

УДК 551.21

## ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ ШИВЕЛУЧ И БЕЗЫМЯННЫЙ: ПРЕДВЕСТНИКИ И ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПОДЪЕМА МАГМЫ

***В.В. Иванов***

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский, 683006;  
e-mail: [victor@kscnet.ru](mailto:victor@kscnet.ru)*

В 20-м столетии на Камчатке после мощнейшей сейсмической подготовки произошло два крупнейших извержения андезитовых вулканов Безымянный (1955-1956 гг.) и Шивелуч (1964 г.) с объемами изверженных продуктов  $V = 3 \text{ км}^3$  и  $1.5 \text{ км}^3$  и эксплозивными вулканическими индексами  $VEI = 5$  и  $4-5$ , соответственно. На вершинах вулканов образовались огромные обвальнo-взрывные кратера, в которых происходят дальнейшие извержения. Извержение Безымянного произошло впервые в историческое время после 800 –летнего периода покоя, а извержение Шивелуча случилось после 14 - летней паузы. Кроме сейсмичности визуально не было отмечено никаких признаков готовящихся извержений. Сразу после пароксизма 30.III.1956 последовала 2.5-месячная фаза непрерывного роста экструзивного купола на Безымянном и к настоящему времени там произошло несколько десятков экструзивно-эксплозивных, а затем эксплозивно-эффузивных извержений с  $V < 0.1 \text{ км}^3$  ( $VEI = 2-3$ ). На Шивелуче после 16 -летней паузы произошло три умеренных экструзивно-эксплозивных извержения с  $0.1 < V < 1 \text{ км}^3$  ( $VEI = 3-4$ ), последнее из которых началось в 2001 г. и продолжается до сих пор. Показано, что эксплозивно – экструзивные извержения вулканов Шивелуч и Безымянный имеют различный характер и различные предвестниковые эффекты. В работе проведен детальный анализ извержений умеренной силы и их предвестников. Описаны механизмы подъема магм при извержениях разного масштаба.

### **Введение**

Вулканы, извергающие очень вязкие кислые по составу продукты, наиболее опасны. Они могут длительное время находиться в покое или сравнительно спокойно, в течение нескольких лет, выдавливать на поверхность земли огромные лавовые купола из блоков вязкой лавы (рис. 1). Но когда к поверхности земли поднимаются большие порции газонасыщенной взрывоопасной магмы, их извержения принимают катастрофический характер [1]: купола разрушаются, в стратосферу поднимаются мощные вулканские или субплинианские и плинианские пепловые шлейфы, представляющие опасность для авиации, на склоны обрушиваются обвальные лавины и раскаленные пирокластические, потоки, порождающие вторичные грязевые потоки (рис. 2) [3; 14; 15; 25]. Прогнозирование таких опасных явлений представляет собой большое практическое значение, но пока проблематично, в частности, в связи с различным механизмом их подготовки [33].

Пароксизмальные извержения андезитовых вулканов Безымянного в 1955-1956 гг. и Шивелуча в 1964 г. были самыми большими в 20- м столетии на Камчатке с объемами извержен-



Рис. 1. Огромный экструзивный лавовый купол вулкана Шивелуч 8 ноября 2007 г., растущий внутри кратера с размерами 1.7 x 1.8 км, который образовался во время последнего катастрофического обвально-взрывного извержения 12 ноября 1964 г. Диаметр основания купола около 1.5 км, а относительная высота порядка 0.5 км. Лавы Шивелуча чрезвычайно вязкие и на поверхность земли поступают не в виде жидких лавовых потоков, а выжимаются в виде обелисков из твердой породы, которые обламываются, образуя крупные блоки. Чтобы выдавить купол из вязкой магмы на такую высоту, избыточное давление магмы у его основания должно быть не менее 150 бар. Если к поверхности земли поступают более газонасыщенные порции магмы, они взрываются, порождая сильные взрывы и частично разрушая купол. Постройка купола крутая, неустойчивая, поскольку состоит из отдельных лавовых блоков. Вид с востока. Фото Ю.В. Демянчука.

ных продуктов  $V = 3$  и  $1.5 \text{ км}^3$  и с эксплозивными индексами [32]  $VEI = 5$  и  $4-5$ , соответственно [2; 14]. Несмотря на аналогичный, андезитовый состав лав, эти извержения и последующие за ними извержения, относящиеся к этим двум вулканам, существенно отличались друг от друга.

Извержение Безымянного в 1955-1956 гг. произошло впервые после почти 800 –летнего интервала покоя, предварялось и сопровождалось мощным роем вулканических землетрясений [3, с. 48-61]. Оно началось с фазы сильных пепловых взрывов, за которой последовал рост экструзии на границе между центральным кратером вулкана и старым экструзивным куполом. Одновременно происходили большие деформации постройки вулкана, вызванные грандиозными внедрениями свежей магмы в тело вулкана. После пароксизмального направленного взрыва 30.III.1956 в образовавшемся кратере сразу начался рост лавового купола, первые два с половиной месяца его рост происходил непрерывно, в 1957 г. была пауза в извержениях. Затем экструзивно – эксплозивные извержения стали происходить в среднем через полгода, а более сильные из них через 2-3 года, вплоть до настоящего времени [3, 16]. Извержения обычно начинались с выжимания жестких блоков очень вязкой лавы, что иден-



**Рис. 2.** Грибообразное пеплогазовое облако сильного взрыва на вулкане Шивелуч 29 марта 2007 г., во время его экструзивно – эксплозивного извержения. Облако не вышло за пределы тропосферы, абсолютная высота его верхней кромки около 10 км, что соответствует эксплозивному индексу VEI =3 [32]. Облако было снесено в восточном направлении на расстояние в несколько сотен километров и представляло опасность для авиации. Взрыв вызвал частичное разрушение постройки лавового купола и сопровождался мощными пирокластическими потоками, распространявшимися по руслам сухих рек в южном секторе вулкана. Фото Ю.В. Демянчука.

тифицировалось по появлению небольших пепловых эксплозий, за которым следовала главная взрывная фаза и более быстрый рост лавового купола [13; 5]. Начальная экструзивная фаза была выражена слабо, основной прирост купола происходил после главной взрывной фазы. Заметим, что во время растянутых интервалов между извержениями вулкан был спокоен [34, Р.381]. С 1965 г. на поверхности лавового купола стала появляться менее вязкая пластичная лава [10]. С 1977 г. эксплозивные фазы извержений обычно завершались излиянием лавового потока. Извержения в 1958 г. и в последующие годы относятся к **слабым (с объемом изверженных продуктов  $V < 0.1 \text{ км}^3$ )**, однако во время главных взрывных фаз пеплогазовые облака поднимались на высоты до 10 км, что соответствовало эксплозивному индексу VEI = 3, на склоны изливались пирокластические и вторичные грязевые потоки [2; 20; 30; 12].

Пароксизмальное извержение 12.XI.1964 на Шивелуче случилось после 14 летнего покоя и предварялось в течение всего 1964 г. мощным роением вулканических землетрясений. Извержение было обвальным-взрывным и очень кратковременным [19;25]. Быстрое прекращение роя вулканических землетрясений и последовавшая за этим длительная 16 - летняя пауза указывают на полную разгрузку магматической системы в результате извержения. Предыдущее извержений такой силы на вулкане было в 1984 г. [2]. Затем в образовавшемся кратере произо-



**Рис. 3.** 29 августа 2000 г. Самый сильный фреатический взрыв на экструзивном лавовом куполе вулкана Шивелуч, в серии взрывов, предвсравивших извержение вулкана, начавшееся в апреле 2001 г. Облако взрыва достигло тропопаузы, его абсолютная высота 9-10 км. По формуле 4 из [22] тепловая энергия мгновенного источника взрыва оценивается в  $2 \cdot 10^8$  МДж. Такое количество теплоты выделилось при охлаждении и кристаллизации  $\sim 100$  тыс. т магмы с температурой  $1000$  °С в результате взаимодействия ее с водой водоносных горизонтов (при теплоемкости магмы 1.7 МДж/кг). Это соответствует объему магмы примерно 30 тыс. м<sup>3</sup>. Фото А.В. Сокоренко.

шло три умеренных (с объемом изверженных продуктов  $0.1 \text{ км}^3 < V < 1 \text{ км}^3$ ) экструзивно – эксплозивных извержения: в 1980-1981 гг., в 1993-1994 гг. Последнее извержение началось в апреле 2001 г. и продолжается до сих пор (на март 2016г.) [14; 15; 6; 27; 26; 24]. Все умеренные извержения начинались с начальной, достаточно длительной (0.5 мес.) экструзивной фазы, за которой следовала главная взрывная фаза, наследуемая продолжительной (несколько лет) экструзивно – эксплозивной фазой. Заметим, что интервалы времени между извержениями Шивелуча были примерно на порядок больше, чем для извержений вулкана Безымянного. В отличие от Безымянного, за несколько лет до начала следующего извержения на лавовом куполе Шивелуча периодически происходили достаточно сильные взрывы (рис. 2), частота которых увеличивалась с приближением к началу извержения [5].

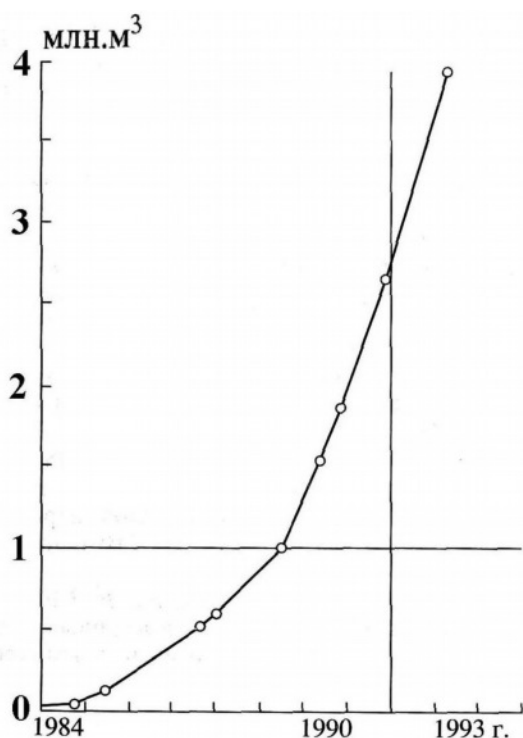
В данной статье принимаем, что под **извержением** подразумевается появление на поверхности земли магматических продуктов, обычно вязких лав. Взрывную активность на лавовом куполе Шивелуча или у его подножия, подобную 29 августа 2000 г. (рис. 3), связанную с взаимодействием поднимающейся магмы с водоносными горизонтами и с разрушением и выносом материала купола от предыдущих извержений, мы считаем **фреатической** и к извержению не относим.

Данные о сейсмичности, предваряющей и сопровождающей извержения вулканов Шивелуч и Безымянный, приведены в ряде работ [3; 34; 20; 19; 21; 4; 27; 24; 9; 8; 18; 17; 28; 35]. Важные результаты по геоморфологическим предвестникам извержений Шивелуча даны в работе В.Н. Двигало [5]. В книге С.Л. Сенюкова [17] приводится алгоритм прогноза извержений Безымянного вулкана, с учетом данных космической съемки, который позволил успешно спрогнозировать ряд взрывных фаз его извержений.

Извержения Шивелуча и Безымянного имеют различный характер и различные особенности предвестников. Для вулканических землетрясений, предварявших извержения вулкана Безымянного, П.И. Токарев выделил экспоненциальный вид нарастания со временем кумулятивного графика условных деформаций [20, с.73]. Напротив, для умеренных извержений вулкана Шивелуч характерен другой тип, с более медленным нарастанием графика по линейному закону [8]. Токаревым выделен также гиперболический тип графика перед катастрофическим извержением Шивелуча в 1964 г. [19]. Как указывалось выше, в отличие от Безымянного, умеренным извержениям Шивелуча в течение нескольких лет предшествовала длительная взрывная подготовка. Кроме того, умеренные извержения Шивелуча начинались с продолжительной экструзивной фазы, что для вулкана Безымянного не было характерно. Пока этим принципиальным различиям в подготовке и характере извержений для этих двух вулканов не было дано объяснения. Т. Минаками [31] указывал на образование после окончания извержений кислых вулканов вязких лавовых пробок в их питающих каналах, которые определяют характер следующих извержений и их предвестников. Моделирование продвижения и отвердевания магм в таких каналах рассматриваются в работе Федотова и Горицкого [23] и др. работах С.А. Федотова и его коллег. В данной статье мы попытаемся проанализировать различия в характере извержений и предвестников для Шивелуча и Безымянного и предложить их объяснение, базирующееся на различии в проницаемости их каналов для флюидов и магмы. Это является **целью работы**.

### **Предвестники извержений вулканов Шивелуч и Безымянный**

*Долгосрочные предвестники.* Для вулкана Безымянного долгосрочные (с упреждением  $T > 1$  года) предвестники были не характерны. П.И. Токарев отмечал [34], что **«во время растянутых (7-12 мес.) интервалов между извержениями в 1957-1961 гг. вулкан Безымянный был абсолютно спокоен»**. Напротив, для вулкана Шивелуч В.Н. Двигало по данным плановой аэрофотосъемки установил, что **«появлению первых порций свежей лавы на поверхности внутрикратерного купола вулкана Шивелуч предшествовала активная эксплозивная подготовка в течение нескольких лет»**. Для извержения 1993-1994 гг. она продолжалась с 1985 по апрель 1993 г. Скорость выноса вещества купола нелинейно возрастала со временем (рис. 4). За эти 8 лет с поверхности купола фреатическими взрывами было вынесено почти 4 млн. м<sup>3</sup> его вещества. В результате на вершине купола 1980- 1981 гг. сформировался огромный кратер размерами 250 x 350 м и глубиной 100 м, что позволило снизить



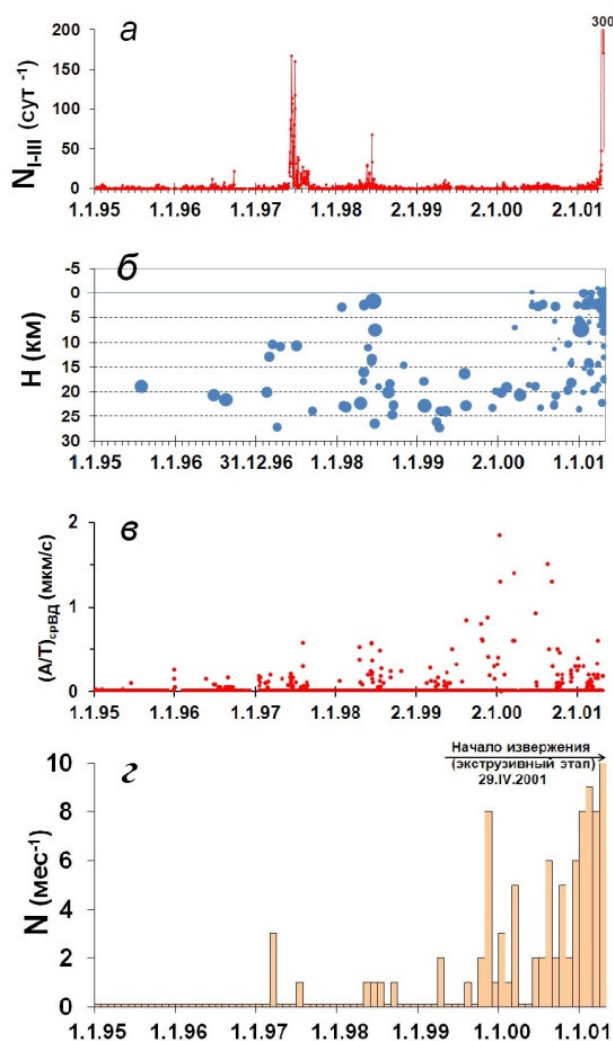
**Рис. 4.** Рост объемов вещества экструзивного купола вулкана Шивелуч, вынесенного фреатическими взрывами с 1984 до начала экструзивной фазы извержения (апрель 1993 г.) [5, с.15].

литостатическое давление на подводящий канал более чем на 25 бар. Поступление свежей лавы в апреле 1993 г. началось именно в этой воронке [5].

По данным А.Ю. Ждановой в 1992 г. перед началом извержения Шивелуча в апреле 1993 г. в кратере 1964 г. отмечалось возобновление активности тектонических нарушений, по которым отмечался прогрев и мощные фумаролы [7]. Часть этих зон располагалась вокруг экструзивного купола и, по-видимому, была связана с радиальными трещинами растяжения. Другие нарушения в кратере были вдали от купола, как линейные, так и дугообразные, длина их достигала 1.2 км. Это указывает на проницаемость тела вулкана для флюидов и на активизацию его геотермальной системы в результате интрузий магмы и взаимодействия ее с водоносными горизонтами. Очевидно, подобные трещины являются поверхностными проявлениями вулканотектонических нарушений, во время которых образуются вулканические землетрясения.

Нарастание взрывной активности наблюдалось В.Н. Двигало и перед извержением, начавшимся в апреле 2001 г. [24; 15]. Новые экструзии также образовывались в огромных эксплозивных воронках, причем последние возникали либо на границах экструзивных блоков купола 1993-1994 гг., либо у его основания. На рис. 3. показан самый сильный из фреатических взрывов, происшедший на Шивелуче 29 августа 2000 г.

Долговременное развитие сейсмичности и взрывной активности на вулкане Шивелуч перед извержением, начавшимся в апреле 2001 г. приведено на рис. 5. Основные особенности были следующими: а) фоновая сейсмичность на глубинах от 15 до 25-30 км; б) несколько роев вулканических землетрясений на меньших (от -2 до 10-15 км) глубинах, особенно с вес-

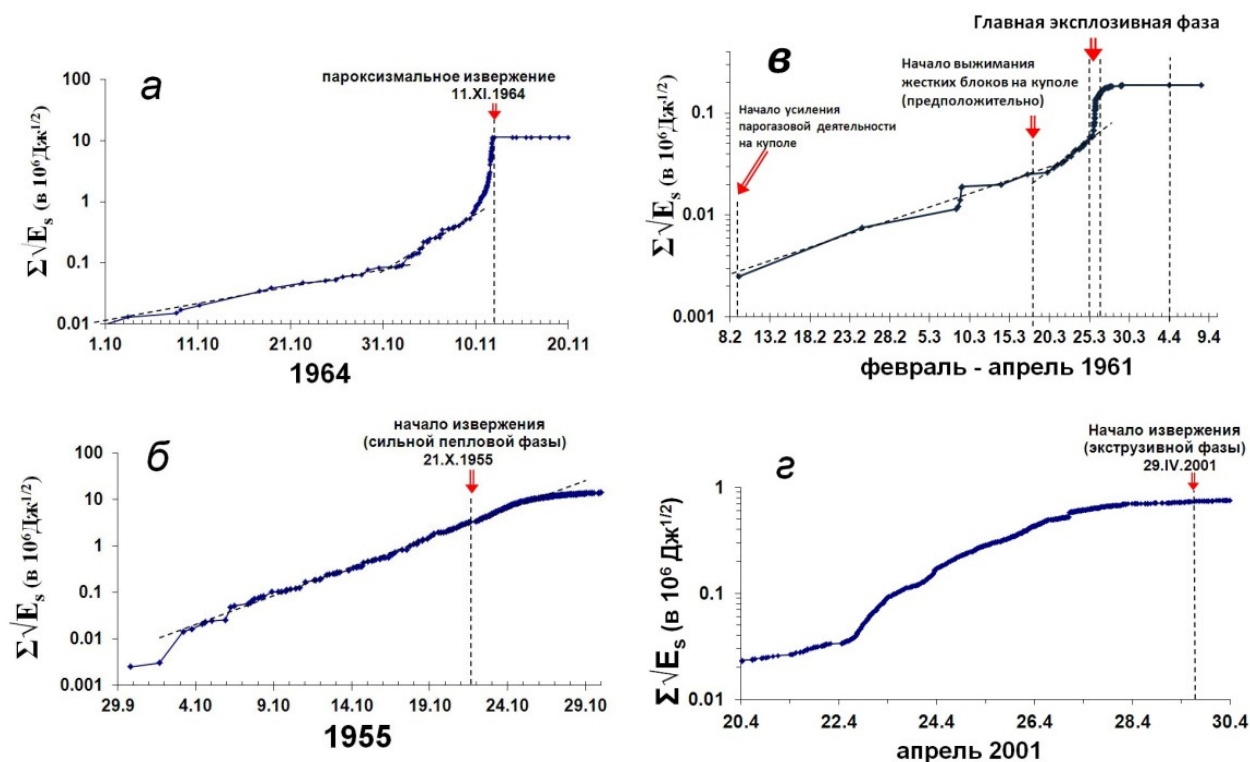


**Рис. 5.** Долгосрочные предвестники извержения вулкана Шивелуч, начавшегося 29 апреля 2001 г.: *а* и *в* – ежесуточные количества вулканических землетрясений II-III типов ( $N_{II-III}$ ) и отношения средних амплитуд вулканического дрожания к его периоду ( $A/T_{срвд}$ ); *б* – распределение вулканических землетрясений по глубине, *г* – ежемесячные количества фреатических взрывов на куполе с января 1995- по апрель 2001 гг. Данные из бюллетеней землетрясений ОМСП ИВ и КФ ГС РАН, каталога КФ ГС РАН и сообщений группы KVERT.

ны 2000 г.; в) мощный предваряющий рой с апреля 2001 г.; г) начиная с 1996 -1997 гг. нелинейное нарастание средних амплитуд вулканического дрожания и ежемесячных количеств взрывов на вулкане.

*Кратко – и среднесрочные предвестники (с временем упреждения  $T < 1$  года).* Как упоминалось во Введении, было выделено три основных класса сейсмологических предвестников для вулканов Шивелуч и Безымянный. Графики распределения во времени кумулятивных условных деформаций (сумм корней квадратных из энергий) для вулканических землетрясений I-III типов для представителей трех указанных классов извержений в полулогарифмическом масштабе показаны на рис. 6. Заметим, что экспоненциальные зависимости в этом масштабе изображаются в виде линейной аппроксимирующей функции.

Самое агрессивное, вначале экспоненциальное, а затем гиперболическое поведение условных деформаций было перед большим катастрофическим извержением Шивелуча 11



**Рис. 6.** Кумулятивные графики условных деформаций землетрясений I-III типов, предвалявших извержения вулканов Шивелуча в 1964 г. (а), Безымянного в 1956 г. (б), Безымянного в 1961 г. (в) и Шивелуча в 2001 г. (г). Время UTC. Стрелками на графиках показаны моменты начала извержений и их характерных фаз. Данные из [21] и из каталогов КФ ГС РАН.

ноября 1964 г. (12 ноября по местному времени). Извержение произошло на вертикальной асимптоте графика (рис. 6 а) [19].

Очень быстро, с ускорением по экспоненциальному закону, развивалась сейсмическая подготовка извержений вулкана Безымянного, как большого, начавшегося 21.X.1955 (рис. 4б), так и более слабого извержения в марте - апреле 1961 г. (рис. 6 в).

Увеличение крутизны графика 18.03.1961 совпадает с началом устойчивого появления пепловых облаков над вулканом, что можно интерпретировать как начало выдавливания жестких блоков лавы на экструзивном куполе Безымянного. Экспоненциальному закону также подчинялись сейсмические подготовки для целого ряда последующих слабых извержений этого вулкана [20, с. 75; 17].

Наиболее медленно, примерно по линейному закону, нарастали условные деформации перед началом умеренного извержения Шивелуча в 2001 г. Первое землетрясение предвещающего роя для этого извержения произошло 18.03.2000, устойчиво рой стал развиваться с 1.06.2000. Вначале график условных деформаций нарастал экспоненциально с малым показателем экспоненты, а примерно за неделю до начала извержения «выположился», что в полу-



логарифмическом масштабе означает линейную зависимость (рис. 6 г). Анализ показывает (здесь не приводится), что линейному закону подчинялась также краткосрочная сейсмическая подготовка умеренного извержения Шивелуча в апреле 1993 г. [27]. Обращает на себя внимание, что энергия сейсмической подготовки больших извержений на 2-2.5 порядка превышает таковую для умеренных и слабых извержений (рис. 6).

Таким образом, извержения Шивелуча и Безымянного имеют различный характер и различные особенности предвестников: 1) начиная с июля 1956 г. извержения Безымянного происходили с интервалом около 0.5 года, а Шивелуча с интервалом на порядок длиннее (7-16 лет); 2) умеренные извержения Шивелуча начинались с продолжительной (порядка 0.5 мес.) экструзивной фазы, что не было характерно для вулкана Безымянный; 3) в отличие от Безымянного, умеренным извержениям Шивелуча в течение нескольких лет предшествовала длительная (несколько лет) взрывная подготовка; 4) для Безымянного отмечалось быстрое экспоненциальное, а для Шивелуча медленное, по линейному закону нарастание энергии и частоты вулканических землетрясений перед извержением.

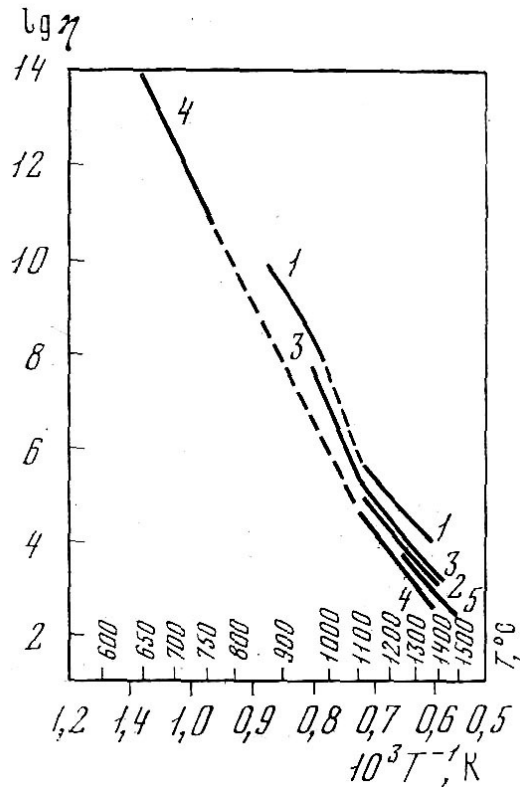
Заметим, что ряд извержений Безымянного вулкана, которые П.И. Токарев полагает более слабыми, не были связаны с заметными усилениями местной сейсмичности [20, рис. 17, с. 68]. Характерный пример приводится Г.С. Горшковым, когда на месте газовой бокки, образовавшейся в августе 1956 г., к концу 1956 – началу 1957 гг. при сравнительно низкой сейсмичности, по сравнению с предыдущей активностью, выросла новая большая доля купола [3, с.51]. В каталогах землетрясений Безымянного в это время сейсмической активизации не отмечено [21, с. 134-136].

### **О строении центральных питающих каналов вулканов Шивелуч и безымянный и возможных механизмах подъема в них магмы**

В вершинных кратерах многоактных вулканов происходят десятки и сотни извержений. Это предполагает наличие центрального питающего канала, как некой проницаемой области в земной коре, по которой расплавы из периферического магматического очага вулкана поступают на поверхность земли. Попытаемся объяснить существенные различия в характере извержений и предвестников для вулканов Шивелуч и Безымянный с точки зрения различной степени проницаемости их центральных питающих каналов для флюидов и магмы.

В зависимости от расхода магмы возможны три случая: 1) большой расход; 2) умеренный расход и сравнительно частые извержения; 3) меньший расход магмы и более резкие извержения. Рассмотрим эти случаи.

*Случай 1.* Если кислая магма продвигается по каналу непрерывно или без больших пауз, то канал остается постоянно проницаемым. Это имело место в течение первых месяцев после пароксизмального взрыва на Безымянном 30.III. 1956 (фаза непрерывного роста экструзивного купола) [3, с. 51]. В определенном смысле это происходит на вулкане Шивелуч и сейчас, начиная с апреля 2001 г. [6].



**Рис. 7.** Логарифм вязкости андезитов ( $\eta$ ) в пузах ( $\Pi$ ) в зависимости от температуры [11, с. 67].  
1  $\Pi = 0.1$  Па·с.

*Случай 2.* Если расход магмы уменьшается, то из-за ее охлаждения вмещающими породами и быстрого увеличения вязкости (рис. 7) происходит остановка течения магмы [23]. Магма сильно загустевает, но не достигает солидуса и в канале представляет собой очень вязкую лавовую пробку, непроницаемую, как для воды и флюидов, так и для магмы (**закрытая система**). Впрочем, новые порции свежей, газонасыщенной магмы способны продвигаться в канале на границах между более старыми инъекциями или на границах канала и консолидированной вмещающей среды. Либо они должны выдавливать более

старые охлажденные порции магмы, образуя на поверхности жесткие экструзивные блоки. В силу закрытости системы магма начинает подниматься к поверхности земли лишь после достижения ею достаточно большого избыточного давления, способного разрушить среду и создать **новые пути для ее продвижения**, что сопровождается быстрым с ускорением нарастанием сейсмичности. Поскольку среда плохо проницаема для воды, продвижение магмы почти не сопровождается ее взаимодействием с водой водоносных горизонтов, т.е. не возникает предваряющих фреатических взрывов. По этой причине не происходит сильного охлаждения и дегазации магмы. При достижении поверхности земли свежие, газонасыщенные порции магмы взрываются, разрушая остатки лавовой пробки. Это открывает систему и порождает быстрый рост новых долей экструзивного купола или излияние лавовых потоков.

Этот случай мы в основном относим к извержениям Безымянного вулкана. После почти тысячелетнего интервала покоя магма в центральном питающем канале вулкана охладилась, гидротермальная активность внутри него прекратилась, заполнив имеющиеся термоусадочные трещины измененными породами (см. случай 3 ниже). К 1955 году питающий канал вулкана, вероятно, был основательно консолидирован. Неудивительно, что в процессе начавшейся 29.IX.1955 сейсмической подготовки новые порции магмы вынуждены были прокладывать себе путь между кратером вулкана и старым куполом. Свежие, слабо измененные газонасыщенные порции магмы при достижении ими поверхности земли вызывали фазу сильных пепловых извержений в конце октября -ноябре 1955 г. [3, с. 27]. В работе [10] приводятся многочисленные случаи, когда рост новых долей купола Безымянного в 1965- 1974 гг. происходил между более старыми долями купола или у его основания. Впрочем, отмечены случаи появления свежих порций лавы и в воронках взрывов [10, с. 53; 16, с. 57], хотя для Безымянного это не было правилом.

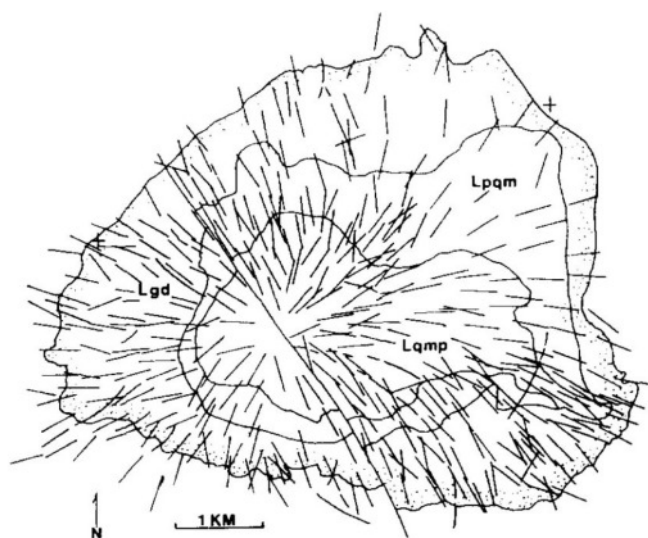
Условия закрытой системы, вероятно, были в процессе время сейсмической подготовки катастрофического извержения Шивелуча в 1964 г. Основная энергия предваряющего роя вулканических землетрясений выделилась в последние 2 дня перед извержением [19]. Масштаб внедрений, вызванные резким изменением тектонической обстановки в районе Алеутской структурной дуги был настолько большим [устное сообщение В.А. Широкова], что вероятно магма не успевала взаимодействовать с водоносными горизонтами. Визуально о приближении извержения нельзя было догадаться.

*Случай 3.* Если интервал между извержениями увеличивается еще больше, например, за счет снижения среднего расхода магмы, то за время покоя вулкана магма в канале достигает солидуса и продолжает охлаждаться дальше. В ней возникают огромные растягивающие напряжения, как вызванные кристаллизацией и связанным с этим уменьшением объема магмы на первые проценты [11, табл. 30 на с. 93 для плагиоклаза], так и термоупругими напряжениями при дальнейшем охлаждении отвердевшей магмы.

Изменения напряжения в изотропической упругой среде, связанные с изменениями температуры, даются выражением [29, Р. 268]:

$$\sigma_T = -E \cdot \alpha_L \cdot dT,$$

где  $E$  –модуль Юнга,  $\alpha_L$  – линейный коэффициент термального расширения, произведение  $E \cdot \alpha_L$  – упругий термомеханический параметр,  $dT$  – изменение температуры. Если напряжения сжатия полагаются положительными, то уменьшение температуры магмы вызовет уменьшение напряжений в магме на величину  $|\sigma_T|$ . Если принять величину  $E \cdot \alpha_L = -0.48 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{-1}$  [29, Р. 277], то охлаждение отвердевшей магмы на  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  ниже солидуса создает в ней дополнительные термоупругие растягивающие напряжения величиной около 1 кбара. Эта величина сравнима с давлением пород на глубине около 3 км, что должно приводить к разрывам тела интрузии и к появлению трещин растяжения в ней. На рис. 8 показан пример развитой сетки радиальных трещин растяжения в большом, древнем (79 млн. лет) гранитом штоке. Трещины



**Рис. 8.** Радиальные трещины растяжения в гранитном штоке Diamond Joe в Аризоне, США, вызванные растягивающими термоупругими напряжениями при остывании интрузии. Диаметр штока около 8 км. Заметны отклонения системы трещин от восточно-северо-восточного направления, вызванные тем, что во время остывания штока это простирание имело главное тектоническое напряжение сжатия во вмещающей среде [29, Fig 6, P. 274].

образовались на глубине около 2 км и сейчас «запечатаны» гидротермально измененными породами. На границах свежей и более старых интрузий температурный градиент имеет наибольшее значение, следовательно, там растягивающие напряжения наибольшие и сильнее будут развиты трещины растяжения. Неслучайно, новые доли экструзивных куполов на вулкане Шивелуч, как правило, выжимаются между более старыми долями или между куполом и вмещающими питающий канал горными породами [5].

Таким образом, кристаллизация и последующее охлаждение интрузий в магматическом канале создают в нем сетку трещин растяжения, и он становится проницаем для флюидов. В частности, вода из водоносных вмещающих пород может проникать по трещинам и взаимодействовать с магмой, порождая гидротермальную

активность и фреатические взрывы. Фреатические взрывы обладают большой разрушающей силой (рис. 3) и способны прорабатывать в трещиноватой среде магматического канала пути для более легкого подъема по ним вязкой андезитовой магмы (**полуоткрытая система**). Мы полагаем, что обнаруженные В.Н. Двигало на Шивелуче взрывные воронки [5] являются поверхностным выражением этих новых путей. По готовым каналам магма из периферического очага начинает подниматься задолго до начала извержения. От длительного взаимодействия с холодными вмещающими породами и водоносными горизонтами она охлаждается, через поры трещиноватой среды частично дегазируется и на поверхности земли впервые появляется в виде экструзий.

Мы относим третий случай в основном к умеренным извержениям вулкана Шивелуч. Поскольку магма поднимается по трещиноватой, уже частично разрушенной среде в условиях полуоткрытой системы, то неудивительно, что график нарастания условных деформаций для предваряющих извержения Шивелуча землетрясений достаточно медленно увеличивается со временем (рис. 6г).

### Выводы

Эксплозивно – экструзивные (эффузивные) извержения андезитовых вулканов Шивелуч и Безымянный имеют различный характер и различные предвестники.

1) После катастрофического извержения вулкана Безымянный 30.III.1956 с  $V = 3 \text{ км}^3$  и  $VEI = 5$  извержения этого вулкана происходили с интервалом от 0.5 до 2-3 лет.

2) Умеренные извержения Шивелуча отмечены значительно реже, с интервалом 7-16 лет, они начинались с продолжительной (порядка 0.5 мес.) экструзивной фазы, что не было характерно для вулкана Безымянный.

3) В отличие от Безымянного, извержениям Шивелуча в течение нескольких лет предшествовала длительная (несколько лет) взрывная подготовка.

4) Для Безымянного перед началом извержений характерно быстрое экспоненциальное, а для Шивелуча медленное, по линейному закону нарастание кумулятивного графика условных деформаций для вулканических землетрясений.

5) Указанные различия позволяют предположить, что магматические питающие каналы этих двух вулканов, по отношению к магме и флюидам, в настоящее время ведут себя различно. Вследствие длительного 800–летнего покоя канал вулкана Безымянный перед его пароксизмальным извержением в 1956 г. был «запечатан» старыми, гидротермально измененными, консолидированными и плохо проницаемыми интрузиями. В результате часто идущих современных извержений, к этому добавились новые порции, представляющие собой вязкую лавовую пробку (закрытая система). Напротив, центральный питающий канал Шивелуча более проницаем для воды и флюидов, поскольку магмы в нем разбиты сетью трещин термоусадки. Вода водоносных горизонтов взаимодействует с магмой, что приводит образованию фреатических взрывов, прорабатывающих новые пути для более свободного продвижения магмы к поверхности земли (полуоткрытая система). В результате происходит охлаждение и частичная дегазация магм, что обуславливает экструзивное начало извержений вулкана Шивелуч.

6) Мы полагаем, что в силу масштабных тектонических явлений в Алеутской структуре, имевших место в 1964 г. и вызвавший беспрецедентную скорость подъема магмы, извержение вулкана Шивелуч 12.XI.1964 происходило в условиях не открытой, а закрытой системы.

Автор выражает признательность Ю.В. Демянчуку и А.В. Сокоренко за предоставление фотографий извержений, А.П. Максимова и В.Т. Гарбузовой за консультации, В.А. Широкову и О.С. Чубаровой за рецензирование статьи.

### Список источников

1. Алидибиров М.А. Модель высвобождения энергии при вулканических взрывах вулканского типа // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 50-58.
2. Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В и др. Безымянный вулкан // Действующие вулканы Камчатки. 1991. Т.1. С. 168-197.
3. Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955-1963 гг. М.: Наука, 1965. 172 с.

4. Горельчик В.И., Гарбузова В.Т., Дроздин Д.В. и др. Вулкан Шивелуч: Глубинное строение и прогноз извержения по данным детальной сейсмичности 1962-1994 гг. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4-5. С. 54-75.
5. Двигало В.Н. Морфологические предвестники (первые признаки) активизации некоторых вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 3-16.
6. Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В. Крупные эксплозивные извержения вулкана Шивелуч (Камчатка) с частичным разрушением экструзивного купола 28 февраля 2005 г. и 27 октября 2010 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 48—62.
7. Жданова Е.Ю., Агеев С.А. Оживление вулканической деятельности в кратере вулкана Шивелуча в 1990–1992 гг. // Вулканология и сейсмология. 1994. № 4–5. С. 215–217.
8. Иванов В.В. Кратко — и среднесрочные сейсмологические предвестники катастрофических извержений вулканов Безымянный и Шивелуч на Камчатке // Материалы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога 27-28.03. 2014 г. Петропавловск-Камчатский, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. С. 168 - 174.
9. Иванов В.В. Средне- и краткосрочные прогнозы извержений вулканов на Камчатке (1956-2012 гг.) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 2(22). С. 98-118.
10. Кирсанов И.Т. Экструзивные извержения на вулкане Безымянном в 1965-1974 гг. и их геологический эффект // Проблемы глубинного магматизма. М. Наука. 1979. С. 51-68.
11. Лебедев Е.Б., Хитаров Н.И. Физические свойства магматических расплавов. М.: Наука, 1979. 199 с.
12. Малышев А.И. Газовый фактор в эндогенных процессах. Институт геологии и геохимии УРО РАН. Екатеринбург. 2015. 324 с.
13. Мархинин Е.К., Токарев П.И., Пугач В.Б., Дубик Ю.М. Извержение вулкана Безымянного весной 1961 г. // Бюлл. вулканол. ст. 1963. № 34. С. 12-35.
14. Мелекесцев И.В., Вольнец О.Н., Ермаков В.А. и др. Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. Т.1. М.: Наука, 1991. С. 84-97.
15. Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирсанова Т.П. и др. 300 лет жизни Камчатских вулканов: Молодой Шивелуч (анализ динамики и последствий эруптивной активности в XVII-XX веках). Часть II. 1965-2000 гг. // Вулканология и сейсмология. 2004. № 1. С. 5-24.
16. Селезнев Б.В., Двигало В.Н., Гусев Н.А. Развитие вулкана Безымянный по данным стереофотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемок 1950, 1967 и 1976-1981 гг. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 52-64.
17. Сенюков С.Л. Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке. LAP Lambert Academic Publishing. 2013. 144 с.
18. Сенюков С.Л., Дроздина С.Я., Нуждина И.Н. и др. Исследования активности вулканов Шивелуч и Безымянный в 2000-2003 гг. дистанционными средствами наблюдений

- //Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2004. С 301-318.
19. *Токарев П.И.* Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. и его предвестники // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1967. № 9. С. 11-22.
  20. *Токарев П.И.* Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 118с.
  21. *Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164с.
  22. *Федотов С.А.* Оценка выноса тепла и пирокластики вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков // Вулканология и сейсмология. 1982. №4. С. 3-28.
  23. *Федотов С.А., Горицкий Ю.А.* Расчёт охлаждения магмы в цилиндрических питающих каналах вулканов при движении магмы и после её остановки // Вулканология и сейсмология. 1981. № 5. С. 3-21.
  24. *Федотов С.А., Двигало В.Н., Жаринов Н.А. и др.* Извержение вулкана Шивелуч в мае-июле 2001 г. // Вулканология и сейсмология. 2001. № 6. С. 3-15.
  25. *Фирстов П.П.* Реконструкция динамики катастрофического извержения вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. на основании данных о волновых возмущениях в атмосфере и вулканическом дрожании // Вулканология и сейсмология. 1996. №4. С. 48-63.
  26. *Фирстов П.П., Гаврилов В.А., Жданова Е.Ю., Кирьянов В.Ю.* Начало нового экструзивного извержения вулкана Шивелуч в апреле 1993 г. // Вулканология и сейсмология. 1994. № 4-5. С. 33-47.
  27. *Хубуная С.А., Жаринов Н.А., Муравьев Я.Д. и др.* Извержение вулкана Шивелуч в 1993 г. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 1. С. 3-19.
  28. *Чубарова О.С., Горельчик В.И., Гарбузова В.Т.* Сейсмический режим вулкана Безымянный 1975-1979 гг. // Вулканология и сейсмология. 1983. №3. С. 58-69.
  29. *Gerla, J. P.* Stress and fracture evolution in a cooling pluton: an example from the Diamond Joe stock, western Arizona, USA // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1988. Vol. 34. P. 267-282.
  30. *Girina O.A.* [Chronology of Bezymianny Volcano activity, 1956-2010](#) // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2013. V. 263. P. 22-41.
  31. *Minakami T.* Prediction of volcanic eruptions // Physical volcanology. Eds: Civetta L., Gasparini P., Luongo G., Rapollo A. Elsevier. 1974. Chapter 14. P. 313-333.
  32. *Newhall C.A., Self S.* The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of the explosive magnitude for historical volcanism // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. Issue C2. P. 1231—1238.
  33. *Sparks R.S.J.* Forecasting volcanic eruptions // Earth and Planetary Science Letters. 2003. V. 210. P. 1-15.
  34. *Tokarev P.I.* On a possibility of forecasting of Bezymianny volcano eruptions according to seismic data // Bull. Volcanol. 1963. V. 26. P. 379-386.
  35. *West M.E.* Recent eruptions at Bezymianny volcano—A seismological comparison // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2013. Vol. 263. PP. 42–57.