

СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСПЛОЗИЙ ВУЛКАНА КАРЫМСКИЙ В 2001-2004 гг.

А. В. Сторчеус¹, С. П. Плотников²

¹Институт Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;

²Камчатский Филиал ГС РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail : sav@kscnet.ru

Введение

Эксплозивная деятельность вулкана Карымский носит преимущественно вулканский или вулканско- Stromboli-анский характер. Эксплозии вулкана значительно различаются по энергетике, о чем свидетельствуют такие параметры, как скорость разлета вулканических бомб, количество и высота выбросов твердого материала. Записи сейсмических и акустических сигналов, сопровождающих эксплозии, также подтверждают это различие.

Начальная скорость разлета бомб достигает 40-50 м/с. Высокая начальная скорость бомб свидетельствует о том, что в очаге взрыва избыточное давление газа может достигать от нескольких десятков до сотни атмосфер ($n \times 10$ МПа). Подобные величины давления достигают в котловой полости при взрывах на выброс химических веществ [11]. Такое давление не способна долго сдерживать ни лавовая, ни насыпная пробка, каптирующая жерло вулкана. Поэтому для вулканических эксплозий представляется разумным предполагать, что высокое избыточное давление газов под дном кратера, также как и при химических взрывах, возникает за довольно короткий промежуток времени – от долей секунды до первых секунд.

К настоящему времени существует множество гипотез, объясняющих причины и механизм внезапного повышения давления в очаге вулканического взрыва. Наиболее обоснованные гипотезы, объясняющие быстрый рост давления в очаге вулканического взрыва, представлены (в хронологическом порядке) в работах [5,8,1]. Но каждая из этих гипотез имеет свои недостатки и противоречия с наблюдаемыми фактами. Так, в работе [8] возникновение большого избыточного давления $\sim n \times 10$ МПа (сотни атм.) в очаге взрыва возможно в результате нескомпенсированного силой поверхностного натяжения давления при слиянии очень маленьких пузырьков газа (размером $n \times 10^{-7}$ м). И несмотря на то, что пепловые частицы диаметром $\sim n \times 10^{-7}$ м были экспериментально обнаружены при извержении вулкана Алаид в 1981 г. [7], так как один из максимумов спектра распределения частиц по размерам приходится на 10^{-6} м (1 мкм), предложенная автором [8] гипотеза не получила широкого распространения. Позднее автором работы [1] вместо сдерживающей избыточное давление в пузырьках силы поверхностного натяжения было предложено использовать условие существования жесткой оболочки застывшей магмы вокруг газовых пузырьков. Таким образом, газовые пузырьки оказывались как бы “вмороженными” в затвердевшую магму и сохраняли внутри себя то гидростатическое давление, при котором происходило их “замораживание”. Эта гипотеза, к примеру, противоречит наблюдаемой пластичности магмы даже с высокой вязкостью $\sim 10^{-7} - 10^{-8}$ Па·с на выходе из жерла вулкана, способной продвигаться по магматическому каналу и даже течь по склону вулкана. Внутри же магматического канала температура магмы выше, чем на выходе, и, следовательно, ее вязкость ниже; поэтому модель быстрого возникновения избыточного давления, предложенная в [1], также далека от совершенства.

Приведенные примеры свидетельствуют о том, что проблема быстрого возникновения большого избыточного давления в очаге вулканического взрыва еще далека от своего окончательного решения. С целью изучения механизма вулканических эксплозий нами были исследованы записи эксплозивных землетрясений вулкана Карымский за 2001 - 2004 гг.

Использованные данные и их анализ

Были исследованы цифровые записи эксплозивных землетрясений, полученные в 2001-2004 гг. телеметрической сейсмической станцией “Карымская” (КРМ), расположенной на расстоянии 1,7 км от кратера вулкана Карымский (54°03' с.ш., 159°27' в.д.) и

входящей в сеть радиотелеметрических станций КФ ГС РАН. Телеметрические станции были разработаны в Институте Вулканологии ДВО АН СССР В.А. Гавриловым с коллегами в 1981-1983 гг. [3]. Использование цифровых записей телеметрических станций значительно повысило точность обработки материала, что явилось решающим фактором в наших исследованиях.

Всего с помощью программы обработки землетрясений, разработанной Дрозным Д.В. и используемой в КФ ГС РАН, было обработано около 300 так называемых «эксплозивных землетрясений» (землетрясений, связанных с взрывной активностью вулкана). Для обработки выбирались землетрясения с достаточно четкими вступлениями Р и S волн, так как в процессе обработки основное внимание уделялось измерению S – P эксплозивных землетрясений. Примеры эксплозивных землетрясений приведены на рис. 1.

В результате обработки было выявлено:

1. величина S – P, характеризующая разность времен прихода S и P сейсмических волн на станцию КРМ, варьирует от 0.4 С до 1.2 С. Величина S – P для слабых эксплозий вулкана Карымский в 2001-2004 гг. хорошо совпадает с данными, полученными для эксплозивных землетрясений вулкана Карымский при исследованиях в 1978 г. [9] с использованием высокочувствительной телеуправляемой сейсмической станции «Тайга».

2. установлена закономерность, что чем сильнее эксплозия, тем меньше значение S – P. Вариации S – P логично объяснить изменением расстояния до пункта регистрации от места (глубины) начального возмущения в физическом процессе, порождающем сейсмические волны, и который, в конечном итоге, приводит к выбросу из кратера вулканического материала.

3. было замечено, что первые вступления на вертикальной составляющей для некоторых эксплозий имеют знак “минус”, что необъяснимо с позиции механики взрывов на выброс.

По результатам обработки эксплозивных землетрясений была предложена модель физического процесса, объясняющая: 1) - причины и механизм внезапного повышения давления газов под кратером; 2) - различие в энергетике эксплозий; 3) – выявленные особенности эксплозивных землетрясений.

Физическая модель эксплозий вулкана Карымский

В качестве основного источника энергии и избыточного давления, возникающего при вулканическом взрыве, предлагается рассматривать вулканический газ, заключенный не в маленьких пузырьках [1, 5, 8], а уже отделившийся в большие полости (пузыри), расположенные в вулканическом канале. Расчеты показывают, что при содержании газа ~4 вес. % для магм вулкана Карымский [2], отделение газа в пузырьки (нуклеация) будет происходить при гидростатическом давлении до 150 МПа (1500 атм.) на глубине до 4.5 км ниже уровня моря (рис. 2, А). Затем, при движении магмы вверх по каналу и уменьшении гидростатического давления происходит рост газовых пузырьков. Достижение газовых пузырьков состояния плотной упаковки зависит от количества растворенного в магме газа и количества пузырьков в единице объема магмы [8]. Если количество газовых пузырьков в состоянии плотной упаковки меньше 10^{18} в 1 м^3 , что соответствует размеру газовых

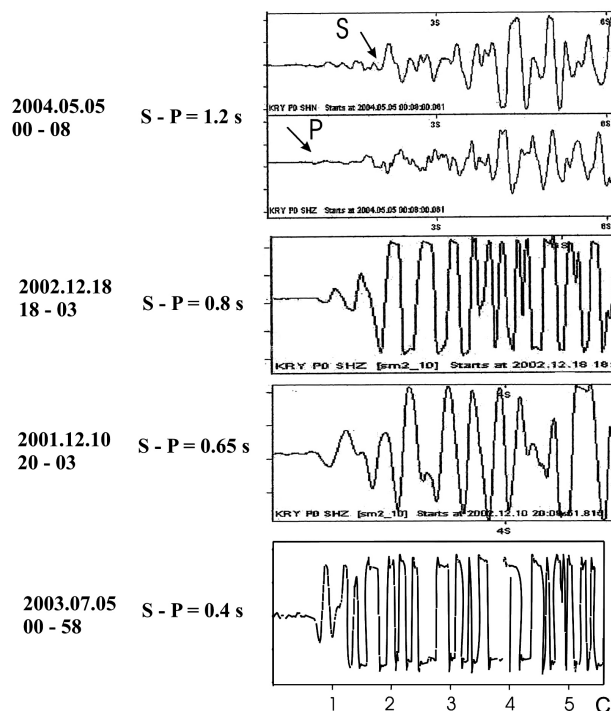


Рис. 1. Примеры записей эксплозивных землетрясений.

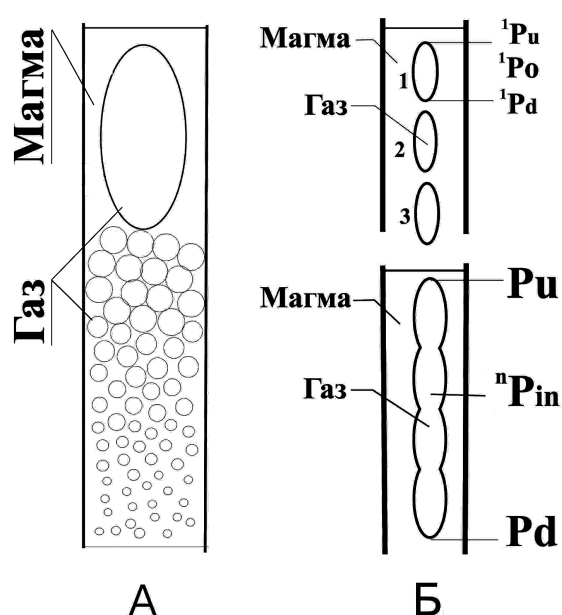


Рис. 2. Схема стадий процесса газоотделения: А – образование больших пузырей; Б (вверху) – снарядный режим течения магмы с газовыми пузырями; Б (внизу) – процесс слияния газовых пузырей.

части магматического канала в результате слияния газовых пузырей (полостей) в магматическом канале. В наших рассуждениях для простоты изложения предлагаемой модели будем считать, что пузыри имеют равные размеры (рис. 2, Б вверху), а плотность магмы по всему каналу постоянная. И, несмотря на то, что в реальности оба эти условия не выполняются, для рассмотрения принципиальной возможности предлагаемого механизма быстрого роста давления, при невыполнении этих условий не имеет существенного значения.

Рассмотрим распределение давления газа в пузырях. Давление газа на верхней кромке верхнего газового пузыря 1, равное 1P_0 , больше, чем гидростатическое давление в магме 1P_B на том же уровне. В то же время давление газа на нижней кромке, также равное 1P_0 , меньше гидростатического давления в магме на нижней кромке, также равное 1P_d . Давление P_0 равно половине суммы гидростатического давления ${}^1P_u + {}^1P_d$, т.е. ${}^1P_0 = ({}^1P_u + {}^1P_d)/2$. Собственно газовый пузырь всплывает вверх по каналу за счет этой разности давлений, – на верхней кромке под давлением газа магма выталкивается вверх и обтекает газовый пузырь, а на нижней кромке повышенное давление в магме поджимает пузырь вверх. Аналогично верхнему, в нижнем пузыре 2 существует такая же разность давлений на верхней и нижней кромках. Но давление 2P_0 будет больше, чем 1P_0 , ${}^2P_0 = ({}^2P_u + {}^2P_d)/2$, так как ${}^2P_d > {}^1P_d$ и ${}^2P_u > {}^1P_u$.

В момент слияния двух соседних газовых пузырей происходит скачок давления на верхней кромке верхнего пузыря на величину $({}^2P_0 - {}^1P_0)/2$ и одновременно снижение давления на нижней кромке пузыря 2 на такое же значение. Таким образом, на верхней и нижней кромках пузыря, образовавшегося в результате слияния двух соседних пузырей, возникают импульсы давления, направленные вверх. Если же слияние пузырей началось с некоторого n – го пузыря (рис. 2, Б, внизу), и если пузыри отделены друг от друга сравнительно тонкой стенкой магмы, в магматическом канале возникает волна избыточного давления, распространяющаяся вверх по каналу и разрывающая магматические перегородки, разделяющие пузыри. Волна избыточного давления может распространяться вверх по каналу со скоростью, превышающей скорость звука в газе (в водяном паре скорость звука при температуре магмы $\sim 1000-1200$ м/с) по следующим причинам: 1 – из-за высокого давления в газовых пузырях внизу цепочки; 2 – большого избыточного давления на фронте волны сжатия. Избыточное давление в этой волне будет нарастать с каждым

пузырьков 1 мкм, сила поверхностного натяжения не способна сдерживать дальнейший рост газовых пузырьков и при гидростатическом давлении $\sim 10-15$ МПа (100-150 атм) должно происходить слияние пузырьков газа и образование больших пузырей (полостей). Физические свойства магмы позволяют стабильно существовать газовым пузырям с размером по вертикали несколько десятков метров. К примеру, во время извержения 2 – го конуса БТТИ в его кратере наблюдались газовые пузыри, верхний диаметр которых достигал нескольких десятков метров. Максимальный размер газовых пузырей прямо пропорционален вязкости магмы. Такие газовые пузыри могут составлять цепочку в канале, заполненном частично дегазированной магмой (рис. 2, Б, вверху), как при снарядном режиме течения двухфазной жидкости. Впервые на схожесть вулканического процесса со снарядным режимом течения двухфазной жидкости обратил внимание В.А. Дроздин [6].

Рассмотрим теперь возможный механизм быстрого роста давления в верхней

новым слившимся пузырем, в результате достигая у дна кратера величины $({}^n P_0 - {}^1 P_0)/2$ или $5 - 7.5$ МПа (50 - 75 атм).

Полученные результаты и их обсуждение

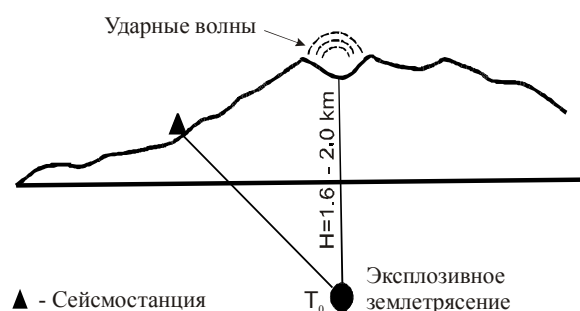
Рассмотренный выше механизм слияния газовых пузырей способен обеспечить скачкообразное повышение давления газа от нескольких десятков до сотни атм. в зависимости от газосодержания в магме, определяющего глубину возникновения и начало слияния больших газовых пузырей. Количество пузырей, участвующих в акте слияния, определяет энергию вулканического взрыва.

Значение $S - P$ зависит от глубины начала слияния газовых пузырей и расположения сейсмической станции относительно очага эксплозивного землетрясения, а также от величин скоростей распространения продольных - V_p и поперечных волн - V_s в среде. По данным [9], V_p и V_s для эксплозивных землетрясений у подножия вулкана значительно возрастают по сравнению со скоростями в верхней части вулканической постройки, что также влияет на величину $S - P$ в сторону ее уменьшения при заглаблении источника. Чем ближе очаг вулканического землетрясения к регистрирующей станции, тем меньше величина $S - P$.

Знак первого вступления в P - волне зависит от взаимного расположения очага начального возмущения и регистрирующей сейсмостанции. Для очагов эксплозивных землетрясений, расположенных выше сейсмостанции, первый импульс может приходиться от нижней кромки нижнего пузыря и регистрироваться как движение "от" станции и "вниз". Землетрясения, очаги которых расположены ниже уровня сейсмостанции, должны вызывать первую волну сжатия. А для самых высокорасположенных очагов эксплозий, также как и при промышленных взрывах на выброс, должен работать механизм образования сейсмических волн, как и при взрывах на выброс, и первой образуется волна сжатия, как было зафиксировано для трех слабых эксплозий в 1978 г. [9].

Интересно сопоставить полученные нами результаты с наблюдениями доктором К. Ишихара эксплозий вулкана Сакурадзима [10] 18-го Мая 1982 г. (рис. 3). Вокруг вулкана была расположена сеть из 7-ми сейсмических станций, по которой довольно точно определялись время в очаге T_0 и глубина очагов вулканических землетрясений (1.6 - 2.0 км ниже кромки кратера). Затем, через почти 2 с после начала землетрясения, видеокамера фиксировала выброс из кратера вулкана твердого материала и лавовых бомб и сферическую ударную волну, распространяющуюся в атмосфере со скоростью до 500 - 900 м/с. Скорость распространения возмущения от очага эксплозивного землетрясения до кромки кратера, в результате которого происходил вулканический выброс, составляла 1.2 - 1.4 км/с, что близко к скорости распространения ударной волны в газе (водяном паре) при температуре $\sim 1000^\circ \text{C}$, но меньше скорости распространения сейсмических волн в вулканической постройке (2.0 - 2.5 км/с). Таким образом, наблюдения доктора К. Ишихара вполне удовлетворительно укладываются в схему модели вулканического взрыва, предлагаемую нами.

Подобный механизм быстрого повышения давления в магматическом канале может работать и в вулканах с более вязкой и менее вязкой магмой, на которых может возникать снарядный режим течения магмы (как на Толбачинском извержении). На его основе можно достаточно просто объяснить механизм генерации длиннопериодных землетрясений, происходящих на глубинах до 5-ти км под кратером вулкана Ключевской и природу одного из типов длиннопериодного вулканического дрожания [4].



Выводы

На основе обработанных данных эксплозивных землетрясений вулкана Карымский в 2001-2004 гг. было установлено, что очаги вулканических землетрясений различных по энергии эксплозий, расположе-

Рис. 3. Схема регистрации эксплозий при извержении вулкана Сакурадзима 18 мая 1982 г. [10].

ны на различной глубине в магматическом канале. Основываясь на выявленных закономерностях взрывных землетрясений, была предложена модель вулканических взрывов вулкана Карымский, не противоречащая наблюдаемым и экспериментальным данным. В рамках предложенной модели можно достаточно просто объяснить различие в энергетике вулканических взрывов, генерацию длиннопериодных вулканических землетрясений на глубинах 0-5 км под кратером вулкана Ключевского и низкочастотного вулканического дрожания в результате возникновения импульсов давления в магматическом канале при слиянии больших газовых пузырей.

Авторы благодарят за помощь в работе и создание благоприятных условий для написания этой статьи Пинегину Т.К. и за помощь в оформлении Гирину О.А.

Список литературы

1. *Алидибиров М.А.* Физическая природа и механизм вулканических взрывов. Автореф. дис. доктора физ.-мат. Наук, М., 1988, 44 с.
2. *Богоявленская Г.Е., Наумов В.Б., Толстых М.Л., Хубуная С.А.* Составы расплавов и условия кристаллизации андезитов вулканов Авачинского, Безымянного, Шивелуча и Карымского (по данным изучения расплавных включений) // *Материалы II Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии «Вулканизм и геодинамика»*, Екатеринбург, 9-12 сентября 2003 г. С. 355-359.
3. *Гаврилов В.А., Воропаев В.Ф., Головицкова И.А. и др.* Комплекс радиотелеметрической аппаратуры ТЕСИ-2 // *Сейсмические приборы*. 1987. № 19. С. 5-17.
4. *Гордеев Е.И.* Природа сейсмических сигналов на активных вулканах: Автореф. дисс... док. физ.-мат. наук, М.1998. 30 с.
5. *Гущенко И.И.* Пеплы Северной Камчатки и условия их образования. М.; Наука, 1965, 144 с.
6. *Дроздин В.А.* Физическая модель вулканического процесса. М.; Наука, 1980. С. 92.
7. *Земцов А.Н.* Исследование твердой дисперсной фазы эруптивного вулканического облака: Автореф. дисс.... канд. геол.-мин. наук. М. 1986. 22 с.
8. *Сторчеус А.В.* К вопросу о природе вулканических взрывов // *Вулканология и сейсмология*. 1983. № 4. С. 72-78.
9. *Фарберов А.И., Сторчеус А.В., Прибылов Е.С.* Исследование слабой сейсмичности вулкана Карымский в августе 1978 г. // *Вулканология и сейсмология*. 1983, № 3, С. 78-89.
10. *Ishihara K.* Dynamic analysis of volcanic explosions // *J. of Geodynamics*. 1985. V.3. N 3 / 4. P. 327-349.
11. *Knox J.B., Terhure R.W.* Calculation of Explosion – Produced Craters – High Explosive Sources // *J. G. R.*, vol.70, № 10, May, 1965.

SEISMOLOGICAL INVESTIGATION OF KARYMSKY VOLCANO EXPLOSIONS DURING 2001-2004

A. V. Storcheus¹, S. P. Plotnikov²

¹*Institute of Volcanology and Seismology FED RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006, e-mail: sav@kscnet.ru*

²*Kamchatkan Branch of GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006*

Digital records of explosive earthquakes received by telemetric seismic station Karymskaja located at distance 1.7 km from a crater of the volcano had been investigated. During processing of seismic records it has been revealed that: 1 - value of S – P - difference of arrival times S and P seismic waves of explosive earthquakes to station

KRY varies from 0.4 s up to 1.2 s; 2 - for strong explosions the value S – P is less then for weak explosions; 3 - the first motion of P wave on a vertical component for some explosions are DOWN. As result of seismic investigation of explosive earthquakes physical model of volcanic explosions explaining the following three points has been proposed: 1) - the reasons and the mechanism of fast increasing of gas pressure under crater; 2) – difference in power of explosions; 3) - the revealed features of explosive earthquakes. As the basic energy source and abundant gas pressure it is proposed to consider assumption that before explosion the volcanic gas is concluded not in fine bubbles but already separated into the great cavities or bubbles located in the magma conduit. Such gas bubbles can make a chain in the magma conduit filled by partially decontaminated magma as in the slug mode of the current of a biphasic liquid. After merging of two or more neighboring gas bubbles the gas pressure sharply increases on the top edge of the upper bubble on value $nP_{in} = (nP_0 - P_0)/2$, n – quantity of bubbles. Thus the quantity of the bubbles participating in the process of merging defines energy of volcanic explosion. The mechanism of merging of gas bubbles considered above is capable to provide spasmodic increasing of gas pressure from several tens up to hundred bars.