

МОЛНИЯ ¹

Дж. К. Симпсон

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ВОЗДУХА И ОБЛАКОВ

Несомненно, что девяносто процентов физиков, не задумываясь, дали бы объяснение явлению грозового разряда. Это объяснение заключалось бы, приблизительно, в следующем: „Во время грозы облако получает электрический заряд, который увеличивается до тех пор, пока из него не проскочит искра на другое облако или на землю, подобно тому, как разряжается изолированный медный шарик, соединенный с электростатической машиной“. Это означает, что облака рассматриваются как обыкновенные проводники, которые можно зарядить и затем разрядить при достаточно высоком потенциале. Я надеюсь, что смогу доказать полную ошибочность такого представления.

Почти в самом начале возникновения науки об электричестве было известно, что воздух не является абсолютным непроводником электричества. На основании наблюдений было установлено, что заряженные тела теряют свой заряд, при условиях, исключающих дефекты изоляции. Вначале полагали, что потеря электрического заряда бывает наибольшей в сырую погоду, когда воздух насыщен влагой, но в 1887 г. Линс установил обратное явление, т. е. большую потерю заряда в хорошую погоду, при сухом воздухе, чем и доказал, что в вопросе об электропроводности

¹ Двадцатая лекция в честь Кельвина, читанная в Институте инженеров-электриков. Напечатана в *Journal of the Institute of Electrical Engineers*. Vol. 67, № 395, Nov. 1929. Перевод с некоторыми сокращениями.

воздуха, влажность или сухость воздуха не являются решающими факторами. Однако вопрос о том, как происходит эта утечка заряда, представлялся чрезвычайно неясным, так как в то время предположение о том, что газы, подобно металлам, могут обладать проводимостью, представлялось невероятным. Общепринятое представление заключалось в том, что молекулы воздуха, сталкиваясь с заряженным телом, при отскакивании уносят с собой часть его заряда. Известный опыт с маятником, в котором изолированная гирька, колеблясь между заряженным и незаряженным колоколами, заставляет последние звучать, служил, вероятно, основанием для такого представления. Во всяком случае оно казалось справедливым и опровергнуть его было невозможно.

Открытие лучей Рентгена и лучей Бекереля привело к быстрому развитию наших представлений об электропроводности газов. Был установлен тот факт, что эти лучи могут ионизировать молекулы газа, вырывать из них электроны, сообщая молекуле положительный заряд; с другой стороны, нейтральная молекула, захватывающая свободный электрон, приобретает отрицательный заряд. Заряженная таким образом молекула газа представляет собою ион (в этом смысле я и буду употреблять везде слово „ион“). Следовательно, потерявшая электрон молекула газа является положительным ионом, а молекула, захватившая электрон, — отрицательным.

В 1900 и 1901 гг. Эльстер и Гейтель в Германии и Вильсон в Англии доказали, что в свободном от пыли воздухе содержатся положительные и отрицательные ионы, числом и подвижностью которых в электрическом поле и обуславливается электропроводность воздуха. Далее было установлено, что в нижних слоях атмосферы в каждом кубическом сантиметре воздуха заключается около 500 ионов каждого знака, движущихся со скоростью $1,5 \text{ см/сек.}$, в электрическом поле, с градиентом в 1 В/см. Простое вычисление показывает, что этим обуславливается небольшая, но вполне определенная электропроводность воздуха, величину которой можно оценить, исходя из того, что сопротивление

нижних слоев атмосферы в ясную погоду равно $4,5 \cdot 10^{15} \Omega$. Как указал (для иллюстрации этой цифры) Сванн, столб воздуха, длиной в несколько сантиметров оказывает сопротивление электрическому току, равное сопротивлению медного провода того же поперечного сечения, длиной в 30 000 миллиардов миль, т. е. в 40 раз большей, чем расстояние от земли до Арктура. Определенная таким образом электропроводность атмосферы может казаться чрезвычайно малой, но все же она имеет существенное значение. Она достаточно велика для того, чтобы изолированный заряженный проводник, помещенный в ней, потерял в течение минут 3% своего заряда, а практически весь заряд ушел бы в воздух в течение полчаса.

Если же мы обратимся к рассмотрению электрических условий внутри облака, то увидим, что здесь они совершенно отличны. Внутри грозового облака ионы практически совершенно отсутствуют, так как, если даже они образуются так же быстро, как и в чистом воздухе, то они немедленно поглощаются частицами облака и утрачивают свою подвижность. Таким образом электропроводность внутри облака невелика, и грозовое облако является одним из наилучших изоляторов. Автор на опыте убедился в том, что заряженные тела, помещенные внутри облака, в течение часа, и даже большего промежутка времени, совершенно не теряли своего заряда. Мы должны, очевидно, изменить наши представления о грозовых явлениях: вместо обладающих электропроводностью облаков, находящихся в непроводящей атмосфере, мы должны представить себе непроводящие облака в электропроводной атмосфере. Наше представление об электропроводности облаков соответствовало объяснениям грозовых явлений, даваемым обычно в учебниках; согласно этим объяснениям, между ближайшими точками двух разных облаков проскакивает искра и заряженное облако индуцирует противоположные заряды на верхней и нижней поверхностях ниже лежащего облака. Если же мы будем рассматривать облако как совершенный непроводник, то такое объяснение должно отпасть, так как заряд не может накапливаться на поверхности изолятора,

подобно тому, как он обычно собирается на поверхности проводника.

Ниже я опишу процесс разделения больших количеств электричества в различных частях облака; сейчас же я останавлиюсь на рассмотрении находящегося в облаке электричества, независимо от того, каким образом оно появилось. Электрический заряд облака очевидно должен быть связан с водой, или с частицами облака, с дождем, градом или снегом. Этот заряд может быть очень большим, — настолько большим, что электрическая сила, действующая на капли дождя во время грозы, может быть больше силы тяжести. Так как заряд постепенно аккумулируется в некоторой части облака, то он должен в конце концов разрядиться, либо благодаря аккумулированному в другой части облака заряду противоположного знака, либо же вследствие индуктирования подобного заряда на поверхности земли. Вопросу о том, как этот разряд начинается и как он распространяется, физиками уделялось очень мало внимания. Относительно разряда электричества через воздух от одного проводящего электрода к другому мы знаем довольно много; но при грозовых явлениях мы не имеем электродов или же, в лучшем случае, всего лишь один электрод, при прохождении заряда в землю или из земли.

МЕХАНИЗМ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ.

Я уже говорил, что внутри облака заряд сосредоточивается на частицах воды; поэтому при своем перемещении заряд должен захватить с собой и воду. Известно, что подвижность частиц воды, даже очень сильно заряженных, так мала, что возбудить заметный ток может лишь электрический пробой воздуха. Другими словами, разряд может наступить лишь в случае подобного пробоя. Поэтому я должен сказать несколько слов о процессе ионизации и об электрическом пробое воздуха.

При нормальном давлении и температуре, электрический пробой воздуха наступает в том случае, когда силовое поле достигает 30 000 вольт на сантиметр. При этих усло-

виях электрон за короткий промежуток своего свободного движения приобретает такую скорость, что при столкновении в конце своего пути с нейтральной молекулой он оказывается способным вырвать из нее один или несколько электронов. Эти освобожденные электроны, попадая в поле той же интенсивности, воспроизводят тот же самый процесс, в результате чего, в течение короткого времени образуется большое количество свободных электронов, движущихся с большой скоростью вдоль электрических силовых линий. Скорость движения электронов очень отличается от скорости движения ионов в том же поле. Эта разница так велика, что даже в самом сильном поле отрицательные и положительные ионы, по сравнению с электронами, можно считать практически неподвижными. Носителями положительного электричества являются всегда только ионы; элементарные частицы положительного электричества — протоны, будучи атомами материи, являются ионами. Поэтому при пробое воздуха движутся лишь большие количества отрицательного электричества, в виде электронов, в то время как положительное электричество остается связанным с практически неподвижными положительными ионами.

Так как во время грозы на одной части облака аккумулируется электрический заряд одного знака, а на другой части — заряд противоположного знака, то интенсивность поля между ними возрастает. На рис. 1 (а) эти заряды изображены знаками $+$ и $-$; там же указаны и силовые линии. Так как заряд распределяется неравномерно, то силовые линии непараллельны; они приближаются друг к другу в месте соединения обоих зарядов, где интенсивность поля максимальная.

При достаточном увеличении интенсивности поля, пробой воздуха произойдет прежде всего по линии AB . Как только это произойдет, эта небольшая область станет весьма электропроводной; эффект получается аналогичный тому, какой мы имеем, вводя отрезок проволоки в электростатическое поле. Изображенные на диаграмме 1 (b) силовые линии указывают новое распределение; интенсивность поля

значительно возрастает по краям проводящей области, где линии сходятся к ней.

На рис. 1 (с) область электрического пробоя воздуха изображена в увеличенном масштабе. Электроны быстро

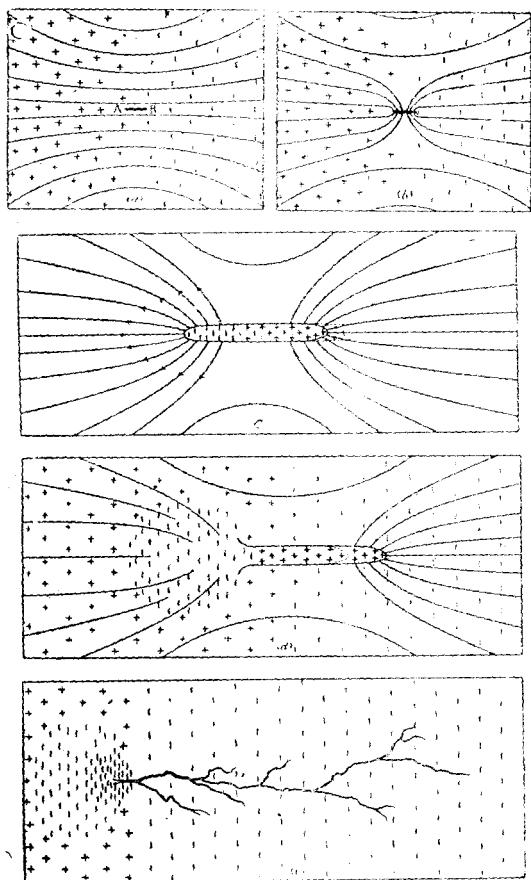


Рис. 1. Диаграмма образования проводящего канала.

двигались налево, т. е. по направлению к положительному заряду; правую половину проводящей области заполняли положительные ионы, которые, как уже было указано, можно считать неподвижными. Такова картина непосредственно после пробоя воздуха; особенный интерес представляют, однако, последующие изменения. На диаграмме стрелки на силовых линиях указывают направление движения электронов. Налево электроны выталкиваются из проводящей области в окружающий неионизированный воздух; оттуда они переходят в ме-

нее интенсивное поле и захватываются нейтральными молекулами, для образования отрицательных ионов. Эти ионы обладают малой подвижностью и остаются в области рассеянного поля, в конце проводящего канала.

Действие этого облака отрицательных ионов на электри-

ческое поле показано на рис. 1 (*d*); из него видно, что по краям проводящей области первоначальное интенсивное поле уже не существует, так как эта область значительно расширилась и многие из силовых линий кончаются в области расположения отрицательного электричества, связанного с новыми отрицательными ионами.

Обращаясь снова к рис. 1 (*c*) и рассматривая условия на другом конце проводящей области, мы находим в них большую разницу. Канал заполнен положительными ионами, слишком громоздкими для заметного продвижения, несмотря на стремление поля вытолкнуть их, вследствие чего форма канала остается неизменной. Однако, благодаря концентрации силовых линий, наступившей после пробоя воздуха, интенсивность поля у края проводящей области очень велика, и воздух в пространстве, окружающем конец канала [указанном пунктиром на рис. 1 (*c*)], не в состоянии противостоять электрическому напряжению. В результате происходит новый пробой, с новым освобождением большого количества электронов. Эти электроны сразу устремляются в проводящий канал, где они сильно ионизируют воздух сталкиваясь с молекулами его при прохождении канала. В конце концов они проникают в облако отрицательных ионов через другой конец канала. Переход электронов из вновь ионизированной области в другой конец канала сопровождается заполнением этой области положительными ионами; другими словами, этот канал, как показано на рис. 1 (*d*), попросту продолжается в область отрицательного электричества. Однако, на этом процесс не заканчивается, так как конец удлиняющегося канала остается острым, вследствие чего поле в конце его оказывается еще достаточно интенсивным для того, чтобы ионизировать воздух. Таким образом, канал сам быстро удлиняется в направлении, противоположном движению электронов, и проникает далеко в область, где перед разрядом интенсивность поля была слишком слаба для того, чтобы вызвать пробой воздуха.

Часто случайные причины вызывают при росте канала разветвление его, в результате чего получается картина, изображенная на рис. 1 (*e*). Этот рисунок иллюстрирует

два чрезвычайно важных свойства электрического разряда в воздухе при нормальном давлении. 1. Возникновение разряда вызывает пробивание канала в одном только направлении, а именно, — к месту расположения отрицательного электричества; в другом же направлении канал не образуется; там находится только рассеянное облако отрицательных ионов. 2. Все разветвления имеют одно и то же направление, именно: в сторону расположения отрицательного электричества. Это обстоятельство имеет большое зна-

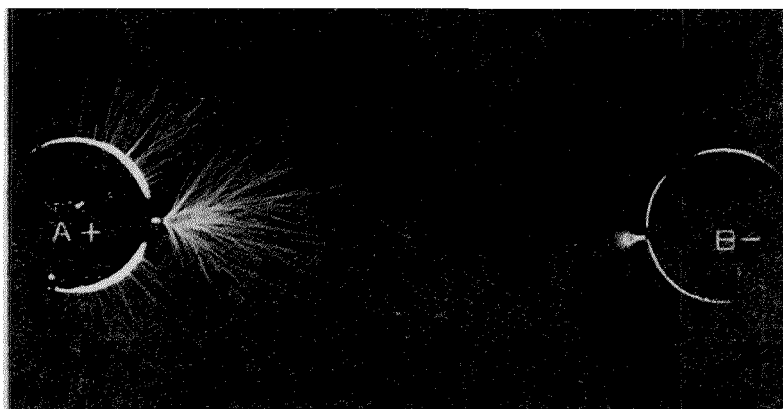


Рис. 2. Разряд между положительным и отрицательным электродами.

чение, так как дает нам возможность определить положительный конец молнии, если видны ее разветвления.

До сих пор мое описание грозового разряда было чисто теоретическим, но ряд произведенных мною лабораторных опытов всесторонне подтвердил эту теорию. Эти опыты описаны мною в специальной статье о молнии, и я упомяну здесь только один из них. На фотографической пластинке были помещены два медных диска, изображающих заряженные области облака, один — положительный (A), другой — отрицательный (B). Для концентрации поля на каждом диске выступала небольшая проволочка. Диски соединялись с электростатической машиной Уимшера, вследствие чего наступал разряд, результаты которого указаны на

рис. 2. Длинные, тонкие, очень заостренные на концах каналы исходят из положительно заряженного электрода, из отрицательно же заряженного — каналы не исходят; там имеется лишь небольшое облако около конца проволоочки.

ТИПЫ ГРОВОВЫХ РАЗРЯДОВ

Желая применить результаты этого опыта к грозовым разрядам, мы должны подразделить эти разряды на три возможных типа: а) разряды между противоположно заряженными областями атмосферы, б) разряды между положительным электричеством, заключенным в облаке, и землей и с) разряды между отрицательным электричеством, заключенным в облаке, и землей.

а) Разряды между противоположно заряженными областями атмосферы. На рис. 1 изображен разряд между двумя областями, соответственно положи-

тельно и отрицательно заряженными. В результате разряда мы имеем внутри положительно заряженной области большое рассеянное облако отрицательных ионов, и внутри отрицательно заряженной области — разветвленный канал, с заключенными в нем положительными ионами. Разряд уничтожил поле, но не произвел значительного перемещения электрических зарядов; последнее зависит от нормального движения атмосферного воздуха, благодаря которому перенесенный заряд переходит в окружающие части облака, где он соединяется с исходным зарядом, в результате чего происходит полная нейтрализация. Мы видим, что разряд начинается там, где интенсивность поля максимальна и канал увеличивается и разветвляется в сторону отрицательного заряда.

б) Разряды между положительным электри-

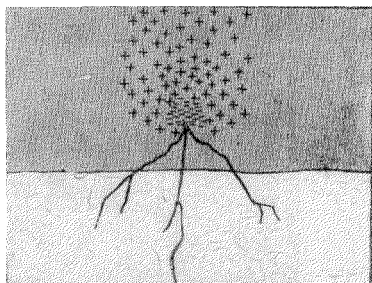


Рис. 3. Диаграмма разряда из положительно заряженной области.

чеством, заключенным в облаке, и землей. Заштрихованная поверхность на рис. 3 изображает облако, в котором сконцентрировано положительное электричество, обозначенное положительным знаком. Разряд начинается в нижней части заряженной области, где вначале интенсивность поля была максимальной. Разряд идет в направлении индуцированного отрицательного заряда земли и,

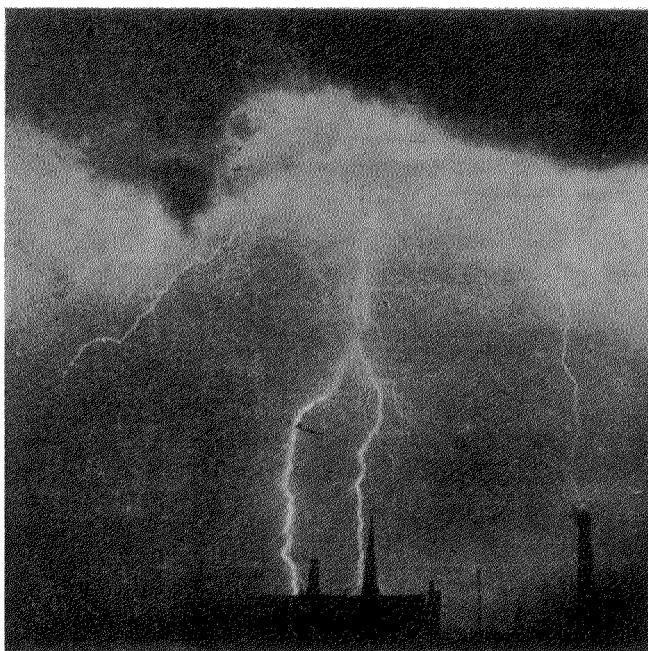


Рис. 4. Фотография разряда, сделанная неподвижной камерой. (Фотография Б. Вальтера.)

по мере его развития, разветвляется проводящий канал. Степень разветвления бывает очень различна; мы можем наблюдать все градации разряда, начиная от неразветвленной прямой вспышки и вплоть до весьма разветвленных разрядов, сопровождающих сильные грозовые бури.

Образование облака отрицательных ионов вблизи конца разряда несомненно играет большую роль для его характера, так как оно уменьшает поле в основании канала и

стремится препятствовать прохождению электричества вдоль последнего. Облако отрицательных ионов может фактически закупорить канал еще до того, как через него прошло количество отрицательного электричества, достаточное для нейтрализации положительного заряда в облаке. В таком случае разряд прекращается до тех пор, пока либо устраняется пробка, либо боковой разряд открывает новый путь между концом канала и другой частью облака. Таким образом разряд вдоль главного канала может быть прерывающимся, так как канал остается ионизированным в течение заметного промежутка времени, после прекращения частичного разряда.

Описанный процесс очень хорошо иллюстрируется двумя фотографическими снимками проф. Вальтера, сделанными им в Гамбурге, при помощи двух фотографических камер, одна из которых была укреплена неподвижно, а другая — установлена на вращающейся подставке.

На рис. 4 показан снимок, сделанный неподвижной камерой. Тот факт, что разветвления канала внутри облака сходятся в одну точку, ясно указывает на то, что разряд начинается не на поверхности облака, как это было бы в том случае, если бы облако являлось проводником. На рис. 5 показан снимок, сделанный при помощи вращающейся камеры. Камера

0.6 0.4 0.2 0
 —————
 sec.

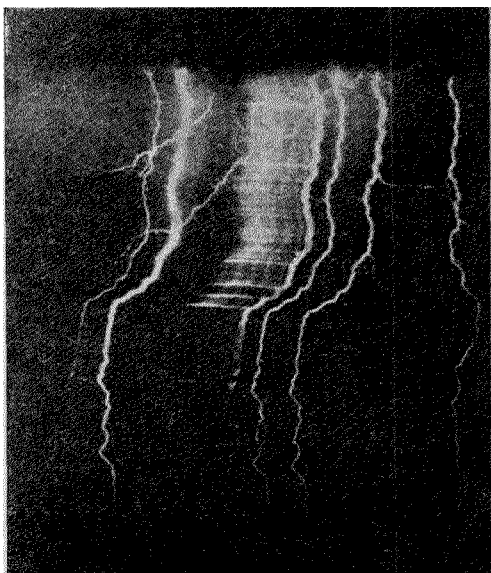


Рис. 5. Фотография разряда, изображенного на рис. 4, сделанная вращающейся камерой. (Фотография Б. Вальтера.)

передвигалась в таком направлении, что первая вспышка оказалась на снимке справа. Следует заметить, что эта вспышка являлась единственным вертикальным разрядом. Спустя $1/10$ сек последовал второй разряд, прошедший по каналу первого до пункта, указанного стрелкой, и образовавший затем второй канал; это относится к двум главным каналам, указанным на снимке неподвижной камеры. Затем, через короткие промежутки времени произошли еще два разряда, после чего разряд, будучи очень ослабленным все же не прекращался в течение более $1/10$ сек; в конце концов он закончился еще двумя вспышками, следовавшими одна за другой через короткий промежуток времени. Между первым и последним разрядами прошло немного более полсекунды. В этом примере заряд облака, вызвавший молнию, был несомненно положительным, так как разветвления были направлены в противоположную облаку сторону; что касается прерывающегося характера разряда, то он может быть удовлетворительно объяснен, как результат закупоривания канала отрицательными ионами.

При большом накоплении положительного электричества внутри облака каналы, заканчивающиеся в нем, не могут достигать земли. К сожалению, в виду того, что такие укороченные вспышки происходят внутри облака, непосредственно убедиться в этом не представляется возможным. Если бы одно из разветвлений достигло нижней части облака и стало видимым, то оно несомненно дошло бы до земли, т. е. по мере приближения к последней интенсивность электрического поля в конце канала сильно возрастает. Хотя при помощи фотографии мы не можем доказать существование заканчивающихся в воздухе вспышек молнии, имеется все же множество косвенных указаний на то, что такого рода вспышки имеют место в тропиках, где грозовые явления происходят в более высоких слоях атмосферы, чем в умеренном поясе.

с) Разряды между отрицательным электричеством, заключенным в облаке, и землей. Перед прохождением заряда, электрическое поле под отрицательно заряженным облаком подобно полю под положительно

заряженным облаком, только направление этих полей противоположно. Пробой воздуха происходит в этом случае также в точке, лежащей близ нижнего края заряда; но разряд при этом распространяется не по направлению к земле, а по силовым линиям внутрь облака. Это показано схематически на рис. 6. Получить фотографический снимок такого рода разряда не представляется, к сожалению, возможным, так как он происходит в облаке. Есть основание полагать, что такие разряды происходят весьма редко, так как неизвестен механизм концентрации отрицательного электричества внутри небольшой части облака, в противо-

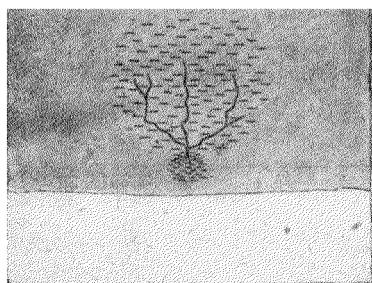


Рис. 6. Диаграмма разряда внутри отрицательно заряженной области.

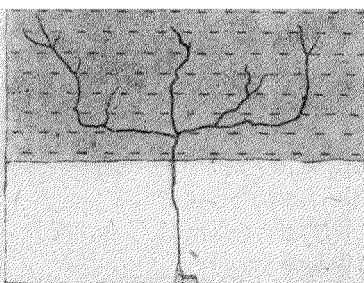


Рис. 7. Диаграмма разряда между отрицательно заряженной областью и землей.

положность тому, что имеет место в случае с положительным электричеством.

По причинам, которые будут указаны ниже, отрицательное электричество распределяется обычно в большой массе облака. Электрическое поле под таким обширным облаком представляется относительно однородным и характеризуется вертикальными силовыми линиями. Область максимальной интенсивности будет теперь расположена не близ облака, а около земли, где находятся горы, башни, деревья и прочие возвышения, на которых будут сосредоточиваться силовые линии. Если при этом достигается разрядное напряжение, то образуется проводящий канал, быстро поднимающийся вверх к облаку, где он там разветвляется, как показано на рис. 7. Сделать фотографические снимки таких

вспышек чрезвычайно трудно, так как разветвление происходит почти всегда внутри облака. Наилучшая фотография вспышек такого типа (принадлежащая Дж. Краку и снятая в июне 1892 г.) воспроизведена на рис. 8.

Из трех типов разрядов, которые мы рассмотрели, разряд внутри облака, разряд в землю из положительного облака и разряд в землю из отрицательного облака — последние два имеют наибольшее значение для инженера-электрика, так как вызывают разрушения зданий, воздушных проводов и пр. Но характерные особенности обоих типов

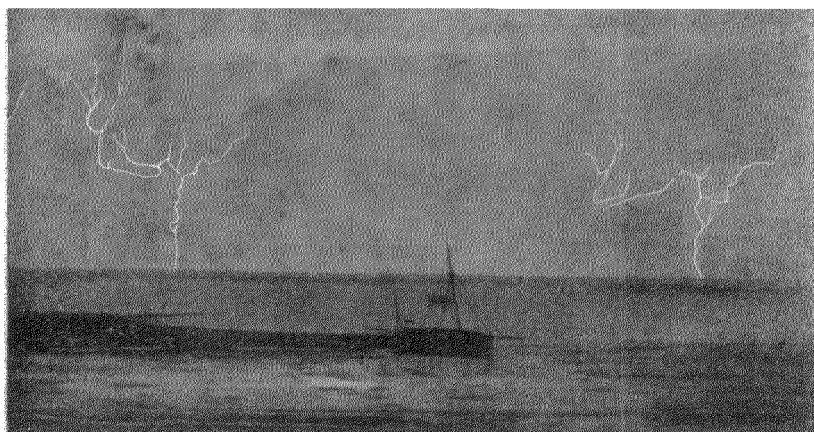


Рис. 8. Фотография разряда у Herne Bay.

разрядов очень различны. Разряд из положительного облака начинается в высоких слоях атмосферы и разветвляется на своем пути к земле. Связанные с земной поверхностью предметы могут, поэтому, испытывать удар либо главного ствола, либо одного из его разветвлений. С другой стороны, разряд в направлении отрицательного облака начинается с возвышающегося предмета, через который проходит весь разряд. Таким образом при положительном разряде вероятность удара гораздо больше, чем при отрицательном.

При разряде одинакового количества электричества из отрицательного и из положительного облака, количество электричества, протекающего через ударенный молнией

предмет, неодинаково; при положительном разряде большая часть электричества остается в канале и его разветвлениях, так что на рассматриваемый предмет приходится лишь небольшая часть всего заряда; при отрицательном же разряде последний целиком проходит через ударенный молнией предмет. Поэтому интенсивность удара при отрицательном разряде больше, нежели при положительном. Положительные разряды, как было показано мной в другом месте, происходят обычно чаще, чем отрицательные.

На основании изложенных теоретических соображений можно заключить, что разряды, исходящие из положительно заряженных облаков, будучи сравнительно редкими, обладают чрезвычайно большой интенсивностью. Для того, чтобы проверить эти заключения, я изучил больше 400 фотографических снимков молнии, определил по направлению разветвлений знак разряда и пришел к выводу, что число разрядов между положительно заряженным облаком и землей, по крайней мере, в четыре раза превосходит число разрядов между отрицательным облаком и землей; есть даже основания полагать, что отношения между этими числами ближе к 10, чем к 4.

До последнего времени физиков весьма занимал вопрос о том, является ли грозовой разряд односторонним или колебательным. В настоящее время этот вопрос окончательно разрешен, благодаря наблюдениям Уотсона, Нориндера и Маттиаса, которые при помощи катодного осциллографа доказали, что главный разряд в правой вспышке состоит в одностороннем токе, начинающемся от нуля, увеличивающемся до максимума и вновь более или менее быстро уменьшающемся до нуля.

На основании вышеизложенной теории этот факт очень легко объясняется. Существенное значение в колебательном разряде имеет конденсатор, который, разряжаясь, переходит через состояние равновесия, вызывая этим обратный ток, перезаряжающий конденсатор. До тех пор, пока облако рассматривалось как проводник, который можно разрядить подобно лейденской банке, — естественно было считать молнию колебательным разрядом. Но в настоящее время мы

знаем, что практически облако является совершенным непроводником, вследствие чего оно не обладает емкостью и не может действовать подобно лейденской банке. Поэтому мы имеем все основания считать главный разряд односторонним.

МОЛНИЯ И АТМОСФЕРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ

Тут однако нужно иметь в виду еще один фактор. Хотя облако, в целом, не имеет емкости, проводящий канал с его ответвлениями является проводящей системой и потому обладает электроемкостью и самоиндукцией. Мы можем себе представить канал грозовой вспышки, направленный к земле или от земли, в виде огромной беспроволочной антенны; если при этом сопротивление канала не слишком велико, то он будет давать электрические колебания, подобно всякой другой радио-антенне. Применяя обычную формулу, мы находим, что вертикальная антенна, заземленная в нижнем конце, вышиной в 2 км и 5 см в диаметре, может дать колебательный разряд, при сопротивлении не свыше одного ома на метр. Не подлежит сомнению, что сопротивление вполне развитого грозового канала, максимально ионизированного, может быть еще менее, вследствие чего канал получает способность давать электрические колебания.

Эти колебания будут накладываться на главный ток, но не будут при этом изменять его направления. Другими словами, интенсивность одностороннего тока главного разряда будет пульсировать с частотой, соответствующей периоду свободных колебаний канала; этот эффект несколько напоминает действие „поющей дуги“, в которой проводящий путь в воздухе между электродами поддерживается односторонним током, в то время как колебания, вызывающие музыкальный тон, наложены на ток, соответственно естественной частоте цепи.

Колебания этого рода, наложенные на грозовой разряд, были на самом деле обнаружены и изучены Нориндером, а Уотсон-Уатт констатировал большое развитие их в ат-

мофферических разрядах, наблюдавшихся им в Кортуме; осциллограммы их изображены на рис. 9. Если, как предполагает Эпплтон, атмосферические разряды обязаны своим происхождением, главным образом, грозовым разрядам, то эта „рябь“, эти мелкие волны находят свое объяснение в колебаниях внутри грозового канала, вытекающих из нашей теории.

Длина волны излучения, вызванного колебаниями, приблизительно вдвое превышает длину каналов, оба конца которых находятся в воздухе, и в четыре раза — длину каналов, которые достигают земли. Если мы примем, что средняя длина грозового канала равна 2 или 3 км, как Уотсон-Уатт,

то длина волны выразится в 10 км, между тем как Уотсон-Уатт нашел, что длина волн исследованной им „ряби“ близка к 30 км, т. е. имеет тот же порядок величины.

Между прочим, следует заметить, что длина волны этих колебаний находится в пределах длин волн, применяемых в беспроволочном телеграфе, и поэтому колебания, возникшие таким образом, являются по видимому основной причиной нарушений, связанных с атмосферическими разрядами.

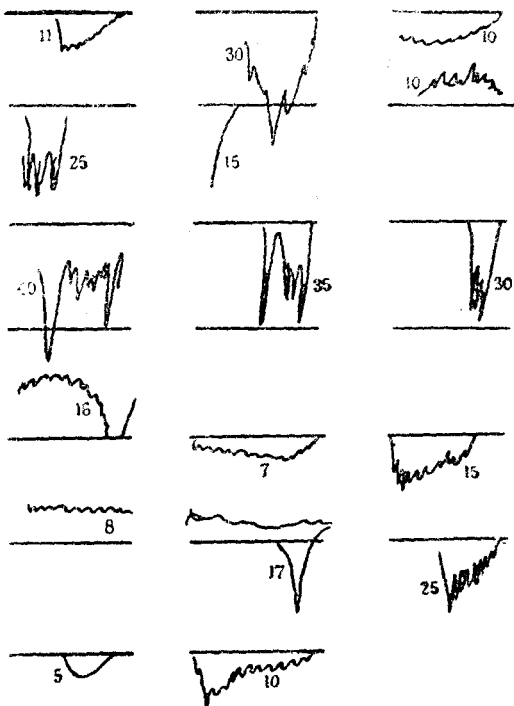


Рис. 9. Волновая форма атмосферных разрядов, наблюдаемая Уотсон-Уаттом.

Количественная сторона вопроса

Очень важно во всех практических вопросах, имеющих отношение к грозовому разряду, знать величину электрических факторов, связанных с ним. Почти всем, что мы знаем по этому поводу, мы обязаны Ч. Т. Р. Вильсону; я приведу здесь лишь результаты его исследований, не пытаясь охарактеризировать методы, которыми он пользовался; упомяну лишь, что они включали также измерение тех изменений в силе электрического поля, которые вызываются грозovým разрядом на известном расстоянии от него.

Вильсон нашел, что количество электричества, связанного с вспышкой молнии средней интенсивности, колеблется между 10 и 50 кулонами; типичным количеством он считает 20 кулонов, величину поразительно малую, равную всего только 20 *А/сек*; это количество электричества может казаться слишком незначительным с точки зрения техники. В 1920 г. Вильсон впервые установил посредством наблюдений количество электричества, связанное с вспышкой молнии. Однако, еще великий Фарадей в своих ранних исследованиях об электричестве пришел к аналогичным результатам. А именно, Фарадей писал, что количество электричества, необходимое для разложения капли воды (700 кулонов), „равно количеству электричества, разряжающемуся при сильнейшей грозовой буре“.

Вильсон вычислил далее, что в грозовом облаке перед прохождением разряда в 20 кулонов электрический потенциал равен биллиону вольт. Конечно, благодаря сопротивлению воздуха в канале, к моменту удара молнии в предмет, находящийся на поверхности земли, величина потенциала уменьшается; можно думать, однако, что при ударе молнии в такие проводники, как, напр., линии передач, не связанные непосредственно с землей, достигаются потенциалом в десятки миллионов вольт. Энергия разряда может быть непосредственно вычислена из количества электричества и напряжения. В случае вспышки, вызывающей разряд в 20 кулонов, она определяется в 10 *эргов*. Будучи выражена

в обычных единицах, энергия среднего грозового разряда равна 3000 kW/час . И тут, так же как в случае потенциала, эта энергия не достигает целиком поверхности земли, так как большая часть ее поглощается в канале; однако многие из наиболее сильных разрядов должны передавать большую часть своей энергии земле.

Очень важным элементом грозового разряда является его длительность. Последняя не была определена Вильсоном, но в настоящее время мы располагаем результатами исследований, произведенных недавно Нориндером и Маттиасом; если, кроме того, мы примем, что атмосферические разряды обуславливаются молниями, то будем иметь большое количество данных, собранных У.-Уаттом. Согласно всем этим определениям, средняя длительность грозового разряда несколько более $0,001 \text{ сек}$. Разряд в 20 кулонов в течение $0,001 \text{ сек}$ дает средний ток в $20\,000 \text{ А}$ — значение, соответствующее непосредственным наблюдениям над силой грозового тока, произведенным Маттиасом. В центре периода разряда эта величина может быть значительно больше, достигая $100\,000 \text{ А}$.

Механизм Грозовой бури

Для понимания различных грозовых явлений нужно иметь понятие о процессах, вызывающих образование интенсивного электрического поля, связанного с грозой. К сожалению, мнения метеорологов по этому вопросу расходятся, и единой принятой всеми теории не существует. В 1909 г. я начал развивать по этому вопросу теорию, которую в 1927 г. окончательно разработал и дополнил, и которую я чувствую себя в праве предложить, по крайней мере, в виде попытки объяснить механизм бури.

Теория электрических процессов во время грозы должна прежде всего дать объяснение явлению первоначального разделения электричества на положительное и отрицательное (или, выражаясь иначе, „зарождению электричества“) и затем переходу обоих видов электричества в совершенно различные части облака. В предлагаемой мной теории за-

Через эту область капли воды не могут проходить, так как относительная скорость между воздухом и дождевой каплей, имеющей в диаметре 0,5 см, равна 8 м/сек, а капли больших размеров распадаются вследствие своей неустойчивости.

Прерывистыми линиями на рис. 10 изображены линии падения дождевых капель. Слева они вертикальны, а справа отклонены течением воздуха влево. Величина отклонения от вертикали зависит, очевидно, от размеров капель. Капли большого размера отклоняются незначительно, в то время как маленькие капельки — частицы облака — следуют фак-

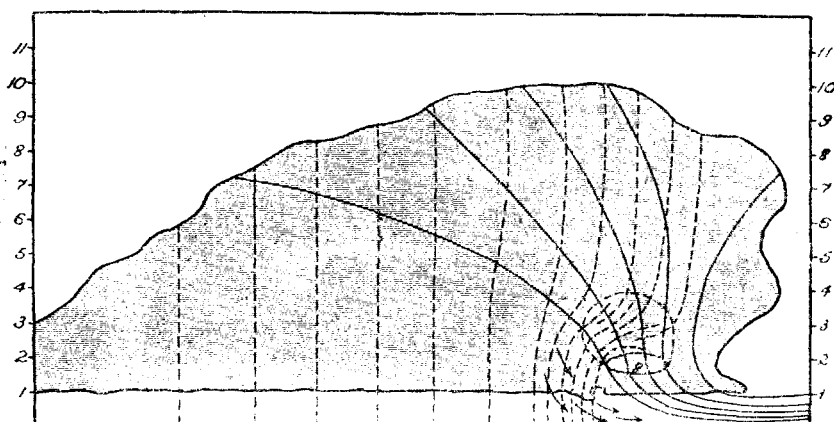


Рис. 10. Диаграмма грозы. Метеорологические условия. По оси ординат отложена высота в километрах.

тически по линиям течения воздуха. Из диаграммы явствует без дальнейших пояснений, что над областью максимальной вертикальной скорости должна накапливаться вода. Только, большие капли смогут проникнуть в нижнюю часть этой области, ближе того места, где вертикальная скорость равна 8 м/сек. Эти капли распадутся, и частицы их будут отнесены вверх. Маленькие капельки вновь соединятся и снова упадут вниз и т. д. Область, где этот процесс разрушения и восстановления капель протекает с особенной интенсивностью, указана на диаграмме кривой пунктирной линией.

Электрические условия, связанные с метеорологическими,

изображенными на диаграмме 10, показаны тоже графически на рис 11.

В той области, в которой вертикальная скорость воздуха превышает 8 м/сек, электричество аккумулироваться не может. Над этой областью, в области, обозначенной буквой *B*, совершается процесс распада и восстановления дождевых капель — здесь каждое разрушение дождевой капли сопровождается положительной электризацией воды, составляющей эту каплю. В воздухе получается соответственный отрицательный заряд, немедленно поглощаемый частицами облака, т. е. мельчайшими капельками, уносимыми сильным

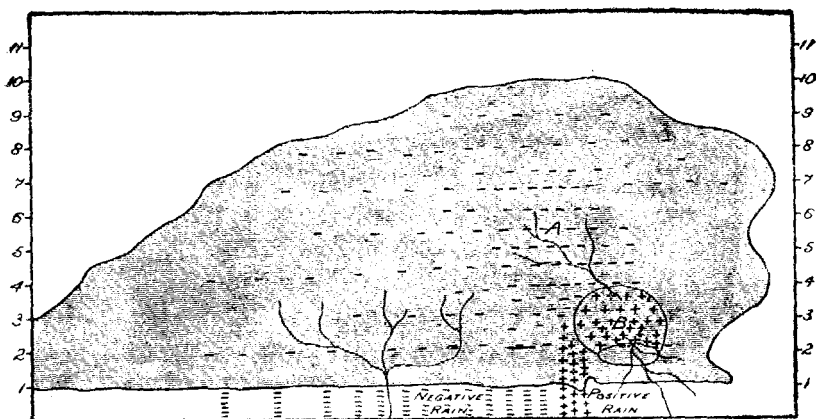


Рис. 11. Диаграмма грозы. Электрические условия.

течением воздуха. Однако вода, получившая сильный заряд, не может так легко выйти из области *B*, так как маленькие капельки, быстро соединяясь, вновь падают для того, чтобы получить новый дополнительный положительный заряд. Таким образом вода, аккумулировавшаяся в *B*, приобретает большой заряд положительного электричества, что показано знаком $+$ на рисунке. Отрицательный заряд воздуха переходит из *B* в главную часть облака, которая приобретает вследствие этого отрицательный заряд. Область *B* можно охарактеризовать как место разделения электричества на положительное и отрицательное.

Дождевые капли, падающие из этой области, будут оче-

видно иметь положительный заряд. Таким образом, наиболее сильный дождь в центральной части бури должен быть заряжен положительно. С другой стороны, вне области восходящего тока, дождевые капли должны иметь отрицательный заряд, т. е. они падают исключительно из отрицательно заряженной части облака. Наблюдения подтверждают это распределение положительного и отрицательного электричества в падающем дожде.

На рис. 11 показаны такие типы грозовых разрядов, которые могут иметь место в связи с описанным распределением электричества. Главным местом возникновения грозового разряда будет являться, очевидно, область разделения электричества, так как именно здесь концентрируется в неограниченном количестве положительный заряд накапливающейся воды. От этого положительного заряда разряд может идти в направлении отрицательно заряженной части облака; чаще же разряды будут происходить в направлении к земле, причем некоторые из них достигают земли, а некоторые будут заканчиваться в воздухе; к последнему типу относятся наиболее частые разряды при грозах в тропиках. Иногда могут также иметь место разряды, исходящие из земли и идущие в направлении главной отрицательно заряженной части облака. Эти разряды будут иметь разветвления, направленные вверх, в противоположность разрядам, исходящим из области разделения электричества, разветвления которых направлены вниз. Таковым по теории дробления капель представляется механизм грозовых бурь. Конечно, в природе все обстоит гораздо сложнее, чем в набросанной здесь упрощенной схеме. Поэтому не следует удивляться тому, что в эту схему укладываются не все наблюдения над молниями. Однако этой схемой можно несомненно объяснить все наиболее важные наблюдаемые факты, в частности, распределение положительно и отрицательно заряженных дождевых капель и частоту различного рода грозовых разрядов.