

## Глава 4. АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ В АТМОСФЕРЕ, КАК РЕЗУЛЬТАТ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В КРАТЕРЕ ИЗВЕРГАЮЩЕГОСЯ ВУЛКАНА

Во время эксплозивной деятельности акустические сигналы диапазона 1÷10 Гц регистрировались на многих вулканах мира (*Stewart, 1959; Токарев, 1964; Tolentino, 1973; Tanaka e.a., 1974; Nain, 1976; Minakami a. o., 1979; Wilson R.C., Forbes B.R., 1984*). Под руководством и при непосредственном участии автора почти на всех извергающихся вулканах Камчатки в 80÷90 годы проводилась регистрация АС. Во время извержения Северного прорыва БТТИ АС были зарегистрированы с достаточной разрешающей способностью и впервые в практике вулканологических исследований проведена их классификация, правомерность которой была проверена на других извержениях.

### 4.1. Типы вулканических акустических сигналов

В сентябре 1975 г. проводилась регистрация АС на Северном прорыве. Подробное описание разнообразия эксплозивных явлений в этот период дано в книге *Большое трещинное Толбачинское извержение (1984)*. Схема расположения пункта регистрации относительно источника АС приведена на рис. 2.3. По форме записи АС, зарегистрированные на Северном прорыве БТТИ, с определенной долей условности, были разбиты на пять типов (рис.4.1):

- I – классическая форма ударной волны, образующейся при взрыве конденсированных взрывчатых веществ на большом расстоянии от источника (*Садовский, 1945*), характеризующаяся резким фронтом положительного импульса и более продолжительным отрицательным импульсом, меньшим по амплитуде ( $\Delta P_+ > \Delta P_-$ );
- II – форма записи с резким передним фронтом положительного и отрицательного импульсов, как правило,  $\Delta P_+ \approx \Delta P_-$ , а 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.

По аналогии с воздушными ударными волнами (ВУВ), возникающими при взрывах взрывчатых веществ в воздухе (*Садовский, 1945*), рассматривались следующие параметры АС:

- 1) избыточное максимальное давление в фазе сжатия  $\Delta P_+$  [Па];
- 2) время действия фазы сжатия  $\tau_+$  [с], под которым подразумевается промежуток времени, заключенный между передним фронтом и границей, где избыточное давление равно нулю;

3) величина импульса, вычисляемого по формуле;  $I_+ = \int_0^{\phi} \Delta P(t) dt$  [Па·с];

4) аналогичные параметры, характеризующие фазу разряжения;  $\Delta P_-, \tau_-, I_-$ .

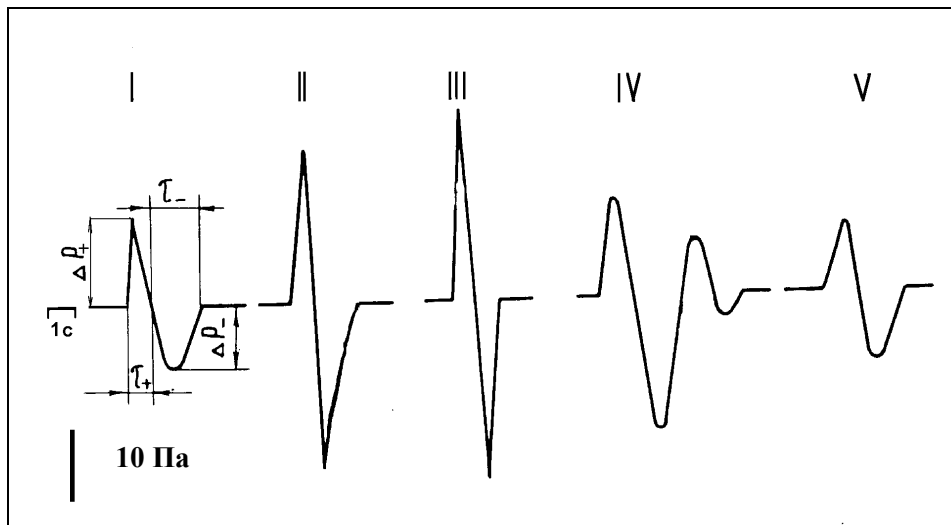


Рис.4.1. Формы импульса типов воздушных ударных волн, возникавших во время взрывной активности Северного прорыва БТТИ, построенные по среднестатистическим параметрам.

Качественное деление АС на типы подтверждается среднестатистическими данными (табл. 4.1.), полученными путем осреднения параметров импульсов, зарегистрированных 14.09.1975 г. с 8 до 12 часов на станции ВДП ( $\Delta = 9$  км). Выбирались импульсы, которые безошибочно можно отнести к тому или иному типу. Распределения в сериях типов АС значений  $\Delta P_+$  и  $I_+$  близки к логнормальному, хотя асимметрия и эксцесс не отличны от нуля. Распределения значений  $\tau_+$  и  $\tau_-$  близки к нормальным.

Таблица 4.1.

Среднестатистические параметры АС, зарегистрированных во время извержения Северного прорыва БТТИ.

Типы АС	N	$\lg \Delta P_+$		$\tau_+$		$\lg I_+$		$\lg \Delta P_-$		$\tau_-$		$\lg I_-$		$\alpha$ $\tau_+/\tau_-$	$\beta$ $\Delta P_+/\Delta P_-$	$\gamma$ $I_+/I_-$
		m	$\sigma$	m	$\sigma$	m	$\sigma$	m	$\sigma$	m	$\sigma$	m	$\sigma$			
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	0,54	1,27	1,06
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	0,60	0,89	0,52
III	20	1,51	0,16	0,33	0,09	0,77	0,21	1,52	0,18	0,53	0,21	0,93	0,21	0,62	0,97	0,69
IV	24	1,24	0,17	0,59	0,12	0,62	0,35	1,38	0,11	0,90	0,15	1,02	0,15	0,65	0,72	0,40
V	45	1,09	0,11	0,57	0,09	0,56	0,16	1,12	0,12	0,80	0,18	0,68	0,19	0,71	0,95	0,75

АС III типа имеют самое большое среднестатистическое избыточное давление  $\overline{\Delta P_+} = 32,4$  Па и наименьшее время действия  $\overline{\tau_+} = 0,39$  с. Наименьшее  $\overline{\Delta P_+} = 12,3$  Па имеет V тип АС с  $\overline{\tau_+} = 0,57$  с. Существенно различны для каждого типа параметры  $\alpha = \tau_+/\tau_-$ ,  $\beta = \Delta P_+/\Delta P_-$  и  $\gamma = I_+/I_-$ . Наиболее сбалансированным импульсом является АС I типа при  $\gamma = 1,06$ .

В физике взрыва используются зависимости  $\Delta P_+ = f_1(E_0, r)$ ,  $I_+ = f_2(E_0, r)$ ,  $\tau_+ = f_3(E_0, r)$ , которые отражают закономерности распространения ВУВ, где  $E_0$  - энергия источника взрывчатого вещества (ВВ),  $r$  - расстояние до источника. При взрывах ВВ принято вместо  $E_0$  использовать тротильный эквивалент в кг. На основании закона подобия обычно рассматривают параметры ВУВ в зависимости от приведенного расстояния  $\bar{r} = r/Q^{1/3}$ . Многочисленные работы по изучению распространения ВУВ от взрывов позволили получить ряд эмпирических формул, имеющих, в основном, вид степенных многочленов, выражающих зависимости  $\Delta P_+ = f_1(\bar{r})$ ,  $I_+ = f_2(\bar{r})$ ,  $\tau_+ = f_3(\bar{r})$  для различных видов ВВ и условий проведения взрыва (воздушные, накладные и камуфлетные взрывы)

В работе (Смолия, Цейтлина, 1981) исследовались слабые ВУВ ( $\Delta P_+ \leq 100$  Па), возникающие от взрывов накладных зарядов в области  $10 \leq \bar{r} = r/Q^{1/3} \leq 1000$ . На основании большого экспериментального материала получены следующие зависимости:

$$\Delta P_+ = 4,4 * 10^5 (Q^{1/3} / \bar{r})^{1,4}; \quad (4.1)$$

$$I_+ = 220 * Q^{2/3} / \bar{r}; \quad (4.2)$$

$$\phi_+ / Q^{1/3} = 3,15 * 10^{-3} \lg \bar{r}. \quad (4.3)$$

Формула (4.3) в диапазоне  $100 \leq \bar{r} \leq 1000$  удовлетворительно аппроксимируется зависимостью

$$\phi_+ = 1,32 * 10^{-3} r^{0,4} Q^{0,2}. \quad (4.4)$$

Для фиксированной точки наблюдений логично рассматривать зависимости  $I_+$  и  $\tau_+$  от  $\Delta P_+$ . Используя формулы (4.1), (4.2), (4.4), эти зависимости можно представить степенными функциями типа  $y = 10^m x^n$  или  $\lg y = n \lg x + m$ . Для АС от вулканических взрывов эти зависимости находились методом наименьших квадратов для каждого типа. Коэффициенты  $n$  и  $m$  приведены в таблице 4.2, а сами кривые показаны на рис. 3.

Таблица 4.2.

Экспериментальные зависимости  $I_+$ ,  $\tau_+$  от  $\Delta P_+$  для различных типов АС

Типы АС	$I_+ = 10^m \Delta P^n$		$\tau_+ = 10^m \Delta P^n$	
	$m$	$n$	$m$	$n$
I	- 1,12	1,40	-0,29	0,34
II	-1,05	1,25	-0,81	0,29
III	-0,91	1,12	-0,62	0,14
IV	-1,52	1,75	-0,74	0,40
V	-0,82	1,27	-0,59	0,31
накладные заряды $100 \leq \bar{r} \leq 1000$	-1,74	1,40	-1,39	0,44

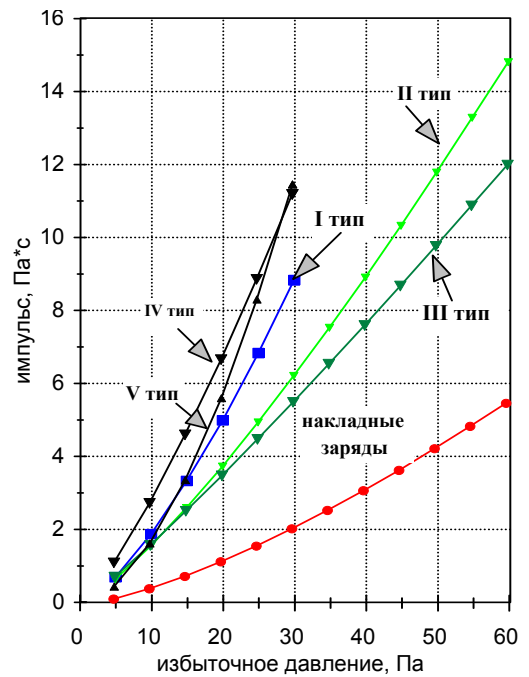
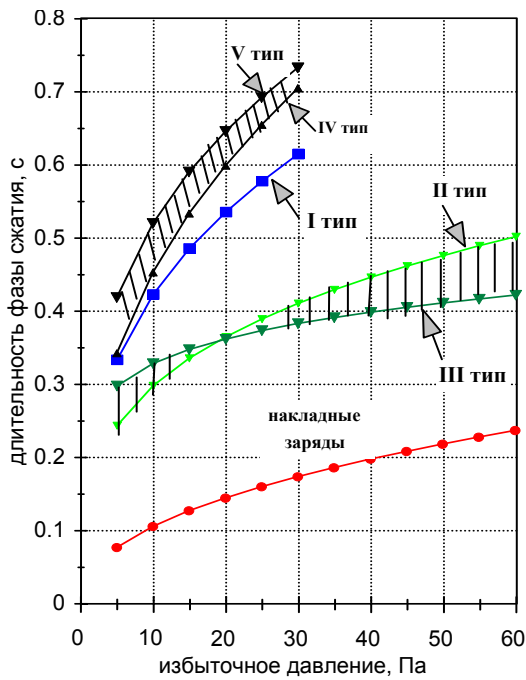


Рис.4.2. Зависимость времени действия  $\tau_+$  и импульса  $I_+$  фазы сжатия от избыточного давления  $\Delta P_+$  для различного типа АС, зарегистрированных во время извержения СП БТТИ в сентябре 1975 г.

На рис. 4.2 в зависимостях  $\tau_+ = f(\Delta P_+)$  и  $I_+ = f(\Delta P_+)$  хорошо видны различия выделенных по форме и среднестатистическим параметрам вулканических АС. Поведение зависимости  $\tau_+ = f(\Delta P_+)$  для АС II и III типов близко к поведению кривой для накладных зарядов, но с постоянным превышением  $\tau_+$  около 0,2 с. Наиболее сильно обе зависимости отличаются от кривых для накладных зарядов для АС IV и V типов. Кривая для АС I типа занимает промежуточное значение между кривыми для АС II+III типов и АС IV+V типов.

По формулам (4.1) и (4.2) рассчитывался тротиловый эквивалент  $Q$  по максимальным и минимальным значениям  $\Delta P_+$ ,  $I_+$  и среднестатистическом  $\Delta P_+$  для каждого типа АС (табл.4.3). Наблюдается расхождение тротиловых эквивалентов  $Q_P$  и  $Q_I$ . Причем, с увеличением параметров волны в данной точке измерения для II и III типов АС, степень не подобия значительно уменьшается, остается без изменений для IV, V типов и слабо изменяется для I типа. Расхождение тротиловых эквивалентов  $Q_P$  и  $Q_I$  наблюдается при быстром нестационарном сгорании объемов (3-10 м<sup>3</sup>) воздушных взрывчатых смесей. Так, при горении со скоростью фронта  $V \approx 100$  м/с,  $Q_P/Q_I = 0,3 - 0,4$ , а при  $V \approx 10$  м/с,  $Q_P/Q_I = 0,1 - 0,2$ . То есть чем меньше плотность энерговыделения в источнике, тем больше расхождение тротиловых эквивалентов, определенных по  $\Delta P_+$  и  $I_+$ .

Тротиловый эквивалент ВУВ по типам,  $10^3$  кг.

Тип АС	$\bar{Q}_P$	$Q_P^{\max}$	$Q_I^{\max}$	$Q_P^{\min}$	$Q_I^{\min}$	$\left(\frac{Q_P}{Q_I}\right)^{\max}$	$\left(\frac{Q_P}{Q_I}\right)^{\min}$
I	0,23	0,92	6,40	0,08	0,74	0,14	0,11
II	0,72	4,64	13,63	0,08	0,48	0,34	0,17
III	1,15	3,20	10,53	0,14	0,86	0,30	0,16
IV	0,28	0,84	10,50	0,05	0,58	0,08	0,09
V	0,21	0,26	6,21	0,04	0,98	0,06	0,04

По форме записи I тип АС является слабой воздушной ударной волной, имеющей характерные для неё особенности:  $\Delta P_+ > \Delta P_-$ ;  $\tau_+ < \tau_-$ ;  $I_+ \approx I_-$ . Среднестатистический тротиловый эквивалент  $\bar{Q}_P = 230$  кг. Но в тоже время, для Северного прорыва БТТИ зависимость  $\tau_+ = f(\Delta P_+)$  отличается от экспериментальной кривой для взрывов наружных зарядов. Не исключено, что возникновение этого типа АС связано с воздушными взрывами, возникающими в результате детонации взрывоспособных вулканических газов при окислении их кислородом воздуха.

Особенностью АС II типа является  $\Delta P_+ < \Delta P_-$  и  $I_+ < I_-$ , т. е. полный импульс не равен нулю. При этом задний фронт отрицательного импульса близок к экспоненте;  $\bar{Q}_P = 720$  кг. Данный тип АС также следует отнести к слабым ВУВ, связанным с нестационарными процессами, возникающими при истечении пепло - газовой струи из кратера вулкана (сверхзвуковой скачок). Экспонента заднего фронта отрицательного импульса объясняется быстрой конденсацией водяного пара, который составляет около 99% в вулканических газах.

III тип АС близок к АС II типа по динамическим характеристикам:  $\Delta P_+ > \Delta P_-$ ;  $\tau_+ < \tau_-$ . Так же как и для II типа, форма кривой  $\tau_+ = f(\Delta P_+)$  близка к зависимости для взрывов наружных зарядов с систематическим завышением  $\tau_+$  на 0,2 секунды  $Q_P/Q_I = 0,16-0,30$ ;  $\bar{Q}_P = 1150$  кг. АС II и III типов имеют наименьшее значение  $\tau_+$  относительно других типов АС, что указывает на наименьший размер их источника. По-видимому, АС II и III типов возникают в результате быстрого движения струи пепло-газовой смеси из жерла вулкана, которое в первом приближении можно рассматривать, как истечение газа из сопла с возникновением скачка уплотнения на границах струи (*Livshits, Bolkhovitinov, 1977*). Действительно, на фотографиях извержения при благоприятных оптических условиях наблюдаются ВУВ, радиально распространяющиеся от вертикального пепло-газового столба.

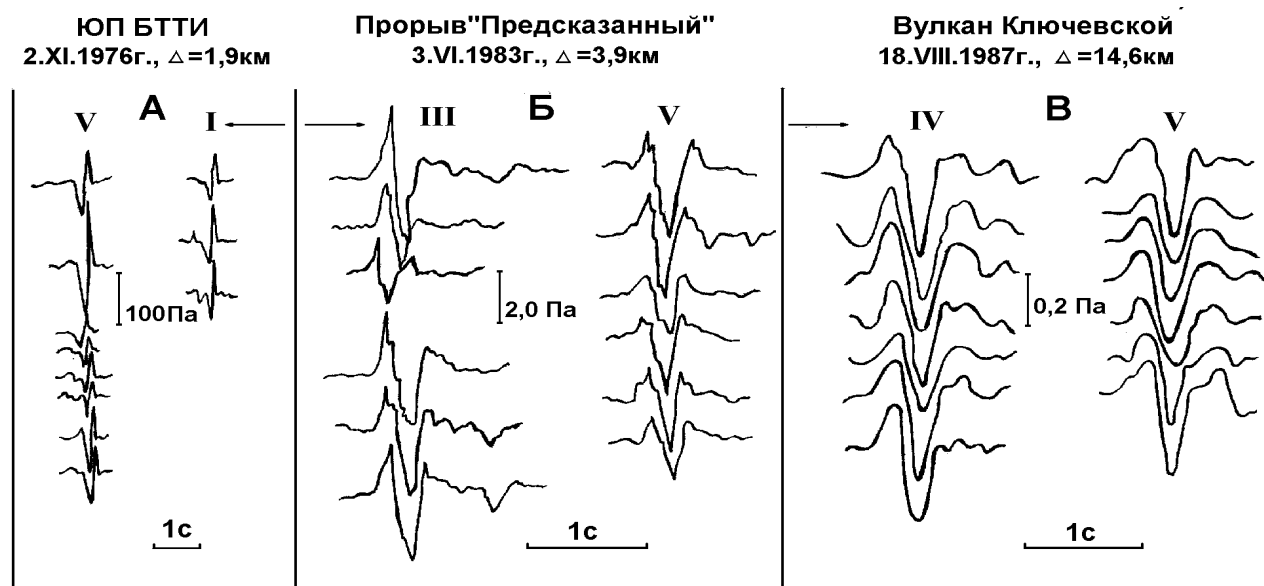
АС IV типа представляет импульс, состоящий из двух фаз сжатия и фазы разрежения, причем амплитуда фазы разрежения сравнима, а иногда и превосходит амплитуду начальной фазы сжатия.  $Q_P/Q_I = 0,08 \div 0,09$ ;  $\bar{Q}_P = 280$  кг. По форме записи IV тип АС напоминает

воздушную волну, регистрируемую при взрывах на выброс (*Reed, 1963*). Первый импульс при подземных взрывах 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 (*Докучаев и др., 1963*).

В этом случае давление на границе купола зависит от скорости ( $v$ ) подъема свободной поверхности:  $\Delta P_0 = v\rho_0 C$ ; где  $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$  - плотность воздуха,  $C$  – скорость звука. Наибольший характерный размер источника соизмерим с размером кратера вулкана и составляет около 100 м. По формуле (4.1) рассчитываем для АС IV типа  $\Delta P_0 = (3\div 9)\cdot 10^4 \text{ Па}$ . В этом случае  $v = 60\div 240 \text{ м/с}$ , что хорошо согласуется со скоростью разлета бомб во время регистрации АС на Северном прорыве БТТИ, определенной по киносъемке.

Пятый тип АС имеет много общего с IV и рассматривается, как предельный случай, когда происходит только прорыв газов с дозвуковой скоростью. Следует отметить, что изменение глубины заложения выбросов объясняет разнообразие форм воздушных волн переходного типа от IV к V.

Данная классификация была подтверждена при регистрации АС во время извержений других вулканов: Южного прорыва БТТИ –1976 г. (*Фирстов, Сторчеус 1978\**; *Сторчеус, 1985*); вершинного и побочного кратеров вулкана Ключевского в 1983 г. (*Фирстов, Сторчеус, 1987*; *Чунчuzов, Фирстов, 1992*; *Фирстов, Кравченко, 1995*). На рис. 4.3 приведены образцы записей АС для этих извержений.



\* *Фирстов П.П., Сторчеус А.В.* О воздушных ударных волнах и вулканическом дрожании, сопровождавших Большое трещинное Толбачинское извержение// Отчет: «Изучение вулканического дрожания при Большом трещинном Толбачинском извержении в 1975-1976 гг.». Фонды Института вулканологии ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский. 1978. С. 8-46.

Для ЮП БТТИ в основном был характерен стромболианский (*барботирующий*) режим активности, с непрерывными выбросами обрывков лавы почти без пепла. На рис. 4.3а приведены копии регистрограмм записей АС в августе 1976 г. на расстоянии 1,9 км от кратера. Избыточное давление в фазе сжатия было заключено в пределах  $\Delta P = 10 \div 100$  Па, а длительность фазы сжатия  $\tau_+ = 0,1 \div 0,14$  с. Как будет показано далее, характерное  $\tau_+$  определяется размером кратера, который был значительно меньше на ЮП БТТИ по сравнению с кратером второго конуса СП БТТИ. Следует отметить, что соотношение АС по типам для вулканской деятельности на СП БТТИ и стромболианской на ЮП БТТИ существенно различалось. Если для СП БТТИ преобладали АС I ÷ III типов, то для ЮП БТТИ большинство АС относились к IV, V типам и очень редки были АС II, III типа.

Зависимость  $I_+ = f(\Delta P_+)$  для различных типов АС строилась для Южного прорыва по той же методике, что и для Северного прорыва БТТИ. Как видно на рис.4.4, наблюдается удовлетворительное совпадение кривой зависимости  $I_+ = f(\Delta P_+)$  для АС I типа и сильное различие кривой для АС IV+V типов по отношению к кривой для взрывов накладных зарядов (Смолий, Цейтлин, 1981).

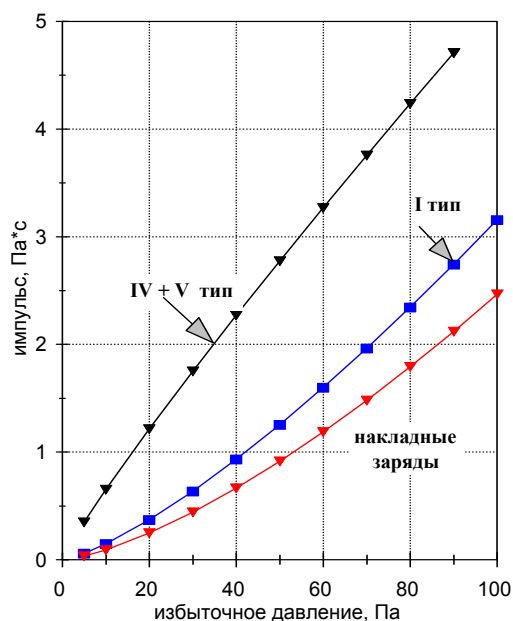


Рис.4.4. Зависимость импульса  $I_+$  фазы сжатия от избыточного давления  $\Delta P_+$  для различного типа АС, зарегистрированных во время извержения ЮП БТТИ в августе 1976 г.

Для понимания физики взрывного процесса большой интерес представляет связь акустического и сейсмического сигналов, т. к. соотношение амплитуд этих сигналов указывает на глубинность процесса. Если процесс поверхностный, то в воздух переходит большая доля энергии, чем в грунт. При заглубленном процессе энергия распределяется между акустическим и сейсмическим излучениями в другом соотношении.

Рассмотрим соотношение ВД и АС для Южного прорыва БТТИ в период I.XI.1976 г. с 07ч 20 мин до 07ч 25 мин. Регистрация велась на расстоянии 2,4 км от кратера, при этом

запаздывание АС относительно сейсмического сигнала составляло  $\Delta t = t_A - t_C = 5,0$ с. ВД за этот период времени носило спазматический характер с ярко выраженными пугами и колебаниями амплитуды от 2 до 15 мкм. При сравнении времени появления АС и моментов увеличения амплитуды ВД с учетом разности распространения акустических и сейсмических волн хорошей корреляции не наблюдается, хотя в отдельных случаях увеличение амплитуды ВД совпадает с моментами появления АС.

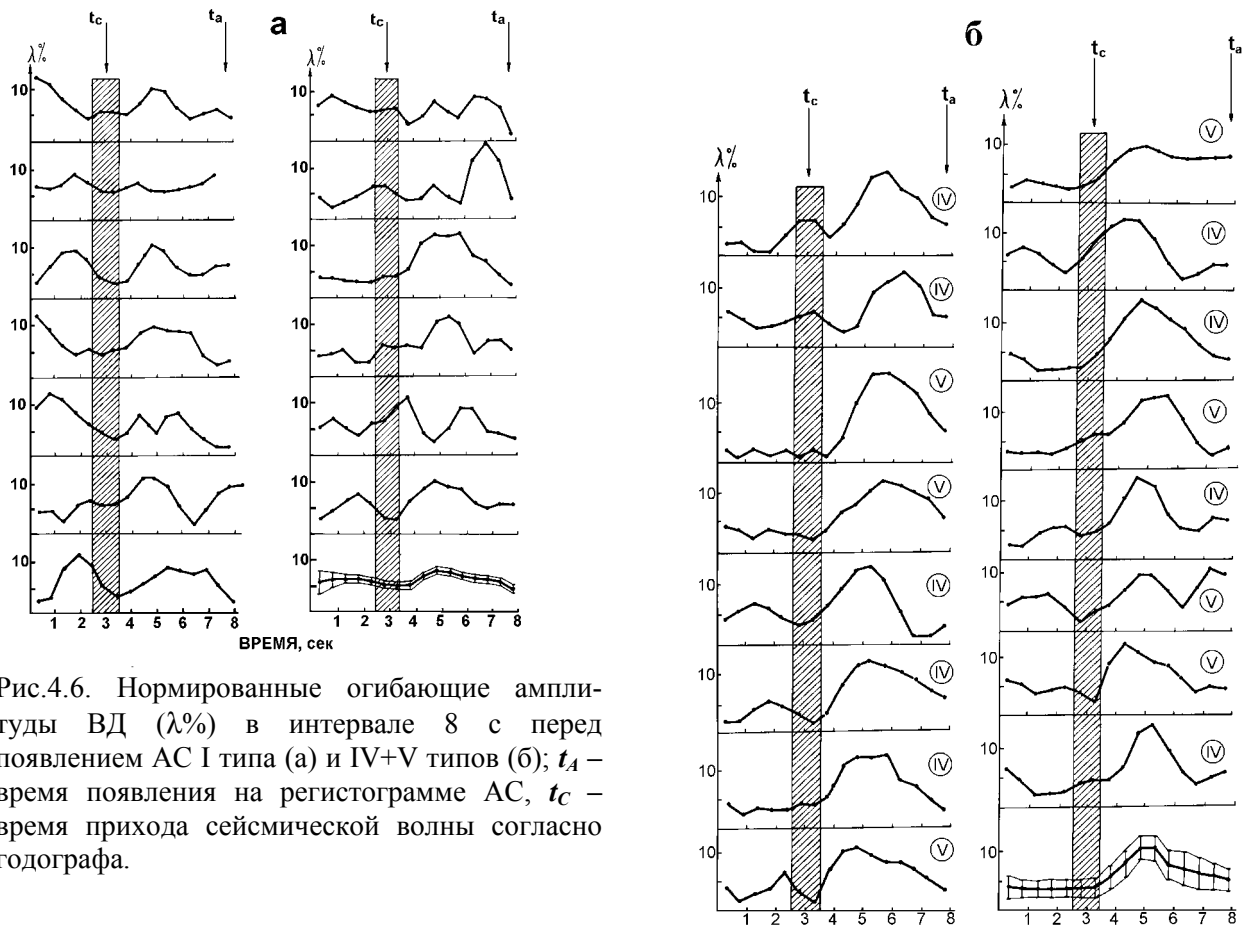


Рис.4.6. Нормированные огибающие амплитуды ВД ( $\lambda\%$ ) в интервале 8 с перед появлением АС I типа (а) и IV+V типов (б);  $t_A$  – время появления на регистрограмме АС,  $t_C$  – время прихода сейсмической волны согласно годографа.

На рис. 4.6 показаны нормированные огибающие ВД за 8 с перед появлением АС. На обобщенных кривых, полученных методом наложения эпох, наблюдается увеличение амплитуды ВД более чем в 2 раза за  $4,5 \div 5,5$  с перед появлением АС типов IV, V и видно слабое изменение амплитуды ВД для АС I типа. Данный факт указывает на то, что процесс, в результате которого генерируются АС I типа, действительно поверхностный. По-видимому, он связан с взрывами взрывоспособных вулканических газов над кратером вулкана при их взаимодействии с кислородом атмосферы, на что указывает меньшее значение  $\tau_+$  для АС I типа по сравнению с  $\tau_+$  для IV и V типов АС. При эксплозиях, генерирующих АС IV и V типов, часть энергии взрыва передается в грунт, что наблюдается на рис.4.6.б. Это является косвенным подтверждением заглуженности источника, которым может быть процесс



разрушения “пузыря” на поверхности лавы. Процесс, в какой-то мере, аналогичный взрыву взрывчатых веществ на выброс.

Анализ формы записи АС, сопровождавших извержение побочного кратера «Предсказанный» (вулкан Ключевской) в 1983 г., показал, что регистрировались те же I ÷ V типы АС (рис.4.7). Особенностью АС от извержения побочного кратера является приход второго слабого импульса через  $0,3\pm 0,4$  с., который связывается нами с нелинейными процессами в жерле вулкана (см. раздел 4.3).

Кроме того, выделяется ещё один тип АС (VI), которые отличаются от остальных “хвостом” затухающих колебаний. В работе (Ковалев и др. 1980) высказывается предположение, что такие АС могут быть следствием цепочки следующих друг за другом воздушных взрывов. На наш взгляд, механизм возникновения подобных сигналов обусловлен автоколебательным процессом скорости истечения, пепло-газовой смеси, когда после разрушения пузыря происходит сравнительно длительное ее истечение. Возможно, аналогичный процесс наблюдался при разрушении стеклянных сфер, наполненных газообразным фреоном в работе (Бейкер и др., 1986). Форма взрывной волны при разрушении таких стеклянных сфер напоминает убывающую синусоидальную волну с тремя отчетливо выраженными пиками, что объясняется частичной конденсацией фреона во время взрыва. Как известно, вулканические газы состоят, в основном, из паров воды, и процесс конденсации обязательно должен иметь место при вулканических взрывах.

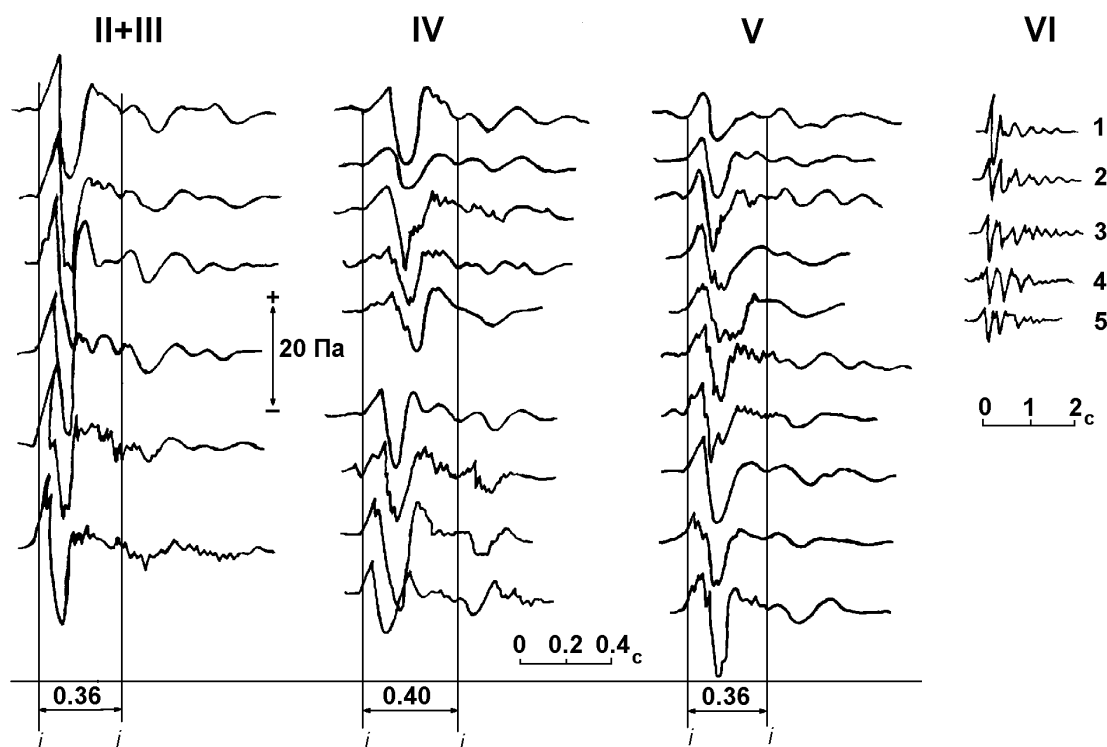


Рис.4.7. Примеры записей АС, зарегистрированных на станции К, во время извержения побочного кратера вулкана Ключевского «Предсказанный», и их разбиение по типам.

Среди АС побочного кратера «Предсказанный» наиболее часто регистрировались АС II и IV типов, практически не наблюдались АС I типа. Для сравнения АС, зарегистрированных на Южном прорыве БТТИ и побочном кратере «Предсказанный» (ПРД), в таблице 4.4 приведены их среднестатистические параметры. Причём для акустических сигналов Южного прорыва БТТИ все параметры приведены к расстоянию  $r = 3,9$  км по эмпирическим зависимостям работы (Смолий, Цейтлин, 1981).

Таблица 4.4

Основные параметры АС побочного кратера «Предсказанный» и ЮП БТТИ и их тротиловый эквивалент

Тип АС	Извержение	$\Delta P_+$ , Па	$\tau_+$ , с	$\Delta P_+$ , Па	$\tau_+$ , с	$\alpha$ $\tau_+/\tau_-$	$\beta$ $\Delta P_+/\Delta P_-$	$\gamma$ $I_+/I_-$	$Q_p$ , кг	$Q_I$ , кг	$Q_p/Q_I$
II	ПРД	11,9	0,07	14,8	0,09	0,78	0,80	0,62	9,6	20	0,5
	БП БТТИ	104,9	0,21	104,0	0,30	0,70	1,00	0,70	1003	2693	0,4
IV	ПРД	6,1	0,09	8,9	0,12	0,76	0,70	0,53	2,3	10,7	0,2
	БП БТТИ	39,6	0,36	42,2	0,51	0,71	0,93	0,66	126	1419	0,1

Отличие АС кратера «Предсказанный» от ЮП БТТИ выражается в том, что АС для первого извержения хуже сбалансированы:  $\beta = 0,7 \div 0,8$ . Объединяет АС обоих извержений различие тротиловых эквивалентов  $Q_p$  и  $Q_I$ , оценённых по  $\Delta P_+$  и  $I_+$ , отношение которых составляет  $\sim 0,5$  для АС III типа и  $\sim 0,2$  для АС V типа. Различие тротиловых эквивалентов обусловлено большей длительностью фазы сжатия для наблюдаемых ВУВ по сравнению с УВВ от накладных зарядов.

По-видимому, такое различие можно объяснить двумя причинами. С одной стороны,  $\tau_+$  зависит от диаметра кратера (см. раздел 4.2.1). С другой стороны, как показали эксперименты на ударной трубе (Гельфанд и др. 1985), структура ударных волн при наличии в камере высокого давления (КВД) аэровзвеси твёрдых частиц отличается от структуры ударных волн при заполнении КВД чистым газом. При одном и том же давлении в КВД при наличии аэровзвеси формируются ударные волны меньшей интенсивности, но большей длительности. Очевидно, образование пепла и шлака при «вулканических взрывах» увеличивает продолжительность времени фазы избыточного давления. По этой причине для оценки энергии процесса следует отдавать предпочтение эмпирическим формулам определения энергии по импульсу.

Типы АС, сопровождавшие выбросы вулкана Карымского в 1970÷1972 гг. Если АС, зарегистрированные при извержениях, описанных выше, возникали во время стромболианской активности (**барботирующий режим**), то во время извержения вулкана Карымского АС сопровождали отдельные выбросы (эксплозии), описание характера которых дано в разделе 3.1. Выбросы, разнесенные во времени, предоставляют возможность провести сопоставление параметров АС и сейсмической волны, образованных одним и тем же процессом выброса.

В конце 1972 г. кратер вулкана имел блюдцеобразную форму диаметром 220 м, на дне которого аэровизуально хорошо просматривались следы отдельных выбросов в виде воронок диаметром 10-50 м. В этом случае логично рассматривать такие выбросы, как аналог взрывов взрывчатых веществ на выброс. Как известно (*Рид, 1974*), при взрывах на выброс форма ВУВ зависит от глубины заложения заряда (рис.4.8). При этом начальная ударная волна, прошедшая сквозь грунт, действует на воздух как поршень, образуя импульс «наведенной грунтовой ударной волны» (I на рис.4.8); вслед за ним следует импульс «выхода газа» (II на рис. 4.8), когда происходит прорыв газов и образуется воронка.

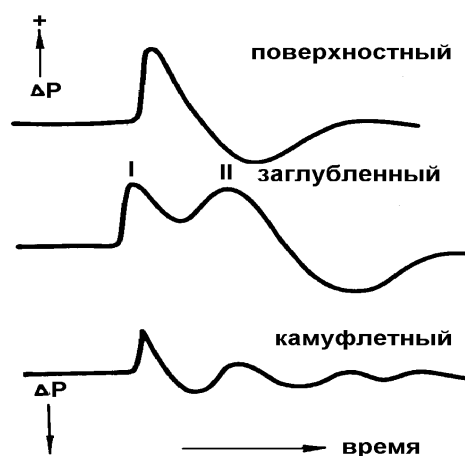


Рис. 4.8 Зависимость импульса давления в воздушной ударной волне при взрыве на выброс от глубины заложения взрыва по *Д.В. Риду (1974)*.

При контактных взрывах и взрывах на малых глубинах наблюдается только второй импульс, при камуфлетных взрывах генерируется только первый импульс. При этом при одной и той же энергии взрыва,  $\Delta P_+$  и максимальная амплитуда сейсмического сигнала будут определяться глубиной заложения взрыва.

Во время извержения вулкана Карымского в 1970 –1972 гг. ВУВ I типа были чрезвычайно редки; основную массу составляли ВУВ II типа, реже регистрировались IV и V типы. Причем в некоторых случаях регистрируемый АС (рис.4.9.г) имеет классическую форму ВУВ от заглубленных взрывов, приведенную на рис. 4.8. Параметры АС, а также соотношение  $\Delta P_+$  и максимальной амплитуды эксплозивных землетрясений ( $A^{max}$ ) качественно указывают на вариацию глубины заложения выбросов:

1. Поверхностные выбросы сопровождаются ВУВ II типа с  $\Delta P_+ > 15$  Па и  $\tau_+ = 0,4 \pm 0,2$ с. Для таких выбросов характерно истечение из жерла вулкана пепло-газового материала со сверхзвуковой скоростью. Эксплозивные землетрясения для этих выбросов имеют  $A^{max} < 3$  мкм (рис. 4.9.а).

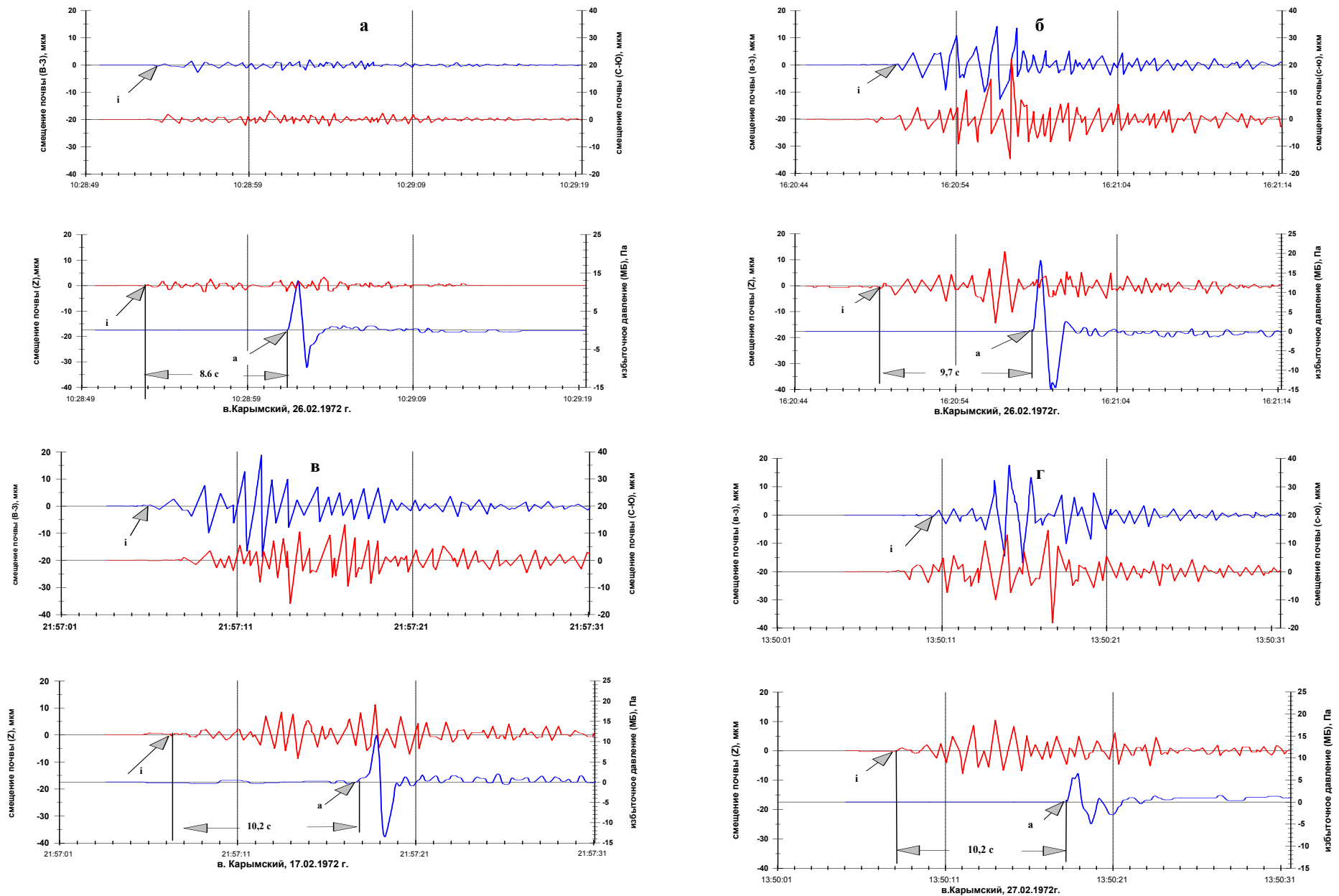


Рис.4.9. Образцы записей акустических сигналов и эксплозивных землетрясений, сопровождавших отдельные эксплозии в Карымский в 1970 г.

2. Выбросы с промежуточной глубиной очага сопровождаются АС, которые можно отнести к ВУВ II типа. Максимальная амплитуда эксплозивных землетрясений превышает  $A^{max} < 10$  мкм (рис. 4.9.б,в). В обоих случаях ВУВ имеют задний фронт отрицательного импульса, близкий к экспоненте. Экспонента заднего фронта отрицательного импульса, по-видимому, обусловлена процессом резкой конденсации паров воды, количество которых в вулканических газах доходит до 92%.

3. Заглубленные выбросы сопровождаются ВУВ V типа с небольшим избыточным давлением  $\Delta P_+ < 5$  Па и  $\tau_+ = 0,8 \pm 0,2$  с. Максимальная амплитуда эксплозивного землетрясения для этих выбросов значительно больше, чем для поверхностных -  $A^{max} > 10$  мкм (рис. 4.9.г)

Процесс вспенивания и фрагментация магматического расплава с образованием пирокластических продуктов извержения в результате работы расширения растворенных в магме газов при её дегазации зависит от таких факторов: характера режима дегазации магмы (*барботирующий или дисперсионный*); свойств магмы; массового расхода магмы; состояния верхней части выводного канала. Независимо от типа активности, вулканические акустические сигналы диапазона 1÷10 Гц в атмосфере по форме записи и параметрам импульса давления могут быть разбиты на VI типов, которые, в общем, отражают многообразие физических процессов, непосредственно сопровождающих дегазацию расплава.