

А. Н. ЗЕМЦОВ<sup>1</sup>, А. А. ТРОНЬ<sup>1</sup>, Е. К. МАРХИНИН

## ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ В ПЕПЛОВО-ГАЗОВЫХ ТУЧАХ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЯХ

Открытие в свежих пеплах вулкана Тятя биологически важных соединений, в образовании которых, вероятно, немалую роль сыграли электрические разряды, делает задачу изучения электрических явлений в пеплово-газовых вулканических тучах особенно важной и актуальной.

Пеплово-газовые тучи представляют собой взвесь силикатных частичек в вулканическом газе.

Частицы ювенильного пепла обычно очень мелки. В среднем их поперечник не превышает 0,1 мм. Даже в пробах шлака и пепла, взятых в непосредственной близости от вулкана (10—15 км), мелкие фракции составляют значительный процент. Так, например, фракционный состав (вес. %) пепла извержения вулкана Тятя в 1973 г. дал следующие результаты (данные П. С. Долгановой и Г. С. Шутовой) в пробах 349, 350, 371, 388, взятых в 12—16 км к северо-востоку от кратера: >1 мм — 0,58; 1 ÷ 0,5 мм — 0,71; 0,5 ÷ 0,25 мм — 10,08; <0,25 мм — 88,63 (итого 100, вес.%; данные представляют собой среднее из четырех проб).

По минеральному составу пепел — мельчайшие обрывки лавы, представленный главным образом вулканическим стеклом, плагиоклазом, пироксенами, магнетитом. Его химический состав охарактеризован следующими окислами (среднее по пробам 440, 446, 449, 450, 463, взятым в 1—15 км от кратера): SiO<sub>2</sub> — 52,57; TiO<sub>2</sub> — 1,30; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 14,40; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 5,98; FeO — 7,78; MnO — 0,20; MgO — 5,07; CaO — 9,10; Na<sub>2</sub>O — 3,06; K<sub>2</sub>O — 0,60; P<sub>25</sub> — 0,08; S<sub>общ</sub> — 0,06; H<sub>2</sub>O — 0,05; п. п. п. сумма — 100,25 (сборы П. С. Долгановой и Г. С. Шутовой; аналитик Л. Г. Воронова).

Газ в пеплово-газовых тучах составляет подавляющую часть их объема и в то же время — лишь первые проценты от веса ювенильного пепла.

О составе вулканического газа конкретно для извержения вулкана Тятя на Курильских островах в 1973 г. дают представление табл. 1 и 2.

В настоящее время не существует развитой теории электрического разряда в газово-пепловых и пылевых тучах, а экспериментальный материал по этому вопросу практически отсутствует. Теория грозовых разрядов в атмосфере также далека от завершения.

Различные геофизические процессы приводят к явлению электрического пробоя между облаками наэлектризованного материала: снежные и песчаные бури (Шопланд, 1970; Юман, 1972), наземные и подводные извержения (Мархинин и др., 1974; Тазиев, 1963). Очевидно, что механизм электризации частиц материала при этих процессах в значительной степени различен, а механизм электрического пробоя всегда сходен

Таблица 1  
Газы вулкана Тятя

Компоненты	Проба, объемн. %			Компоненты	Пробы, объемн. %		
	8	9	20		8	9	20
H <sub>2</sub>	1,42	0,01	0,016	CO <sub>2</sub>	77,29	18,00	1,30
O <sub>2</sub>	2,58	6,00	20,70	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,06	0,00	0,00
N <sub>2</sub>	18,00	75,80	77,984	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,02	0,00	0,00
CH <sub>4</sub>	0,57	0,13	0,00	H <sub>2</sub> S	0,00	0,00	0,00
CO	0,06	0,07	0,00				

Примечание. Проба 5 — маар Радкевич,  $t = 99,5^{\circ} \text{C}$ ; соотношение газ — конденсат: 1 л сухого газа — 10 мл конденсата. Проба 9 — фумарольное поле на верхнем гребне кратера «Пограничник»,  $t = 400^{\circ} \text{C}$ ; соотношение газ — конденсат: 1 л газа — 0,6 мл конденсата. Пробы 8 и 9 отобраны Р. А. Шуваловым 26 и 27 июля 1973 г. соответственно. Проба 20 — фумарольное поле там же,  $t = 500^{\circ} \text{C}$ ; проба отобрана Л. П. Вергасовой, Г. С. Штейнбергом в августе 1973 г. Анализы газов выполнены Р. В. Гусевой.

Таблица 2  
Анализы конденсатов фумарольных газов вулкана Тятя

№ пробы	8			9		
	99,5			400		
Т, °С	5,15			4,25		
рН	5,15			4,25		
Компоненты	мг/л	мг-экв/л	экв. %	мг/л	мг-экв/л	экв. %
H <sup>+</sup>	0,0	0,00	0,0	0,06	0,06	0,1
K <sup>+</sup>	0	0,00	0,0	5,0	0,13	0,1
Na <sup>+</sup>	0	0,00	0,0	24	1,04	1,0
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1,5	0,08	100,0	1900	105,32	98,8
Ca <sup>2+</sup>	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
M <sup>2+</sup>	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Fe <sup>2+</sup>	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Fe <sup>3+</sup>	0	0,00	0,0	0	0,00	0,0
Сумма	1,5	0,08	100,0	1929	106,55	100,0
Cl <sup>-</sup>	0	0,00	0,0	3600	101,41	95,3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,6	0,05	50,0	160	3,42	3,2
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3,0	0,05	50,0	93	1,53	1,5
Сумма	5,6	0,10	100,0	3853	106,36	100,0
H <sub>3</sub> SO <sub>3</sub>	0,7	—	—	120	—	—
Общая минерализация	7,8	—	—	5902	—	—

Примечание. Пробы отобраны и проанализированы Р. А. Шуваловым.

с разрядом молнии в воздухе. Рассмотрим явленно разряда на примере извержения вулкана Тятя на о. Кунашир в июле 1973 г. (Мархинин и др., 1974).

Газово-пепловую тучу, образовавшуюся при этом извержении и достигшую высоты 8—10 км, можно условно разделить, на три части (рисунк):

I. Область ламинарного истечения газово-пепловых струй из жерла и быстрого движения устойчивых клубов пепла с характерным размером  $(0,5-1) \cdot 10^2$  м.

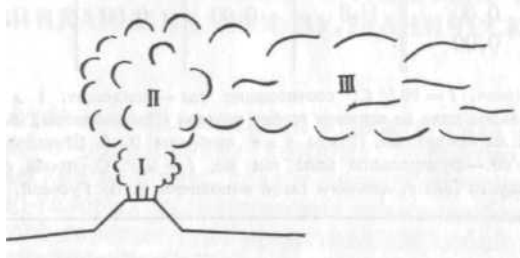


Схема строения пеплово-газовой тучи вулкана Тятя извержения 1973 г.

II. Область разрушения ламинарного течения с переходом к развитой турбулентности и образованием облачной структуры с характерным размером клубов пепла  $(1-5) \cdot 10^2$  м.

III. Область разрушения и сноса облачной структуры устойчивыми ветрами.

В процессе извержения наблюдались частые (ежесекундные) разряды молний; между областями I—II — вертикальные, между областями II—III — горизонтальные. Характерно, что разряды были внутри-облачными; молний между тучей и океаном и поверхностью Земли не наблюдалось.

Оценим физические условия в области I и ее размеры. Для этого будем считать, что взрывы происходят, когда газовые пузырьки в верхней части лавового столба в канале жерла достигают состояния плотной упаковки (Мархинин, 1957). При этом доля объема, заключенного между пузырьками, составляет  $15 \div 20\%$ . На основании наблюдений был известен объем единичного выброса, фиксируемый клубами пепла, а при дальнейшей обработке этих данных — его масса, равная 300 т.

С помощью данных об известных плотностях отсюда было установлено изменение объема газа при взрыве в 40 раз, при условии, что процесс развития взрыва практически закончен, когда давление газа становится равным атмосферному. С достаточной степенью точности можно считать взрыв процессом адиабатического расширения газа, для которого  $pV^\gamma = \text{const}$ , где  $p$  — давление,  $V$  — объем,  $\gamma = c_p/c_v$ , в нашем случае  $\gamma = 1,4$ .

Отсюда определяем начальное давление

$$p_0 = 140 \text{ атм}$$

и начальный объем, т. е. объем камеры жерла, в которой происходят взрывы:

$$V_{\text{нач}} = 10^3 \text{ м}^3$$

Температура газа после расширения ( $T_{\text{нач}} = 1000^\circ \text{ C}$ ):

$$T_{\text{газа}} \cong 160^\circ \text{ C}$$

$$\text{Работа расширения газа } A = p_0 V_{\text{нач}}^{\gamma} \int_{V_{\text{нач}}}^{V_{\text{кон}}} \frac{dV}{V^{\gamma}} = 2 \cdot 10^{17} \text{ эрг, что хорошо}$$

совпадает с данными предварительных оценок (Мархинин и др., 1974).

После расширения плотность газа составляет около половины плотности воздуха и отношение числа молекул вулканических газов и воздуха равно

$$\eta = \frac{1}{2} \frac{\mu_{\text{возд}}}{\mu_{\text{газа}}} \simeq 3/4$$

(для вулканических газов принято  $\mu = 20$ ), т. е. доля молекул вулканических примесей в воздухе достигает 40%.

Исходя из размеров области взрывов, можно считать, что указанные значения параметров достигаются на высоте 400 м над кромкой кратера. Следовательно, вполне можно допустить, что на высоте 1 км температура газов падает до температуры окружающего воздуха, а доля молекул вулканических примесей в воздухе становится пренебрежимо малой, к тому же большую часть из них составляет водяной пар, присутствующий в атмосфере. Здесь и происходит граница области I.

Зная размеры области I, можно сделать следующий физически важный вывод: вне этой области разряд молнии происходит практически в воздухе, а клубы пепловой тучи являются носителями заряда, вызывающего пробой диэлектрика — воздуха.

Как указывалось выше, в процессе извержения наблюдались лишь внутриоблачные разряды, что, очевидно, является следствием неравномерного распределения объемной плотности заряда по туче. Флуктуации объемной плотности заряда, вызывающие электрическое поле, достаточное для пробоя воздуха ( $E_0 \cong 3 \cdot 10^{4R} / \text{см}$ ), играют роль аналога механизма разделения заряда в грозовых облаках.

Определим необходимые плотности заряда; рассмотрим два случая:

а) разряд между двумя клубами на расстоянии  $R$ , имеющими примерно сферическую форму с радиусом  $r$ , причем  $r \leq R$  (разряд в туче между областями II и III);

б) разряд между объемно заряженными цилиндрами длиной  $l$ , радиусом  $r$ , расположенными на расстоянии  $R$  друг от друга (разряд между истекающими пеплово-газовыми струями в областях I—II).

Нижняя граница флуктуации зарядов, при которых происходит пробой воздуха, определяется выражением

$$Q \geq C \quad E_0 R,$$

где  $C$  — емкость соответствующей системы.

В случае а) получаем

$$Q \geq 2\pi E_0 E^r \frac{(R-r)R}{R-2r} E_0,$$

где  $E_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м}$ ,  $E = 1,00$ , что дает величину заряда

$$Q_{\text{проб}} \simeq 18K.$$

В случае б):

$$Q \geq \frac{\pi E_0 E l}{\ln \frac{R-r}{r}} R \cdot E_0,$$

а заряд  $Q = 0,3 K$  (обозначения те же, а для величин  $r, R, l$  приняты следующие наиболее характерные по наблюдениям значения:

- а)  $r = 10^2 \text{ м}, R = 10^3 \text{ м};$   
 б)  $r = 10 \text{ м}, R = 10^2 \text{ м}, l = 10^2 \text{ м}.$

Из расчетов видно, что горизонтальные молнии требуют гораздо больших величин флуктуаций заряда.

Энергия описанных систем зарядов в первом случае равна

$$E_1 = 3 \cdot 10^{16} \text{ эрг},$$

а во втором

$$E_2 = 3 \cdot 10^{14} \text{ эрг},$$

что на несколько порядков ниже, чем аналогичные величины в грозовых тучах.

Электризованные частицы пепла ( $\alpha \approx 0,1 \text{ мм}$ ), находящиеся в поле подобных зарядов, будут испытывать незначительные ускорения ( $\alpha \approx 10^2 \text{ м/сек}^2$ ), т. е. движение частиц будет по-прежнему определяться динамикой газоздушных потоков в пепловой туче.

Подобные величины флуктуации плотности заряда могут появиться в результате различных механизмов электризации частиц пепла. Важнейшими из них являются:

1. Баллоэлектрический эффект — явление электризации мельчайших частиц лавы ( $3 \cdot 10^{-8} \div 10^{-7}$ ) см при взрывном дроблении ее на начальной стадии взрыва. Электризация связана с разрушением дипольных молекул жидкой лавы. При этом размеры частиц соответствуют размерам молекулярных цепочек в жидкости, а плотности зарядов могут достигать  $10^{-11} \div 10^{-12} \text{ К/см}^3$ . Мелкие частицы, несущие объемный заряд с такой плотностью, могут образовывать в вершине зоны II, при характерных размерах турбулентных клубов пепла порядка  $10^2 \text{ м}$ , заряды, достаточные для возникновения пробоя.

2. Трение частиц пепла о стенки канала жерла при движении газопепловой струи наружу. При трении происходит дробление частиц, связанное с разрушением молекулярных структур и образованием зарядов. В этом процессе могут принимать участие частицы с размерами порядка размеров шероховатости канала; по-видимому, это размеры  $0,5 \text{ мм} \div 1 \text{ см}$ .

3. Взаимное трение и столкновения частиц пепла. В макромасштабе процесс может быть эффективен на границе зон I и II, где свежие ламинарные струи газопепла сталкиваются с турбулентной II зоной, а также при взаимном трении поднимающихся струй.

По-видимому, в зонах I и II работают все эти механизмы электризации. При характерной плотности мелких частиц в зоне II порядка  $10^9 \text{ м}^3$  они обеспечивают заряд в  $10^2 \div 10^3$  — электрон/частица, достаточный для возникновения флуктуации заряда  $20 \text{ К}$ , необходимых для пробоя.

При появлении подобной флуктуации в зонах II—III возникает электрический пробой, приводящий к появлению приблизительно горизонтального проводящего канала длиной  $10^3 \div 5 \cdot 10^5 \text{ м}$  и шириной  $10 \div 30 \text{ см}$  (Юман, 1972). По этому каналу проходит ток  $1 \approx 2 \cdot 10^5 \alpha$  приблизительно за  $3 \cdot 10^{-4} \div 10^{-3} \text{ сек}$ . За время порядка  $10^{-4} \text{ сек}$  в канале развивается температура  $10^4 \div 3 \cdot 10^4$  °К, которая спадает до температуры окружающего воздуха к концу разряда. При такой температуре и давлении в канале  $P \approx 10 \text{ атм}$  основные составляющие воздуха — кислород O и азот N — почти полностью однократно ионизованы. В грозовых разрядах наблюдаются и дважды ионизованные O и N (Юман, 1972).

При средней плотности мелких частиц пепла ( $d \leq 0,5$  мм) порядка  $10^9 - 10^{12} \text{ м}^3$  в канал попадает  $10^{10} - 10^{13}$  частиц или около  $10^2$  кг пепла.

Частицы с размером  $d \leq 0,1$  мм за время  $10^{-4}$  сек успеют полностью испариться, так как коэффициент температуропроводности для материала частиц составляет  $K = 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$ . Поскольку частицы такого размера преобладают среди мелкого материала, можно считать, что почти весь пепел, попавший в канал разряда, испарится. Таким образом, в канале образуется, наряду с воздушной плазмой, приблизительно  $10^2$  кг смеси нейтральных и диссоциированных молекул, нейтральных атомов и ионов вещества пепла (см. стр. 18). Если за время  $10^{-4}$  сек в канале успеет установиться локальное термодинамическое равновесие (Юман, 1972), то при концентрации электронов порядка  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  у таких элементов, как С, Cl, F, N, O, S, H, в течение времени разряда  $2 \cdot 10^{-4}$  сек на 1 нейтральный атом в  $1 \text{ см}^3$  будут приходиться 200—300 однократно-ионизированных; у Al, Ca, Fe, Mg, Na, Ti, Si —  $2 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^4$ ; у Ca, Mg, Fe, Ti, Si будет 0,01—2 двухкратноионизированных атома в  $1 \text{ см}^3$  на 1 нейтральный; для остальных составляющих элементов вторая ионизация пренебрежимо мала.

После прохождения тока начинаются процессы рекомбинации, сопровождающиеся высвечиванием, причем основную роль играют ионы O II и N I.

Высвечивание длится  $\approx 0,3$  сек.

В зоне I—II наблюдались в основном вертикальные молнии. Количественная оценка физических условий разрядов здесь затруднена, так как совершенно отсутствуют данные об электрическом пробое в смеси газов, подобной приведенной в табл. 1 и 2 в столь сложных газо- и термодинамических условиях. Здесь также образуется плазма, состоящая из компонентов газов, воздуха и пепла. В виду большого процентного содержания  $\text{H}_2\text{O}$  в газах заметную роль могут играть ионы  $\text{OH}^-$ .

Для более детального изучения процессов и физических условий при разрядах в газопепловых тучах необходимо привлечение данных о дипольных моментах электронных оболочек составляющих пеплов, о диэлектрических свойствах смесей соответствующих газов. С наблюдательной точки зрения представляются наиболее интересными и перспективными фотографирование спектров молний в тучах, расшифровка и измерение интенсивностей возможно большего числа линий.

## ЛИТЕРАТУРА

- Мархинин Е. К. Об энергии образования ювенильного вулканического пепла.— Докл. АН СССР, 1957, т. 116, вып. 5, стр. 826—830.
- Мархинин Е. К., Анисеев Ю. А., Гранник В. М. и др. Извержение вулкана Тятя.— Геология и геофизика, 1974, № 10, стр. 20—31.
- Тазиев Г. Вулканы. М., ИЛ, 1963, стр. 117.
- Шопланд Б. Полет молний. М., «Мир», 1970.
- Юман М. Молния. М., «Мир», 1972, стр. 327.