

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ И ГРОЗЫ
В НЕДРАХ ЗЕМЛИ**

А. А. ВОРОБЬЕВ

В земной атмосфере при некоторых условиях возможно накопление электрических зарядов в грозовой туче. Когда напряженность электрического поля в грозовой туче достигнет значения, равного электрической прочности среды, то происходит разряд в виде молнии. Накопившийся в туче заряд стекает по каналу молнии.

В недрах Земли, в литосфере возможно аналогичное явление. Накопление объемного заряда в диэлектрических породах, при котором величина напряженности поля достигнет значения электрической прочности диэлектрика. Произойдет пробой и накопившийся объемный заряд протечет по каналу разряда [1].

Так как электрическая прочность твердых диэлектриков в недрах Земли может быть на три или четыре порядка выше, чем электрическая прочность воздуха, то соответственно и электрический заряд, накопленный в недрах Земли, может быть на несколько порядков выше, чем заряд в атмосфере, а длина заряда на несколько порядков меньше длины молнии. Если накопление заряда произойдет вблизи от поверхности Земли, то разряд произойдет в атмосферу, электрическая прочность которой ниже прочности горных пород. Максимальная величина заряда, зарегистрированного в туче, достигала величины до 500 кулонов, наименьшая величина — 0,5 кулона. Среднее количество энергии, выделяющейся в молнии, оценивалось около 4 квтч, а максимальное почти на два порядка выше [2]. В недрах Земли эти значения соответственно будут на 3—4 порядка выше, в частности, в разряде можно будет ожидать выделения энергии до $1,44 \cdot 10^{16}$ эргов, что соответствует энергии, регистрируемой при слабом землетрясении. Так как время разряда может составлять только 10^{17} сек и более, то мгновенная мощность, которая может быть достигнута в таком разряде, составит 10^{20} ватт. Это очень большая скорость выделения энергии, которая может быть отведенной из канала пробоя. Сердняя мощность при землетрясениях составляет 10^{10} ватт. Такая мощность, фиксируемая при землетрясениях, определяется возможностями распространения энергии из очага путем сейсмических волн.

Некоторая часть энергии из канала разряда будет выноситься потоками тепла излучения, сейсмическими волнами и проч. В условиях разряда, внутри плотной непрозрачной породы большая часть энергии поглотится вблизи оси канала разряда и пойдет на нагревание разрядной плазмы. Следовательно, физические процессы в области канала разряда будут адиабатическими.

Для разработки гипотезы образования грозы в Земле представляет интерес исследование всех стадий ее подготовки и протекания, а именно, определение источников электрических зарядов в веществе недр Земли, процесс накопления объемного заряда, условия начала разряда, стадии протекания разряда в горных породах и в атмосфере, возможные физические или геологические процессы под действием электрических разрядов в Земле, например возникновение термоядерных реакций в плазме разрядного канала.

Электрические условия возникновения подземной грозы состоят в накоплении большого электрического заряда в диэлектрической горной породе. Когда напряженность поля достигнет величины электрической прочности диэлектрика, тогда произойдет электрический разряд. С увеличением давления, улучшения сплошности тела и повышением сил связи в диэлектрике, его механическая прочность быстро растет. Механическая прочность диэлектриков при гидростатическом сжатии возрастает на несколько порядков и приближается к теоретической при нормальном давлении. При одностороннем давлении электрическая прочность диэлектриков, по данным Е. К. Заводовской, А. Гемпроем и др., растет по кривой с максимумом. При высоком давлении происходит растрескивание диэлектрика и понижение прочности [3, 4]. При гидростатическом давлении не возникает растрескивания диэлектрика, наблюдаемого при одностороннем давлении. Таким образом, вплоть до высоких давлений, при которых диэлектрик переходит в полупроводник, а затем в металл, должно происходить его упрочнение. Диэлектрик получает свойства металлического проводника при давлениях, соответствующих глубинам больше тысячи километров. Заметим, что наиболее глубокие очаги землетрясений зафиксированы на глубине около 700 км. С глубиной повышается температура и должна расти ионная электропроводность пород.

Учитывая одновременное действие давления и температуры, можно допустить, что до глубины несколько сот километров возможно сохранение диэлектрических и полупроводниковых свойств вещества недр Земли. До глубины 100 км электрическая прочность вещества недр будет расти и может на несколько порядков превысить максимальное значение электрической прочности диэлектриков в нормальных условиях, которая достигает в тонких слоях на импульсах наносекундной длительности 10^9 в/см [5], т. е. порядка теоретической прочности. В исследовании грозовых давлений в глубинах Земли существенно изучать интегральные процессы и их закономерности, обуславливающие изменения электрических полей и их напряженности. Необходимо также изучать элементарные процессы появления электрических зарядов, их распределение и миграцию в физических условиях залегания вещества недр Земли, которые должны оказывать существенное влияние на развитие электрических явлений в породах.

Свободные электрические заряды в минералах и породах могут возникнуть под влиянием постоянно действующих факторов, как-то: петростатическое давление, радиоактивные излучения, градиенты температур, давлений или концентраций, изменение химического состава и проч., а также временного воздействия. К их числу относятся прохождение фронта ударной волны, возмущение магнитного поля, пропускание индукционных токов в Земле, вызванных явлениями в ионосфере, возникновение электрических зарядов при раскалывании минералов и трении, так как смещение горных масс сопровождается трением и возникновением электрических зарядов на поверхностях. Возникновение разности потенциалов до 335 кв [6] наблюдалось при фильтрации изолирующих разности или коллоидных растворов. В цепи, вклю-

чающей тела разной проводимости γ и диэлектрической проницаемости, падения напряжения и напряженности поля распределяются неравномерно. Вследствие этого возможны перенапряжения, значения которых рассчитываются теоретически [6].

Электрическое поле может возникнуть в недрах Земли от диффузионных токов, если поверхности равных плоскостей и равных давлений не совпадают [7].

Изменения в микроструктуре твердого диэлектрика и его энергетического спектра при сжатии образца приводят к возникновению э. д. с. и токов в короткозамкнутом образце.

Независимое возникновение в ионных кристаллах вакансий положительных и отрицательных ионов, имеющих различные энергии образования, приводит к возникновению объемного заряда. Возникновение э. д. с. наблюдается при механическом нагружении кристалла, их обучении или неравномерного нагружения до высокой температуры [8, 9].

При прохождении фронта ударной волны, образуются высокие электрические поля. Возникали электрические разряды, и наблюдалось разрушение минералов стекла вследствие внутренних разрядов. Скорость распространения ударных волн растет с увеличением прочности тела, поэтому крутизна фронта, а следовательно, и большие поля будут возникать в механически более прочных телах на некоторых глубинах, где достигается такая прочность. В них же будет накапливаться и большой запас упругой энергии, поэтому и разрушение тела и последствия разряда будет больше.

Прохождение сейсмической волны с крутым фронтом при землетрясении большой мощности может быть причиной образования электрических полей разрядов в диэлектриках горных пород. Рассмотрены различные возможные способы появления и накопления свободных зарядов в твердых диэлектриках, частично перечисленные выше.

Растекание зарядов из заряженного объема в недрах происходит по законам разрядки емкости через сопротивление. Чем выше сопротивление диэлектрика в канале пробоя, тем менее быстро будет происходить его разряжение. В диэлектрике с более высоким сопротивлением накопится и сохраняется более высокий заряд. Если не учитывать вторичных явлений, то величина напряжения U , до которого можно зарядить изолированный проводник, бомбардируя его заряженными частицами с массой m , зарядом e и скоростью v до напряжения, которое определяется условием, что кинетическая энергия частицы равняется работе, затрагиваемой на преодаление сил отталкивания, возникающих при приближении частицы, т. е.

$$\frac{mv^2}{2} = eU. \quad (1)$$

Увеличение заряда тела может быть также достигнуто при вылете заряженных частиц из его поверхности. В этом случае сохраняется условие (1), но может быть накоплен очень большой заряд даже при вылете из объема частиц с малой энергией. Если подводить заряды к внутренней поверхности слоя, то для ее зарядки могут быть использованы частицы любых малых скоростей.

Известны сотни радиоактивных изотопов с периодом полураспада, изменяющимся в широких пределах.

Для рассматриваемых целей заряженных веществ в недрах Земли представляют интерес естественные источники, хотя можно и представить схему зарядки с промежуточным источником, который испускает α -, β -частицы и позитроны и γ -лучи. Промежуточный радиоактивный источник может образоваться при облучении. Большинство актив-

ных ядер испускают электроны с непрерывным спектром и позитроны. Кинетическая энергия α - и β -частиц, испускаемых при естественном радиоактивном распаде, незначительно превышает 10 Мэв. Например, при распаде ThC^1 длиннопробежные α -частицы имеют максимальную кинетическую энергию 10,5 Мэв. Среди естественных излучателей наибольшей кинетической энергией 3,2 Мэв обладают электроны, наблюдаемые при распаде RaC . Верхняя граница β спектра при радиоактивном распаде искусственного изотопа достигает почти 12 Мэв.

Электрические объемные заряды могут накапливаться вблизи границы раздела радиоактивной и нерадиоактивной пород с высоким удельным сопротивлением. Удельное сопротивление пород в недрах может доходить до 10^{+18} ом·см. Считая радиоактивную породу эмиттером, а нерадиоактивную — коллектором заряженных частиц (например, β -частиц), такую систему можно рассматривать как своеобразный ядерный генератор и ориентировочно рассчитывать зарядку ее как зарядку емкости. Накопление заряда q во времени в такой системе определится уравнением:

$$\frac{dq}{dt} = I_0 - I_{\text{ут}}, \quad (2)$$

где q — заряд единицы поверхности;

I_0 — плотность тока заряженных частиц;

$I_{\text{ут}}$ — плотность тока утечки. Этот ток зависит от удельного сопротивления утечки R и емкости единицы площади C границы раздела:

$$I_{\text{ут}} = q(RC)^{-1}.$$

Из уравнения (2) следует:

$$q = I_0 RC (1 - e^{-\frac{t}{RC}}). \quad (3)$$

Предельный заряд $q_{\text{пр}} = I_0 RC$, а время зарядки $t_{\text{зар}} \approx 3 RC$. Если принять удельное сопротивление $R = 10^{20}$ ом·см, а $C = 10^{-10}$ Ф, то заряд, близкий к предельному, накопится через 1000 лет. Максимальное напряжение, которое можно получить с помощью бета-активных препаратов, составляет, вероятно, 1—2 Мэв. Считая, что максимальное напряжение соответствует максимальному заряду, получаем активность препарата

$$I_0 = \frac{U}{R} \sim 10^{-20} \frac{\text{распад}}{\text{сек}}.$$

Фактическая активность должна быть порядка на два больше, так как через некоторое время после начала зарядки фактический ток зарядки будет меньше I_0 вследствие того, что низкоэнергетические частицы бета-спектра не будут доходить до коллектора. Активность препарата с учетом сферического распределения частиц должна быть порядка 10^{-18} — 10^{-17} расп/сек, т. е. 10^{-8} — 10^{-9} /кюри, что является весьма малой активностью. Таким образом, необходимым условием длительного накопления большого заряда является малая активность и большое удельное сопротивление породы $\sim 10^{20}$ ом/мм. Время накопления заряда определяется исключительно удельным сопротивлением. Со временем окончания накопления связан момент разряда в Земле, по которому можно судить о сопротивлении породы и глубине ее залегания.

Исходя из рассматриваемой модели, большая энергия будет выделяться в разряде, если последний происходит одновременно на боль-

шой площади. На единице площади в 1 см^2 будет выделяться энергия:

$$W = \frac{CU^2}{2} \approx 10^{11} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2}.$$

Если принять энергию, необходимую для землетрясения 10^{15} эрг , то площадь накопления зарядов составит 100 м^2 . Для более мощного разряда необходима большая заряженная площадь. Возможно также зарядение диэлектриков и при облучении их гамма-лучами и образовании радиоэлектретов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Воробьев. К вопросу об инициировании землетрясений подземными грозовыми разрядами.
2. А. А. Воробьев. Техника высоких напряжений. М.—Л., ГЭИ, 1945.
3. А. А. Воробьев, Е. К. Завадовская. Электрическая прочность твердых диэлектриков. ГИЗ, ТТЛ, М., 1956.
4. А. А. Воробьев. Нарушение электрической прочности диэлектриков и их пробой. Томск, изд-во ТГУ, 1962.
5. А. А. Воробьев. Физические условия залегания горных пород в земных недрах (в печати).
6. А. А. Воробьев. Сверхвысокие электрические напряжения. М.—Л., ГЭИ, 1955.
7. Я. И. Френкель. Кинетическая теория жидкостей. М., изд. АН СССР, 1945.
8. Л. В. Альтшуллер, С. Б. Корнер, А. А. Баканова, Р. Р. Грунин. ЖЭТФ, 38, 790 (1960).
9. Ю. Н. Тюняев, А. А. Урусовская, В. Н. Минеев, А. Г. Иванов. ФТТ, 10, в. 11, 2399, 1968.
10. А. А. Воробьев. Электрические сверхвысокие напряжения. М.—Л., ГЭИ 1955.