все это существенно осложняет процесс измерения параметров молнии. Статистическая ценность того или иного измерения очень часто довольно мала в связи с перечисленными условиями, в которых приходится наблюдать и регистрировать грозовой разряд в природе.

Все существующие методы регистрации молнии можно грубо разбить на две группы. К первой группе относятся методы регистрации временной последовательности развития грозового разряда, со всеми вытекающими отсюда измерениями, тогда как ко второй группе можно отнести общие интегральные измерения параметров молнии. Соответственно этому перечислим основные существующие методы и способы регистрации молнии и ее параметров, давая краткие описания и характеристики приборам и установкам, осуществляющим их.

Фотографирование молнии обычным фотоаппаратом, вероятно, начали производить вскоре после открытия фотографии. Стереоскопический снимок может дать пространственную картину общего свечения канала, по которому прошел грозовой разряд. Никакого процесса развития молнии таким способом получить, конечно, не удастся. Пространственно временную развертку явления можно произвести, очевидно, созданием относительного движения объектива и фотопленки. На этом, в сущности говоря, основано принципиальное устройство так называемой камеры Бойса (Boys), предложенной им в конце прошлого столетия^{21, 22}.

Камера Бойса является в настоящее время основным прибором, которым производят съемку процесса развития грозового разряда. Правда, эта камера в ее современном варианте очень сильно отличается от первоначальной, но принципиальная идея относительного перемещения объектива и пленки остается в соответствующих измерениях неизменной.

Осуществление движения объектива относительно фотопленки

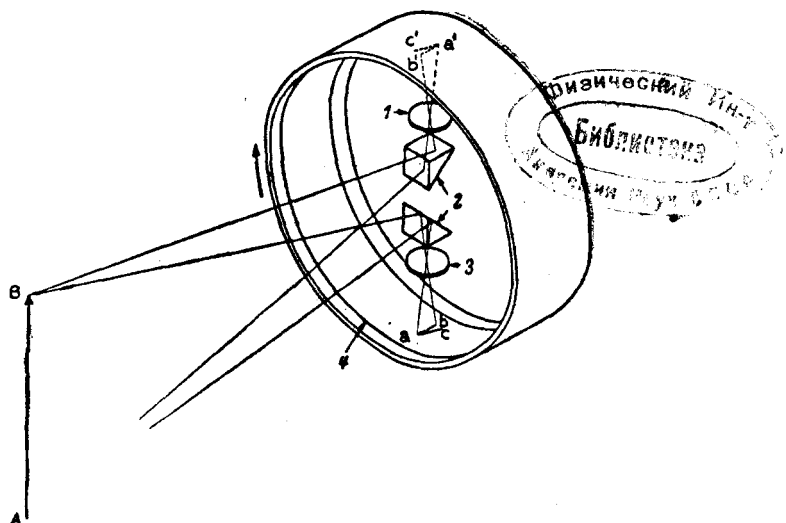


Рис. 5. Схематическое устройство двухлинзовой камеры Бойса. 1, 3 — линзы, 2 — призмы, 4 — пленка

можно получить вращением объектива при покоящейся пленке, либо вращением пленки; в общем случае можно вращать (или передвигать) объектив и пленку с разными скоростями. Рис. 5 схематично показывает устройство камеры Бойса с двумя линзами.

В качестве примера фотографирования молнии с помощью камеры Бойса можно привести прекрасные снимки, полученные Шонландом. Рис. 6а и 6б представляют фотографии одного и того же грозового разряда, снятого быстровращающейся и медленно вращающейся камерами. На фотографии рис. 6а виден характер развития молнии, состоящей из ряда последовательных разрядов, так называемый многократный разряд (см. гл. III). Медленная развертка (рис. 6б) не дает возможности проследить развитие грозового разряда.

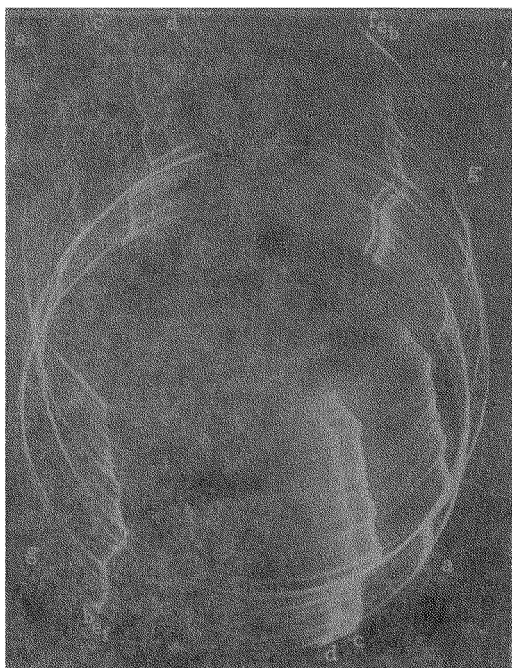


Рис. 6а. Фотография молнии, полученная с помощью быстровращающейся камеры. Отчетливо виден ряд последовательных разрядов

Кроме полезного искажения фотоснимка, вследствие относительного перемещения линзы и пленки, имеют место различные вредные, искажающие снимок, факторы. Для учета вредных искажений и в целях дополнительного контроля используют подчас двухлинзовую камеру. Фотографирование производится двумя диаметрально расположенными линзами на фотопленке, помещенной на внутренней стороне барабана (рис. 5). Линзы в двухлинзовой камере можно вращать с различными, но вполне определенными скоростями, получая тем самым различные временные развертки. Наложений снимков бояться не приходится в связи с тем, что одна линза дает изображение в верхней части пленки, другая же на нижней. Заслуживает быть отмеченным следующий весьма важный практический момент, могущий иметь место при съемках молний и способный подчас смазать или исказить всю картину. Удар молнии наилучшим образом будет сфотографирован, если в течение разряда линза камеры (или пленка) имела направление скорости, близкое к перпендикулярному относительно пути распространения молнии. Однако

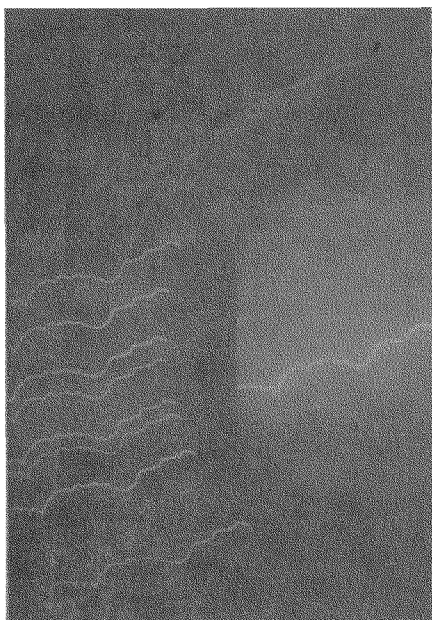


Рис. 7. Фотография молнии (Мак-Икрон). Слева — снимок с вращающейся пленкой. Справа — обычная фотография этого же разряда

Двенадцать линз давали развертку, пять — обычный снимок. Камера с таким количеством линз захватывала весь горизонт. Движение пленки осуществлялось мотором, а не рукой, как в экспериментах Шонланда^{30, 31} с двухлинзовой камерой.

Заканчивая описание различных камер, дающих временные развертки, отметим, что данный метод регистрации процесса развития грозового разряда дает двухмерную картину. Третьим измерением является здесь время, вычисленное из величин смещения и относительных скоростей движения линз и пленки. Измерения ряда линейных параметров молнии, разумеется, следует давать с учетом трехмерности пространства. Множитель, применяемый для учета третьего пространственного измерения, обычно получается при сравнении двух-

мерного изображения (снимок) с его проекцией на ось, соединяющую начало и конец зигзагообразной картины. Статистически поправка на трехмерность обычно не превышает 30% относительно общей длины двухмерного изображения³¹.

Несмотря на то, что грозовые разряды сравнительно хорошо фотографируются в обычных условиях, при развертках некоторые элементы молнии не фиксируются, вследствие недостаточной интенсивности. Применение кварцевой оптики, разумеется, увеличит интенсивность, однако до сих пор при фотографировании молнии кварц не применялся, хотя ультрафиолетовая часть общего излучения канала молнии вероятно достаточно велика.

Все снимки молнии относятся к ночным грозам. Разработка методики фотографирования молнии при дневном освещении представляет интерес, во много раз увеличивая коэффициент полезного действия. Кроме того, спектральное изучение молнии может дать много интересного материала с точки зрения выяснения природы грозового разряда.

Пространственно-временная регистрация разряда может осуществляться не только вышеизложенным методом; осциллографирование также дает развертку явления во времени. Особенностью этого метода регистрации можно считать следующее: на ряду

далеко не всегда это случается. Подчас движение линзы оказывается почти параллельным направлению удара молнии. Это часто бывает при разрядах между облаками, если камера была настроена на съемку удара типа облако — Земля. Итак, временная развертка может оказаться самой разнообразной в зависимости от взаимориентировки направления движения грозового разряда и направления вращения линз (или пленки). В связи с этим, для обнаружения угла ориентации, а кроме того и из некоторых других соображений, в настоящее время камера монтируется почти всегда с подвижными и неподвижными линзами (или пленками). В этом случае получается обычная фотография и развертка (рис. 7).

Условия эксперимента в поле требуют, в целях повышения коэффициента полезного действия, использовать наибольший телесный угол при фотосъемках²³. С этой целью применяют камеры с большим количеством линз.

Работы по изучению молнии, проводимые в Энергетическом институте Академии наук СССР и в ВЭИ, заслуживают большого внимания в связи с тем широким размахом, который они приняли в последнее время, и в связи с теми достижениями, которые имеют место в вопросах конструирования аппаратуры, планомерных съемок грозовых разрядов, толкования механизма разряда и т. д.^{24—29}.

При изучении молнии в районе Бакуриани (1938 г.) группой сотрудников Энергетического института Академии наук СССР и ВЭИ под руководством проф. Стекольниковой применялась камера с 17 объективами²⁷. Фотографирование молнии производилось на неподвижную и движущуюся пленки при неподвижных линзах.

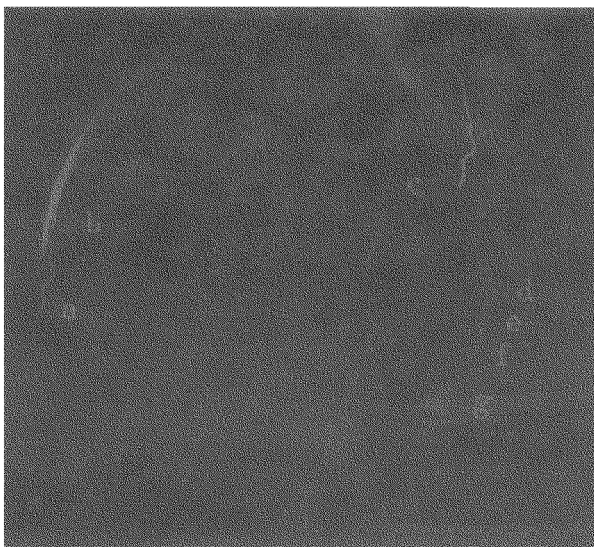


Рис. 6б. Фотография молнии, полученная с помощью медленно-вращающейся камеры

Магнитный метод регистрации обычно применяется для измерений токов молнии, определения полярности удара и т. п. и имеет очень широкое распространение при регистрации грозовых перенапряжений в линиях передач.

Все перечисленные методы регистрации молнии и вообще импульсных напряжений в той или иной степени дают общую картину происходящего явления. Однако каждый метод в отдельности очень односторонен и подчас дает противоречивые результаты. Поэтому

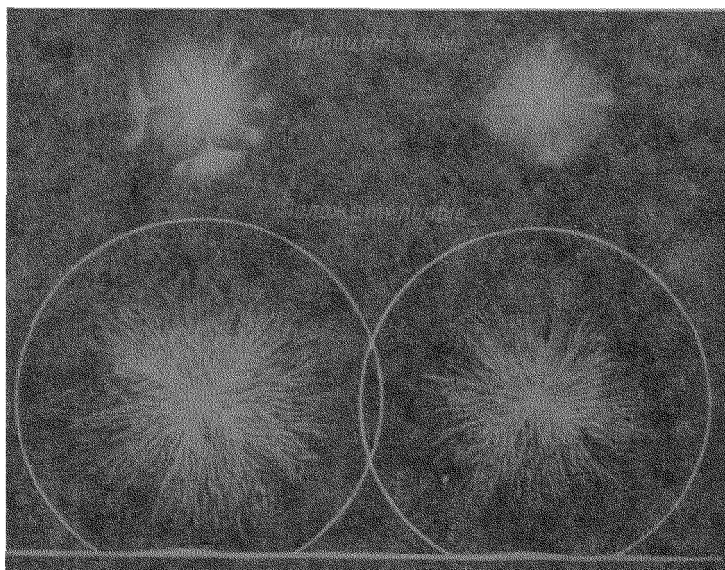


Рис. 9. Клидонограммы при разных полярностях регистрируемых волн

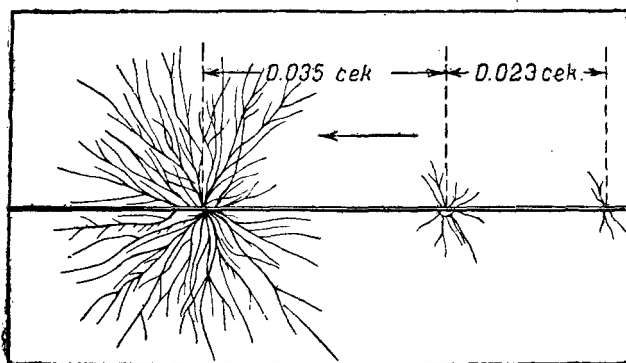


Рис. 10. Клидонограмма, полученная при вращающейся пленке. На рисунке видны три последовательных разряда

с временной разверткой появляется возможность количественного определения напряжений, токов и количеств электричества при разряде. Возможно определение полярности в течение многократного разряда этим методом, разумеется, с учетом индукционных влияний окружающей обстановки. Вообще говоря, индукционные влияния, сравнительно часто появляющиеся при осциллографировании, очень трудно поддаются устранению и подчас сильно искажают эффект. Этот момент значительно принижает ценность осциллографического метода.

Одновременная регистрация осциллографами и камерами типа Бойса производилась Мак-Икроном³³, Шонландом³² и Стекольниковым²⁹. Показано, что при хорошо налаженной системе осциллографирования и фотографирования записи получаются соответственно идентичными. Группой сотрудников ВЭИ для более полной картины грозового разряда применялись два осциллографа: один записывал всю волну, другой же — лишь фронт волны.

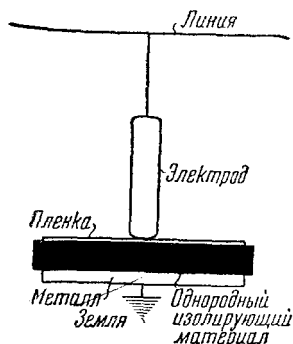


Рис. 8. Схематическое устройство обычного клидонографа

Перейдем к краткому описанию других приборов, регистрирующих тот или иной параметр молнии и вообще разряда. К таким приборам в первую очередь относится клидонограф, изобретенный Петерсом³⁴. Принципиальная схема прибора изображена на рис. 8. В результате подачи напряжения на электрод, у конца его появляется коронное свечение, которое фиксируется на пленке (так называемые фигуры Лихтенберга).

Надежные результаты работы этого прибора обычно получаются для напряжений от 1,5 до 30 kV. Для больших напряжений используется делитель напряжений³⁵.

Клидонографы дают ответ относительно полярности разряда по виду фотографии (рис. 9). Существуют клидонографы с вращающейся пленкой²⁵. Создав достаточно быстрое вращение, можно получить фотографии последовательных стадий процесса; примером служит рис. 10²⁴. После каждого удара молнии автоматически передвигают электрод клидонографа по горизонтали, используя, таким образом, оставшуюся площадь пленки. Это чрезвычайно облегчает съемки в условиях полевых исследований.

На ряду с регистрацией явления фотографически и электрически, существует метод магнито-записи²⁷. Величина прошедшего по проводнику электрического тока может быть получена измерением остаточной намагниченности ферромагнетика, помещенного вблизи этого проводника. Этот метод регистрации впервые применен был в конце прошлого столетия Поккельсом. Полярность молнии также может быть определена этим методом. Однако в случае биполярных разрядов (см. гл. III) ферромагнетик даст лишь разностный эффект.

в настоящее время многие исследователи применяют все перечисленные методы регистрации молнии одновременно. Дублирование ряда приборов также является надежным критерием правильности записи явления, и поэтому часто практикуется^{29, 32, 33}.

В заключение укажем, что общая методика измерений молнии не всегда является надежной в описании действительно происходящего явления. Погрешности в определении требуемых параметров молнии почти всегда достаточно велики. Все это, разумеется, существенно влияет на разрешение целого ряда вопросов, связанных с механизмом грозового разряда.

III. МОЛНИЯ И ЕЕ ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА

Молния представляет собой электрический разряд между облаками или между облаком и Землей. Существует три типа молнии: 1) линейная молния, т. е. обычная, наиболее распространенная молния, которая наблюдается во всех грозах и представляет собой прямолинейный или извилистый ярко светящийся электрический разряд; 2) шаровая молния — ярко светящийся шар, который летит по воздуху или неподвижно сидит на каком-либо предмете; шаровая молния — явление сравнительно редкое; 3) четкообразная молния, которая представляет собой разряд в виде цепочки, состоящей из отдельных светящихся шаров; этот тип молнии — явление наиболее редкое.

Из всех этих типов молний наиболее исследована линейная молния, в связи с тем, что она наблюдается во всех грозах, и кроме того, может быть, до известной степени, воспроизведена в лабораторных условиях.

Систематическое изучение явления грозового разряда начинается с момента изобретения Бойсом^{21, 22, 36} (1900 г.) специальной фотографической камеры. Однако только за последнее десятилетие имеются серьезные достижения в изучении молнии, которые проливают некоторый свет на механизм грозового разряда. В этом отношении большие заслуги имеют исследования Шонланда (Англия) и Мак-Икрона (Америка). В СССР начало систематического изучения грозового разряда относится к 1934—1935 гг., когда было начато комплексное изучение этого явления в полевой лаборатории (под руководством проф. Стекольников), и в настоящее время уже получены довольно ценные результаты.

Вопреки ранее существовавшему представлению о молнии, создававшемуся на основании визуальных наблюдений, в настоящее время установлено, что грозовой разряд — чрезвычайно сложное явление. Развитие грозового разряда рисуется сейчас следующим образом: из облака, заряженного большей частью отрицательно, появляется слабый, светящийся разряд, так называемый лидер, который движется по направлению к Земле. Когда лидер достигает Земли, немедленно появляется интенсивный, ярко светящийся разряд, идущий в обратном направлении, т. е. от земли к облаку по пути, проложенному лидером. Этот разряд носит название главного или

обратного разряда. На рис. 11 приведена фотография, полученная в камере Бойса, лидера (справа) и обратного разряда (слева). Довольно часто наблюдается, что после достижения главным разрядом облака, через некоторый промежуток времени появляется второй разряд (тоже состоящий из лидера и главного разряда), идущий по пути первого разряда, затем третий и т. д. Эта многократность молнии, т. е. появление целого ряда последовательных

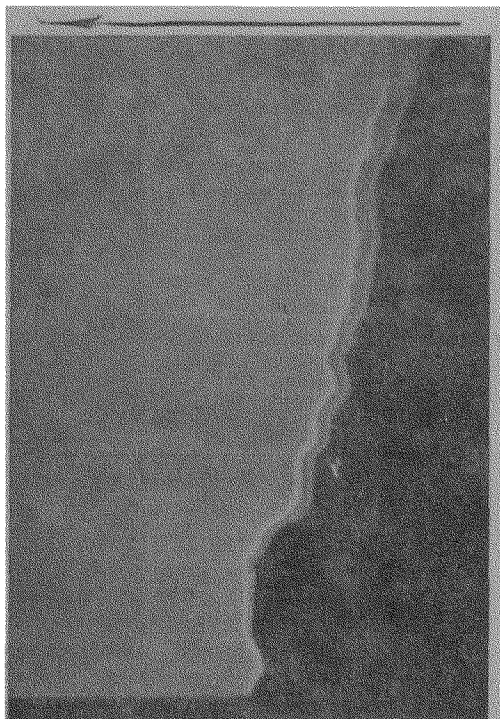


Рис. 11. Разряд с лидером. Стрелка указывает направление временной развертки

разрядов, следующих друг за другом по одному и тому же пути с небольшими временными интервалами, была замечена уже давно (1884 г.). Дальнейшие исследования Гафферта³⁷, Вальтера³⁸, Ларсона³⁹ с помощью вращающихся фотокамер подтвердили существование многократной молнии и, наконец, исследования Шонланда^{31, 40}, Мак-Икрона^{11, 41}, Стекольниковца^{25, 29} и др. с усовершенствованной камерой Бойса и осциллографами позволили определить время между отдельными разрядами, скорость распространения, число и характер их развития.

На ряду с такими лидерными разрядами наблюдаются иногда разряды, которые не имеют лидера. Такие разряды будут подробно рассмотрены в § 6.

В результате многочисленных исследований за последнее время получены данные относительно характера развития грозового разряда и основных параметров, хотя не всегда еще имеется достаточный статистический материал.

Рассмотрим все последовательные стадии грозового разряда и их параметры.

1. Лидер

а) Типы лидеров. Шонланд разделяет лидеры на три типа: 1) ступенчатый лидер, 2) стреловидный и 3) ступенчато-стреловидный (dart — stepped) лидер.

Ступенчатый лидер, согласно Шонланду, всегда предшествует первому разряду многократной молнии и распространяется от облака к Земле ступенями, т. е., выйдя из облака, разряд проходит некоторое расстояние и прекращается, через некоторый промежуток времени разряд вновь появляется и проходит по тому же пути, но большее расстояние, затем опять прекращается и т. д., пока не достигнет Земли, после чего появляется обратный разряд. Длина ступени такого лидера составляет ~ 50 м. Ступенчатый лидер часто имеет ответвления, распространяющиеся к земле, которые оканчиваются в воздухе, не доходя до земли. В этом случае обратный разряд, идущий по пути такого лидера, тоже дает ответвления, распространяющиеся по пути лидерных ветвей.

В своей последней работе Шонланд³² приводит данные, полученные при одновременном фотографировании и осциллографировании молнии. Сопоставляя результаты измерений этими двумя методами, Шонланд приходит к выводу, что осциллограммы первого разряда многократной молнии также показывают ступенчатый характер развития лидера. На осциллограммах были обнаружены пульсации напряжения, которые соответствуют, по мнению Шонланда, ступеням лидера. На рис. 12 *a* даны: схематическая осциллограмма (вверху) и фотография на движущейся пленке (внизу) одного и того же разряда (обе схемы совместимы по времени). Пульсации (*a*) вначале волны соответствуют ступеням лидера на нижней фотографии, резкое изменение поля (пик — *b*) соответствует появлению обратного разряда и, наконец, участок — *c* на осциллограмме соответствует продолжению свечения канала, после того как обратный разряд достигнет облака. На рис. 12а представлены также последующие разряды со стреловидными лидерами (пульсаций нет). Такой тип ступенчатого лидера Шонланд называет α -типом, этот тип разряда встречается чаще всего (65%). Другой тип ступенчатого лидера, называемый им β -типом, представлен также схематически на рис. 12б. Лидеры β -типа вначале быстро продвигаются яркими и длинными ступенями, но по мере продвижения к Земле яркость свечения, длина ступени и эффективная скорость такого лидера уменьшаются. Лидеры β -типа имеют

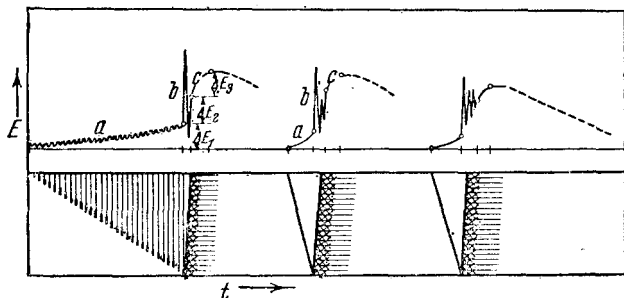


Рис. 12а. Разряд α -типа (по Шонланду)

скорость продвижения, значительно большую, чем лидеры α -типа. На рис 12а и 12б ясно видно различие этих двух типов лидеров.

В последней работе Мак-Икрон³³ приводит новые чрезвычайно интересные данные по поводу ступенчатых лидеров. Мак-Икрон изучал (фотографированием и одновременно осциллографированием) удары молнии в Empire State Building (Нью-Йорк), высота которого — 380 м. Из 55 зарегистрированных разрядов, при отрицательно-заряженном облаке, 36 тоже имели начальный ступенчатый ли-

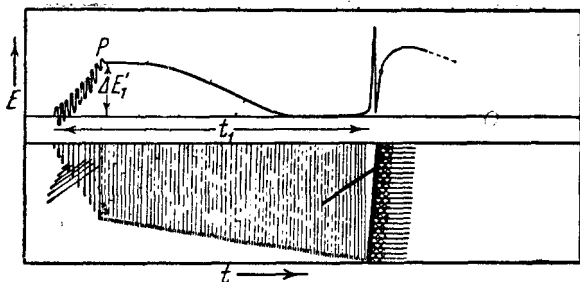


Рис. 12б. Разряд β -типа (по Шонланду)

дер, но распространявшийся снизу вверх, т. е. от здания к облаку. Такой «ступенчатый положительный лидер» не сопровождался обратным разрядом. Следует отметить, что «положительный» лидер, т. е. лидер, распространяющийся от положительно-заряженного облака, был впервые обнаружен Стекольниковым²⁷.

В противоположность данным Шонланда и Мак-Икрона в последних комплексных исследованиях Стекольников²⁹ (на высоте 2000 м) не наблюдалось появления ступенчатых лидеров. На фотографиях Стекольников вообще не мог обнаружить лидеров у первых разрядов (возможно из-за слабой интенсивности таких лидеров), тогда как осциллограммы показывали изменение напряженности поля, которое может быть приписано лидеру, но никаких пульсаций напряжения при этом не наблюдалось. Стекольников делает вывод, что полученные им данные не подтверждают точку зрения Шонланда об обязательном существовании ступенчатого лидера к первому разряду. Таким образом вопрос о характере лидера к первому разряду требует дополнительных исследований.

Другой тип лидера — стреловидный, обычно предшествует последующим разрядам и продвигается непрерывно от облака к Земле, в виде ярко светящейся головки, оставляющей после себя слабо светящийся канал. Стреловидный лидер редко дает ответвления.

Если между последовательными разрядами получается очень большой интервал, то разряд после такого интервала имеет ступенчато-стреловидный лидер, т. е. стреловидный лидер, нижний конец которого имеет ступенчатый характер. Длина ступени такого лидера составляет всего 8—10 м.

На рис. 13 схематически представлено развитие грозового разряда по Шонланду, состоящего из нескольких последовательных разрядов (зарегистрированных на движущейся пленке), слева представлен первый удар со ступенчатым лидером и ветвями, последующие разряды имеют стреловидный лидер.

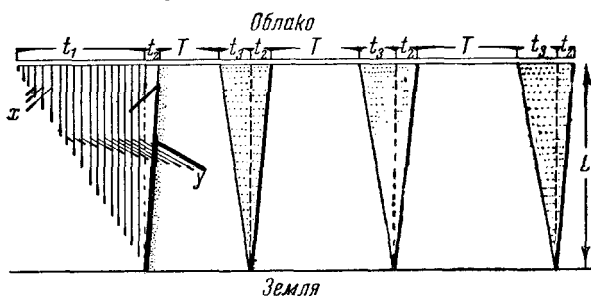


Рис. 13. Схема развития многократного разряда (по Шонланду)

Шонланд⁴⁰ приводит данные, которые характеризуют процент появления лидеров для первых и последующих разрядов; эти данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Фотографии	Первые разряды		Последующие разряды		Все разряды	
	число	с лидером	число	с лидером	число	с лидером
Хорошие	15	15	26	23	41	38
Удовлетворительные	18	9	41	26	59	35
Всего	33	24	67	49	100	73

Из табл. 2 следует, что из общего числа сфотографированных Шонландом разрядов 73% имеют лидеры, при этом, как для первых разрядов, так и для последующих, процент появления лидеров приблизительно один и тот же. В своей первой работе Шонланд³¹ указал, что из 36 разрядов 26 имели лидеры, что составляет 72%. Приведенные данные показывают, что большинство разрядов имеют лидеры.

б) Скорость распространения лидеров. Распространение ступенчатого лидера характеризуется некоторой «эффективной» скоростью, которая меньше действительной скорости продвижения ступени, так как эффективная скорость включает временные интервалы между ступенями.

В табл. 3 собраны данные, полученные Шонландом для «эффективной» скорости ступенчатых лидеров.

Таблица 3

Скорость в $\text{см/сек} \cdot 10^7$	Число ступенчатых лидеров первого разряда	Скорость в $\text{см/сек} \cdot 10^{-7}$	Число ступенчатых лидеров первого разряда
От 1,0 до 2,0	9	От 7,0 до 9,0	3
» 2,0 » 3,0	3	» 9,0 » 11,0	1
» 3,0 » 5,0	3	» 11,0 » 13,0	1
» 5,0 » 7,0	3	» 13,0 » 15,0	0

Средняя «эффективная» скорость получается равной $3,8 \cdot 10^7$ см/сек , большинство лидеров имеют скорость между $1,0 - 3,0 \times 10^7$ см/сек . Данные табл. 3 представляют «двухмерную» скорость лидеров; для получения «трехмерной» скорости (т. е. с учетом пространственного продвижения канала лидера) Шонланд увеличивает эти данные на 30% (см. гл. II).

Скорости движущихся вверх (положительных) ступенчатых лидеров, измеренные Мак-Икроном³³, находятся в интервале от 0,17 до 2,09 фут/м.сек , т. е. от $5,1 \cdot 10^6$ до $6,3 \cdot 10^7$ см/сек .

Скорости продвижения стреловидных лидеров значительно выше и приведены в табл. 4. Средняя скорость стреловидного лидера — $5,5 \cdot 10^8$ см/сек , наиболее вероятная скорость соответствует — $2,0 \cdot 10^8$ см/сек . Максимальная скорость — $2 \cdot 10^9$ см/сек .

Таблица 4

Скорость в $\text{см/сек} \cdot 10^8$	Число стреловидных лидеров	Скорость в $\text{см/сек} \cdot 10^{-8}$	Число стреловидных лидеров
От 1,0 до 3,0	17	От 13,0 до 15,0	6
» 3,0 » 5,0	8	» 15,0 » 17,0	1
» 5,0 » 7,0	6	» 17,0 » 19,0	2
» 7,0 » 9,0	5	» 19,0 » 21,0	2
» 9,0 » 11,0	5	» 21,0 » 23,0	1
» 11,0 » 13,0	2		

Существует определенная связь между скоростью стреловидного лидера и промежутком между этим лидером и предшествовавшим разрядом, а именно чем больше этот промежуток, тем меньше скорость лидера и наоборот. Несомненно, что это связано с процессами рекомбинации, происходящими в ионизированном канале, созданном предшествующим разрядом. Зависимость скорости лидера от интервала подтверждается данными табл. 5.

Таблица 5

Лидеры	Порядковый номер разряда	Интервал между разрядами в сек.	Скорость стреловидного лидера $\cdot 10^{-8}$ см/сек
Быстрые	5	0,015	21,5
	9	0,06	17,1
	9	0,12	20,2
	14	0,005	19,3
Медленные	7	0,014	15,0
	5	0,07	1,9
	5	0,07	1,7
	7	0,48	1,8
	4	не измерено	1,7
	8	0,08	2,0
	6	0,14	2,8
	5	0,03	не измерено

Иногда наблюдается уменьшение скорости продвижения лидера по мере приближения к Земле; так например, для одного разряда получилось следующее изменение скорости (Шонланд³¹): первые 700 м скорость лидера была — $9,3 \cdot 10^8$ см/сек, а для последних 600 м скорость уменьшилась до — $5,3 \cdot 10^8$ см/сек.

Однако еще слишком мало данных для утверждения универсальности этого факта.

Зарегистрированные Шонландом⁴⁰ три ступенчато-стреловидных лидера имели скорости — $1,9 \cdot 10^8$, $1,2 \cdot 10^8$ и $1,0 \cdot 10^8$ см/сек.

с) Связь между длиной ступени и интервалом. Обычно длина ступени ступенчатого лидера составляет 50 м, интервал между ступенями порядка 100 мсек. Для ступенчато-стреловидного лидера длина ступени — порядка 10 м и интервал около 8 мсек. Существует определенная зависимость между средней длиной ступеней $\bar{l}$ в разряде и средним интервалом $\bar{t}$ между ступенями. Полученная Шонландом зависимость представлена графически на рис. 14, где по оси ординат отложено $\bar{t}$ в микросекундах, а по оси абсцисс — $\bar{l}$ в метрах; каждая точка соответствует одному

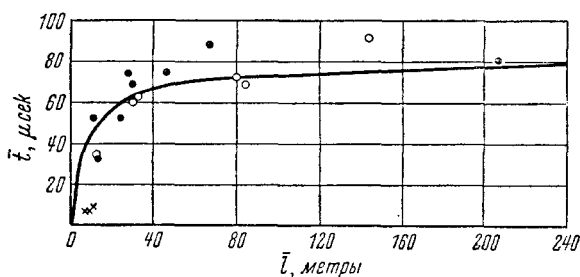


Рис. 14. Зависимость средней длины ступени лидера от среднего значения временного интервала

разряду. Черные кружки — данные хороших фотографий, где точность определения $\bar{l}$ и $\bar{t}$ достаточная, крестики — соответствуют ступенчато-стреловидным лидерам. Из рис. 14 следует, что чем больше временный интервал, тем длиннее ступень, появляющаяся после этого интервала. Кривая рис. 14 позволяет получить зависимость между «эффективной» скоростью лидера ($\bar{v} = \frac{\bar{l}}{\bar{t}}$) и средней длиной ступени $\bar{l}$. На рис. 15 дана эта зависимость; пунктирная прямая рис. 15, на которую точки ложатся даже несколько

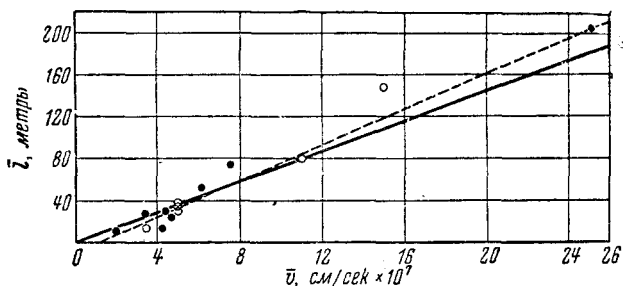


Рис. 15. Зависимость между эффективной скоростью лидера и средней длиной ступени

лучше, пересекает ось абсцисс в точке $\bar{v} = 1,0 \cdot 10^7$ см/сек. Эта скорость является некоторой «граничной» скоростью и имеет определенный физический смысл (см. § 7).

§ 2. Главный (обратный) разряд

Как только лидер достигает Земли, немедленно возникает главный разряд, распространяющийся от Земли к облаку. Главный разряд является значительно более интенсивным по свечению, и было замечено, что по мере продвижения главного разряда вверх это свечение уменьшается, особенно по мере прохождения точек разветвлений. Никогда не наблюдалось увеличения свечения по мере продвижения разряда вверх.

а) Скорость обратного разряда. Скорость продвижения обратного разряда значительно больше скорости лидера, а именно, среднее значение скорости обратного разряда $\approx 5,2 \cdot 10^9$ см/сек, а наиболее часто встречающееся значение скорости $\approx 3,5 \cdot 10^9$ см/сек. Шонланд⁴⁰ приводит результаты определения скоростей обратных разрядов для 48 случаев. Эти результаты представлены на рис. 16, где в первом столбце графика приведены скорости распространения канала обратного разряда; как видно, максимальная скорость — $14,4 \cdot 10^9$ см/сек и минимальная — $2,0 \cdot 10^9$ см/сек. Во втором столбце графика приведены данные для скорости распространения нижней части канала (более интенсивной) и в третьем столбце — данные по скорости распространения верхней части канала (менее

интенсивной). Как видно, яркое свечение имеет место при больших скоростях продвижения канала. В последнем четвертом столбце даны скорости обратных разрядов вдоль ветви; к сожалению, здесь слишком мало данных.

На рис. 17 схематически представлен один из разрядов, у которого наблюдалось значительное изменение интенсивности свечения и уменьшение скорости по мере продвижения вверх. На рисунке цифры около разряда дают время в микросекундах от начала

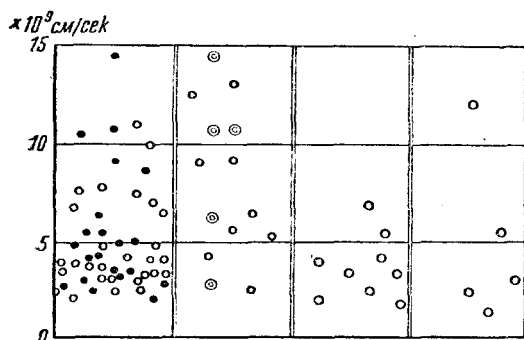


Рис. 16. Распределение по скоростям главных разрядов (по Шонланду)

разряда. У этого разряда удалось определить изменение скорости по мере его продвижения; результаты оказались следующие:

Участок канала	Скорость $\times 10^{-9}$ см/сек
От Земли до ветви 2	16,1
От ветви 2 до ветви 3	21,0
От ветви 3 до ветви 5	9,7
От ветви 5 до облака	5,5

Общая протяженность этого разряда составила $\sim 2,5$ км.

б) Свечение. Свечение главного разряда продолжается сравнительно долгое время, довольно часто продолжительность свечения значительно превосходит время, необходимое разряду для достижения облака. В табл. 6 приводятся данные Шонланда³¹ по продолжительности свечения для четырех разрядов.

Мак-Икрон¹¹ также указывает, что он наблюдал свечение, продолжавшееся значительно дольше, чем время, необходимое для достижения разрядом облака; так например, был зарегистрирован случай, когда свечение продолжалось 0,185 сек. — вплоть до появления второго разряда.

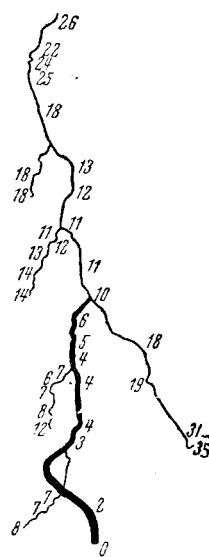


Рис. 17. Изменение интенсивности свечения главного канала молнии по мере продвижения разряда вверх (схема)

Таблица 6

Разряд	Продолжительность свечения у основания (в μ сек)	Время, необходимое для достижения облака (в μ сек)	Время, необходимое для достижения конца последней ветви (в μ сек)
4	125	44	96
8	162	50	61
9	150	65	145
7	12	49	40

Вальтер⁴² высказал предположение, что такая продолжительность свечения обусловлена большим сопротивлением в точке контакта у Земли. Однако, как указывает Мак-Икрон, наблюдалось продолжительное свечение при очень хорошем контакте (разряды попали в стальную раму здания), и кроме того, для разных разрядов время свечения было различно, хотя сопротивление контакта было одно и то же. Мак-Икрон делает предположение, что продолжительность свечения зависит от процессов, происходящих в облаке во время разряда.

Как уже указывалось выше, наблюдается значительное изменение интенсивности свечения по мере продвижения разряда вверх и по мере прохождения точек разветвления. Этот вопрос был тщательно исследован Малан и Колленсом⁴³, которые обнаружили «тонкую структуру» главного разряда. Было установлено, что свечение канала состоит из ряда отдельных «компонент», следующих одна за другой. Появление этих компонент, в основном, зависит от появления ветвей. На рис. 18 представлена диаграмма такого главного разряда (разряд идеализирован), на которой стрелка указывает направление движения пленки фотокамеры. Ветви указаны значками *br 1*, *br 2* и т. д. На диаграмме видны четыре компонента свечения внизу канала и только две вверху (одна из них двойная); интенсивность свечения характеризуется густотой штриховки. Эти компоненты свечения непосредственно связаны с ветвями, так вторая компонента появляется в момент, когда первая компонента достигает ветви 2; третья компонента возникает в момент,

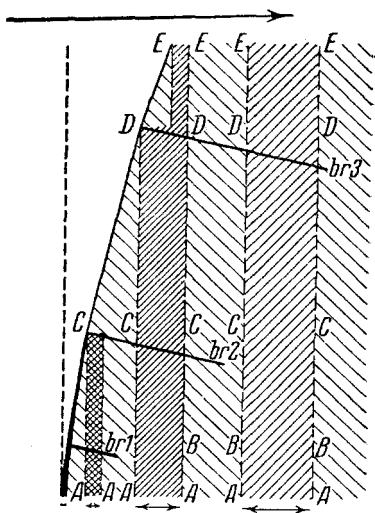


Рис. 18. Тонкая структура свечения главного канала

когда первая компонента достигает ветви 3. Четвертая компонента образуется, когда первая компонента достигает облака и все ветви заканчиваются.

Наиболее часто встречающиеся значения для продолжительности свечения отдельных компонент и время их возникновения приведены в табл. 7.

Таблица 7

Компоненты	Продолжительность в μ сек	Время начала в μ сек
1	< 10	0
2	20	25
3	50	70
4	100	(150—500)

На рис. 19 показано распределение по времени возникновения и продолжительности компонент свечения для 16 разрядов (зарегистрированных Малан и Колленсом⁴³). Прямоугольники с легкой штриховкой (около оси ординат) дают время прохождения обратного разряда от Земли до облака; черные полосы относятся к компонентам свечения: длина полосы дает продолжительность компоненты, а их положение по абсциссе дает время появления компоненты (цифры слева — нумерация разрядов). Как видно из графика, почти у всех разрядов вторая компонента появляется, когда

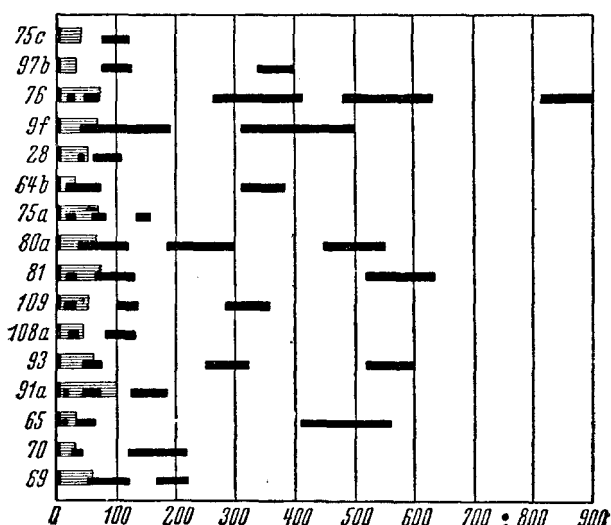


Рис. 19. Временное распределение компонент свечения главного разряда

разряд еще не достиг облака. Маленькие черные прямоугольники слева (у ординаты) характеризуют первые компоненты свечения.

Компоненты свечения могут быть и у неветвистых разрядов, но число компонент для таких разрядов не превосходит двух, и большей частью наблюдается только одна компонента. Число компонент ветвистых разрядов обычно 4—6 (был зарегистрирован разряд с двадцатью компонентами).

Как уже отмечалось, для ветвистых разрядов появление компонент свечения связано с ответвлениями. Эта связь хорошо видна на рис. 20 (Малан и Колленс⁴³), где по оси ординат отложено время начала компоненты, а по оси абсцисс — время начала ветви. Прямая, проведенная под углом 45° , соответствует равенству этих

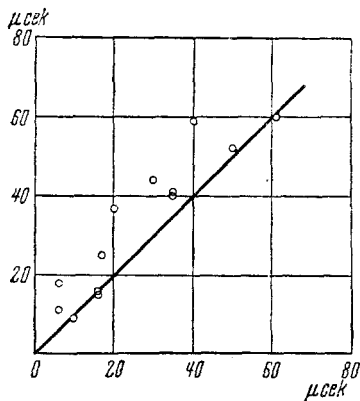


Рис. 20. Временная зависимость между компонентами свечения и ветвями. На оси абсцисс — время начала ветви, по оси ординат — время возникновения компонент

времен. Как видно из графика, большинство экспериментальных точек лежит выше этой прямой; это означает, что компоненты начинаются несколько позже по сравнению с появлением ветви. Однако эта разница составляет всего 10^{-5} сек/км, что лежит в пределах ошибки измерения.

Скорость распространения компонент свечения очень велика и поэтому ее трудно определить; измерения показывают, что скорость компонент больше 10^{10} см/сек (эта величина является пределом измерений в указанной работе⁴³). Скорость распространения компонент, не связанных с ветвями, — значительно меньше (хотя не всегда). Направление распространения компонент может быть

любым (от облака к земле и наоборот), хотя замечено, что компоненты с малой скоростью обычно распространяются от облака к Земле. Определить направление компонент, связанных с ветвями, очень трудно из-за большой скорости продвижения этих компонент.

Фотометрирование снимков дает изменение интенсивности свечения канала со временем. На рис. 21 дана фотометрическая кривая; по оси ординат отложена интенсивность (интенсивность свечения первой компоненты принята за 100), по оси абсцисс — время с момента начала разряда. Видно, что вначале канал имеет интенсивность свечения — 100, затем падает до 45 и снова возрастает до 115 (появляется вторая компонента). Максимумы 18 и 2 соответствуют появлению компонент 3 и 4.

Физическая природа такой «тонкой структуры» обратного разряда совсем не ясна, и слишком еще мало имеется экспериментальных данных по этому вопросу.

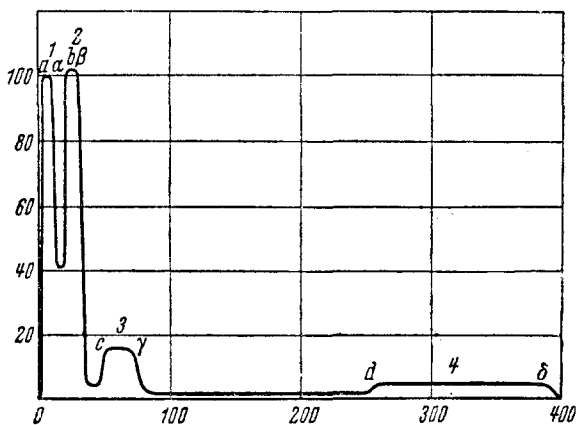


Рис. 21. Изменение свечения разряда со временем

§ 3. Ответвления

Обычно, первые разряды имеют довольно много ветвей, так, из 57 первых разрядов, исследованных Шонландом ⁴⁰, 54 имели ответвления, что составляет 95%. Последующие разряды имеют сравнительно редко ответвления; так, из 33 последующих разрядов только 14 имели ветви, что составляет 42%. В среднем каждый первый разряд дает 5 ветвей (198 ветвей на 40 разрядов), тогда как у последующих разрядов в среднем приходится 1 ветвь на разряд. Ветви у последующих разрядов значительно слабее по интенсивности, по сравнению с ветвями первого разряда, и всегда развиваются по путям ветвей предшествовавшего разряда. Скорость разви-

тия ветви такого же порядка, как и скорость развития всего разряда (ветви лидера развиваются со скоростью $\sim 10^7$ см/сек, а ветви главного разряда — со скоростью $\sim 10^9$ см/сек). На рис. 22 дана «временная диаграмма» ветвистого разряда, снятая движущейся камерой. Пунктирная линия на диаграмме — путь лидера; жирная линия — обратный разряд. Тонкие цифры — время в миллисекундах для ли-

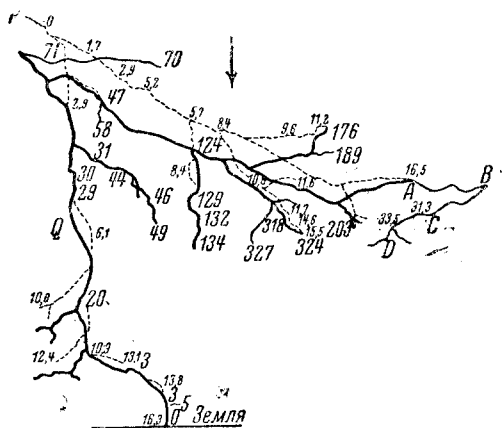


Рис. 22. Временная диаграмма ветвистого разряда (стрелка указывает движение камеры). Пунктирная линия — лидер, сплошная — главный разряд

дера, жирные цифры — время в микросекундах для главного разряда. Стрелка указывает направление движения линзы фото-камеры.

§ 4. Многократность молнии

Наиболее полное исследование явления многократности молнии было произведено Шонландом⁴⁰ и Мак-Икроном^{11, 41}.

а) Число последовательных разрядов. Максимальное число последовательных разрядов — до 40 — было зарегистрировано Ларсеном³⁹; Шонланд наблюдал до 27 последовательных разрядов, Мак-Икрон — только 12 и Стекольников — 11 (1936 г.).

Число многократных молний из общего числа зарегистрированных случаев составляет 30—50%. В табл. 8 приведены данные Мак-Икрона⁴⁴, характеризующие процент появления многократных молний.

Таблица 8

Год	Общее число молний	Однократные молнии	Многократные молнии			Число гроз		
			число многократн. молний	%	общее число разрядов	только с однократн. молниями	только с многократн. молниями	и тех и других
1934	42	32	10	24	44	11	3	2
1935	21	19	2	9	4	9	—	2
1936	45	32	13	29	38	6	1	6
1937	76	49	27	35	90	13	2	11
Всего . .	184	132	52	28	176	39		24

Обычно, первый разряд из серии последовательных разрядов бывает наиболее интенсивным, однако были случаи, когда какой-либо из последующих разрядов был наиболее интенсивным²³. Из 33 молний, зарегистрированных Шонландом, 88% имели первый разряд наиболее интенсивным. Интенсивность свечения последующих разрядов зависит от интервала между разрядами, разряды, следующие быстро за предыдущими, являются интенсивными; чем больше интервал, тем разряд получается менее интенсивным.

б) Интервал между разрядами и общая продолжительность молнии. Интервал между двумя последовательными разрядами довольно сильно меняется и может достигать до 0,53 сек., минимальный интервал, зарегистрированный Шонландом, составляет — 0,001 сек., а по данным Мак-Икрона даже — 0,0005 сек.

В табл. 9 приведены данные Шонланда⁴⁰ для временного интервала между разрядами.

Таблица 9

Интервал между разрядами в сек	Число зарегистрированных случаев	Интервал между разрядами в сек	Число зарегистрированных случаев
0,001—0,002	1	0,07—0,09	15
0,002—0,005	6	0,09—0,11	4
0,005—0,01	9	0,11—0,15	6
0,01 —0,03	28	0,15—0,23	1
0,03 —0,05	22	0,23—0,32	3
0,05—0,07	11	0,32—0,42	1
		0,42—0,53	2

Наиболее часто встречающийся интервал $\cong 0,03$ сек. Такой же результат получили Мак-Икрон и Стекольников²⁹. В противоположность этим данным Нориндер⁴⁵ получил максимальный интервал всего только 0,005 сек. По мнению Стекольникова⁴, Нориндер измерял не полный многократный разряд, а лишь часть его и обычные пульсации были им приняты за отдельные разряды.

Максимальная продолжительность многократной молнии, по последним данным,—1,53 сек. (Мак-Икрон⁴⁴) и 1,55 сек. (Стекольников).

§ 5. Диаметр канала молнии

Несомненно, что диаметр канала молнии является чрезвычайно важным параметром в теории грозового разряда, однако данные по этому вопросу очень ненадежны и противоречивы.

Теплер⁴⁶ дает как верхний предел диаметра канала 40 см. Однако исследование места удара молнии в почву дает указание, что диаметр составляет всего несколько сантиметров. Белаши⁴⁷ в лабораторных условиях получил разряд (14 000 А) между электродами и определил диаметр канала этого разряда путем фотографирования. Он получил значение — 10—25 см; по мнению Белаши, это значение в несколько раз превосходит действительный диаметр ствола разряда. С целью выяснения этого вопроса Белаши произвел дополнительные исследования и установил, что место попадания разряда на электрод дает диаметр разряда всего 1,5 см. Наряду с этим, произведенный им опыт с пропусканьем разряда через фиб-

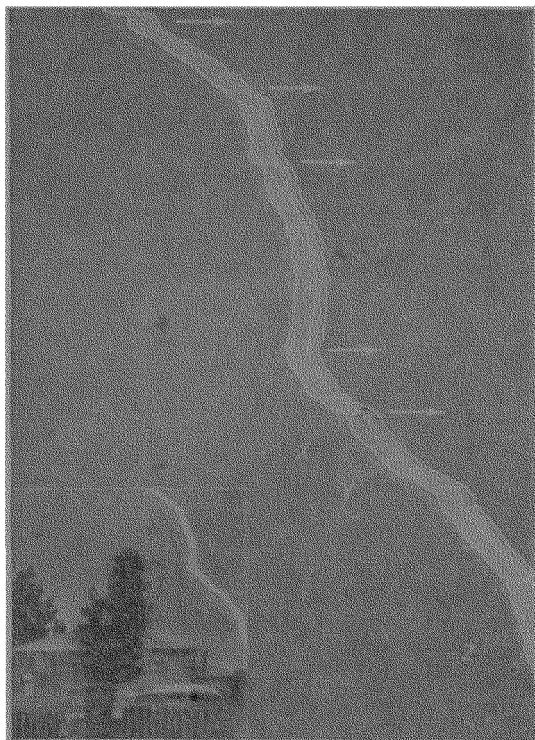


Рис 23 Фотография молнии обычным аппаратом. Ветром молния разделена на 11 отдельных разрядов

ровую трубку показывает, что, если диаметр трубки ~ 2 см, то при прохождении разряда в ней развивается давление до 15 000 ат. Так как трудно предположить возможность возникновения таких высоких давлений в нормальных условиях разряда, то естественнее предположить, что такое давление возникает вследствие того, что диаметр канала разряда значительно превосходит диаметр трубки.

Для определения диаметра канала молнии Шонланд ⁴⁸ произвел фотографирование молнии неподвижной камерой. На рис. 23 приведена эта фотография. На фотографии видно, что разряд состоял из 11 отдельных последовательных разрядов, которые оказались разделенными благодаря сильному ветру (20—30 миль в час). Видны также три ветви x , y и z . По этой фотографии был определен диаметр канала для каждого из разрядов и ветвей. Результаты даны в табл. 10.

Таблица 10

Номер разряда	1	2, 3, 4 (среднее)	5	6	7	8—9 (среднее)	10	11	Ветви			
									x вверх- у	x внизу	y	z
Диаметр в см	23	20	16	16	16	15	19	19	16	11	13	17

Максимальное значение для диаметра — 23 см. Наиболее вероятное значение — 16 см.

В настоящее время еще слишком мало данных для того, чтобы окончательно установить величину диаметра молнии. Возможно, что диаметр канала не является величиной постоянной, а зависит от облака и условий разгигия разряда. Так, например, Белаши⁴⁹, изучая разряд в лабораторных условиях, показал, что площадь поперечного сечения канала искры прямо пропорциональна току.

§ 6. Другие типы грозового разряда

До сих пор речь шла о разрядах, которые имели отрицательный лидер, предшествующий главному разряду. На ряду с этим было отмечено, что Мак-Икрон и Стекольников наблюдали появление положительных лидеров при грозовых разрядах.

Мак-Икрон³³ наблюдал положительный ступенчатый лидер для первого разряда, но не обнаружил появления обратного разряда для такого лидера. В этом типе разряда, хотя первый разряд представлял собой положительный ступенчатый лидер, т. е. распространялся от Земли к облаку, все последующие разряды имеют обычный отрицательный стреловидный лидер, т. е. идущий от облака к земле, и обратный разряд. Скорости продвижения таких положительных лидеров наблюдались от $5,1 \cdot 10^6$ до $6,3 \cdot 10^7$ см/сек, тогда как лидеры к последующим разрядам имели скорости от $5,7 \cdot 10^7$ до $3,9 \cdot 10^9$ см/сек. Наиболее часто встречающаяся длина ступени такого лидера оказалась $\sim 7,5$ м, при минимальной длине $\sim 5,7$ м, а максимальной — ~ 20 м. Интервал между ступенями составляет от 20 до 100 мсек, при наиболее вероятном значении — 30 мсек. Эти характеристики оказываются значительно меньшими по сравнению с аналогичными данными для отрицательных ступенчатых лидеров, полученных Шонландом⁴⁰.

У большинства таких положительных лидеров не удалось обнаружить ветви, и только несколько разрядов имели ветви, направленные тоже вверх. Никогда не наблюдалось появления ветвей, направленных вниз у лидера, движущегося вверх, и наоборот, т. е. ветви всегда направлены в сторону распространения лидера.

Мак-Икрон³³ обнаружил, что большинство разрядов в Empire State Building характеризуется непрерывным свечением в продолжении всего разряда. Это непрерывное свечение было неравномерно по интенсивности и сопровождалось непрерывно текущим током (данные получены из сопоставления фотографической и осциллографической развертки). На фоне такого непрерывно текущего тока наблюдаются отдельные пики, соответствующие резкому возрастанию тока в канале молнии. Эти пики тока соответствуют резкому увеличению интенсивности свечения на фотографиях. Такие разряды были названы Мак-Икроном «непрерывными разрядами». Продолжительность свечения непрерывных разрядов достигает 0,625 сек., причем наиболее, часто встречающихся — до 0,4 сек. Вполне возможно, что продолжительность свечения еще больше, так как часть разряда могла быть не зафиксирована благодаря слабой интенсивности свечения.

Из 47 разрядов, зарегистрированных Мак-Икроном, 34 были непрерывными, 4 состояли из двух последовательных непрерывных разрядов, идущих по одному пути с некоторым временным интервалом, 7 других начинались как непрерывные разряды, сопровождаемые резко выделяющимися разрядами. Разрядов, которые могли бы быть названы в обычном смысле «многократными», не удалось обнаружить в этих исследованиях. Большинство непрерывных разрядов имели движущиеся вверх ступенчатые лидеры. Мак-Икрон указывает, что такие же непрерывные разряды наблюдались в Швейцарии (Lake Maggiore) и Питсфилдской обсерваторией.

Количество электричества, переносимое такими разрядами, достигает 164 кулон, при среднем значении 35 кулон. Прежние данные дают максимальное количество электричества 2 кулона⁴⁵ (и расчетное — 20 кулон¹⁵).

Обнаруженный Мак-Икроном характер развития грозового разряда является чрезвычайно интересным. Равным образом представляет большой интерес обнаруженный им идущий вверх (положительный) ступенчатый лидер, не сопровождаемый обратным разрядом. Такой характер развития разряда имеет некоторую аналогию с результатами, полученными Меттас⁵⁰ и Аллибон⁵¹ при изучении длинной искры в лаборатории. Было обнаружено, что лидерный разряд между двумя остриями иногда начинается одновременно с обоих электродов, при этом получают два лидера, идущие друг другу навстречу. Возможно, что молния, наблюдаемая Мак-Икроном, имеет такой же характер развития, причем лидер, движущийся от облака к зданию, и место встречи лидеров не были замечены.

Появление разрядов без лидера отмечалось рядом авторов, однако всегда было известное сомнение, что лидер просто не был замечен из-за малой интенсивности. Уоркман⁵² наблюдал три типа грозового разряда: 1) обычный разряд с лидером, 2) разряд без лидера и 3) разряд без лидера, продвигающийся ступенями.

Первый тип разряда — обычный и достаточно подробно рассмотрен выше.

Разряд без лидера (2-й тип), фотография которого дана на рис. 24, принадлежит к типу «главного разряда». Этот разряд распространялся от облака к Земле, был очень интенсивен и не имел лидера, хотя по условиям фотографирования лидер мог быть зарегистрирован. Такой разряд повторился еще три раза (на фотографии это не дано) с интервалами — $1,2 \cdot 10^{-4}$, $1,3 \cdot 10^{-4}$ и $2,4 \cdot 10^{-4}$ сек. Уоркман указывает, что такие разряды довольно часто наблюдаются в местности, где происходило фотографирование (Новая



Рис. 24. Разряд без лидера

Мексика), и сопровождаются, обычно, очень сильным громом.

Следующий тип разряда, описываемый Уоркманом, — разряд, развивающийся ступенями, еще никем не был обнаружен. Разряд состоит из четырех ступеней и не имеет лидера. Развивался разряд так: начавшись в облаке, разряд прошел 0,98 км и внезапно остановился, через 0,008 сек. появился второй разряд и по тому же пути прошел 1,2 км и тоже прекратился. Через 0,01 сек. появился третий, который прошел 1,70 км, и, наконец, четвертый — через 0,0098 сек., который прошел весь путь от Земли до облака. Уоркман указывает, что эти разряды не могут быть лидерами, так как интервал между ними слишком велик и кроме того их интенсивность показывает принадлежность к типу «главного разряда». Возможно, что появление таких трех незаконченных разрядов можно объяснить тем, что сопротивление внутри облака очень велико и поэтому заряды медленно притекают из соседних областей и начавшийся разряд прекращается. Через некоторое время, когда напряжение вновь повысится, разряд появляется вновь.

Наконец, наблюдаются еще разряды, которые оканчиваются в воздухе, не доходя до земли (Шонланд⁴⁰). Эти разряды («воздушные разряды») разделяются на две группы: 1) разряды распространяются ступенями от облака в воздух и 2) разряды распространяются непрерывно (подобно стреловидному лидеру). Все эти разряды являются по существу лидерами и не сопровождаются обратными разрядами.

§ 7. Механизм грозового разряда

В настоящее время еще не существует удовлетворительной теории грозового разряда, а имеются только отдельные гипотезы и предположения.

В результате своих многочисленных исследований Шонланд⁵³ приходит к следующему механизму грозового разряда. Лидер первого разряда и лидер последующего разряда различны по своему поведению, что обусловлено различием в механизме их развития. Лидеры к последующим разрядам (стреловидные лидеры) движутся по пути, проделанному предшествующим разрядом, и этот путь уже достаточно ионизован. Лидер первого разряда имеет обычно ступенчатый характер и продвигается в неионизованном воздухе.

Шонланд считает, что ступенчатый лидер на самом деле состоит из двух лидеров. Первый лидер непрерывно продвигается в неионизованном воздухе и прокладывает путь второму лидеру. Этот первый гипотетический лидер Шонланд называет ведущим лидером (pilot-leader). Скорость продвижения ведущего лидера невелика $\sim 1 \cdot 10^7$ см/сек. Второй лидер, который продвигается ступенями, идет по пути этого ведущего лидера. Так как скорость продвижения ступенчатого лидера значительно больше скорости пилот-лидера, а именно порядка 10^9 см/сек, то ступенчатый лидер

периодически догоняет головку пилот-лидера. Как только ступенчатый лидер достигает пилот-лидера, дальнейшее его продвижение прекращается, получается пауза, во время которой пилот-лидер проходит еще некоторое расстояние; затем вновь появляется ступенчатый лидер, который опять идет по пути, проложенному пилот-лидером, вновь догоняет и т. д. Таким образом конец ступени является как бы началом пилот-лидера. На рис. 25 дана схема

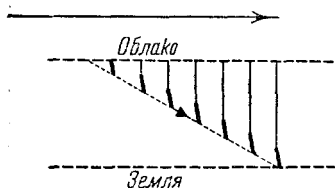


Рис. 25. Схема продвижения ступенчатого лидера (по Шонланду)

развития такого лидера; пунктирная линия — путь пилот-лидера; вертикальные стрелы — ступени ступенчатого лидера (время указано стрелкой). Пилот-лидер, если он действительно существует, должен иметь слабое свечение и поэтому его невозможно сфотографировать.

Если t — время паузы между ступенями, а l — длина ступени после паузы t , то $\frac{l}{t}$ является скоростью

пилот-стримера или «эффективной» скоростью ступенчатого лидера. Между l и t должна существовать определенная зависимость, причем если t — велико, то последующая ступень должна быть длинной и наоборот. Анализ фотографий подтверждает это положение.

Таким образом Шонланд приходит к выводу, что ступенчатый лидер, как и последующие лидеры, продвигается по предварительно ионизированному пути, который подготавливает для него пилот-лидер, зато пилот-лидер продвигается в неионизированном воздухе.

Шонланд предполагает, что пилот-лидер распространяется благодаря ионизации, производимой электронами у головки лидера. В таком случае должна существовать некоторая критическая напряженность поля $E_{кр}$ у головки лидера, при которой электрон имеет критическую скорость $v_{кр}$, ниже которой не может происходить ионизация столкновением. Эта скорость электрона — $v_{кр}$ является в то же время минимальной скоростью пилот-лидера, так как лидер в целом не может продвигаться медленнее, чем ионизирующие агенты. Можно воспользоваться обычным соотношением между $E_{кр}$ и $v_{кр}$ в форме

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{2E_{кр}e\lambda}{\pi \cdot m}}, \quad (1)$$

где e — заряд электрона, λ — длина свободного пробега электрона, m — масса электрона.

В этом выражении, согласно Таунсенду, заключается предположение, что каждое столкновение между электроном и молекулой газа является неупругим. Подставляя в формулу (1) известные значения для $E_{кр}$ (30 000 кВ/см) и $\lambda = 3,8 \cdot 10^{-5}$ см (значение λ берется для среднего свободного пробега электрона при 20° С и 76 см Hg), Шонланд получает для скорости $v_{кр}$ значение $\sim 3,6 \cdot 10^7$ см/сек. Это несколько больше полученной из фото-

графий минимальной эффективной скорости ступенчатого лидера ($\sim 1,0 \cdot 10^7$ см/сек), однако, как указывает Шонланд, в расчете были сделаны допущения (все столкновения неупруги, значение для λ несколько завышено), и если учесть это, то значение для $v_{кр}$ получается несколько меньше и близкое к наблюдаемому — $\sim 1,0 \cdot 10^7$ см/сек.

Эти расчеты не могут, конечно, претендовать на точность, так как некоторые величины взяты произвольно; кроме того, экспериментальное значение минимальной скорости ступенчатого лидера, полученное из фотографий, тоже не совсем достоверно. Во всяком случае важно только то, что порядок величины для скорости лидера получается правильный, при напряженности поля у головки лидера, не превосходящей допустимого значения.

Значительно хуже дело обстоит в случае ступенчатых лидеров, эффективная скорость которых порядка $2 \cdot 10^8$ см/сек. В этом случае значение поля у головки лидера получается согласно формуле (1), чрезвычайно большим — $8 \cdot 10^6$ В/см. Едва ли такие высокие градиенты могут иметь место в канале лидера. Поэтому Шонланд разделяет ступенчатые лидеры на две группы: в первой группе — эффективная скорость лидера от $1 \cdot 10^7$ до $5 \cdot 10^7$ см/сек, эта группа составляет 65% из наблюдаемых лидеров; вторая группа — со скоростями от $5 \cdot 10^7$ до $2 \cdot 10^8$ см/сек и составляет только 35%.

Первую группу Шонланд называет, как уже указывалось выше, α -типом, вторую группу — β -типом (см. рис. 12). Шонланд указывает, что большие скорости лидеров β -типа могут появляться в результате некоторой предварительной ионизации впереди головки пилот-стримера. Так, Лёб и Кравас⁵⁴ предположили, что предварительная ионизация впереди головки лидера вызвана существованием в воздухе свободных электронов, возникающих по естественным причинам (космические лучи, радиоактивность и т. д.). Однако «производительность» таких естественных агентов будет, повидимому, малой.

Более правильным является второе предположение Лёба⁵⁵ о существовании фотоэлектрической ионизации воздуха впереди головки стримера, которая облегчает его продвижение. Существование предварительной ионизации впереди пилот-лидера может объяснить наблюдающиеся большие скорости ступенчатого лидера, при этом без допущения ненормально больших полей у головки лидера. Несмотря на то, что предположение Лёба заслуживает внимания, Шонланд считает, что пока не имеет смысла присоединять фотоионизацию для объяснения малочисленной группы (35%) лидеров, и допускает, что для таких лидеров существуют ненормально большие поля у головки. Лидеры этого типа имеют обширные разветвления и часто не доходят до земли, а заканчиваются такими разветвлениями в воздухе. Лидеры, которые доходят до Земли, имеют скорость, уменьшающуюся по мере приближения к Земле. Шонланд связывает такое поведение лидеров с существованием в воздухе концентрированного положительного объемного заряда, образован-

ного процессами, аналогичными процессам истечения с острия (предложено Вильсоном, 1925 г.). Такие объемные заряды приводят к образованию ненормально больших электрических полей и объясняют, по Шонланду, высокие скорости пилот-стримера.

Для определения токов пилот-лидера Шонланд пользуется выражением Руденберга⁵⁶, которое выведено в предположении, что: 1) головка стримера имеет полусферическую форму, 2) заряды распределены равномерно по этой полусфере и 3) что плотность зарядов вдоль канала лидера очень мала по сравнению с плотностью зарядов у головки. При таких допущениях выражение для тока имеет следующий вид

$$i = \frac{E \cdot r \cdot v}{18 \cdot 10^{11}}, \quad (2)$$

где E — электрическое поле у головки (в вольтах на сантиметры), r — радиус головки (в сантиметрах), v — скорость лидера (в сантиметрах на секунды).

Для определения r можно воспользоваться вычислениями Олендорфа⁵⁷ для продвижения роя электронов. Согласно вычислениям Олендорфа, для роя электронов, прошедшего 10 м пути в поле — 30 000 В/см, r будет равно 1 см. Подставляя эти значения в формулу (2), получим, что токи медленных пилот-лидеров ($v \sim 10^7$ см/сек) составляют всего ~ 1 А. Для более быстрых пилот-лидеров r бу-

дет значительно меньше ($r \approx \sqrt{\frac{l}{v^2}}$, где $l = v \cdot t$), так при $v = 2 \cdot 10^8$ см/сек, r равно 2 мм. Такие лидеры будут иметь токи, согласно формуле (2), порядка 180 А ($E = 8 \cdot 10^6$ В/см). Таким образом токи пилот-лидеров чрезвычайно малы по сравнению с токами других лидеров, так например, стреловидный лидер изменяет заряд облака на ~ 1 кулон за время $10^{-3} - 10^{-4}$ сек., что соответствует токам $10^3 - 10^4$ А. Обратный разряд имеет токи порядка $10^4 - 10^5$ А.

Шонланд считает, что причиной пауз в ступенчатом лидере является механизм, связанный с газовым разрядом, а не процессы в облаке. Доказательство этого Шонланд видит в узком диапазоне пауз (50—90 мсек). Пауза является временем, необходимым для достижения полем у головки лидера критического значения $E_{кр}$. Это нарастание поля может быть обусловлено либо уменьшением плотности электронов в канале пилот-лидера (при этом поле усиливается для поддержания тока лидера), либо образованием положительного объемного заряда на пути лидера. Последнее объяснение было предложено Гиппелем в связи с фигурами Лихтенберга. Однако, по мнению Шонланда, второе предположение едва ли приемлемо, так как газообразный конец лидера сильно отличается по своей природе от металлического катода искры, и трудно представить себе образование положительного объемного заряда около газообразного конца лидера.

Механизм развития лидера, который движется по предварительно ионизованному пути (как например, стреловидный лидер к последующему разряду, или обратный разряд), несколько отличается от механизма развития пилот-лидера. Механизм развития стреловидного лидера был предложен Лёбом и Кравасом⁵⁴. На рис. 26 схематически представлен канал такого лидера, согласно представлению Лёба и Краваса. На рис. 26 AB — ствол стримера, BC — об-

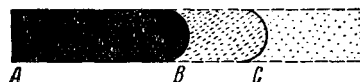


Рис. 26. Схема продвижения разряда по Лёбу и Кравасу

ласть, ионизированная предыдущим разрядом, в которой электрическое поле имеет критическое значение $E_{кр}$, необходимое для ионизации столкновением. В случае отрицательного лидера (стреловидный) электроны участка BC создают электронную лавину при своем движении вперед (от головки), в случае положительного стримера (обратный разряд) эти электроны образуют лавину движением к головке стримера. Как только BC благодаря этому делается достаточно проводящим, стример немедленно достигает точки C и процесс продолжается дальше. Шонланд несколько расширяет эту гипотезу Лёба и Краваса, а именно вводит время — t — эффективной ионизации участка BC , которое по существу является временем, необходимым для каждого начального электрона, чтобы пройти среднее расстояние от одного электрона до другого. Если n — начальная плотность электрона и $\bar{v}$ — средняя скорость электрона в участке BC , то

$$t = \frac{1}{n \bar{v}} \quad \text{и} \quad V = \frac{d}{t} = n^{\frac{1}{3}} \cdot \bar{v} \cdot \alpha, \quad (3)$$

где $\alpha = BC$ и V — скорость продвижения стримера. Таким образом скорость продвижения стримера — V — зависит от начальной плотности электронов и от величины электрического поля у головки стримера, так как $\bar{v}$ и α зависят от величины поля. Для сопоставления Шонланд приводит следующие вычисления: если радиус головки стримера — 1 см и напряжение у головки — $1,5 \cdot 10^6 \text{ В/см}$, то скорость стримера в неионизированном воздухе будет, согласно формуле (1), равна $7 \cdot 10^7 \text{ см/сек}$. Если же стример продвигается в предварительно ионизированном пространстве, где плотность электронов $n = 10^3 \text{ эл/см}^3$, то, согласно выражению (3), скорость стримера будет уже — $1,03 \cdot 10^9 \text{ см/сек}$ (при этом α равно 6 см). Следовательно, существование предварительной ионизации объясняет большие скорости стреловидных лидеров и обратных разрядов. Так

как с течением времени плотность электронов $\bar{n}$ вследствие рекомбинации уменьшается, то чем больше промежуток времени между двумя последовательными разрядами, тем меньше будет скорость последнего разряда. Если время будет очень велико, то вместо непрерывного стреловидного лидера получается быстрый ступенчатый лидер.

Свечение лидера обычно сосредоточено вблизи головки, и это показывает, что свечение обусловлено процессами возбуждения в сильных полях у головки лидера. Если свечение распространяется на расстояние D позади головки стримера, то очевидно, что $D \geq v \cdot \tau$, где v — скорость стримера, а τ — средняя продолжительность жизни возбужденного состояния молекул. Для стреловидного лидера $v = 10^9$ см/сек и d — около 50 м, отсюда $\tau = 5 \cdot 10^{-6}$ сек. Это довольно большое значение для τ , так как известно, что τ в спектре дуги в азоте получается равным $\sim 10^{-7}$ сек. Этот вопрос требует дополнительного рассмотрения.

По вопросу о многократности молнии существует несколько точек зрения.

Симпсон⁸ объясняет многократность молнии своей теорией положительного разряда. Согласно этой теории, разряд, идущий от положительно заряженного облака, прекращается скоплением отрицательных зарядов у «облачного» конца разряда. Однако в случае отрицательно-заряженной тучи эта гипотеза не применима.

Бьюли⁵⁸ предлагает свою точку зрения, согласно которой облако рассматривается состоящим из отдельных объемов, не связанных между собой. Разряд начинается из одного какого-либо объема, потенциал которого в процессе разряда понижается. Это приводит к увеличению разности потенциалов между этим объемом и соседним, в результате чего происходит пробой между объемами. Прекращение тока на Землю, т. е. прекращение разряда, приводит к перераспределению потенциалов вдоль облака, и в том месте, где был разряд, потенциал будет увеличиваться и может возникнуть второй разряд, и т. д. Вычисления показывают, что при принимаемых Бьюли значениях R и C ($R = 1000 \text{ } \Omega$ и $C = 0,01 \text{ } \mu F$) процесс должен протекать чрезвычайно быстро, что совершенно не согласуется с экспериментальными данными.

Шонланд⁵³ считает, что многократность молнии вызвана существованием нескольких генерирующих центров в облаке. Разряд порождается одним из центров, в результате этого поле внутри облака меняется так, что появляется ступенчатый стример из соседнего генерирующего центра, который использует канал от облака к Земле, образованный первым разрядом, и дает следующий разряд на Землю.

Шонланд видит подтверждение своей точки зрения в том, что наблюдаются U-образные каналы разряда, которые представляют собой два отдельных разряда из двух генерирующих центров, причем второй разряд частично использует канал первого разряда. Кроме того, многократные разряды наблюдаются у облаков с большим объемом (фронтальные грозы), в которых можно ожидать

существования нескольких таких центров. Согласно этой точке зрения, интервал T между двумя последовательными разрядами является временем, которое необходимо для ступенчатого лидера, чтобы пройти от нового облачного центра к тому, который породил первый разряд, плюс время, необходимое стреловидному лидеру, чтобы пройти от облака к Земле по каналу первого разряда (это время не учитывается, так как оно мало). Следовательно, $T = \frac{D}{v}$, где D — расстояние между генерирующими центрами, v — скорость ступенчатого лидера. Подставляя значения $T = 0,03$ сек. (среднее значение) и $v = 2 \cdot 10^7$ см/сек, получим $D \cong 6$ км. Шонланд считает, что это значение является максимальным, так как скорость лидера в облаке вероятно меньше принятого значения и кроме того, может быть запаздывание, что уменьшает T .

На рис. 27 дана схема развития разряда, предложенная Шонландом, где a , b и c — развитие первого разряда и d , e и f — развитие последующего разряда. На рис. 27 видны положительные

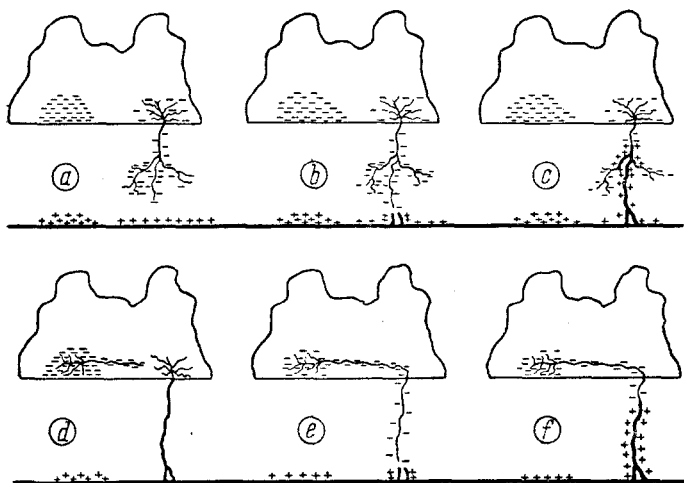


Рис. 27. Развитие разряда (по Шонланду)

стримеры, идущие навстречу отрицательному лидеру. Такие положительные стримеры, идущие от Земли навстречу отрицательному лидеру молнии, были впервые обнаружены Мак-Икроном ^{11, 13}.

Существует еще целый ряд гипотез о механизме грозового разряда ^{23, 52, 58, 59}, некоторые из них носят подчас спекулятивный характер. В виде примера рассмотрим точку зрения Албрайта ²³, который делает попытку объяснить развитие лидера от положительно заряженного облака. Албрайт считает, что сфотографированные им разряды происходят от положительного облака, так как ветви направлены от облака к Земле. Это утверждение неправильно, так как в настоящее время уже известно, что направление ветвей

существования нескольких таких центров. Согласно этой точке зрения, интервал T между двумя последовательными разрядами является временем, которое необходимо для ступенчатого лидера, чтобы пройти от нового облачного центра к тому, который породил первый разряд, плюс время, необходимое стреловидному лидеру, чтобы пройти от облака к Земле по каналу первого разряда (это время не учитывается, так как оно мало). Следовательно, $T = \frac{D}{v}$, где D — расстояние между генерирующими центрами, v — скорость ступенчатого лидера. Подставляя значения $T = 0,03$ сек. (среднее значение) и $v = 2 \cdot 10^7$ см/сек, получим $D \cong 6$ км. Шонланд считает, что это значение является максимальным, так как скорость лидера в облаке вероятно меньше принятого значения и кроме того, может быть запаздывание, что уменьшает T .

На рис. 27 дана схема развития разряда, предложенная Шонландом, где a , b и c — развитие первого разряда и d , e и f — развитие последующего разряда. На рис. 27 видны положительные

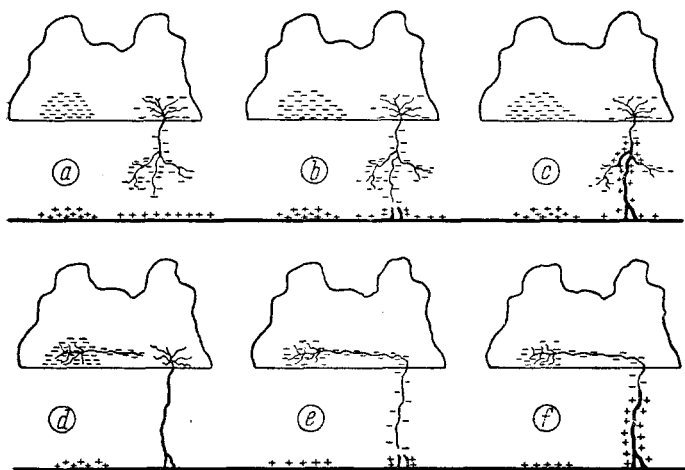


Рис. 27. Развитие разряда (по Шонланду)

стримеры, идущие навстречу отрицательному лидеру. Такие положительные стримеры, идущие от Земли навстречу отрицательному лидеру молнии, были впервые обнаружены Мак-Икроном^{11, 13}.

Существует еще целый ряд гипотез о механизме грозового разряда^{23, 52, 58, 59}, некоторые из них носят подчас спекулятивный характер. В виде примера рассмотрим точку зрения Албрайта²³, который делает попытку объяснить развитие лидера от положительно заряженного облака. Албрайт считает, что сфотографированные им разряды происходят от положительного облака, так как ветви направлены от облака к Земле. Это утверждение неправильно, так как в настоящее время уже известно, что направление ветвей

не характеризует знака заряда облака. Албрайт считает, что положительный лидер представляет собой движение положительных частиц, а так как скорость обычных положительных ионов слишком мала, то он приходит к выводу, что такими частицами могут быть позитроны. Это предположение абсурдно, так как нельзя предположить, что в канале лидера имеются условия для появления в таком громадном количестве позитронов.

Из всего вышесказанного следует, что пока не существует еще теории, удовлетворительно объясняющей физическую природу грозового разряда. Несомненно, что дальнейшее изучение молнии и параллельное изучение (в лабораторных условиях) механизма длинной искры позволяет разрешить этот вопрос. Работы Стекольников и Аллибона по исследованию искры между электродами показывают, что существует почти полная аналогия в поведении длинной искры в молнии. Установлено, что искра имеет: 1) лидер (чаще от положительного электрода, но иногда и от отрицательного) и обратный разряд, 2) многократность, 3) ветви, направление которых всегда совпадает с направлением лидера, и даже 4) в некоторых случаях, лидер искры имеет ступенчатый характер. Скорость обратного разряда у искры очень велика, тогда как скорость лидера порядка 10^6 — 10^7 см/сек, причем положительный лидер продвигается быстрее, чем отрицательный. Первый разряд многократной искры слабее и медленнее и более ветвист, последующие разряды более быстры.

Все эти факты показывают, что изучение искры поможет разрешить вопрос о механизме молнии.

§ 8. Шаровая молния

Шаровая молния представляет собой очень интересное явление. До настоящего времени природа этого явления остается непонятной, так как попытки воспроизвести шаровую молнию в лабораторных условиях не увенчались успехом.

Существование шаровой молнии не может быть подвергнуто никакому сомнению. В 1920 г. была опубликована работа Бранда⁶⁰, который собрал весь имеющийся материал наблюдений шаровой молнии и систематизировал его. Бранд нашел, что из 600 зарегистрированных случаев 215 вполне надежны и заслуживают рассмотрения. В результате критического рассмотрения этого материала Бранд приходит к выводу, что шаровая молния имеет две формы: первая — когда она свободно летит по воздуху, и вторая — когда она неподвижно сидит на каком-либо предмете или катится по этому предмету, так называемая «осевшая» шаровая молния. В каждом из случаев шаровая молния имеет различные характеристики.

Бранд указывает 14 особенностей шаровой молнии.

1. Шаровая молния представляет собой шарообразный, реже грушеобразный, электрический разряд, который появляется во время грозы. Чаще всего шаровая молния появляется в зимние грозы и обычно в конце грозы.

2. Шаровая молния имеет вид красного светящегося шара с синим ореолом, диаметром 10 — 12 см. Очертание — обычно туманное. Иногда шары бывают ослепительно белыми и имеют резкий контур.

3. Шаровая молния сопровождается шипением, свистом или жужжанием.

4. После исчезновения шаровая молния оставляет после себя дым или нечто вроде тумана с резким запахом.

5. Время существования такой молнии меняется в интервале от малых долей секунды до нескольких минут, чаще всего 3—5 сек.

6. Шаровая молния может появиться из нижней части тучи или неожиданно оказаться сидящей на каком-нибудь предмете. Иногда она предшествует линейной молнии и тогда она может оказаться вблизи или на том месте, куда потом происходит удар линейной молнии.

7. Шаровая молния исчезает или бесшумно или со взрывом. Иногда линейная молния ударяет в шаровую молнию и последняя исчезает.

8. Скорость шаровой молнии весьма различна. Шар, вылетающий из тучи и летящий по направлению к Земле, имеет значительную скорость, порядка скорости линейной молнии. Около Земли или в закрытом помещении шаровая молния имеет скорость около 2 м/сек. Иногда шар перемещается воздушным потоком, но обычно его движение не зависит от ветра. Довольно часто при полете шар совершает сильные колебательные движения и продвигается большими скачками (до нескольких метров).

9. Иногда шар распадается и образуется несколько маленьких шаров. Иногда появляются два шара, окруженные ожерельем из малых шаров.

10. Летящий и осевший шары ведут себя различно, хотя могут переходить один в другой. Летящий шар создает впечатление сильно напряженного электрического разряда с малым током (например, вроде токов Тесла), тогда как осевший шар обладает малым напряжением, но большой плотностью тока.

11. Летящий шар избегает хороших проводников и предпочитает путь по воздуху. Шаровая молния, когда она летит по воздуху, не опасна для человека, даже когда она появляется в непосредственной близости, так как избегает человека, как и всех проводников.

12. Осевшие шары — ослепительно блестящие, белого или синего цвета. Такие шары садятся и закрепляются на хороших проводниках и предпочитают высокие точки. Иногда шары катятся по горизонтально расположенному проводнику, например, по желобу. Предметы, на которых сидят или по которым катятся шары, сильно накаляются (человек получает сильные ожоги).

13. Когда летящий шар переходит в «осевшее» состояние, то он делает это внезапно, бросаясь на ближайший проводник (например, вода). Прикасаясь к проводнику, шар остается на нем или исчезает (тихо или со взрывом). Шары, вылетающие из облаков, при ударе о Землю взрываются.

14. Когда происходит обратное явление, т. е. из «осевшего» состояния шар переходит в «летящее» состояние, то шар просто поднимается и летит. Но такие шары существуют недолго и быстро исчезают.

§ 9. Четкообразная молния

Четкообразная молния представляет собой как бы промежуточный тип линейной и шаровой молний. Обычно эта молния появляется в виде 20—30 светящихся шаров диаметром около 8 см, расположенных один за другим на расстоянии 0,5—1 м.

Несмотря на наличие материалов о поведении шаровой и четкообразной молний, физическая природа этих явлений остается совершенно неясной.

IV. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОЛНИИ

В настоящей главе приводятся сводки данных по различным наиболее существенным параметрам молнии.

Таковыми параметрами являются: 1. Полярность грозового разряда. 2. Токи молнии. 3. Количество электричества, переносимое грозовым разрядом. 4. Значения максимальных градиентов и потенциалов в грозовом разряде. 5. Параметры волны грозового разряда, т. е. а) крутизна фронта, б) длина фронта, в) длина волны. 6. Многократные разряды.

Большинство приводимых данных позволяет установить наиболее часто встречающиеся значения того или иного параметра, т. е. установить фактор «повторяемости».

Однако приводимые данные не всегда могут претендовать на достаточную достоверность в связи с тем, что экспериментальные условия определения того или иного параметра дают подчас значительные ошибки, с другой стороны, интерпретации тех или иных измерений иногда не соответствуют действительности.

Вследствие этого каждые подобные данные обычно будут сопровождаться краткими описаниями экспериментальных условий, в которых производились измерения, и иногда будут приводиться источники возможных ошибок либо в эксперименте, либо в интерпретации отдельных данных.

§ 1. Полярность грозового разряда

Вопрос о полярности грозовых разрядов имеет существенное значение не только для теории образования грозовых облаков, но и для теории самого грозового разряда. Первоначально существовало мнение, что большинство разрядов на Землю имеет положительную полярность (см. гл. 1), т. е. облако считалось заряженным положительно относительно Земли. Однако исследования последних лет, произведенные рядом исследователей в различных странах и при различных условиях, показывают, что это утверждение неправильно. На самом деле многочисленные данные свидетельствуют о преобладании грозовых разрядов отрицательной полярности, т. е. в большинстве слу-

Таблица 11

Место регистрации	Условия регистрации	Число измерений	% разрядов отриц. поляр.	Метод регистрации	Автор (лит. ссылка №)
СССР	Высоковольтная линия передач и молниеотвод	84	68	Магнитозапись	4
»	Молниеприемник высотой 900 м	6	83	»	24, 25
»	Гористая местность	24	79	Магнитозапись, осциллографир. и клидонограф.	29, 36
США	Высоковольтная линия передач	358	95	Магнитозапись	61
»	Распределительные линии	1 608	63	»	62
»	Здание высотой 380 м (Empire State Building)	55	100	Магнитозапись и осциллограф.	33
»	Высоковольтная линия передач	124	100	Магнитозапись	63
Германия	То же	654	86	»	64
Швеция	Открытая местность	130	56	Катодноосциллограф. на рамках	45
Швейцария	Высокогорная линия передач	12	83	Магнитозапись	65
Африка	Открытая местность	71	100	Катодноосциллограф. на антеннах	32
Япония	Высоковольтная линия передач	60	96	Магнитозапись	66
Общее число регистраций		3 186			

чаев разряд происходит от облака, заряженного отрицательно. Табл. 11 представляет собой полную сводку всех имеющихся данных по вопросу о полярности молний, полученных в 7 различных странах.

В табл. 11 приводится место регистрации, условия регистрации и метод регистрации. Полное число измерений дается в графе 3, а процент разрядов отрицательной полярности помещен в графе 4. Как видно из таблицы, большинство измерений производилось

путем магнитозаписи, т. е. с помощью ферромагнетиков, и в основном на высоковольтных линиях передач. Только в двух случаях регистрация разрядов производилась исключительно катодным осциллографом (Нориндер и Шовланд). Нориндер применял специальную методику измерений, используя горизонтально расположенные антенны-рамки, соединенные с осциллографом. Шовланд использовал обычные антенны, соединенные с осциллографом. Стекольников определял полярность грозового разряда иногда всеми тремя способами, применяя, наряду с магнитозаписью, осциллограф и клидонограф.

Табл. 11 дает для всех случаев значительное преобладание разрядов отрицательной полярности. Некоторым исключением можно считать данные Нориндера, у которого имеет место незначительное преобладание числа отрицательных разрядов по сравнению с положительными. Приведенные данные позволяют определить средний процент отрицательных разрядов, с учетом, разумеется, удельного веса каждой серии измерений. Оказывается, что средний процент появления отрицательных разрядов составляет 75%.

Необходимо отметить, что кроме «униполярных» разрядов наблюдались и «биполярные» разряды, а именно в многократной молнии наряду с отрицательными импульсами наблюдаются иногда положительные разряды. Эти «биполярные» разряды наблюдались сравнительно редко, но почти всеми исследователями.

§ 2. Токи молнии

Наиболее распространенный метод определения токов в канале молнии — метод регистрации токов с помощью ферромагнетиков⁶⁷. Регистраторы-ферромагнетики размещаются в самых различных частях линии передач, как-то в опорах, в отдельных ногах опор, в тросах и в молниеотводах. Подсчет полного тока молнии, прошедшего через все токоведущие пути, различными авторами производится по-разному, причем в большинстве случаев недостаточно правильно. Так например, Спорн и Гросс⁶⁸ определяют токи молнии тремя различными способами в зависимости от того, в какое место линии передач ударит молния: а) при ударе молнии в опору производят сложение всех токов в смежных опорах, б) при ударе молнии в трос — складывают токи, растекающиеся по тросам, в ближайшие опоры и, наконец, в) при ударе в молниеотвод принимают ток молнии, равный показаниям регистраторов, расположенных на молниеотводе. При таких подсчетах, вполне естественно, получаются совершенно различные результаты, которые почему-то усредняются авторами. Можно считать, что токи, вычисленные первыми двумя способами, при прочих равных условиях будут заведомо больше, чем истинный ток в стволе молнии, вследствие присутствия отраженной волны. Вместе с тем данные последнего способа более близки к действительным значениям токов молнии.

Льюис и Фоуст⁶¹ суммируют токи во всех опорах, на которых появляются показания регистраторов, учитывая возможные разветвления токов, совершенно пренебрегая присутствием отраженной

волны. На примере их работы видна роль отраженной волны, которая примерно удваивает показания всех регистраторов относительно тока в молниотводе, стоящем на опоре. Цадук⁶⁹ равным образом суммирует показания регистраторов, расположенных во всевозможных разветвлениях на линиях передач.

Таким образом, вопрос о методике измерений действительных токов молнии с помощью ферромагнетиков остается не совсем ясным. Наряду с ошибками, возникающими вследствие появления отраженной волны, которая зависит от величины волнового сопротивления заземления опор, имеют место всевозможные потери, вызванные природой самих ферромагнетиков. Обычно, в большинстве работ точность определения токов по показаниям ферромагнетиков оценивается в 10—15%, однако можно считать несомненным, что эта точность завышена, в связи с тем, что показания ферромагнетиков зависят от формы волны тока и от других временных параметров волны. Присутствие многократных разрядов, случаи биполярных ударов молнии также уменьшают точность метода ферромагнитной регистрации амплитудного значения тока.

Следующий по распространенности метод измерения токов молнии это — осциллографический метод. Осциллографическая запись волны тока равным образом недостаточно полно характеризует токи молнии благодаря тому, что волна тока, идущая по проводнику до ответвления на осциллограф и частично в подводке к самому осциллографу, претерпевает обычно изменения. Воспроизведение волны, подошедшей к молниеприемнику, иногда почти невозможно. Кроме непосредственного измерения токов молнии осциллографом применяют регистрацию молнии по тому индуцирующему действию, которое она оказывает на соответствующие антенны. Шонланд, Стекольников и особенно Нориндер применяли данный метод. Употребление Нориндером специальных антенн-рамок заметно не улучшает положения, а наоборот вводит ряд трудностей, устранение которых почти невозможно.

Существует еще один метод определения токов молнии, разработанный Белаши⁴⁷, заключающийся в вычислении тока по величине отверстия, которое получается вследствие пробоя листа бумаги искрой. Этим методом Коллинс⁷⁰ измерил довольно большое число случаев перенапряжений на линии передач от грозовых разрядов. Ориентироваться на точность этого метода рискованно, хотя ряд исследований Белаши за последние годы в лабораторных условиях доводят точность метода до точности, получаемой от ферромагнетиков.

Представляется интересным из чисто формальных соображений построить общую сводную таблицу вероятности появления тех или иных значений токов на основании данных, взятых из оригинальных работ. Такая таблица, разумеется, дает только некоторое ориентировочное представление об этом важном параметре грозового разряда. Построение сводной таблицы может быть оправдано тем, что методика измерений в основном одна и та же, точность измерения вероятно так же сильно не расходится и остальные условия

равным образом однотипны; кроме того, общее распределение токов у всех авторов относительно подобно.

Для построения суммарной табл. 12 используются данные: Стекольников ⁴ (СССР), Мак-Икрона и Мак-Морриса ^{33, 62} (США), Спорна и Гросса ⁶⁸ (США), Льюиса и Фоуста ⁷¹ (США), Коллинса ⁷⁰ (США), Цадука ⁶⁹ (Германия), Нориндера ⁴⁵ (Швеция), Руккаку и Като ⁶⁶ (Япония). По данным таблицы построен рис. 28.

Таблица 12

Токи кА	Число измерений	% «повторяемости»
0— 5	2 002	60,7
5— 10	359	10,8
10— 20	369	11,1
20— 30	220	6,6
30— 40	183	5,5
40— 50	63	1,9
50— 60	36	1,1
60— 70	23	0,7
70— 80	15	0,4
80— 90	11	0,3
90—100	11	0,3
100—120	10	0,3
120—140	6	0,15
140—160	2	0,05
160—180	1	0,025
220—230	1	0,025
	3 312	100%

Из табл. 12 следует, что

82% всех данных не превышают	20 000 А
96% » » »	50 000 »
99,4% » » »	100 000 »

Кроме этого среднее вероятное значение тока в опорах можно считать до 10 000 А.

В заключение следует отметить, что все исследования, по существу, пока еще не дают ответа относительно действительного значения токов молнии, а характеризуют только порядок величины тока в канале молнии.

§ 3. Количество электричества, переносимое грозовым разрядом

Непосредственное измерение количества электричества, переносимого при грозовом разряде, не производилось, вследствие экспериментальных трудностей, сопровождающих применение обычных методов регистраций к подобным процессам.

Обычно фигурирующая величина количества электричества в даре молнии ~ 20 кулонов представляет собой в значительной

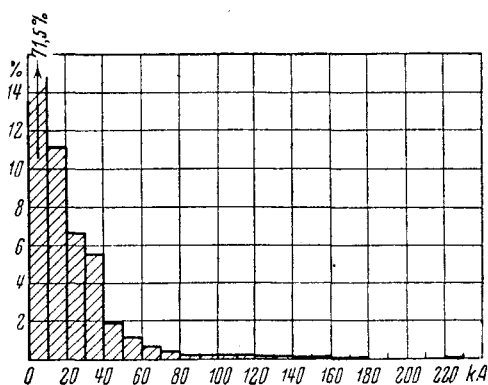


Рис. 28. Распределение данных по значениям токов

получается довольно большая, кроме того, сама волна тока на осциллограмме не всегда дает правильное понятие об истинном токе молнии (см. § 2).

При определении количества электричества, переносимого грозвым разрядом, следует различать общее количество электричества и количество, заключенное в одном импульсе при многократных разрядах. Довольно большой процент многократных разрядов, неравномерность распределения токов в отдельных импульсах разряда, встречающаяся биполярность многократного разряда и различная продолжительность импульсов в разряде — все это влечет за собой большие усложнения в одновременном определении как полного количества электричества, так и количества электричества в каждом отдельном импульсе. Поэтому обычно исследователи дают либо количество электричества, заключенное в данном импульсе, либо полное количество; правда, не всегда достаточно четко указывая, какую именно величину они измеряли.

Определения количества электричества в грозвом разряде встречаются в очень небольшом числе работ. Стекольников²⁴ дает максимальное значение для количества электричества одного импульса грозвого разряда, не превышающее 0,5 кулона. Приведенное значение, как видно, резко отлично от величины 20 кулонов. Конечно, число 20 кулонов можно считать заключающим полное количество электричества многократного разряда, но и тогда принимая среднюю вероятную кратность — 4 (см. § 6), получаем десятикратное расхождение. Результаты измерений Нориндера находятся в согласии с данными Стекольников. Нориндер указывает, что для получения количества электричества ~ 20 кулонов токи должны быть $\sim 10^6$ А или очень большой продолжительности ~ 1000 μ сек.

Совершенно иную картину дают последние результаты Мак-Икрона, изучавшего удары молнии в здании Empire State Building (Нью-Йорк)³³.

степени расчетное и весьма ориентировочное число, полученное в свое время Вильсоном^{12, 15} при построении теории грозообразования. Наиболее распространенный метод определения количества электричества при импульсном режиме заключается в графическом интегрировании осциллографической записи изменения тока молнии во времени. Разумеется, что общая ошибка в этом случае

Табл. 13 характеризует, согласно данным Мак-Икрона, «повторяемость» того или иного количества электричества, приходящегося на весь многократный разряд.

Таблица 13

Количество электричества в кулонах	Число измерений	Количество электричества в кулонах	Число измерений
0—10	2	60—70	1
10—20	4	70—80	2
20—30	5	80—90	0
30—40	5	90—100	1
40—50	3	100—160	0
50—60	3	160—170	1
			27

Главное, что непосредственно следует из табл. 13, это чрезвычайно большие количества электричества, доходящие фактически до 164 кулонов. Среднее значение количества электричества определяется в 30—40 кулонов на весь разряд. Эти значения почти вдвое больше общераспространенного числа 20 кулонов, если это число относить ко всему разряду, и во много раз больше предшествующих данных. Если 20 кулонов считать приходящимися на отдельный импульс, тогда расхождение немного уменьшается.

В результате рассмотрения экспериментальных данных по измерению количества электричества, получающегося при грозовом разряде, видно, что имеют место большие расхождения, которые возможно определяются самой молнией. В связи с тем, что токи молнии фактически не измеряются, приведенные количества электричества, разумеется, являются весьма ориентировочными. Различия в данных, конечно, выходит за пределы ошибки эксперимента и может быть объяснено, возможно, как было уже указано, различным расположением экспериментальных пунктов, рельефом местности, структурой облака и т. п.

§ 4. Значения максимальных потенциалов и градиентов в грозовом разряде

Основные измерения потенциалов и градиентов, возникающих в течение грозы и грозового разряда, по существу, относятся к периоду времени 1929—1932 гг. Как известно, целый ряд исследователей, начиная с 1934 г., перешли на использование ферромагнетиков для измерений токов, возникающих при ударах молнии в линии передач, и почти совсем не производят измерений напряжений и градиентов. В связи с этим даже те экспериментаторы, которые еще работают с осциллографами и клидонографами, касаются только вопросов токов, полярностей, многократности, харак-

теристики волны и т. д., оставляя в стороне потенциалы и градиенты. Поэтому данных по измерениям градиентов, а особенно потенциалов, очень немного.

Общий потенциал облака относительно Земли оценивается Вильсоном^{12, 15}, в результате экстраполяции и целого ряда предположений, в 100—1 000 млн. В.

Пик⁷² также приходит к этим числам на основании сравнений лабораторной искры с молнией.

Непосредственное измерение потенциалов молнии вряд ли можно себе представить, но знание градиентов в нескольких точках пространства, по которому идет разряд, может оказаться достаточным для более или менее надежного определения потенциала. Измерения градиентов производились Вильсоном на поверхности земли. Шонланд и Льюис и Фоуст равным образом измеряли осциллографами градиенты поля, возникающие вблизи антенн.

В 1937 г. Симпсон и Скрезе⁷ (см. гл. I) измеряли градиенты поля с помощью шаров, зондов и прибора «альтиэлектрографа» на различных высотах. Но эти измерения дали не достаточно полную картину значений градиентов в области грозового центра, по той причине, что все измерения велись главным образом в других местах облака с целью опровержения теории грозообразования Вильсона.

Градиенты поля вблизи поверхности Земли измерялись, как было указано Вильсоном, Шонландом и Льюисом и Фоустом, и оказались в пределах 5—280 кВ/м. Эти градиенты малы по сравнению с пробойными градиентами, полученными в лаборатории (известно, что пробойный градиент в плоском воздушном конденсаторе — 30 кВ/см).

Если принять относительно равномерное распределение поля от Земли к облаку, то общее напряжение получается близкое к тому, что ориентировочно дается Вильсоном и Пиком (см. выше).

§ 5. Параметры волны грозового разряда

Осциллографическая запись волны грозового разряда, при чувствительности ~ 100 *мк*сек на всю шкалу, позволяет зарегистрировать отдельный импульс разряда. Характерные параметры волны, как-то: амплитуда волны, длина волны, длина фронта, крутизна — все это, казалось бы, должно быть сравнительно легко определимо. Оставляя в стороне вопрос относительно того, что записывает осциллограф (см. § 2), необходимо отметить следующее: очень часто экспериментатору при расшифровке осциллограммы трудно определить начало процесса, в связи с присутствием колебаний вблизи области начального подъема волны. Эта неизбежная ошибка подчас достигает большой величины, которая становится сравнимой, например, с длиной фронта волны. Разные авторы по-разному определяют начало волны, вследствие этого при сопоставлении ряда данных можно лишь ориентировочно судить о «повторяемости» тех или иных значений параметров. Это тем более осложняется, что

далеко не все авторы дают описание метода подсчета параметров волны. Кроме всего сказанного, следует отметить, что все искажающие действия подводных проводников, а в особенности самих антенн и молниеотводов, главным образом, сказываются на параметрах волны импульса.

Довольно большое число экспериментаторов измеряли параметры волны импульса, вызванного грозовым разрядом, но тем не менее по этому вопросу получено все же относительно малое число данных.

Для характеристики волны приводятся данные: по длине волны, длине фронта и крутизне фронта

Длина волны. В результате рассмотрения ряда работ можно заключить, что все данные по длине волны, полученные отдельными авторами, оказываются единообразными (это, возможно, объясняется сравнительно малым числом измерений). Приводим сводную таблицу по длине волны грозового разряда.

Табл. 14 составлена по данным: Стекольников²⁴, Белл и Прайса⁷⁴, Георга и Итона⁷⁵, Гросса и Кокса⁷⁶, Пик⁷², Спорна и Ллойда⁷⁷, Нориндера⁴⁵. Табл. 14 представляет сводку всех данных по длине волны грозового разряда.

Таблица 14

Длина волны в $\mu\text{сек}$	Число разрядов	%
0—10	29	15,6
10—20	51	27,4
20—30	47	25,3
30—40	18	9,7
40—50	18	9,7
50—60	16	8,6
60—70	4	2,1
70—80	2	1
80—90	0	—
90—100	1	0,5
	186	

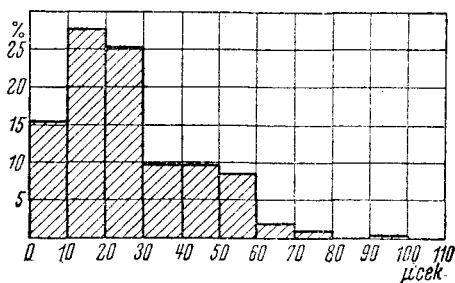
Как видно из табл. 14 и рис. 29, средняя длина волны оказывается порядка 10—30 $\mu\text{сек}$. 98% всех измерений дают длину волны, меньшую, чем 70 $\mu\text{сек}$.

Известно, что грозовые разряды дают на осциллографе либо аperiodическую запись, либо колебательную. Многие авторы это отмечают, но наиболее полно это иллюстрируется данными Стекольников⁴. Так, из общего числа 95 измерений — 43 оказались аperiodическими, 30 колебательными и 22 неизвестными. Определение формы волны производилось путем сопоставления показаний ферромагнетиков⁶⁷.

В заключение отметим, что длина волны при грозовом разряде находится в пределах 10—100 $\mu\text{сек}$ (это, разумеется, — пе-

риод колебания) или длина волны располагается в интервале 10^5 — 10^6 см.

Длина фронта волны при грозовом разряде. Как выше указывалось, наличие



ошибок при расчете параметров волны наиболее серьезно сказывается на определении длины фронта.

Табл. 15 дает сводку данных по длине фронта, собранных по работам: Стекольников²⁴, Спорна и Ллойда⁷⁷, Нориндера⁴⁵ и Льюиса⁷⁸.

Рис. 29. Распределение данных по длинам волн

Таблица 15

Длина фронта в μ сек	Число разрядов	%
0— 2	22	10,7
2— 5	85	41,8
5— 10	77	37,5
10— 20	11	5,4
20— 30	4	2
30— 40	3	1,3
40— 60	1	0,4
60— 80	1	0,4
80—100	1	0,4
	205	100%

Несмотря на существующий разброс показаний по длине фронта, основная часть измерений относится к временам до 20 μ сек. 95% всех измерений имеет длину фронта волны меньшей 20 μ сек. 90% всех измерений располагается до 10 μ сек.

Крутизна фронта волны грозового разряда. Этот параметр волны наиболее редко измерялся вследствие тех трудностей, которые сопутствуют определению быстроты нарастания фронта по осциллографическим записям. Градуировка здесь, повидимому, является очень сложной.

Измерения, произведенные Стекольниковым^{4, 24} и Нориндером^{45, 79, 80}, дают значения для крутизны фронта порядка нескольких тысяч ампер на микро-секунду.

§ 6. Многократные разряды

Фотографии молнии камерой Бойса и другими камерами позволяют раздвинуть во временном отношении последовательно идущие

импульсы в грозовом разряде. Осциллографирование грозовых разрядов при относительно малой временной развертке также дает понятие о многократности.

На основании данных Стекольников²⁵, Мак-Икрона⁴⁴, Шонланда⁴⁰ построена табл. 16.

Таблица 16

Число импульсов в многократном разряде	Число наблюдений	%
1	215	61,6
2	45	12,9
3	26	7,5
4	21	6,0
5	13	3,7
6	8	2,3
7	6	1,7
8	4	1,1
9	2	0,6
10	3	0,8
11	1	0,3
12	2	0,6
13	1	0,3
14	—	—
15	1	0,3
• • •	• • •	• • •
27	1	0,3
	349	100%

Из табл. 16 следует, что наиболее вероятную величину кратности можно ожидать равной — 4,3, без учета числа однократных разрядов, которые встречаются наиболее часто (215 из 349). Если учесть однократные разряды, то средняя степень кратности падает до $\sim 2,3$.

Общая продолжительность многократного разряда наиболее полно дается Стекольниковым, Мак-Иконом и Шонландом. Максимальная продолжительность многократного разряда наблюдалась в измерениях Стекольников²⁵ — 1,55 сек., Мак-Икрона — 1,53 сек. и Шонланда — 0,93 сек. Как видно, продолжительность многократной молнии далеко не «молниеносна». Наиболее часто встречающаяся продолжительность разряда не превосходит 0,25 сек.

Временные интервалы между отдельными импульсами многократного разряда. Последовательность импульсов в многократном разряде происходит далеко не с одинаковой частотой. Временные интервалы между импульсами очень различны, и поэтому в общем полная продолжительность того или другого грозового разряда не является непосредственной функцией степени кратности; так например, не всегда самая большая полная продолжительность разряда встречается у разрядов с максимальной кратностью.

Можно считать, что 80% всех измерений дают временные интервалы между импульсами меньше 0,1 сек. Максимальный интервал наблюдался в измерениях Стекольников (1937 г.) и оказался равным 0,93 сек.

В заключение этой главы приведем сводную таблицу наиболее вероятных значений основных параметров грозового разряда.

Таблица 17

Параметр	Наиболее часто встречающаяся величина	Максимальное зарегистрированное значение	Минимальное зарегистрированное значение
Полярность	Отрицательная (из 4-х разр. 3)	—	—
Токи молнии, зарегистрированные в опорах	до 20.000 А	220—230 кА	0,5 кА
Количество электричества	до 2 кулон	164 кулона на весь разряд	0,5 кулон
Длина волны μ сек	10—30	100	< 10
Длина фронта в μ сек	5—10	80—90	< 1
Крутизна фронта	5 000 А/ μ сек	—	—
Множественность	1	40 разр.	—
Продолжительность многократного разряда	0,2—0,6 сек.	1,55 сек.	—
Временные интервалы между импульсами в многократном грозовом разряде	0,03—0,05	0,93 сек.	0,001 сек.

Табл. 17, составленная на основании предшествующих данных, взятых из работ ряда авторов, дает ориентировочную картину по параметрам молнии.

В. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение явления грозового разряда представляет громадный интерес как с технической, так и с физической точек зрения. Физическая природа молнии, как видно из всего изложенного, остается до сих пор не выясненной. Существующие теории распространения искры (теория Таунсенда, теория Лёба и Краваса⁵⁴) дают довольно наглядное представление о механизме явления, но не всегда достаточно полно рисуют физику явления и совсем, разумеется, не объединяют комплекс явлений — искра, молния и грозообразование. Общая проблема электрического состояния Земли не имеет достаточно глубокого теоретического базиса. С экспериментальной стороны, как было показано, имеется сравнительно большое количество материала по вопросам линейной молнии, а также по вопросу грозообразования. Материалы по изучению лабораторной искры, равным образом, имеются в соответствующей литературе. Весь этот материал, полученный в различных школах,

различными исследователями, в основном оказывается согласным. В некоторых случаях имеющийся экспериментальный материал может быть хорошим критерием правильности тех или иных положений теории. Это последнее относится, например, к характеру развития грозового разряда, скорости распространения отдельных этапов разряда, многократности и т. п. В других случаях, так например, в вопросах количества электричества, переносимого грозовым разрядом, и параметров волны требуется еще довольно большое число наблюдений для получения достаточной статистики. В некоторых вопросах общая методика определения того или иного параметра не совсем надежна. Однако общие статистические данные относительно величины основных параметров молнии повидимому близки к реальным значениям (см. гл. IV, табл. 17).

Ведущиеся работы с лабораторной искрой (Стекольников, Алибон и др.) параллельно с исследованиями грозовых разрядов в поле и на линиях передач (Стекольников, Шонланд, Мак-Икрон, Льюис и Фоуст, Нориндер и др.) безусловно являются надежным средством решения общей проблемы.

Работа с «длинными» искрами, т. е. с разрядами при напряжениях в несколько миллионов вольт, заслуживает большого внимания, как переходный этап к исследованию реальной молнии. Она тем более необходима, что почти все характеристики молнии можно воспроизвести в лабораторной искре, включая многократность и ступенчатый лидер. Кроме этого, работы по получению больших токов в искре, аналогичных токам в стволе молнии, путем применения специальных генераторов тока, и изучение поведения высоковольтной искры при больших токах, также являются существенно необходимыми.

Только комплексное изучение этого сложного вопроса поможет разгадать природу и представить реальный механизм возникновения и развития грозового разряда.

Весь этот комплекс вопросов становится чрезвычайно актуальным для Советского Союза в связи с общей проблемой Большой Волги и строительством Куйбышевского гидроузла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Келлер, Атмосферное электричество, 1920, Изд. НКП.
2. И. Стекольников, А. Акопян, А. Беляков, Молния и защита от ее действий, Изд-во АН СССР, 1938.
3. Brookes, Meteorological Office Geophysical Memoir., 23 (1925).
4. Стекольников и Ламдон, Электричество, № 5, 1938.
5. Simpson, J. I. E. E., 67, 1269, 1929.
6. P. Lenard, Meteor. Z., 39, 249, 1904.
7. Simpson a. Screse, Proc. Roy. Soc., A 161, 309, 1937.
8. Simpson, Proc. Roy. Soc., A 111, 56, 1926.
9. Allibone a. Schönland, Nature, 123, 794, 1931.
10. Lewis a. Foust, A. J. E. E., 54, 934, 1935.
11. McEachron a. McMorries, G. E. Rev., 39, No 10, 1936.

12. C. T. R. Wilson, J. F. I., **208**, 1, 1929.
13. McEachron a. McEachron, G. E. Rev., **33**, No 9, 1936.
14. E. W. Schumann, Physik. Z., **26**, 81, 1925.
15. C. T. R. Wilson, Phil. Trans. Roy. Soc., A **221**, 73, 1920.
16. J. C. Gott, Proc. Roy. Soc., A **151**, 665, 1935.
17. Goodlet, J. I. E. E., **81**, 1, 1937.
18. Ross Gunn, Terr. Magn. & Atm. El., **40**, 79, 1935.
19. Dauzeré, C. I. G. R. E. N. T., No 311, 1935.
20. Dauzeré, C. I. G. R. R. N. T., No 322, 1937.
21. C. V. Boys, Nature, **118**, 749, 1926.
22. C. V. Boys, Nature, **127**, 25, 1931.
23. G. Allbright, J. Appl. Phys., **8**, No 5, 1937.
24. И. Стекольников, Электричество, № 2, 1937.
25. Стекольников и Валеев, Электричество, № 1, 1938.
26. Н. Мякишев, Новости техники, № 25, 1937.
27. Стекольников и Мякишев, Электричество, № 11, 1938.
28. Стекольников, Электричество, № 8, 1937.
29. Стекольников, Электричество, № 1, 1939.
30. Schonland, Malan a. Collens, Nature, **134**, 177, 1934.
31. Schonland a. Collens, Proc. Roy. Soc., A **143**, 654, 1934.
32. Schonland, Hodges a. Collens, Proc. Roy. Soc., A **166**, 56, 1938.
33. McEachron, Elec. Eng. **57**, 493, 1938, J. F. I., **227**, 149, 1939.
34. J. F. Peters, El. World, **183**, 1924.
35. Ф. Пик, Диэлектрические явления в технике высок. напряж., 1934, ОНТИ, Энергоиздат.
36. C. V. Boys, Nature, **122**, 310, 1928.
37. H. H. Haffert, Proc. Phys. Soc., **10**, 176, 1890.
38. B. Walter, Ann. Phys., **18**, 863, 1905.
39. A. Larson, An. Rep. Smithsonian Inst., p. 119, 1905.
40. Schonland, Malan a. Collens, Proc. Roy. Soc., A **152**, 595, 1935.
41. McEachron, Elec. Eng., **53**, 1633, 1934.
42. Walter, Phil. Mag., Series 7, **20**, 1144, 1935.
43. Malan a. Collens, Proc. Roy. Soc., A **162**, 175, 1937.
44. McEachron, Elec. Eng., **57**, 510, 1938.
45. H. Norinder, J. F. I., **220**, 69, 1935.
46. Teopler, Hermsdorf-Schomburg, Mitt., 25, 734, 1926.
47. Bellashi, Elec. Eng., **54**, 837, 1935.
48. Schonland, Phil. Mag., **23**, 503, 1937.
49. Bellashi, Elec. Eng., **56**, No 10, 1937.
50. Matthias, E. T. Z., **58**, No 32, 1937.
51. Allibone, J. I. E. E., **82**, 513, 1938.
52. Workmann, Snoddy a. Beems, Physics, **7**, 375, 1936.
53. Schonland, Proc. Roy. Soc., **164**, 132, 1938.
54. Loeb a. Cravath, Physics, **6**, 125, 1935.
55. Loeb, Rev. Mod. Phys., **8**, 267, 1936.
56. Rudenberg, Wiss. Veröff. Siemens-Konz., **29**, Part 1, 1930.
57. Ollendorf, Archiv Elek., **26**, 1932, 1932.
58. Bewley, Gen. Elec. Rev., **36**, 516, 1933.
59. Ollendorf, Archiv Elek., **27**, 169, 1933.
60. G. C. Simson, Nature, **113**, 677, 1924.
61. Lewis a. Foust, Elec. Eng., **56**, 101, 1937.
62. McEachron a. McMorries, Elec. Eng., **57**, 307, 1938.
63. E. Bell, Elec. Eng., **55**, 1306, 1936.
64. Grünwald, J. C. L. H. T. S., Report, No 316, 1937.
65. K. Berger, Bull. S. E. V., No 6, 1936.
66. Rukkaky a. Katoh, E. T. J., **2**, 175, 1938.
67. Foust a. Henderson, Elec. Eng., **54**, 373, 1935.
68. Sporn a. Gross, Elec. Eng., **56**, 245, 1937.
69. Zaduck, E. T. Z., No 17, 475, 1935.
70. Collens, Elec. World, **103**, 688, 1934.
71. Lewis a. Foust, Elec. Eng., **56**, 452, 1937.

72. F. Peek, A. I. E. E., Tr., **50**, 1077, 1931.
 73. Lewis a. Foust, A. I. E. E., Tr., **49**, 317, 1930.
 74. Bell a. Price, A. I. E. E., Tr., **50**, 1101, 1931.
 75. George a. Eaton, A. I. E. E., Tr., **50**, 877, 1931.
 76. Gross a. Cox, A. I. E. E., Tr., **50**, 1118, 1931.
 77. Sporn a. Lloyd, A. I. E. E., Tr., **49**, 905, 1930.
 78. Lewis, Gen. Elec. Rev., **39**, 543, 1936.
 79. H. Norinder, J. F. I., **218**, 717, 1934.
 80. H. Norinder, E. T. Z., No 5, 105, 1938.
-