

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

551.596.5

ГРОМ *)

А. Фью

Гром — это акустический сигнал, производимый быстрорасширяющимся каналом нагретого воздуха. Информация, полученная от этого сигнала, позволяет сделать заключение о месте, форме и ориентации вспышки молнии.

В настоящее время совершенно очевидно, что появление грома связано с молнией. Менее понятно, как электрический разряд в атмосфере вызывает различной силы шумы, которые слышатся во время грозы. Во время вспышки молнии диссипируется громадное количество энергии, но как эта энергия (или ее часть) преобразуется в звуковые волны? Более того, разряд молнии происходит за мгновения, поэтому каким образом он способен генерировать продолжительное гремяние, гул, громовые раскаты и другие звуки, слышимые при ударе грома?

Полагая, что гром является темой для размышления с античных времен, можно было ожидать, что на эти вопросы уже давно получены ответы. На самом же деле даже наиболее общие принципы возникновения грома не были установлены до нашего столетия, а некоторые успехи в теории этого явления были достигнуты только в последние 10 или 15 лет. Ряд важных вопросов остается не решенным и по нынешний день.

Вместе с моими коллегами по Райсскому университету, а также в сотрудничестве с учеными в других местах я исследовал гром, записывая его «автограф»: образчики звуковых волн, полученных в специальных местах от единичной вспышки молнии. Изучение этих записей дает существенную информацию о природе грома. Оно позволяет также разработать теорию, связывающую параметры разряда молнии с характеристиками акустического сигнала. В настоящее время эта теория достигла значительных успехов, так что она дает возможность использовать гром как инструмент для исследования источников атмосферного электричества.

Связь грома и молнии была установлена в конце XIX века. Осталось определить, какие эффекты разряда молнии ответственны за появление звука. Всего было выдвинуто четыре принципиально различные теории, которые оживленно обсуждались в первой декаде XX века. (В 1903 г. журнал «Scientific American» опубликовал четыре статьи о природе и причинах возникновения грома.)

*) Arthur A. Few, Thunder, Scientific American 223 (1), 8 (July 1975). Перевод Э. Д. Лозанского.

А. Фью читал в Райсском университете курсы атмосферной динамики, загрязнений и акустических явлений в земной атмосфере.

© Scientific American, Inc., 1975.

© Перевод на русский язык,
Главная редакция физико-математической
литературы издательства «Наука»,
«Успехи физических наук», 1976 г.

Первая теория основывалась на том, что удар молнии образует область вакуума и гром возникает при исчезновении вакуума. Другая заключалась в том, что водяные капли на пути канала молнии превращаются в пар, после чего быстрое расширение пара сопровождается громким звуком. В третьей теории предполагалось, что электрический разряд посредством электролиза разлагает молекулы воды, после чего водород и кислород вновь соединяются со взрывом. Наконец, простейшее объяснение связывало гром с быстрым нагревом воздуха на пути разряда молнии. Так как воздух обладает электрическим сопротивлением, он нагревается при прохождении тока точно так же, как проволока; гром возникает при быстром расширении нагретого воздуха.

Мы теперь знаем, что верным объяснением является последнее. Каждая волна тока в разряде молнии нагревает воздух на своем пути, образуя канал газа с высокой температурой и давлением. Газы расширяются в окружающий воздух как ударная волна, которая после прохождения короткого расстояния распадается на акустические волны.

Интересно отметить, что и другие теории грома не были лишены оснований. Например, на пути молнии действительно образуется область пониженного давления воздуха. Этот частичный вакуум является скорее следствием грома, а не его причиной. Кроме того, водяные капли действительно испаряются в канале молнии и молекулы воды также разлагаются. Имеется превосходное доказательство этого разложения из оптического спектра молнии: одной из наиболее ярких линий спектра является излучательная линия водорода. Оба эти эффекта, однако, являются второстепенными; они не дают существенного вклада в удар грома.

Интерес к природе грома, достигший кульминации в начале XX века, вскоре после этого упал и изучение грома практически не велось в течение последующих пятидесяти лет. Все же в этот период делались отдельные эксперименты и наблюдения, но они могли скорее затруднить, чем облегчить понимание этого явления. Например, из измерений длительности грома можно оценить длину канала молнии; во многих случаях такие измерения давали длины, гораздо больше наблюдаемых, а в некоторых случаях длина канала молнии оказывалась больше высоты облака. Это противоречие только недавно было объяснено.

С 1960 г. научный интерес к грому возродился вновь и исследования природы и источника грома были возобновлены. Исследования ведутся с помощью технологии и оборудования, которые ранее были недоступны. Фундаментальные принципы явления грома сейчас ясны и цель исследований в настоящее время — это расчет детальной картины.

То, что слышится как удар грома, зависит в большой степени от характеристик конкретной вспышки молнии, производящей этот удар. Следует принимать во внимание как временную последовательность событий в разряде, так и их пространственное распределение. Эти два сложных фактора определяют не только частоту и амплитуду излучаемых акустических волн, но также и порядок, в котором волны принимаются в данном месте наблюдения.

Вспышка молнии в большинстве случаев начинается вблизи основания облака в месте скопления отрицательных зарядов. Этот слой находится обычно на высоте около пяти километров, где температура приблизительно -10°C . Это район облака, где водяные капли замерзают, — процесс, который может быть связан с образованием электрического заряда.

Отрицательно заряженная зона облака может находиться под потенциалом более чем 300 миллионов вольт по отношению к земле, но даже такого громадного потенциала недостаточно для зажигания дуги через

пятикилометровый слой воздуха (рис. 1). Главный разряд может начаться только после того как ему проложит путь предшествующий низкоточный разряд, называемый ступенчатым лидером. Ступенчатый лидер начинает формироваться, когда электроны, сорванные с капель в облаке, ускоряются сильным электрическим полем. Затем они сталкиваются с молекулами воздуха, освобождая много новых электронов и оставляя проводящий путь из частично ионизированного газа. Такой каскад ускоренных



Рис. 1. Четыре вспышки молнии были сфотографированы вблизи Таксона, штат Аризона.

Выступающие изгибы и узлы являются крупномасштабными или макроструктурными элементами канала молнии; участки между основными узлами имеют длину порядка 100 м. Макроструктурные элементы определяют общую картину ударов и раскатов грома. Эти четыре вспышки не были одновременными, но засняты на одной фотографии при времени экспозиции около двух минут. Фото было сделано Г. Гарреттом из Райского университета. Разветвленный канал слева был образован вспышкой молнии с несколькими возвратными ударами, что и вызвало его ветвление.

электронов обычно развивается только от 50 до 100 м, но с каждой ступенью вниз переносится порция заряда облака и каждая следующая ступень может начинаться с вершины продвинутого лидера.

Путь ступенчатого лидера извилист и во время его движения к земле он может сильно ветвиться. Каждая ступень образуется менее, чем за одну микросекунду, а между двумя ступенями имеется пауза около 50 микросекунд. Когда лидер приближается к земле, градиент потенциала, — вольт на метр, — возрастает и с предметов или неровностей земли испускаются искры, обычно с наивысших точек поверхности. Когда одна из этих искр встречается с распространяющимся вниз ступенчатым лидером, проводящий путь между облаком и землей замыкается. Так как разность потенциалов вдоль этого пути равна нескольким сотням миллионов вольт, то немедленно следует волна электрического тока; этот большой ток называется первым возвратным ударом.

Ступенчатому лидеру требуется примерно 20 мсек, чтобы создать проводящий канал между облаком и землей, в то время как возвратный удар завершается за несколько десятков микросекунд. В некоторых случаях вспышка молнии на этом заканчивается. Однако с большей вероятностью лидерно-ударные процессы повторяются в этом же канале с интервалом от десятков до сотен миллисекунд. Последующие лидеры, именуемые стреловидными лидерами, распространяются более плавно и быстро, чем ступенчатые, так как электрическое сопротивление на пути, по которому они следуют, ниже, чем сопротивление окружающего воздуха. Когда стреловидный лидер движется к земле, внутриоблачные процессы

удлиняют канал, заряжая при этом дополнительные районы облака. Однако последующие возвратные удары обычно менее сильны, чем первый. Типичная вспышка молнии имеет три-четыре лидера, каждый сопровождается возвратным ударом. Однажды была сфотографирована вспышка, сопровождавшаяся 26 ударами.

Каждая волна тока в разряде, включая ступени ступенчатого лидера, стреловидные лидеры и возвратные удары, нагревает газы в канале молнии, образуя впоследствии акустический сигнал. Амплитуда и продолжительность сигнала, производимого каждой волной тока, зависит от величины тока. Поэтому заверченный сигнал грома отражает сложную последовательность событий в разряде молнии. Обычно в записи сигналов

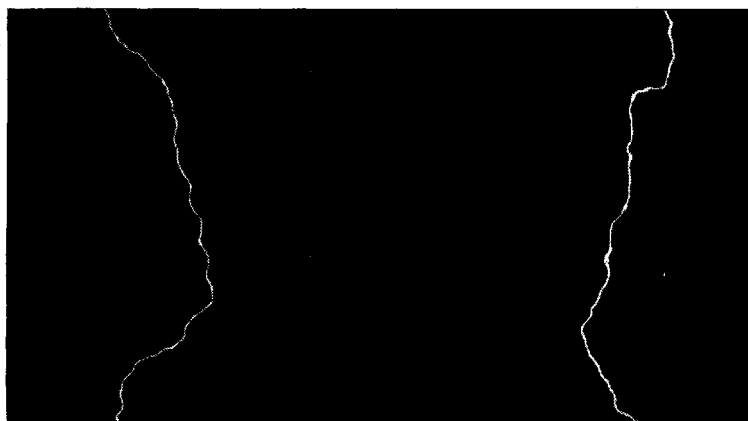


Рис. 2. Более мелкие участки канала молнии, различимые на фотографии, удалось получить с помощью телеобъектива.

На этом снимке видна разветвленная часть канала молнии. Многочисленные прямые участки имеют длину порядка 10 м; элементы канала таких размеров классифицируются как мезоструктурные и они могут рассматриваться как локальные источники грома. Микроструктурные элементы (т. е., которые имеют длину менее 5 м) редко разрешаются на фотографиях и оказывают незначительное влияние на сигнал грома.

грома не представляется возможным различать акустические пульсации, генерированные индивидуальным лидером или возвратным ударом, но последовательность ударов и переносимых ими токов определяют, тем не менее, какой звук при этом производится. В нескольких исключительных записях бесспорно доказана корреляция между пульсациями грома и ударами молнии.

Пространственное расположение канала молнии имеет, вероятно, большее влияние на результирующий сигнал грома, чем временная структура канала. По-видимому, канал молнии извилистый: он состоит из прямых участков, разделенных резкими изломами.

Структурные элементы канала по своим размерам классифицируются по трем основным группам (рис. 2). Крупномасштабные участки, называемые макроструктурными, представляют собой прямые участки длиной по крайней мере 100 м. Прямые участки от 5 до 100 м называют мезоструктурными, а короче 5 метров — микроструктурными. Мезо- и макроструктурные элементы, разумеется, не являются прямыми линиями, они состоят из многих более мелких участков и рассматриваются как прямые только в соответствующем масштабе. Более того, классификация на мезо- и микроструктурные элементы не определяется фиксированными правилами, а зависит от энергии разряда. Пять метров — это минимальная длина для мезоструктурных элементов в ударах, несущих большие токи. Если

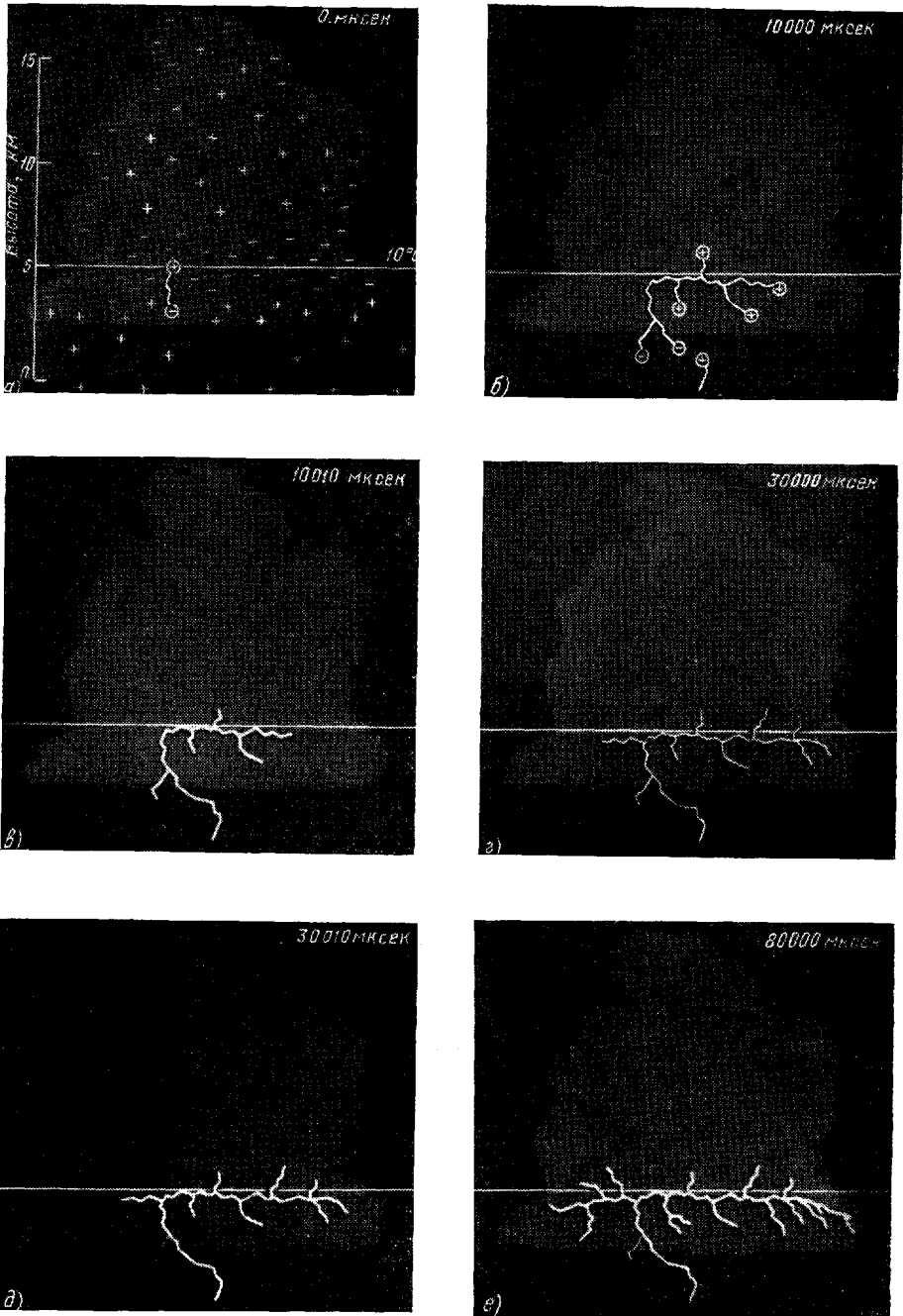


Рис. 3. Канал молнии развивается из района сконцентрированного отрицательного заряда вблизи основания облака, где происходит замерзание водяных капель.

Вспышка начинается с образования ступенчатого лидера (а), который движется вниз ступенями длиной от 50 до 100 м и одновременно продвигает стримеры горизонтально через заряженную область. Когда лидер приближается к земле, искры, распространяющиеся вверх, встречают его (б); после замыкания пути следует большая волна тока первого возвратного удара (в). Последующие лидеры, называемые стреловидными (г), движутся гораздо быстрее и продвигают канал к другим частям облака; каждый стреловидный лидер сопровождается возвратным ударом (д). Большая часть завершеного канала молнии горизонтальна и лишь небольшая его часть видна ниже облака (е). Каждый лидер и возвратный удар нагревает газы в канале молнии и дает вклад в акустический сигнал, воспринимаемый как гром.

токи сравнительно малы, как это имеет место в ступенчатых или стреловидных лидерах, то и более мелкие участки могут рассматриваться как мезоструктурные.

Мезоструктурные элементы являются первичными излучателями акустических пульсаций грома. Весь канал может рассматриваться как «нить жемчуга», где каждая жемчужина — мезоструктурный участок — излучает серию импульсов, определяемую последовательностью пульсаций в вспышке молнии (рис. 3). Макроструктурные элементы определяют пространственное распределение индивидуальных акустических излучателей, и, следовательно, оказывают существенное влияние на то, что слышит наблюдатель.

Удар грома начинается в канале горячего газа при высоком давлении. Спектроскопические наблюдения показывают, что температура в канале может достигать 30 000 °С, а давление может превышать атмосферное

в 10—100 раз. В начальный момент ядро высокого давления расширяется как ударная волна. Ударная волна отличается от акустической тем, что она сжимает и нагревает среду, в которой она распространяется, и посредством этого увеличивает скорость звука. Так как скорость звука увеличивается с ростом температуры, ударная волна движется быстрее звука в данной среде. Степень сжатия и нагревания и связанное с этим увеличение скорости зависит от амплитуды волны. Позади ударной волны воздух продолжает двигаться наружу и образует область низкого давления.

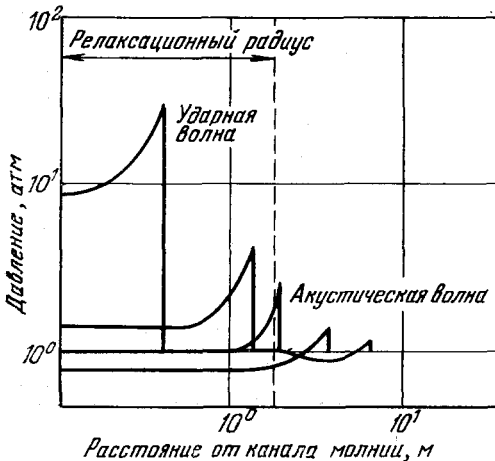


Рис. 4. Расширяющийся канал нагретого газа, производимого разрядом молнии, распространяется как ударная волна, а затем как акустические пульсации грома.

Так как ударная волна сжимает и нагревает воздух, то она быстро диссипирует свою энергию. На расстоянии нескольких метров от канала молнии ударная волна «релаксирует», производя акустические волны небольшой амплитуды, а давление за фронтом волны на короткое время уменьшается. Только около 1% энергии ударной волны передается акустическим волнам, остальная энергия расходуется на нагревание воздуха вблизи канала.

Расширение ударной волны связано с диссипацией ее энергии, за счет чего совершается работа над окружающим воздухом. Когда вся энергия, полученная ударной волной при разряде молнии, будет израсходована, волна «релаксирует» и давление вблизи канала возвращается к нормальному (само ядро канала остается, однако, районом высокой температуры и низкой плотности). Зная окружающее давление и энергию на единицу длины канала молнии, можно рассчитать радиус релаксации ударной волны. Этот релаксационный радиус в свою очередь связан с длиной волны акустического сигнала грома. Таким образом, длина волны или высота тона сигнала определяется энергией разряда молнии и давлением окружающего воздуха в районе разряда. Чем больше мощность разряда или ниже давление воздуха, тем ниже высота тона производимого акустического сигнала. Типичное значение равно примерно 60 гц (рис. 4).

Релаксационный радиус является характерным размером, отличающим микроструктурные элементы от мезоструктурных. Участки канала,

имеющие размер меньше радиуса релаксации, замазываются при расширении ударных волн. Они имеют незначительное влияние на форму результирующих акустических волн и поэтому не могут быть разрешены из данных, полученных от записи сигнала грома. Поэтому к мезоструктурным элементам относят те, которые слишком малы, чтобы быть обнаруженными из данных записи.

Ударные волны не являются эффективным источником акустического излучения: менее одного процента от их энергии передается акустическим

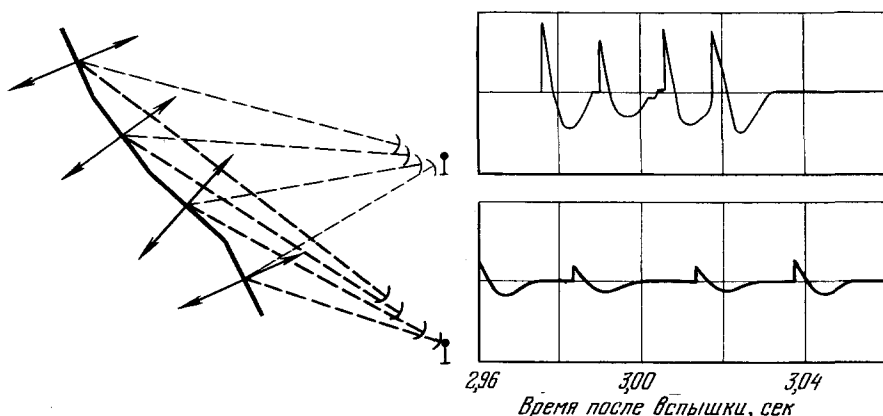


Рис. 5. Мезоструктурные элементы канала молнии являются первичными излучателями грома.

Каждый из четырех показанных участков может рассматриваться как независимый точечный источник звука. Акустические импульсы испускаются из каждого участка почти одновременно, но звук, принятый на земле, зависит от того, как канал ориентирован по отношению к наблюдателю. Звук, излучаемый перпендикулярно к участку (тонкие штриховые линии), более мощный, чем — параллельно и почти параллельно к нему (сплошные). Так как ориентации соседних участков отличаются на небольшой угол, то сигнал от ряда участков достигнет наблюдателя, чье положение перпендикулярно к каналу, почти одновременно; в результате будет слышен краткий, но мощный удар грома. Наблюдатель, положение которого таково, что он смотрит вдоль канала, с другой стороны, будет воспринимать акустические волны в течение более длительного интервала времени, и он услышит продолжительные раскаты.

волнам. Остальные 99% расходятся на нагревание воздуха вблизи канала молнии. Полная энергия ударной волны очень велика и даже небольшая ее часть, преобразованная в звук, генерирует акустические волны большой амплитуды. В результате получается один из самых громких звуков в природе.

Звуковая энергия, испускаемая мезоструктурными участками канала, не распределяется по всем направлениям равномерно. Изучение длинных искр, проводимое в лаборатории, показало, что более чем 80 процентов акустической энергии заключено в зоне 30 градусов выше и ниже плоскости, делящей искру перпендикулярно пополам. Микрофон, установленный вблизи концов искры, получает гораздо меньше энергии, чем установленный сбоку. Это свойство направленности звука, излучаемого при искровом разряде, является одним из наиболее важных, благодаря которому он может быть услышан на земле.

Изучение фотографий молнии показало, что среднее изменение направления или ориентации между двумя соседними мезоструктурными участками составляет около 16° . Так как этот угол значительно меньше, чем зона в 60° , в которую каждый участок излучает большинство своей энергии, некоторое количество мезоструктурных участков, расположенных вдоль определенного макроструктурного, будут излучать большинство своей энергии, грубо говоря, в одном и том же направлении (рис. 5). Именно это свойство грома ответственно за резкие удары и продолжительные раскаты.

Акустические пульсации от всех частей канала молнии будут, разумеется, излучаться почти одновременно. Полный акустический выход молниевой вспышки происходит менее чем за секунду, за время, необходимое для прохождения лидеров и возвратных ударов. Гром существует значительно дольше благодаря тому, что канал молнии имеет очень большую длину (по крайней мере 5 км, а часто и значительно больше) и сигналы от его ближайшего участка достигают наблюдателя быстрее, чем от удаленных. Ориентация канала и в особенности ориентация мезоструктурных участков определяет характер слышимого звука.

Если макроструктурный участок ориентирован концом к наблюдателю, пришедший к нему звук будет сравнительно низкой амплитуды,

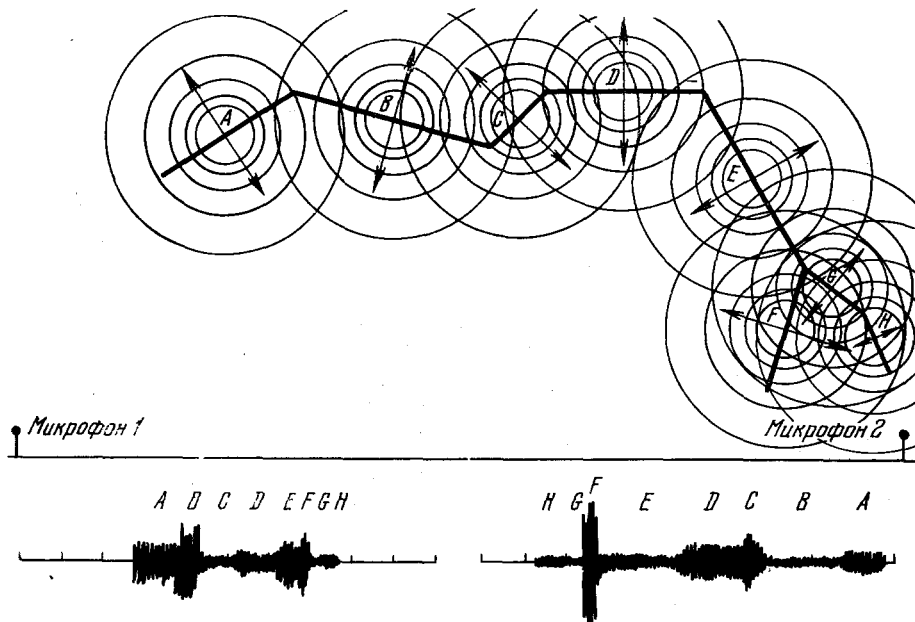


Рис. 6. Макроструктурные элементы канала молнии определяют общую картину ударов и раскатов грома в записи его сигнала.

Амплитуда и продолжительность сигнала, производимого каждым участком, определяется ориентацией участка и его расстоянием от наблюдателя. Микрофоны, размещенные в различных местах, запишут различные сигналы от одного и того же канала молнии. Для этой гипотетической вспышки молнии показаны две записи, полученные с помощью микрофонов, размещенных в двух разных местах.

так как большинство акустической энергии излучается перпендикулярно к участку. Кроме того, волновые фронты от каждого мезоструктурного элемента будут достигать наблюдателя в последовательности, начинающейся с сигнала, испущенного ближайшим из них. В результате будут слышны раскаты грома или протяжный гул.

Если же макроструктурный участок расположен сбоку от наблюдателя, то наблюдатель воспримет гораздо большую часть излученной энергии. Важно также то, что волновые фронты практически от всех мезоструктурных элементов придут почти одновременно. В результате будет услышан короткий, но мощный удар грома (рис. 6).

Гром, производимый единичной вспышкой молнии, обычно воспринимается как комбинация ударов и раскатов, так как различные макроструктурные элементы канала молнии по-разному ориентированы по отношению к наблюдателю. Гром от одной и той же вспышки молнии будет

по-разному восприниматься в различных местах, так как каждое место имеет свою позицию и ориентацию по отношению к каналу молнии.

Во время движения от канала к наблюдателю сигнал грома изменяется средой, в которой он распространяется. Атмосфера ослабляет, рассеивает и преломляет сигналы. Кроме того, они подвержены нелинейным эффектам распространения, а достигая земли — отражаются от нее.

Под «нелинейными эффектами» подразумеваются те, которые воздействуют на одну часть волны в большей степени, чем на другую или на некоторые частоты звука больше, чем на другие. Нелинейное распространение поэтому изменяет форму волны сигнала (форму отдельных волн) или его спектра. Один из таких эффектов ведет к удлинению каждого импульса при его распространении; звуковые волны большой амплитуды подвергаются наиболее сильному воздействию, так что нелинейность проявляется сильнее вблизи канала молнии.

Затухание грома в атмосфере обусловлено двумя независимыми процессами. «Классическое» затухание возникает из-за вязкости воздуха, т. е. из-за того, что воздух не является идеально упругой средой. Классическое затухание хорошо объясняется и его величина может быть предсказана. «Молекулярное» затухание возникает из-за сложного взаимодействия звуковых волн с молекулами воды и с молекулами кислорода, которое возбуждает внутренние колебания в молекулах. Такое затухание можно оценить лишь при условии, что известна температура и влажность в каждой точке вдоль пути звукового сигнала. Молекулярное затухание является обычно более существенным, чем классическое. Затухание возрастает как квадрат частоты сигнала; так, волна с частотой 20 *гц* должна пройти расстояние в четыре раза больше, чем волна с частотой 40 *гц*, прежде чем ее затухание достигнет такой же степени.

Рассеяние звукового сигнала предсказать значительно труднее, чем затухание. Принципиальными центрами рассеяния являются турбулентные клубы в атмосфере, которые имеют размеры от микроскопических, с диаметром несколько микрон, до размеров самих грозовых облочков. Для рассеивания грома наибольшее значение имеют те, размер которых порядка длины волны сигнала грома (менее 50 *м*). Здесь потери также возрастают с увеличением частоты. Когда громовой сигнал проходит расстояние в несколько километров через турбулентную среду, то из-за рассеяния и затухания только низкочастотная компонента исходного спектра сохраняется без существенного изменения. Гром, созданный при вспышке молнии с небольшим энергетическим выходом, достаточным лишь для формирования слабого низкочастотного звука, будет слышен только на небольших расстояниях.

Преломление звука — это крупномасштабное явление, вызываемое изменением скорости звука в атмосфере; преломленный «луч» звука отклоняется от прямолинейного пути между источником и наблюдателем. Законы преломления хорошо известны и из них можно получить достаточную информацию и рассчитать траекторию, по которой будет идти акустический луч в атмосферных условиях. Наиболее важные переменные — это температура, а также направление и скорость ветра. В нижних слоях атмосферы температура обычно уменьшается с высотой примерно на 6,5 °C на километр. Под грозовым облаком градиент температуры идет более круто, достигая в максимуме 9,8 °C на километр. Так как звук распространяется в теплом воздухе быстрее, чем в холодном, то градиент температуры смещает вверх кривую акустического луча (рис. 7). По этой причине гром, производимый нижними частями канала молнии, не может

быть услышан на расстоянии и, кроме того, имеется расстояние, далее которого гром вообще не слышен, так как он проходит над головой наблюдателя.

Ветер оказывает два воздействия на распространение звуковых волн. Во-первых, действительная скорость волнового фронта является суммой скоростей звука в воздухе и скорости ветра. Поэтому по ветру звук распространяется быстрее, чем против ветра и в точном анализе сигналов грома это различие должно учитываться. Во-вторых, ветряной срез,

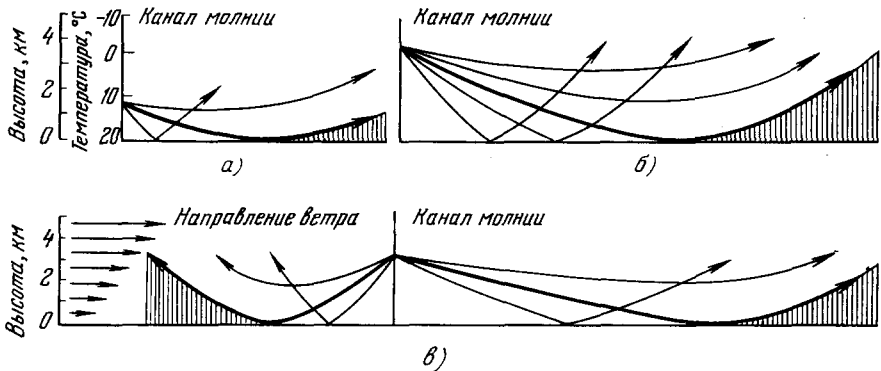


Рис. 7. Отражение и преломление изменяют сигнал грома и ограничивают район его слышимости.

Градиент температуры в атмосфере загибает звуковые волны вверх, так что гром, излученный из нижних частей канала молнии, может быть слышен лишь поблизости (верхняя часть рис. а); имеется максимальное расстояние, далее которого гром не может быть услышан (рис. б). Распределение звука, производимое температурным градиентом, изменяется ветром, скорость которого обычно возрастает с высотой. В верхней части канала ветер увеличивает преломление, а в нижней — уменьшает (рис. в). Звуковые волны низкой частоты, падающие на землю, эффективно отражаются.

т. е. изменение скорости ветра с высотой, ведет к дальнейшему искривлению пути акустического луча. Скорость ветра обычно возрастает с высотой, поэтому в направлении против ветра эффект среза суммируется с эффектом температурного преломления, а в направлении по ветру — вычитается из него.

В комбинации с затуханием и рассеянием температурный градиент и ветряной срез накладывают определенный предел на расстояние, на котором можно услышать гром. Максимальное расстояние обычно около 10 км, но иногда оно значительно больше, в зависимости от высоты канала молнии и скорости ветра.

Отражение дает окончательную модификацию сигнала грома перед тем, как он достигает наблюдателя. Для низкочастотного звука амплитуда отраженной волны в первом приближении пропорциональна угловому размеру отражающей поверхности, как она видится наблюдателю. В большинстве случаев имеется только одна достаточно большая отражающая поверхность, чтобы сформировать амплитуды, сравнимые с амплитудами падающих сигналов, — земля. Если смотреть вниз, то плоскость земли полностью заполняет поле зрения, поэтому амплитуда отраженной волны будет равна амплитуде волны, принимаемой наблюдателем непосредственно (до отражения), если звук не поглощается поверхностью, что, по-видимому, для низких частот справедливо. Слышимый звук есть, следовательно, сумма прямой и отраженной волн.

В зависимости от высоты над землей и угла падения падающего сигнала, прямые и отраженные волны будут усиливаться для некоторых длин волн и ослабляться для других. При записи сигналов грома мы избе-

гаем затухания, размещая наши микрофоны на высоте, дающей возможность записать наиболее короткие длины волн из подлежащих измерению.

Принимаемый сигнал грома зависит также от точки наблюдения. Микрофон, установленный на несколько метров выше идентичного микрофона на уровне земли, примет частично измененный сигнал. Если оба

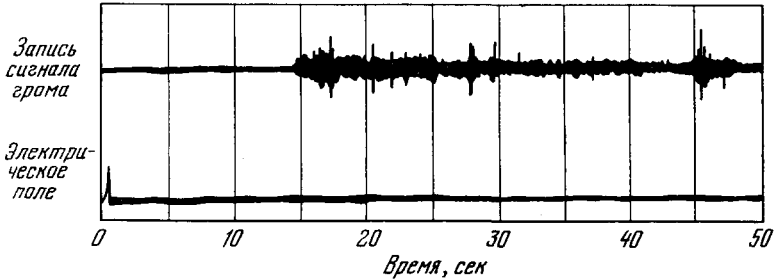


Рис. 8. Запись сигнала грома, полученная от одного микрофона из целого ряда микрофонов, содержит детальную информацию о канале молнии, который производит гром. Время вспышки молнии регистрируется кратковременным изменением электрического поля в начале записи. Зная время прибытия каждого участка записи грома, можно рассчитать расстояние до соответствующего участка канала; из информации, полученной от дополнительных микрофонов, можно определить также направление и местонахождение канала. Должны быть сделаны соответствующие поправки на ветер и температурные изменения в атмосфере.

микрофона находятся на уровне земли, но разделены на 20—30 м по горизонтали, записываемые сигналы будут сходны, но все же будет зафиксировано незначительное различие из-за того, что эти два положения дают существенно различную перспективу для мезоструктурных участков канала молнии. Если микрофоны находятся на расстоянии 100 м друг от друга, то лишь некоторые детали записываемых сигналов будут совпадать, но все же основные параметры ударов и раскатов будут сохранены; расстояние между микрофонами теперь становится сравнимым с размерами макроструктурных элементов. Микрофоны, разделенные на расстояние несколько километров, запишут сигналы грома, которые могут иметь только один или два общих параметра.

Запись сигнала грома содержит большое количество информации о канале молнии, который его производит, и об атмосфере между каналом и местом наблюдения. Запись сигнала представляет собой сложный комплекс волн, но его можно проанализировать и извлечь много полезной информации. С помощью этой информации можно восстановить параметры канала молнии и, что особенно ценно, это можно сделать также в месте входа канала в облако, где фотография или другие оптические методы неприменимы (рис. 8, 9).

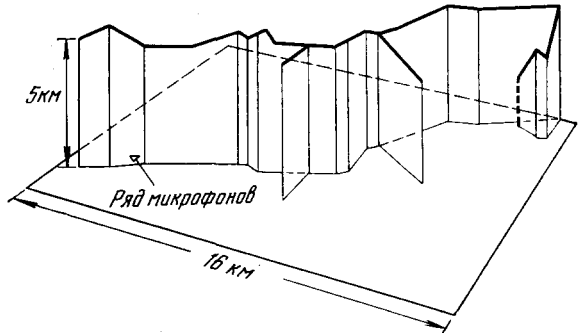


Рис. 9. Восстановленная конструкция канала молнии из записи сигнала на рис. 8.

Большая часть канала горизонтальна и скрыта от визуального наблюдения облаком. Восстановлены макроструктурные элементы основного канала и главные боковые ветви. Более мелкие участки не могут быть разрешены и восстановлены, так как производимый ими гром очень слаб. Гром от низших частей канала (штриховая линия) не может быть зарегистрирован из-за преломления.

Сигнал грома записывается целым рядом микрофонов. Для целей анализа сигнал разбивается на короткие участки, каждый длиной от четверти до половины секунды. Микрофоны измеряют направление прибытия каждого участка и суммарное время вспышки молнии. Известно также и время прибытия каждого участка записи. С помощью компьютера и математической модели атмосферы затем становится возможным определить исходные данные каждого участка, т. е. определить его положение в момент вспышки молнии. Таким путем может быть восстановлена вся трех-

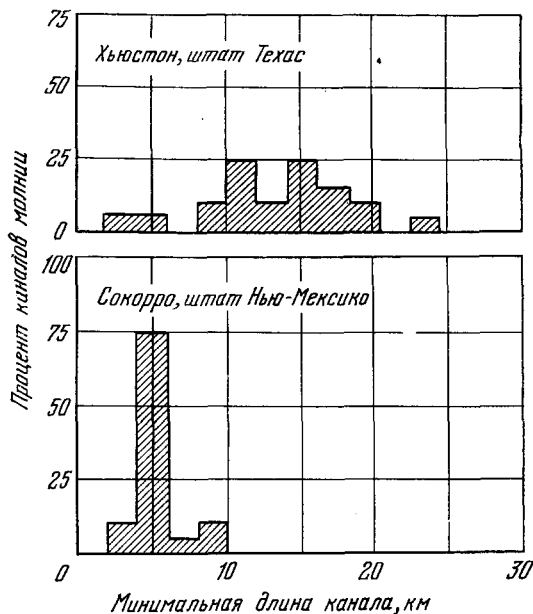


Рис. 10. Длина канала молнии изменяется от грозы к грозе.

Грозы вблизи Хьюстона, штат Техас, объединенные с фронтальными системами, формируют каналы с широким распределением по длинам, включая каналы с очень большими длинами. В локальной грозе в Сокорро, штат Нью-Мексико, однако, не было больших каналов и измеренные длины имели минимально возможные значения из всех, определяемых из продолжительности сигнала грома.

обычно горизонтальна и такова же межоблачная часть канала молнии облако — земля. Горизонтальные каналы молнии имеют тенденцию к выравниванию, так что большинство из них, в первом приближении, параллельны.

Наши результаты показали также, что центр отрицательного заряда в нижней части облака имеет обычно форму диска с толщиной около двух километров и диаметром около 10 км. Положительный заряд, наоборот, чаще всего размыт по верхней части облака. Район отрицательного заряда локализуется вблизи изотермы — 10° С. Это означает, что создание заряда связано с замерзанием капель или с сосуществованием льда и капель в одной и той же части облака. Создание заряда, по-видимому, идет более эффективно в районах с восходящими и нисходящими потоками, содержащими маленькие капли, чем в местах, где концентрируются дождевые капли. Молния в ранней стадии грозы зарождается в нижней, отрицательно заряженной зоне; верхняя зона становится активной позже. Вспышки молнии вытягивают заряд из различных частей облака, но каналы часто пересекаются в одном месте. Это возможно, если одна искра

мерная структура канала. Техника регистрации настолько чувствительна, что позволяет локализовать основной канал и его большие ветви. К сожалению, более мелкие ветви нельзя восстановить, так как производимый ими сигнал грома имеет малую амплитуду.

Изучая акустическую запись всей грозы, мы имеем возможность восстановить историю крупномасштабного электрического разряда в течение грозового периода. Из этих же данных мы можем выделить информацию о процессах, посредством которых облако накапливает электрический заряд, объем, в котором собирается этот заряд, и время восстановления этого заряда после удара молнии. Таким образом, изучение грома дает возможность экспериментального изучения явлений атмосферного электричества и ведет к удивительным сведениям о разряде молнии в облаках.

Нами было установлено, что межоблачная молния (молния, не разряжающаяся на землю)

зарождается там, где прошла другая. Более того, молния в одной части облака вызывает разряд в другой. Важные процессы физики облаков, такие как рост облачных частиц, сильно зависят от электрических полей и коррелируют со вспышками молнии.

Наконец, средняя длина канала молнии, по-видимому, изменяется от типа грозы (рис. 10). Малые локальные грозы дают относительно короткие разряды молнии (обычно около 5 км длиной) и все каналы молнии

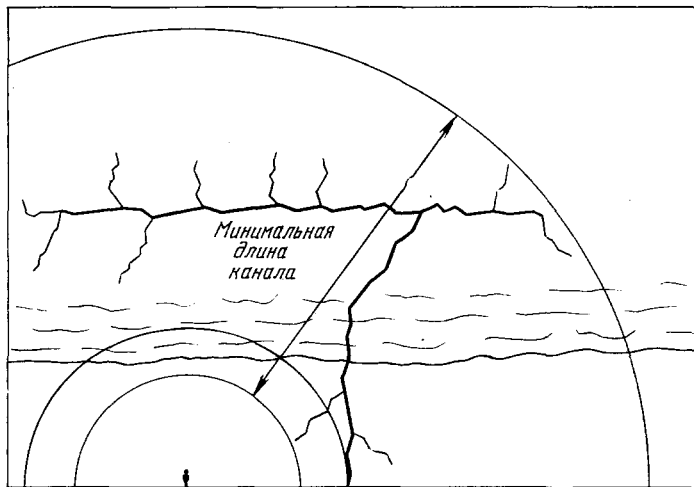


Рис. 11. Любительское наблюдение грома требует лишь наручных часов.

Измеряя время, прошедшее от вспышки молнии до первого слышимого сигнала грома, наиболее сильного удара и до последних раскатов, можно определить соответственно расстояние до ближайшей ветви канала молнии, основного канала и наиболее удаленных его частей. Приблизительное расстояние в километрах равно времени в секундах, деленному на 3. Этим же методом можно определить минимальную длину канала, если измерить полную продолжительность сигнала грома.

концентрируются в сравнительно небольшой области. В грозах, связанных с большими фронтальными системами, с другой стороны, каналы молнии имеют широкое распределение по длинам, достигающим 15 км. В сильных грозах большинство каналов расположено горизонтально.

Полная реконструкция канала молнии требует использования микрофонов, чувствительных к звуку низкой частоты, оборудования, способного записывать звук, и компьютера. Однако непрофессиональный наблюдатель может также получить некоторую информацию с помощью обычных часов. Приблизительное расстояние до источника сигнала грома можно получить, умножая время, прошедшее между вспышкой молнии и прибытием акустического сигнала на скорость звука. (Приблизительное расстояние в километрах равно времени в секундах, деленному на 3, а в милях — деленному на 5.) Таким же образом можно оценить минимальную длину канала из общей продолжительности грома, снова умножая это время на скорость звука (рис. 11).

При внимательном наблюдении можно различать отдельные события, которые происходят в разряде молнии — земля: образование ветвей, боковых каналов, формируемых ступенчатым лидером, расширение канала после первого возвратного удара и мерцания при последующих возвратных ударах. Иногда канал молнии разветвляется, когда стреловидный лидер отклоняется от пути основного канала.

Во время ночной грозы можно также попытаться сфотографировать молнию. Для этого следует расположить фотоаппарат на штативе и направить объектив в наиболее активное место грозы. Затем необходимо установить наименьшую возможную диафрагму, сфокусировать объектив на бесконечность и поставить время экспозиции от 20 до 30 сек. В среднем один из трех или четырех снимков будет содержать фотографию молнии, хотя это число зависит от активности грозы.

Большую информацию о канале молнии можно получить, внимательно изучая запись грома. Измеряя время между вспышкой и первым слышимым сигналом грома, самым громким ударом и конечными раскатами, можно из этих данных оценить соответственно расстояние до ближайшей ветви, до основного канала и до наиболее дальней ветви. Измеряя полную продолжительность сигнала грома, можно рассчитать также минимальную длину канала.

Разряд, ударяющий в землю поблизости, вызывает громкий треск, которому иногда предшествует краткий удар или шум разрыва, зарождающиеся в небольших ветвях, простирающихся от основного канала к наблюдателю. Когда в такой близкой искре происходит несколько ударов, иногда становится возможным различать акустические пульсации, производимые каждым ударом. Звук в этом случае чем-то напоминает короткие пулеметные очереди.

Когда мощности грома достаточно для сотрясения окон, а вместо удара или треска слышится гул, это означает, что мощный разряд произошел на большом расстоянии или на большой высоте. На расстоянии нескольких километров высокие частоты ослабевают по отношению к низким и результирующий сигнал грома ощущается в такой же степени, как слышится. В некоторых случаях высота сигнала становится значительно ниже, если звук прибывает от высоких или наиболее удаленных частей канала.

Наконец, в редких случаях сигнал грома слышится как шум разрыва, что можно представить себе как разрыв какой-то космической оболочки. Это обычно случается при движении ступенчатого лидера к земле. Когда лидер завершает путь к земле, звук, который он производит, перекрывается звуком от последующего возвратного удара.

Следует соблюдать осторожность во время наблюдения грозы. Не стоит рисковать и исследовать разряд молнии, стоя на открытом пространстве или возле деревьев, линий электропередач, заборов и других объектов, в которые может ударить молния. Безопасным наблюдательным постом может служить закрытое пространство, например здание или автомобиль, при условии, что вы не будете касаться наружных стенок и проводящих поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

A. A. F e w, J. Geophys. Res. 75, 7517 (1970); E. S. Trans. Am. Geophys. Union 55, 508 (1974).

Th. L. T e e r, A. A. F e w, J. Geophys. Res. 79, 3436 (1974).