

УДК 551.21

## О МЕХАНИЗМЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ 5 ДЕКАБРЯ 1997 г.

© 2001 г. В. Ю. Кирьянов, А. В. Сторчеус

*Институт вулканической геологии и геохимии РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006*

Поступила в редакцию 5.11.1998 г.

Вслед начавшимся 3 декабря 1997 г. форшокам сильного тектонического землетрясения, происшедшего в Камчатском заливе 5 декабря 1997 г., возросла сейсмическая активность вулкана Безымянный. Рой вулканических землетрясений закончился эксплозивным извержением вулкана 5 декабря 1997 г. Анализ вулканических землетрясений, предвзвравших извержение и происходивших во время него, показал их связь по времени возникновения с сильными землетрясениями в рое форшоков. Исследование сейсмичности в районе вулкана Безымянный позволило предположить, что возникновение роя вулканических землетрясений и извержение вулкана Безымянный произошли в результате “накачки” газовыми пузырьками верхней части магматической системы при прохождении в ней сейсмических волн тектонических землетрясений. В рамках предложенной модели можно достаточно хорошо объяснить основные особенности развития во времени сейсмических событий в ходе извержения вулкана Безымянный и в период его подготовки.

5 декабря 1997 г. в 6 ч 31 мин утра по местному времени в районе Северной группы вулканов Камчатки произошло очередное извержение вулкана Безымянный. Вулкан Безымянный после катастрофического извержения 30 марта 1956 г. находится в активной стадии роста экструзивного купола [1], сопровождающейся сильными эксплозивными извержениями.

В день извержения 5.12.1997 г. в 11 ч 27 мин по Гринвичскому времени в юго-восточной части Камчатского залива произошло землетрясение с моментной магнитудой  $M = 7.9$  и координатами эпицентра  $54.95^\circ$  с.ш. и  $164.23^\circ$  в.д. (по данным КОМСП ГС РАН). Это землетрясение предвзвралось сейсмической активизацией в области его эпицентра (начиная с 3 декабря было записано около 150 землетрясений с максимальной магнитудой  $M = 4.7$ ).

Пространственно разделенные (~200 км), эти события оказались связанными друг с другом на временной шкале. При этом сейсмическая подготовка извержения началась позднее начала роя форшоков, а само извержение произошло на 18 часов ранее основного землетрясения в Камчатском заливе.

Несмотря на то, что полевые работы на вулкане Безымянный по причине отсутствия финансирования не были проведены, анализ развития роев тектонических и вулканических землетрясений, а также данные визуальных наблюдений и метеорологических спутников позволяют уточнить ход извержения вулкана Безымянный и его связь с форшоками сильного землетрясения в Камчатском заливе.

**Визуальные наблюдения.** По сообщению группы KVERT (Kamchatka Volcanic Eruption Response Team), на основе данных КОМСП ГС РАН, 1–2 декабря вулкан был закрыт облаками. В предыдущие дни, по данным визуальных наблюдений из поселка Козыревск, над вулканом наблюдалась фумарольная деятельность с высотой подъема парогазовых струй до 50 м над куполом. 3–4 декабря высота подъема фумарол достигала 500 м над вулканом. Шлейф перемещался на юго-восток на расстояние 20 км от вулкана.

По данным американского метеорологического спутника AVHRR, 3–4 декабря на вулкане было зафиксировано горячее пятно, при этом в атмосфере отсутствовали следы вулканического пепла. Размеры горячего пятна непрерывно увеличивались во времени. Появление и рост размеров температурной аномалии на вулкане перед извержением можно объяснить разогревом купола Нового и сходом с него раскаленных обломочных лавин, но не пирокластических потоков, которые, как правило, изливаются после эксплозивной деятельности.

5 декабря в 6 ч 31 мин утра по местному времени (или 4 декабря в 18 ч 31 мин по Гринвичскому времени – GMT) началось извержение вулкана, сопровождавшееся выбросом пепла на высоту 6 км над уровнем моря (в 8 ч 30 мин утра). По визуальным наблюдениям из г. Ключи и пос. Козыревск, пепловое облако перемещалось на северо-восток на расстояние свыше 20 км. В 12 ч 15 мин местного времени пепловая туча достигла высоты 9 км, а к 13 ч – 10 км. Согласно информации, полученной от пилотов рейсовых самолетов, примерно в

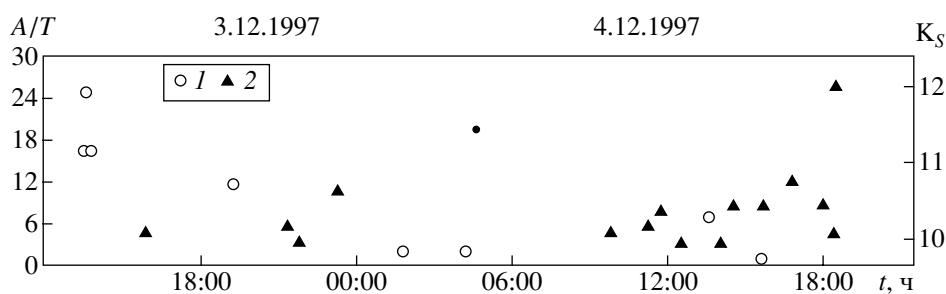


Рис. 1. Рои тектонических (1) с  $K_S \geq 9.5$  (шкала справа) и вулканических (2) с  $(A/T)_{\max} \geq 3$  (шкала слева) землетрясений, предшествовавших началу извержения 5.12.1997 г.

это же время максимальная высота пепловой тучи достигала 13 км над уровнем моря.

По данным спутника AVHRR, в 13 ч 30 мин местного времени пепловый шлейф был прослежен на расстоянии до 300 км к востоку от вулкана. Ширина шлейфа в районе побережья Тихого океана достигала 100 км. Наиболее плотная часть шлейфа наблюдалась в это время на расстоянии 125 км от вулкана.

5 декабря после 14 ч интенсивность извержения заметно снизилась и перешла в парогазовую стадию с высотой подъема шлейфа до 3.5–4 км над вулканом. 6 декабря парогазовый столб поднимался на высоту 1.5 км над вулканом; парогазовый шлейф прослеживался на расстоянии до 10 км к юго-востоку.

7 декабря высота парогазовых струй достигала 0.5 км над вулканом, парогазовое облако смещалось на юго-восток на расстояние до 1 км. Вплоть до 12 декабря спутники регистрировали аномальное горячее пятно на вулкане. 8 декабря средняя по площади термальная аномалия составляла  $+49^\circ\text{C}$  при температуре окружающей земной поверхности  $-15^\circ\text{C}$ , и было зафиксировано V-образное газовое облако, простирающееся на расстоянии до 40 км на восток от вулкана. 10 декабря термальная аномалия составляла  $+43^\circ\text{C}$ , при температуре окружающей земной поверхности  $-5^\circ\text{C}$ . 12 декабря температура аномального разогретого участка составляла  $+14\text{--}15^\circ\text{C}$ , при этом никакой существенной фумарольной деятельности на вулкане уже не наблюдалось.

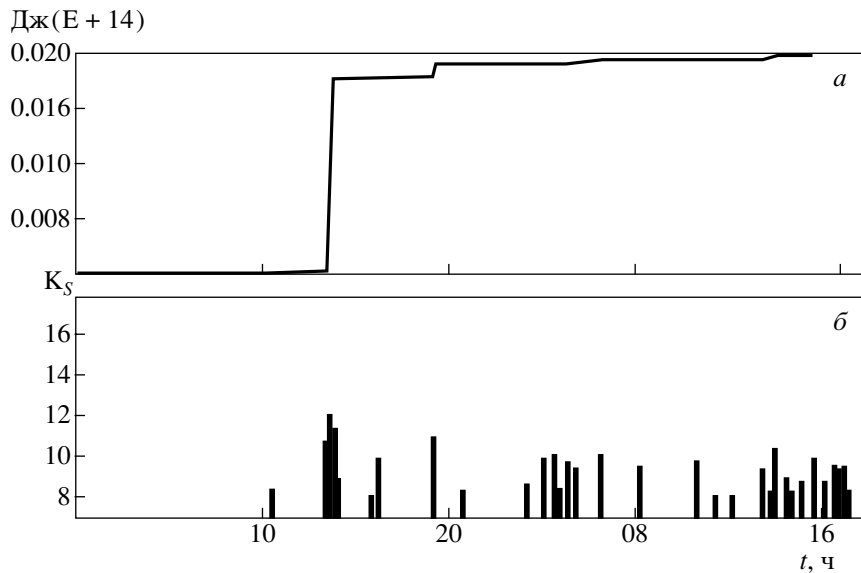
Таким образом, по визуальным наблюдениям с земли и космоса, пароксимальная стадия этого извержения началась в 6 ч 31 мин утра и закончилась в  $\sim 14$  ч местного времени 5 декабря 1997 г.

**Совместный анализ сейсмологических и визуальных данных об извержении и сравнение с тектонической активностью в районе землетрясения 05.12.1997 г.** Анализ сейсмограмм позволяет уточнить время начала и конца сейсмической подготовки и пароксимальной стадии извержения и их развитие во времени.

Рой вулканических землетрясений начался в 15 ч 56 мин 3.12.1997 г. GMT (здесь и далее в тексте и в рисунках используется время по Гринвичскому меридиану, Гринвич. время = местное время – 12 ч) землетрясением с  $(A/T)_{\max} = 5$  мкм/с на сейсмостанции Зеленая и насчитывал к началу извержения 16 уверенно выделенных по форме записи и по разности прихода различных групп сейсмических волн на сейсмостанции Зеленая вулканических землетрясений с  $(A/T)_{\max} > 3$  мкм/с (рис. 1). Все землетрясения относятся к 2–3 типам землетрясений вулкана Безымянный [3]. Максимальная скорость смещения грунта  $(A/T)_{\max}$  измерялась в поверхностных волнах и отражала сейсмическую энергию источника.

Эпицентры этих землетрясений построить не удалось, так как в районе вулкана Безымянный нет достаточного количества близко расположенных к вулкану сейсмических станций и даже на ближайшей к вулкану сейсмостанции Зеленая часто трудно уверенно выделить времена прихода различных групп сейсмических волн. Но землетрясения вулкана Безымянный отличаются от сходных с ними по форме записи землетрясений вулкана Ключевской большей длительностью цуга поверхностных волн и различной степенью затухания на сейсмостанциях Подкова и Водопадный по сравнению с записями сейсмостанции Зеленая. Это объясняется расположением сейсмических станций относительно вулканов Ключевской и Безымянный и различным эпицентральной расстоянием. Кроме того, учитывалось время вступления выделенных групп волн на эти станции. Эти признаки и были положены в основу разделения землетрясений вулканов Безымянный и Ключевской.

Первое из роя вулканических землетрясений вулкана Безымянный произошло через 2 ч 22 мин после начала роя форшоков тектонического землетрясения в Камчатском заливе. В самом начале роя форшоков, т.е. до извержения, выделилась значительная часть сейсмической энергии (рис. 2). Через  $\sim 2$  ч после тектонического землетрясения с  $K_S = 11$  в 19 ч 17 мин 3.12.1997 г. рой вулканиче-



**Рис. 2.** Временные закономерности роя тектонических землетрясений за (3–4) 12.97, предшествовавших извержению: *a* – график выделившейся сейсмической энергии; *б* – энергетический класс  $K_S$  землетрясений.

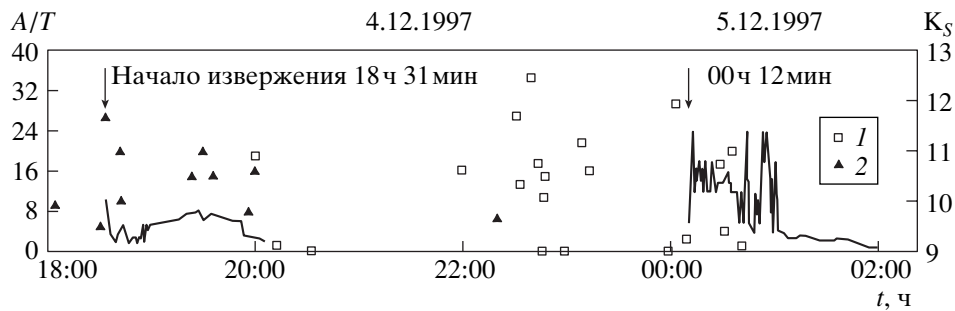


**Рис. 3.** График накопленных деформаций  $(A/T)_{\max}$  в рое вулканических землетрясений.

ских землетрясений продолжился (рис. 1). Эти два факта позволили предположить, что начало сейсмической активизации вулкана связано с началом роя тектонических землетрясений в Камчатском заливе.

За ~8.5 ч до начала извержения частота вулканических землетрясений возросла (рис. 1). График накопленных условных деформаций  $\Sigma(A/T)_{\max}$  в рое вулканических землетрясений, представленный на рис. 3, близок к экспоненциальной зависимости и имеет характерную для извержений вулкана Безымянный форму [3].

*Пароксизмальная стадия* извержения может быть восстановлена на основе совместного анализа сейсмологических данных и визуальных наблюдений. Из анализа сейсмограмм следует, что извержение началось 4.12.1997 г. серией из четырех сильных взрывов в 18 ч 31 мин, 18 ч 32 мин, 18 ч 34 мин и 18 ч 41 мин, сопровождавшихся вулканическими землетрясениями, самое сильное из которых имело скорость смещения  $(A/T)_{\max} = 26.5$  мкм/с на сейсмостанции Зеленая. Затем поверхностные волны землетрясений от более слабых выбросов сформировали цуги волн спазматического вулканического дрожания с  $(A/T)_{\max} = 8$  мкм/с, амплитуда которого после 19 ч 58 мин



**Рис. 4.** График сейсмических событий в пароксизмальную стадию извержения с 18 ч 31 мин 4.12.1997 г. до 01 ч 47 мин 5.12.1997 г. Линией показано изменение  $(A/T)_{\max}$  вулканического дрожания (шкала слева): 1 —  $(A/T)_{\max}$  вулканических землетрясений (шкала слева); 2 — энергетический класс  $K_S$  тектонических землетрясений (шкала справа).

резко уменьшилась, а после 22 ч 08 мин снизилась до уровня сейсмического фона (рис. 4). После этого, судя по сейсмограммам, в кратере вулкана продолжались редкие слабые выбросы.

Рост амплитуды вулканического дрожания вновь начался в 00 ч 12 мин 5.12.1997 г. до  $(A/T)_{\max} = 24$  мкм/с (обработано по сейсмостанции Крестовская), достигавшего такой величины во время отдельных сильных выбросов. Амплитуда вулканического дрожания начала резко уменьшаться после 00 ч 47 мин 5.12.1997 г., а после 01 ч 47 мин снизилась до уровня сейсмического фона.

Таким образом, можно уверенно выделить 2 периода усиления амплитуды вулканического дрожания, отражающей, как следует из [3, 4], энергию вулканических эксплозий, которые совпадают, по-видимому, с периодами пароксизмальной вулканической активности: с 18 ч 31 мин до 19 ч 58 мин 04.12.1997 г. и с 00 ч 12 мин до 00 ч 47 мин 05.12.1997 г. Это согласуется с визуальными наблюдениями и данными метеорологических спутников, так как после 00 ч 47 мин до 01 ч 47 мин 05.12.1997 г. в кратере вулкана еще происходили редкие, сравнительно слабые эксплозии, что подтверждается появлением на сейсмограммах отдельных цугов вулканического дрожания.

В начале первого периода, по-видимому, в результате сильных вулканических взрывов была выброшена из кратера вулкана лава, застывшая после последнего извержения. Гидростатическое давление над насыщенной газом магматической колонной уменьшилось, и началось эксплозивное извержение, сопровождавшееся сильным спазматическим вулканическим дрожанием.

Следует заметить, что второй период усиления сейсмической активности начался постепенным ростом амплитуды вулканического дрожания, а не сильным эксплозивным землетрясением, с которого, как правило, начинаются извержения вулкана Безымянный. Рост амплитуды вулканического дрожания начался через 6 минут после тектонического землетрясения в 00 ч 06 мин 5.12.1997 г. с  $K_S = 12.2$  (рис. 4). По-видимому, силь-

ные тектонические землетрясения, среди которых и сильнейшее за весь период форшоков землетрясение в 22 ч 41 мин 4.12.1997 г. (за ~1.5 ч до начала второй пароксизмальной стадии) с  $K_S = 12.6$ , происшедшие в период спада вулканической активности, вызвали новый подъем эксплозивной деятельности в кратере вулкана.

**Механизм извержения** можно объяснить исходя из двух возможных, по нашему мнению, гипотетических причин, связывающих это извержение с роением форшоков землетрясения в Камчатском заливе.

Первая гипотеза, учитывающая время задержки начала роя вулканических землетрясений относительно начала роя форшоков, предполагает сравнительно низкую скорость передачи сброса напряжений или деформаций при скольжении блока, на котором находится вулкан Безымянный, относительно Тихоокеанской плиты.

Вторая гипотеза основана на замедленной реакции газожидкостной среды (вязкая магма с пузырьками газа) на сейсмическую радиацию форшоков. Рассмотрим на качественном уровне обе гипотезы.

Исходя из первой, достаточно трудно объяснить такую низкую скорость передачи сброса напряжений или деформаций в твердой среде из района эпицентров тектонических землетрясений к вулкану Безымянный и некоторое непостоянство времени реакции вулкана на тектонические землетрясения. Даже после сравнительно сильных форшоков сейсмическая активность в районе Северной группы вулканов не возросла. Графики накопленных деформаций для ров форшоков и вулканических землетрясений также различны. Приведенные доводы позволяют предполагать, что причина связи этого извержения с тектонической активностью имеет более сложный характер, чем просто передача сброса напряжений из эпицентральной области тектонических землетрясений к вулкану Безымянный.

В рамках второй гипотезы картина связи вулканической активности с тектоническими землетрясениями выглядит следующим образом. Сейсмические волны землетрясений вывели из равновесного состояния магму, заполняющую магматический канал. Проходя через магматический расплав, насыщенный газом, сейсмические волны вызывали периодические изменения давления в нем. При этом во время прохождения фазы разрежения происходило появление и рост пузырьков газа в магме за счет диффузии газа из расплава в газовые пузырьки, а следующая за фазой разрежения волна сжатия не приводила систему расплав – газовая фаза в первоначальное состояние. Покажем это.

Давление  $P$  в газовом пузырьке прямо пропорционально гидростатическому давлению  $-P_r$ , поверхностному натяжению  $-\sigma$  и обратно пропорционально радиусу  $-r$  пузырька:

$$P = P_r + 2\sigma/r,$$

а изменение давления  $dP$  при прохождении сейсмических волн:

$$dP = -2\sigma(dr/r^2).$$

В конце прохождения волны разрежения в магме давление в газовых пузырьках будет меньше начального давления (так как радиус газовых шариков увеличится на  $\delta r$  за счет диффузии газа в пузырьки) на величину:

$$\delta P = -2\sigma \int_r^{r+\delta r} dr/r^2 = -2\sigma\delta r/r(r+\delta r).$$

Чтобы компенсировать это уменьшение давления, волна сжатия должна иметь большее пиковое давление на величину  $\Delta P = |\delta P|$ . Но если предположить, что волны разрежения и сжатия в расплаве имеют равные по абсолютной величине максимальные вариации давления и длительность, то во время прохождения волны сжатия давление в пузырьке окажется меньше пикового давления в жидкой фазе расплава на  $\Delta P$ . Кроме того, по этой же причине в фазе разрежения время диффузии газа обратно в расплав также будет меньше, чем из расплава в пузырьки. Следовательно, и поток газа из пузырька обратно в расплав во время прохождения в магме волны сжатия тоже будет меньше, чем из расплава в газовый пузырек.

Таким образом, за полный цикл колебания давления в газовых пузырьках, они увеличатся на некоторую величину по сравнению с первоначальным состоянием. На качественном уровне, можно объяснить механизм роста газовых пузырьков в результате прохождения сейсмической радиации сквозь газонасыщенную магму. Следует подчеркнуть, что такой эффект воздействия сейсмичес-

ких волн на магматический расплав возможен в том случае, когда газосодержание в магме на некоторой глубине достигает уровня насыщения.

Рост и слияние пузырьков газа приводит к росту давления в магме [2], о чем свидетельствует появление длиннопериодных вулканических землетрясений. В газонасыщенной магме этот процесс становится необратимым, приобретает лавинообразный характер, что отражают графики накопленных деформаций [3], и заканчивается эксплозивным извержением.

**Выводы.** Извержение вулкана Безымянный 5 декабря 1997 г. оказалось не случайно связанным по времени с роем форшоков землетрясения в Камчатском заливе 5 декабря 1997 г.

1. Рой вулканических землетрясений, предва- ривших извержение вулкана Безымянный, начался сразу после начала роя тектонических землетрясений – форшоков основного землетрясения в камчатском заливе. Отдельные вулканические землетрясения оказались связанными по времени возникновения с сериями сильных тектонических землетрясений.

2. Анализ хода извержения показал, что второй период усиления вулканической деятельности в пароксизмальную фазу извержения связан с сильными тектоническими землетрясениями роя форшоков, происшедших незадолго до второй активизации вулкана.

Рассмотренный нами механизм “накачки” газом магматического расплава достаточно хорошо согласуется с особенностями извержения и предваряющего роя землетрясений.

Авторы благодарны за полезное обсуждение статьи А.Ю. Озерову, В.А. Широкову и В.И. Горельчик. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 97-05-96600).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955–1964 гг. М.: Наука, 1965. 170 с.
2. Сторчеус А.В. К вопросу о природе вулканических взрывов // Вулканология и сейсмология. 1983. № 4. С. 72–78.
3. Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 120 с.
4. 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.

**On the Mechanism of the Besvmyannvi Eruption on December 5, 1997****V. Yu. Kiriyanov, A. V. Storcheus***Institute of Volcanic Geology and Geochemistry, Far East Division, Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

The foreshocks of a large tectonic earthquake that occurred in the Gult of Kamchatka on December 5, 1997 were followed by an increase in the seismic activity of Bezymyannyi Volcano. Analysis of the seismic events that occurred prior to and during the eruption revealed that the foreshock swarm had included large earthquakes. A study of the seismicity in the Bezymyanniy region suggested that the origin of the volcanic earthquake swarm and of the Bezymyannyi eruption had been associated with the “oumping” of gas bubbles into the upper segment of the magma system as a result of seismic waves traversing the system. A model is proposed to explain the basic patterns of the evolution of the seismic events in time during the preparation and occurrence of the Bezymyannyi eruption.