

4.4. Оценка количества взрывного газа, участвующего в извержениях стромболианского типа

Для трех извержений стромболианского типа (*барботирующий режим*): Южный прорыв Большого трещинного Толбачинского извержения 1976 г.; прорыв Предсказанный – побочное извержение вулкана Ключевского, 1983 г.; терминальное извержение вулкана Ключевского, 1987 г., по акустическим сигналам, возникающим во время разрушения газовых пузырей, определялся объем взрывного газа. При этом считалось, что АС излучаются из кратера в результате всплытия и разрушения газового пузыря на поверхности маловязкой лавы и представляют собой слабые воздушные ударные волны. Разрушающийся газовый пузырь считался неидеальным взрывным источником с малой плотностью энергии.

В акустическом приближении по форме акустической волны в атмосфере, зарегистрированной на некотором расстоянии R от источника, можно определить объем вытесненного взрывом воздуха (*Губкин, 1970*):

$$DV = \frac{4\rho p}{c_0} \int_0^{\phi} I(R, \phi) d\phi, \quad (4.11)$$

где ρ_0 – плотность атмосферного воздуха, τ – время действия фазы сжатия.

Для подтверждения применимости данной формулы к нашему случаю исследовалось движение газа в результате внезапного расширения первоначально сжатого сферического объема с помощью математического моделирования. Избыточное давление в сфере задавалось от 5 до 10 атм, а радиус изменялся от 1 до 10 м. Импульс образовавшейся волны вычислялся спустя 0,1 с после начала движения. Причем изменения объемов сфер при расширении до давления окружающей среды в зависимости от начальной энергии сжатого газа рассчитывались при условии адиабатического расширения по импульсу образовавшейся волны. Сравнение результатов этих вычислений позволяет считать определение вытесненного в процессе расширения объема по импульсу образовавшейся волны вполне приемлемым даже на расстояниях регистрации сигнала, не соответствующих акустическому приближению.

Энергия взрывного процесса для отдельного выброса определялась по формуле:

$$E_0 = \frac{2}{\gamma - 1} P_0 DV, \quad (4.12)$$

а энергия акустической волны –

$$E_a = \frac{4\pi R^2}{c_0 C_0} \int DP_+^2 dt, \quad (4.13)$$

где ρ_0, C_0, P_0 – плотность, скорость звука, давление атмосферы, соответственно, γ – показатель адиабаты, R – расстояние между источником и пунктом регистрации.

Для всех рассматриваемых случаев вычислялись указанные выше характеристики взрывного процесса. Причем при вычислении I_0 избыточное давление на границе “пузыря”, расширившегося до атмосферного давления, вычислялось, исходя из акустического приближения:

$$I_0 = \frac{\Delta P_a \cdot \phi_+}{2}; \quad \Delta P_a = \frac{\Delta P_+ \cdot R}{a}; \quad a = C_0 \cdot \tau_+$$

В таблице 4.7 приведены среднестатистические значения параметров ВУВ и характеристик взрывного процесса для всех трех извержений.

Таблица 4.7.

Среднестатистические значения ВУВ и параметров взрывного процесса

Извержение	N	Параметры ВУВ				\bar{I}_0 , Па·с	$\bar{\Delta V}$, м ³	\bar{E}_0 , Дж	\bar{E}_a , Дж	E_a/E_0 , %
		$\bar{\Delta P}_+$, Па	$\bar{\tau}_+$, с	$\bar{\Delta P}_-$, Па	$\bar{\tau}_-$, с					
Южный прорыв БТТИ	22	49,3	0,13	43,5	0,20	142	8230	$2,9 \cdot 10^9$	$5,2 \cdot 10^7$	1,8
Предсказанный	16	1,9	0,08	2,3	0,09	11	209	$7,6 \cdot 10^7$	$1,9 \cdot 10^5$	0,25
Вершинный кр. в. Ключевского	18	0,28	0,24	0,37	0,36	6,1	761	$2,710^8$	$2,3 \cdot 10^6$	0,1

На рис.4.25а,б приведены зависимости вычисленных объемов вытесненного воздуха отдельных взрывов от величины импульса и энергии акустического источника в билогарифмическом масштабе для всех трех извержений. Несмотря на некоторую обособленность полей точек для каждого извержения, в основном, точки образуют сравнительно компактные области. В обоих случаях коэффициент корреляции довольно высок ($r_1 = 0,74$; $r_2 = 0,84$). Методом наименьших квадратов получены следующие уравнения регрессии:

$$\lg(V, \text{м}^3) = (0,99 \pm 0,08) \cdot \lg(I_0, \text{Па} \cdot \text{с}) + 1,74;$$

$$\lg(V, \text{м}^3) = (0,59 \pm 0,03) \cdot \lg(E_0, \text{Дж}) - 0,54.$$

Среднее отклонение $\lg V$ составляет в первом случае 0,37, а во втором – 0,28. Следует отметить, что отдельно для каждой серии наблюдаемая дисперсия значительно меньше и варьирует в пределах $0,13 \div 0,17$ для первой зависимости и $0,11 \div 0,30$ - для второй. Наибольшая дисперсия наблюдается для объемов, вычисленных для извержения вершинного кратера вулкана Ключевского, где регистрация осуществлялась на значительном расстоянии (14,6 км).

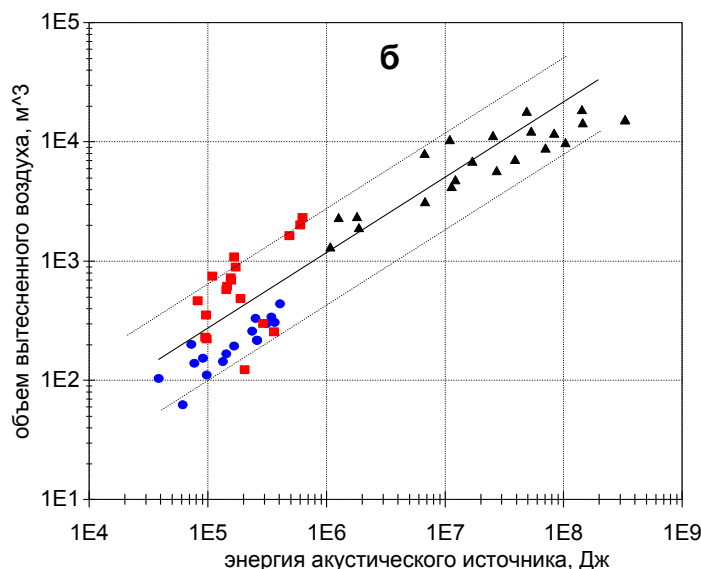
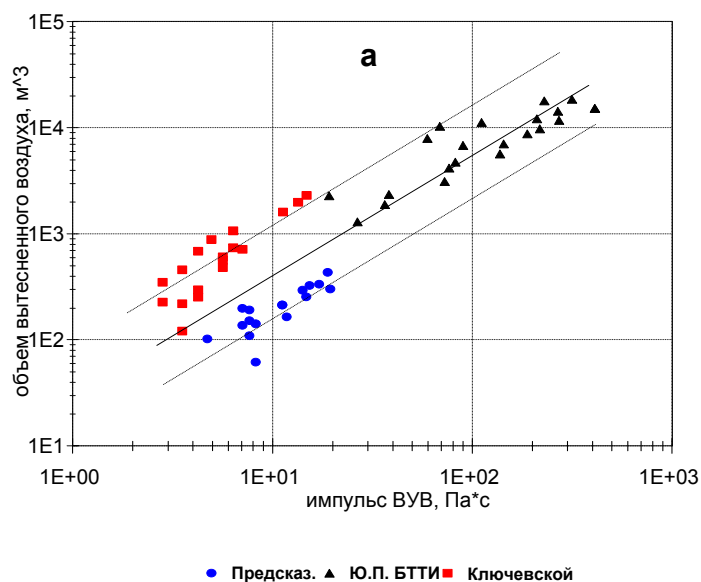


Рис.4.26 Зависимость логарифма объема вытесненного воздуха при разрушении газовых пузырей во время извержений стромболианского типа от логарифма начального импульса АС (а) и логарифма энергии акустического источника (б).

Учитывая интервал между выбросами Δt , рассчитывался объемный расход газа Q_o . Считая, что основная доля газа состоит из водяного пара, объемный вес которого при $T=1000^\circ\text{C}$ равен $0,17 \text{ кг/м}^3$ (Вукалович, 1966), определялся весовой расход газа Q_e (табл. 4.8). Наибольший весовой расход взрывного газа из всех рассмотренных случаев приходится на Южный прорыв БТТИ ($Q_e = 308 \text{ кг/с}$); на порядок меньше составляет расход взрывного газа из вершинного кратера вулкана Ключевского в 1987 г.

Определим весовое содержание взрывного газа и сравним полученные результаты с оценками, сделанными другими методами. Для определения весового содержания газа для ЮП БТТИ была использована средняя оценка расхода лавы, выполненная на основании аэро-

фотограмметрических измерений объемов лавовых потоков на разные даты, которая составила $\bar{Q}_o = 0,25 \text{ м}^3/\text{с}$ (Федотов и др., 1984). При допущении постоянства расхода газа в течение всего извержения весовое содержание газа, вычисленное по параметрам акустических волн, составило $\chi = 0,5\%$.

Во время извержения побочного кратера Предсказанный с дискретностью 3-5 дней регулярно измерялся расход лавового материала (Хренов и др. 1985). В рассматриваемый нами период, когда наблюдалось резкое кратковременное усиление активности, расход составлял $1,25 \cdot 10^4 \text{ кг/с}$. В этом случае весовое содержание взрывчатого газа, вычисленное по параметрам акустических волн, составляло 0,2%.

Эти оценки следует считать максимальными, так как для измерений выбирались наиболее интенсивные записи АС, которые хорошо читались на регистрограммах, что приводило к завышению среднего объема газа для единичного выброса.

Таблица 4.8.

Весовое содержание взрывчатого газа для некоторых извержений стромболианского типа, оцененное по воздушным волнам

Извержение	Газ					Лава			$\chi\%$
	$\Delta V,$ м^3	$\Delta t,$ с	$Q_o,$ $\text{м}^3/\text{с}$	$\rho,$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$Q_v,$ $\text{кг}/\text{с}$	$Q_o,$ $\text{м}^3/\text{с}$	$\rho,$ $\text{кг}/\text{м}$	$Q_v \cdot 10^{-4},$ $\text{кг}/\text{с}$	
Южный прорыв БТТИ	8324	4,5	1816	0,17	308	25	2300	5,8	0,5
Предсказанный	216	2	108	0,17	18,4	5	2500	1,2	0,2
Вершинный кратер в.Ключевского	760	4,2	179	0,17	30,4	-	-	-	

Сравним полученные оценки весового содержания взрывчатого газа с оценками, выполненными на основании других методов. Наиболее изученное извержение в этом плане – Южный прорыв БТТИ. На основании уравнения баланса энергий (потенциальной энергии газового пузыря и кинетической энергии выброса) в работах (Слезин, Федотов, 1981; Слезин, 1990) сделаны оценки средней массы газа на один выброс $\sim 100 \text{ кг}$ и для весового содержания газа, которое близко к 0,1%. Эти оценки следует считать минимальными, так как при расчете предполагалось, что вся энергия сжатого газа переходит в кинетическую энергию твердых продуктов.

В октябре 1976 г. с кромки кратера И.А. Меняйлов (Меняйлов и др. 1984), определил площадь жерла и скорость выделения газов, по которым вычислялся расход газа, который составил $1300 \div 1400 \text{ м}^3/\text{с}$. При допущении, что расход газа во время извержения изменялся мало, весовое содержание взрывчатого газа оценивается в $0,4 \div 0,5\%$.

Так как оценка весового содержания газа для ЮП БТТИ, вычисленная по параметрам акустических волн, совпадает с оценкой натуральных измерений, то ее следует признать вполне приемлемой.

В таблице 4.7 видно, что наибольшее количество энергии взрывного процесса переходит в акустику на Южном прорыве БТТИ – 1,8 %, в то время как на побочном извержении «Предсказанный» – 0,24%, а на вершинном кратере вулкана Ключевского всего 0,1%.

Во всех случаях разрушение газовых пузырей можно рассматривать как источник с малой плотностью энерговыделения, так как энергия взрывной волны на большом расстоянии от центра сферического химического взрыва с учетом реального уравнения состояния воздуха составляет ~ 5% энергии взрыва (Губкин, 1970). Обращает на себя внимание отличие соотношения энергий взрывной волны к энергии процесса почти на порядок для Южного прорыва БТТИ и для вулкана Ключевского. Не исключено, что причиной этого могли быть взрывоспособные вулканические газы, так как на Большом трещинном Толбачинском извержении отмечался ряд явлений (воздушные взрывы, горение газа), которые косвенно указывали на наличие взрывоспособной компоненты в ювенильном вулканическом газе. По-видимому, при разрушении пузыря взрывоспособные вулканические газы при смешивании с кислородом воздуха могли усиливать эффект «лопающегося пузыря».

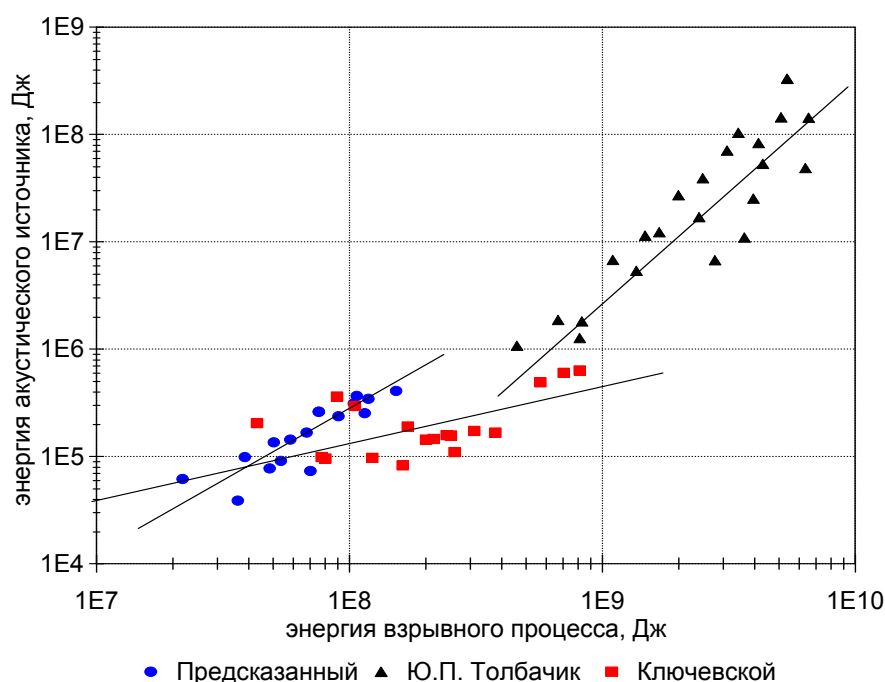


Рис.4.27. Зависимость энергии акустических волн E_a от энергии взрывного процесса E_0 .

На рис.4.27 показана зависимость энергии акустических волн (E_a) от энергии взрывного процесса (E_0) в билогарифмическом масштабе. Для двух извержений (Южный прорыв БТТИ, ПРД) точки на графике образуют довольно компактные области с высокими коэффици-

ентами корреляции ($r_{\text{БТТИ}} = 0,81$, $r_{\text{ПРД}} = 0,77$), в то время как для извержения вершинного кратера он составляет всего $r_{\text{КЛЧ}} = 0,28$. Столь малый коэффициент корреляции для зависимости $\lg E_a = f(\lg E_\theta)$ вулкана КЛЧ, по-видимому, объясняется регистрацией ВУВ в этом случае на довольно значительном расстоянии (14,6 км). Для Южного прорыва БТТИ наблюдается более сильная зависимость энергии акустического источника от энергии взрывного процесса по сравнению с ПРД и КЛЧ. Не исключено, что в этом случае так же существенную роль играют взрывоспособные вулканические газы.

Таким образом, при извержениях с **барботирующим** режимом, к которым относятся стромболианский и гавайский типы активности, с помощью дистанционного акустического метода можно оценить количество свободно выделяющегося газа. Если при этом осуществлять наблюдения за расходом лавового материала, то можно оценить весовое содержание взрывного газа.