

Оценка энергии взрывов на вулкане Алаид по акустическим сигналам

П.П. Фирстов¹, М.А. Лобачева², Д.И. Будилов¹

¹Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, Россия

²Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, г. Петропавловск-Камчатский

Введение

Действующий вулкан Алаид расположен на острове Атласова Большой Курильской гряды (рис. 1). Он находится на расстоянии 30 км к северо-западу от острова Парамушир. Алаид является самым северным и самым высоким вулканом Курильских островов.

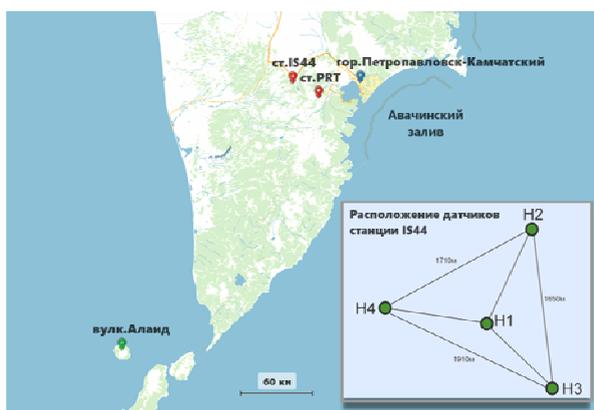


Рис. 1. Расположение вулкана Алаид и ближайших акустических станций на полуострове Камчатка. На врезке показано конфигурация группы микробарографов на станции IS44.

Вулкан Алаид имеет базальтовый состав пород (SiO_2 49-53%) и для него характерны извержения стромболианского типа. Предыдущее терминальное извержение вулкана Алаид происходило в мае – июне 1981 г., через 87 лет после предшествующего

в 1894 г. Отдельные выбросы пепла и пара продолжались до конца марта 1982 г. [4].

Вершина вулкана после извержения 1981 г. представляла собой взрывной кратер размером 1300*900 м и глубиной 200 м, широко открытый к югу. Внутри него находился шлаковый конус высотой 250 м. На аэрофотоснимках кратера и вершины вулкана в этот период дешифрировался разлом северо-восточного простирания, рассекавший вулкан строго по центру [4].

Начало нового терминального извержения вулкана Алаид было отмечено группой KVERT 01.10.2015 г. (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>). Извержение продолжалось весь 2015 г. и первое полугодие 2016 г.

На спутниковых снимках, любезно представленных Д.В. Мельниковым, видно, что в процессе извержения в основном кратере сформировался насыпной конус, а на юго-западной кромке кратера образовалась субтерминальная бокка - источник лавового потока протяжённостью ~300 м (рис. 2). Эффузивный центр и расположение фумарол на кромке кратера на этих же снимках трассирует разлом северо-восточного простирания, выделенный в работе [4].

К сожалению, сейсмическая станция у подножия вулкана Алаид не работала, поэтому источниками информации об извержении вулкана Алаид в 2015-2016 гг. были космические снимки и волновые возмущения в атмосфере, регистрируемые акустическими станциями Камчатки.

Аппаратура и методика наблюдений

В настоящее время для наблюдений за инфразвуковыми сигналами в атмосфере, в рамках Договора о Всеобъемлющем Запрещении Ядерных Испытаний (ДВЗЯИ), работает 60 инфразвуковых станций, распределенных по поверхности земного шара. Одна такая станция IS44 расположена на Камчатке в поселке Начики в 299 км от вулкана.

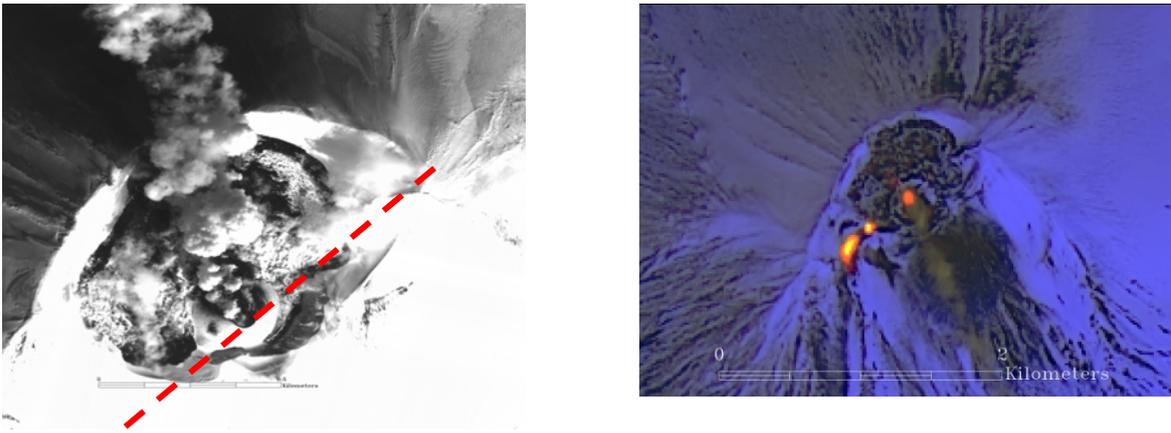


Рис. 2. Спутниковые снимки (Landsat 8) за 22.03.2016 г. (а) и 10.05.2016 г. (б), предоставленные Д.В. Мельниковым. Пунктиром выделена разломная зона по [4].

На IS44 стоит антенна с апертурой ~ 1.8 км на базе четырех микробарографов MB2000 производства Франции (рис. 1, врезка), что позволяет определять азимут прихода звукового луча. За счет конфигурации расположения микробарографов, близкой к равнобедренному треугольнику, антенна имеет почти круговую диаграмму направленности и позволяет определять азимут и кажущуюся скорость прихода звукового луча со всех направлений от различных источников. Частота дискретизации на этой станции 20 Гц.

На распространение звукового луча в атмосфере сильно влияет изменение температуры, скорости и направления ветра с высотой. На больших расстояниях от источника звука измеренные уровни могут существенно отличаться как в большую, так и в меньшую сторону от значений, ожидаемых вследствие геометрического расхождения. Это объясняется тем, что звуковой луч, в зависимости от вертикального профиля эффективной скорости ($C_{эф}$), преломляется или по направлению к земной поверхности, или от неё. В случае градиента $C_{эф}$ больше нуля (температурная инверсия или рост скорости ветра с высотой) образуется теньевая зона, в которую прямая волна не попадает.

Расчет тротилового эквивалента взрывного процесса на вулкане Алаид

Энергетические оценки вулканического процесса представляют большой интерес с точки зрения баланса энергий. Процесс дегазации лавового материала на дневной поверхности сопровождается быстрым выделением вулканических газов, из которых более 90% пары воды. Это приводит к формированию пузырей и разрушению их на поверхности лавы при извержении базальтовых вулканов. При таком процессе возникают слабые воздушные ударные волны (ВУВ) [5]. ВУВ по мере распространения эволюционируют и распространяются на многие сотни километров в виде инфразвуковой волны [2]. В этом случае энергию такого взрывного процесса можно определять на основании параметров АС в виде тротилового эквивалента (Q). Для этих целей разработаны ряд методик, позволяющие определять энергию взрывного процесса по амплитуде избыточного давления (ΔP_0) и по величине импульса ($I_+ = \int_0^T \Delta P(t) dt$) – параметры ВУВ см. рис. 3 врезка.

Взрывы газовых пузырей при стромболианском типе извержения происходят на дне кратера. Продукты взрыва первоначально формируют криволинейный фронт головной волны, а затем происходит постепенное отделение фронта ударной волны от газов и взаимодействие его со стенками кратера. Образующаяся отраженная волна

движется по сжатой и нагретой головной волной среде с большей скоростью, догоняя головную и сливаясь с ней. В результате чего происходит формирование ВУВ, которая излучается в атмосферу кратером и в этом случае фаза сжатия (τ_+) определяется диаметром кратера. Поэтому «вулканический взрыв» можно рассматривать как процесс с низкой плотностью выделения энергии по сравнению с взрывчатым веществом.

На рис. 3 приведены образцы записей двух типов АС, зарегистрированных на станции IS44 ($R = 299$ км), возникших во время извержения в. Алаид в феврале 2016 г. Из формы записей следует, что зарегистрированные АС являются отраженными от стратопазузы, на что указывает фаза разряжения в первых вступлениях. Отличие в длительности периодов ($T_1=0.4$ с и $T_2=0.15$ с) можно объяснить размерами источников вершинного кратера и субтерминальной бокки.

Как показано в работе [5], в первом приближении радиус сферической области повышенного давления, которая служит источником зарегистрированных АС, можно определить, как, $a = C_0 \cdot \tau_+$, где C_0 – скорость звука. Принимая, что период в цуге АС $T \approx 2\tau_+$, то радиусы источников составляют $a_1 \approx 60$, $a_2 \approx 15$ м. Это согласуется с наблюдаемыми на космических снимках размерами эффузивных центров (рис. 2).

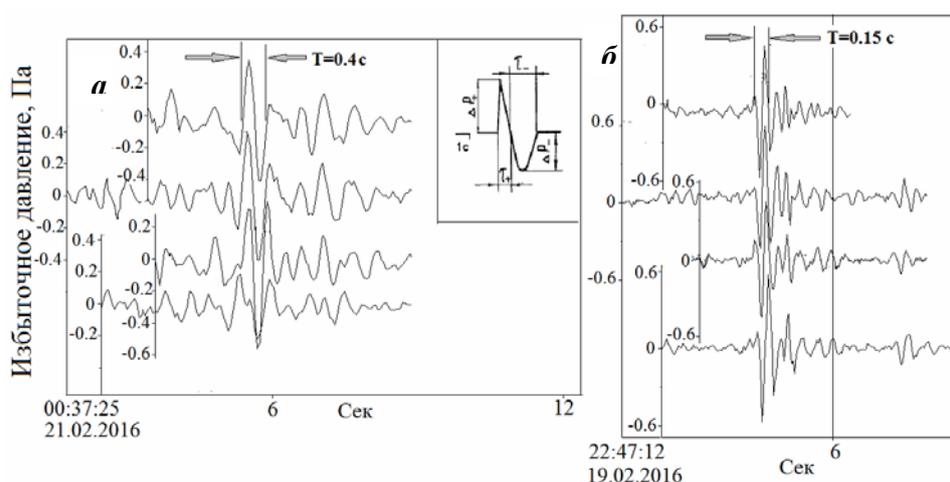


Рис. 3. Пример записи АС на станции IS44 при извержении вершинного кратера (а) и субтерминальной бокки (б). На врезке показаны основные параметры ВУВ вблизи источника.

В мировой практике для определения Q взрывов используются эмпирические зависимости изменения ΔP_+ и τ_+ с расстоянием. Как показано в работе [5] при расчете тротилового эквивалента по ΔP_+ и I_+ для АС от вулканов наблюдается существенное различие в тротильных эквивалентов Q_P и Q_I , связанное с размером источника вулканических взрывов. Поэтому наиболее правильный будет оценка тротилового эквивалента для них по I .

В работе [3] предложена эмпирическая зависимость для расчета на больших расстояниях от источника тротилового эквивалента по величине импульса $Q_I = f(I, R)$:

$$Q_I = f(I, R): Q_I [\text{кг}] = 1.38 \times 10^{-10} (I [\text{кг/сек}])^{1.482},$$

где Q_I [кг] - значение энергии взрыва в килотоннах (кт) тринитротолуола; I [кг/сек] - значение акустического импульса (I), определённого из записей инфразвуковых приходов, зарегистрированных в зоне слышимости на больших расстояниях. Преимуществом данной зависимости является то, что она может быть использована для лучевых траекторий АС от взрывов, расположенных на произвольной высоте над земной поверхностью, в том числе и независимо от формы волнового профиля начального акустического сигнала [3]. Поэтому зависимость $Q_I = f(I, R)$ рассматривается как более приемлемая для оценок Q при стромболианском типе извержений по АС, зарегистрированным в дальней зоне. Оценки Q для максимальных значений и средних значений ΔP_+ для обоих типов АС, зарегистрированных во время извержения вулкана Алаид в 2016 г. приведены в таблице.

С целью анализа правдоподобности данной оценки, рассмотрим оценки Q для извержений стромболианского типа рассчитанные по АС в ближней зоне в работе [7]. Во время извержения Южного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения (ЮП БТТИ) в августе 1976 г. регистрация слабых ВУВ осуществлялась на расстоянии 1.9 км. Во время извержения побочного кратера вулкана Ключеского (прорыв «Предсказанный») в мае 1983 г., АС регистрировались на расстоянии 3.9 км. Расчет Q для этих извержений производился по ΔP_+ и I_+ по эмпирическим формулам для взрывов накладных зарядов [7].

В этом случае оказалось, что отношение Q_p/Q_l заключено в пределах 0.1-0.5 в зависимости от типа ВУВ. Такое различие объясняется тем, что АС вулканического происхождения генерируются источниками с низкой плотностью энергии по сравнению с взрывами взрывчатых веществ.

Таблица. Оценка тротилового эквивалента отдельных эксплозий для некоторых извержений стромболианского типа

Извержение	a , м	ΔP_{cp} , Па	Q_{cp} , кг	ΔP_{max} , Па	Q_{max} , кг
в. Алаид, вершинный кратер	60	0.3	300	1.0	2000
Южный прорыв БТТИ	45	104.0	2700		
в. Алаид, субтерминальная бокка	22	0.1	10	0.3	65
Прорыв «Предсказанный»	15	14.8	20		

Примечание: a – расчетный радиус жерла вулкана; ΔP – избыточное давление; Q – тротильный эквивалент.

Заключение

Оценка тротилового эквивалента по АС, зарегистрированными в дальней зоне, для извержений стромболианского типа может осуществляться по методике, предложенной в работе [3]. Для АС от вершинного кратера в. Алаид Q_l на порядок превышает Q_l для субтерминальной бокки. При сравнении Q_l , рассчитанного для извержения в. Алаид по формуле из работы [3], наблюдается удовлетворительное согласие с Q_l , рассчитанного по эмпирическим формулам для ВУВ, зарегистрированными в ближней зоне с близкими размерами кратера.

Список литературы

1. Будилов Д.И., Фирстов П.П., Лобачев М.А. Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз / VI Сахалин. молодеж. науч. школа. Южно-Сахалинск, 3-8 октября 2016 г., сб. мат / Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2016. С. 220-226.
2. Куличков С.Н. Дальнее распространение звука в атмосфере (обзор) // ФАО. 1992. Т. 28. № 4. С. 3-20.
3. Куличков С.Н. Постоянство “акустического импульса” при дальнем распространении инфразвука в атмосфере // ФАО. 2002. Т. 38. № 5. С. 658-664.
4. Федотов С.А., Иванов Б.В., Флеров Г.Б. и др. Изучение извержения вулкана Алаид (Курильские острова) в 1981 г. // Вулканология и сейсмология. 1982. № 6. С. 9-28.
5. Фирстов П.П. Вулканические акустические сигналы диапазона 1.0–10 Гц и их связь с эксплозивным процессом. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2003. 90 с.
6. Фирстов П.П., Кравченко Н.М. О возможности использования воздушных волн для оценки количества эксплозивного газа, высвобождаемого во время вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4-5. С. 160-171.
7. Цейтлин Я.И., Смолий Н.И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. М.: Недра, 1981. 136 с.