

П. П. ФИРСТОВ, В. В. АДУШКИН, А. В. СТОРЧЕУС

**УДАРНЫЕ ВОЗДУШНЫЕ ВОЛНЫ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ
ВО ВРЕМЯ БОЛЬШОГО ТРЕЩИННОГО ТОЛБАЧИНСКОГО
ИЗВЕРЖЕНИЯ В СЕНТЯБРЕ 1975 г.**

(Представлено академиком М. А. Садовским 20 I 1978)

При извержении второго конуса во время Большого трещинного Толбачинского извержения в сентябре 1975 г. (1) с целью изучения физики взрывного процесса регистрировали ударно-воздушные волны (у.в.в.), возникающие при работе вулканического аппарата.

Широкополосный микробарограф ЭДМБ-IV (2), нагруженный на гальванометр ГВ-IV с $f_0=15$ Гц и постоянной затухания $D=3$, обеспечивал столбобразную характеристику в диапазоне 1–5 Гц с чувствительностью 3 Па на 1 мм записи. В качестве регистрира использовали осциллограф

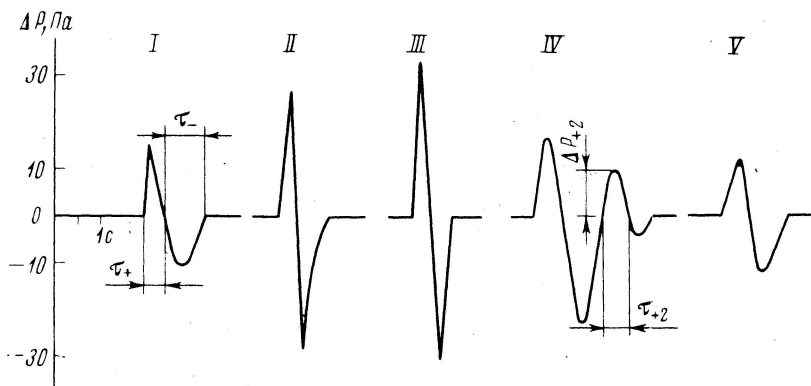


Рис. 1. Типы ударно-воздушных волн

ОСБ-1М со скоростью развертки 3 мм/с. Регистрация осуществлялась 14 IX 1975 г. с 8 до 12 час. в 9 км от источника.

По форме записи у.в.в., возникшие во время извержения, можно условно разбить на 5 типов (рис. 1).

I — классическая форма слабой ударной волны на большом расстоянии от источника (3), характеризуемая резким фронтом положительного импульса и более продолжительным отрицательным импульсом, меньшим по амплитуде;

II — форма записи с резким передним фронтом положительного и отрицательного импульсов. Задний фронт отрицательного импульса близок к экспоненте;

III — отличается от II резким фронтом отрицательного импульса;

IV — представляет колебания, состоящие из четко выраженных двух положительных и одного отрицательного импульса;

V — квазисинусоидальная форма с нерезкими фронтами импульсов обеих полярностей.

Рассматривали следующие параметры воздушных волн: максимальное избыточное давление в фазе сжатия ΔP_+ в Па; время действия положительного импульса τ_+ в с; величина положительного импульса $I_+=$

Среднестатистические параметры у.в.в.

Тип у.в.в.	N	lg ΔP ₊		τ ₊		lg I ₊		lg ΔP ₋		τ ₋		lg I ₋	
		m	σ	m	σ	m	σ	m	σ	m	σ	m	σ
I	30	1,19	0,11	0,44	0,09	0,52	0,18	1,06	0,18	0,82	0,28	0,50	0,38
II	38	1,38	0,22	0,40	0,10	0,66	0,29	1,43	0,21	0,66	0,20	0,94	0,32
III	20	1,51	0,16	0,33	0,09	0,77	0,21	1,52	0,18	0,53	0,81	0,93	0,21
IV	24	1,24	0,17	0,50	0,12	0,62	0,35	1,38	0,11	0,90	0,15	1,02	0,15
V	45	1,09	0,11	0,57	0,09	0,56	0,16	1,12	0,12	0,80	0,18	1,68	0,19

$= \int_0^{\bar{r}} \Delta P(t) dt$ в Па·с; ΔP_- , τ_- , I_- — параметры, характеризующие фазу разряжения.

Качественное разбиение у.в.в. на типы подтверждается табл. 1, где приведены среднестатистические данные, полученные путем осреднения параметров импульсов, четко соответствующих тому или иному типу.

Наиболее полный анализ экспериментального материала и соответствующие обобщения по параметрам у.в.в. приведены в работе академика М. А. Садовского (3). Однако полученные в этой работе зависимости применены лишь в области $1 \leq \bar{r} = r/Q^{1/2} \leq 10$, где r — расстояние до источника в м, Q — тротиловый эквивалент в кг. В работе (4) исследовали слабые у.в.в. ($\Delta P_+ \leq 100$ Па), возникающие от взрывов зарядов в области $10 \leq \bar{r} \leq 1000$ м. На основе большого экспериментального материала получены следующие зависимости:

$$\Delta P_+ = 4,4 \cdot 10^5 (Q^{1/2}/r)^{1,4}; \quad (1)$$

$$I_+ = 220 Q^{2/3}/r; \quad (2)$$

$$\tau_+/Q^{1/2} = 3,15 \cdot 10^{-3} \lg \bar{r}. \quad (3)$$

Формула (3) в диапазоне $100 \leq \bar{r} \leq 1000$ м удовлетворительно аппроксимируется зависимостью

$$\tau_+ = 1,32 \cdot 10^{-3} \cdot r^{0,4} \cdot Q^{0,2}. \quad (4)$$

Для фиксированной точки наблюдения логично рассматривать зависимости I_+ и τ_+ от ΔP_+ . Используя формулы (1), (2), (4), эти зависимости можно представить степенной функцией типа $y = 10^m x^n$ или $\lg y = n \lg x + m$. Методом наименьших квадратов были найдены $\lg I_+ = \lg I_+(\lg \Delta P_+)$ и $\lg \tau_+ = \lg \tau_+(\lg \Delta P_+)$ для каждого типа зарегистрированных у.в.в. (рис. 2). На рис. 2 приведены зависимости $\Delta \tau_+$ и I_+ фазы сжатия от избыточного давления для различных типов у.в.в.:

$$\text{I} - \Delta \tau = 10^{1,39} \cdot \Delta P_+^{0,44}, \quad \Delta I_+ = 10^{-1,12} \cdot \Delta P_+^{1,40};$$

$$\text{II} - \Delta \tau = 10^{0,81} \cdot \Delta P_+^{0,29}, \quad I_+ = 10^{1,05} \cdot \Delta P_+^{1,25};$$

$$\text{III} - \Delta \tau = 10^{0,62} \cdot \Delta P_+^{0,14}, \quad I_+ = 10^{0,91} \cdot \Delta P_+^{1,12};$$

$$\text{IV} - \Delta \tau = 10^{0,74} \cdot \Delta P_+^{0,40}, \quad I_+ = 10^{-1,52} \cdot \Delta P_+^{1,75};$$

$$\text{V} - \Delta \tau = 10^{0,59} \cdot \Delta P_+^{0,31}, \quad I_+ = 10^{-0,22} \cdot \Delta P_+^{1,27}.$$

Из рис. 2 видно, что поведение кривых $\tau_+ = \tau_+(\Delta P)$ для II и III типов весьма близко к поведению кривой у.в.в. взрывов наружных зарядов (4) с систематическим завышением τ_+ на 0,2 с. Для IV и V типов поведение кривых $\tau_+ = \tau_+(\Delta P_+)$ близко между собой и существенно отличается от кривых II и III типов. Кривая I типа занимает промежуточное значение. Качественно близкая картина наблюдается и для зависимостей $I_+ = I_+(\Delta P_+)$.

По формулам (1), (2) подсчитываем тротильный эквивалент по ΔP_+ и I_+ (табл. 2).

Наблюдается расхождение тротильных эквивалентов Q_P и Q_I . Причем с увеличением параметров волны в данной точке измерения для II и III типов у.в.в. степень неподобия значительно уменьшается, остается без изменений для IV, V типов и слабо изменяется для I типа. Расхождение тротильных эквивалентов Q_P и Q_I происходит при быстром нестационарном сгорании объемов (3–10 м³) воздушных взрывчатых смесей. Так, при го-

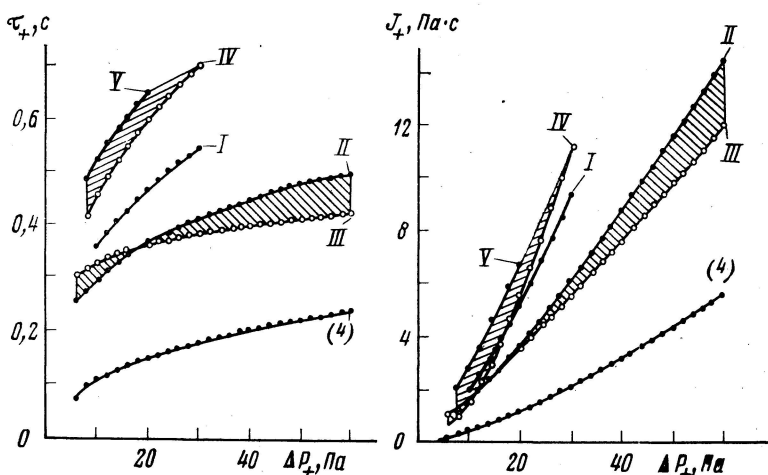


Рис. 2. Зависимость времени действия $\Delta\tau_+$ и импульса I_+ фазы сжатия от избыточного давления ΔP . Данные (*): $\Delta\tau_+ = 10^{-1,39} \cdot \Delta P_+^{0,44}$, $\Delta I = 10^{1,74} \cdot \Delta P_+^{1,40}$, $100 \leq r \leq 1000$ м

рении со скоростью $V \approx 100$ м/с $Q_P/Q_I = 0,3-0,4$, а при $V \approx 10$ м/с $Q_P/Q_I = 0,1-0,2$.

Форма записи у.в.в., зарегистрированных во время Большого трещинного Толбачинского извержения, а также среднестатистические параметры и зависимости $I_+(\Delta P_+)$ и $\tau_+(\Delta P_+)$ указывают, что механизм возникновения у.в.в. различен.

По форме записи I тип у.в.в. является слабой ударной волной, имеющей характерные особенности: $\Delta P_+ > \Delta P_-$; $\tau_+ < \tau_-$; $I_+ \approx I_-$. Но в то же время кривая $\tau_+(\Delta P)$ отличается от экспериментальной кривой, полученной для взрывов наружных зарядов. Среднестатистический тротильный эквивалент $\bar{Q}_P = 230$ кг. Природа возникновения у.в.в. этого типа не ясна.

Особенностью у.в.в. II типа является $\Delta P_+ < \Delta P_-$ и $I_+ < I_-$, т. е. полный импульс не равен 0. При этом задний фронт отрицательного импульса близок к экспоненте, $\bar{Q} = 720$ кг. Данный тип у.в.в., по-видимому, возникает в результате сверхзвукового истечения пепло-газовой смеси из жерла

Таблица 2

Тротильный эквивалент у.в.в. по типам, 10³ кг

Тип у.в.в.	Q_P^{\max}	Q_I^{\max}	Q_P^{\min}	Q_I^{\min}	$\left(\frac{Q_P}{Q_I}\right)^{\max}$	$\left(\frac{Q_P}{Q_I}\right)^{\min}$
I	0,92	6,40	0,08	0,74	0,14	0,11
II	4,64	13,64	0,08	0,48	0,34	0,17
III	3,20	10,53	0,14	0,86	0,30	0,16
IV	0,84	10,50	0,05	0,58	0,08	0,09
V	0,26	6,21	0,04	0,98	0,06	0,04

вулкана. Экспонента заднего фронта отрицательного импульса объясняется быстрым затвердеванием и выпадением из эруптивного облака лавового материала.

III тип близок к у.в.в. по динамическим характеристикам: $\Delta P_+ > \Delta P_-$; $\tau_+ < \tau_-$. Кривая $\tau_+(\Delta P_+)$ близка к кривой, полученной для взрывов наружных зарядов (⁴), $Q_P/Q_I=0,16-0,30$; $\bar{Q}_P=1150$ кг. Не исключено, что возникновение этого типа ударных волн связано с горением и детонацией взрывоспособных вулканических газов. Существуют расчеты (⁵), показывающие принципиальную возможность протекания цепных реакций в вулканических газах.

IV тип имеет $\Delta P_+ > \Delta P_-$ и $\tau_+=0,6$ с, $\bar{Q}_P=280$ кг, по форме записи напоминает воздушные волны, зарегистрированные при взрывах на выбросе (⁶). Выделяются два положительных импульса. Первый связан с развитием каверны и образованием купола за счет вытеснения грунта в сторону свободной поверхности, а второй — с прорывом газов в атмосферу. Причем скорость разлета грунта в эпицентральной области близка к скорости движения свободной поверхности (⁷). В этом случае давление, развиваемое куполом, зависит от скорости (v) подъема свободной поверхности: $\Delta P_0 = v r_0 c$. Наибольший характерный размер источника соизмерим с диаметром кратера вулкана $D=100$ м. По формуле (1) рассчитываем ΔP_0 , которое заключено в пределах $(2,4-9,6) \cdot 10^4$ Па. В этом случае скорость составит $v=60-240$ м/с, что вполне согласуется с данными кино съемки за этот период.

V тип у.в.в. имеет много общего с IV и рассматривается как его предельный случай, когда происходит только прорыв газов с дозвуковой скоростью. Глубина заложения выбросов, по-видимому, изменяется в широких пределах, что подтверждается большим разнообразием форм у.в.в. переходного типа (от IV к V).

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта
Академии наук СССР
Москва

Поступило
22 XII 1977

ЛИТЕРАТУРА

¹ С. А. Федотов и др., ДАН, т. 228, № 5, 1193 (1976). ² И. П. Пасечник, Н. Е. Федосеев, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 1, 1121 (1958). ³ М. А. Садовский, Тр. сейсмологич. ин-та, № 116, 114 (1945). ⁴ Н. И. Смолий, Я. И. Цейтлин, Физика горения и взрыва, № 6, 919 (1974). ⁵ И. И. Гущенко, Пеплы северной Камчатки и условия их образования, М., 1965. ⁶ J. W. Reed, Symposium on Engineering with Nuclear Explosives, v. 2, Las Vegas, 1970, p. 1485. ⁷ М. М. Докучаев и др., Взрывы на выбросе, М., 1963.