

Центральный питающий канал андезитового вулкана: процессы и факторы, определяющие его проницаемость для флюидов и магмы и характер развития сейсмологических предвестников извержений

В.В. Иванов

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: victorvasilievich53@gmail.com

Описаны процессы в центральных питающих каналах кислых вулканов, выделены факторы, определяющие проницаемость каналов для флюидов и магмы. На этой основе дано объяснение трех основных режимов развития сейсмологических предвестников для извержений андезитовых вулканов.

Введение. Крупные взрывные извержения вулканов с андезитовым и более кислым составом представляют собой наиболее опасные вулканические проявления. Изучение механизма подъема магмы и разработка методик их прогнозирования имеют важное научное и практическое значение. На многоактных вулканах подъем магм перед извержениями обычно происходит по *центральному питающему каналу* как проницаемым зонам в земной коре, под которыми имеется длительно действующий (в течение сотен и тысяч лет) восходящий поток расплавов. В этом их принципиальное отличие от питающих каналов одноактных извержений, где поступление расплавов в данном месте непродолжительно, и следующее извержение происходит в другом месте.

Сравнительно маловязкие базальтовые магмы после окончания извержения в результате дегазации и уплотнения опускаются в центральном питающем канале с образованием глубоких провальных кратеров (рис. 1, слева). Напротив, андезитовые магмы, в силу их огромной вязкости и близости к состоянию солидуса, обычно образуют в питающем канале прочные лавовые пробки, которые выступают на поверхности земли в виде экструзивных лавовых куполов (рис. 1, справа).



Рис. 1. Слева: провальный кратер базальтового Ключевского вулкана 4 апреля 1993 г. диаметром около 500 м и глубиной около 190 м, образовавшийся после извержения, аэрофото. Справа: огромный андезитовый экструзивный лавовый купол вулкана Шивелуч 8 ноября 2007 г. с диаметром основания около 1.5 км и относительной высотой около 0.5 км. Фото Ю.В. Демянчука.

С другой стороны, после сильных, чисто взрывных извержений на вулкане могут образовываться взрывные или обвальное-взрывные кратеры. При этом верхняя часть канала андезитового вулкана будет заполнена сравнительно непрочной пирокластикой. Это имело место, например, после извержения вулкана Шивелуч 12.XI.1964 г. Наличие или отсутствие лавовой пробки как барьера на пути продвижения свежих порций магм, а также степень ее проницаемости влияют как на размер будущего извержения, так и на выраженность его предвестников [7].

В силу большой эффективной вязкости андезитовых и более кислых магм, подъем их к поверхности земли перед извержением возможен только при значительных избыточных давлениях в магме, что порождает во вмещающей среде деформации и мощные предваряющие рои вулканических землетрясений. В ряде случаев это позволило предвидеть или даже предсказать время начала и силу извержения [7]. Однако это были только отдельные успехи, реальная практика оказалась намного сложнее.

В работе [3] выделены три кардинально различных режима развития во времени предваряющей сейсмичности для извержений андезитовых вулканов на Камчатке: экспоненциально-гиперболический, экспоненциальный и линейный. Сделана первая попытка объяснения причин различия этих режимов различной степенью проницаемости питающих каналов. При этом была абсолютно непонятна причина различия сейсмической подготовки для крупных извержений Шивелуча в 1964 г. и Безымянного в 1955 г. Сейсмическая подготовка извержения Шивелуча на завершающей стадии была более агрессивной, гиперболической по сравнению со случаем более мягкой, экспоненциальной подготовки Безымянного. При этом первое извержение по объему выброшенных ювенильных продуктов заметно уступало второму (0.5 км^3 против 1.6 км^3). Ранее мы полагали [3], что степень проницаемости канала зависит от величины временного интервала между извержениями и темпа, с которым внедряются свежие порции магмы. В данной работе для удовлетворительного объяснения принципиальных различий в сейсмической подготовке указанных выше извержений мы дополнительно рассматриваем также характер предыдущего извержения на завершающей его стадии. Это позволяет оценивать состояние центрального питающего канала андезитового вулкана накануне рассматриваемого извержения (открытая или закрытая система). Целями настоящей работы являются описание процессов в центральных питающих каналах андезитовых вулканов, которые определяют их проницаемость для флюидов и магмы, выделение влияющих факторов и объяснение на этой основе различий сейсмических режимов для предваряющих вулканических землетрясений. Вопросы образования питающих каналов здесь не рассматриваются.

Процессы в центральных питающих каналах андезитовых вулканов. В магме, оставшейся в центральном питающем канале от предыдущих извержений, с течением времени происходит ряд процессов, которые определяют его проницаемость для подъема более свежих порций магмы и флюидов. В свою очередь, от степени проницаемости канала зависит количество магмы, которое накопится в периферическом очаге вулкана и будет выброшено при следующем извержении, избыточное давление и сейсмичность, сопровождающая подъем свежих порций магмы.

Во-первых, это охлаждение горячей магмы в результате теплообмена со вмещающей средой и более старыми интрузиями с образованием вязкой лавовой пробки как барьера на пути подъема свежих порций магмы. Эффективная вязкость кислой магмы очень сильно увеличивается в результате не только охлаждения, но и дегазации. По данным [4] при 2 % весовом содержании воды охлаждение такой магмы с $800 \text{ }^\circ\text{C}$ до $600 \text{ }^\circ\text{C}$ увеличивает ее эффективную вязкость на 2.5 порядка с $6 \cdot 10^6$ до 10^9 Па с. Еще сильнее выражено увеличение вязкости магмы при ее дегазации. По данным этих же авторов, вязкость такой магмы с температурой $600 \text{ }^\circ\text{C}$ при дегазации с 4 % до 1 % увеличивается почти на четыре порядка с $5 \cdot 10^6$ до $3 \cdot 10^{10}$ Па с. Поэтому лавовая пробка образуется, в основном, в поверхностных частях питающего канала, где магма существенно дегазирована. Вязкая лавовая пробка непроницаема не только для магмы, но и для флюидов (*закрытая система*).

Во-вторых, образование открытых трещин растяжения на границах между интрузиями и вмещающей средой, между интрузиями разного возраста, а также внутри самих интрузий при их охлаждении. Изменения напряжения в изотропической упругой среде, связанные с изменениями температуры, даются выражением [6]:

$$\sigma_T = E \cdot \alpha_L \cdot dT, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга, α_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 $E \cdot \alpha_L = 0.48 \text{ МПа} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ [6], то охлаждение отвердевшей магмы на

200 °С ниже солидуса создает в ней дополнительные термоупругие растягивающие напряжения величиной около 100 МПа (1 Кбар). Эта величина сравнима с давлением горных пород на глубине около 2700 м, что должно приводить к разрывам тела интрузии и к появлению *открытых трещин* в ней. Еще больший эффект связан с уменьшением объема магмы при достижении ею солидуса. На границах между свежей и более старыми интрузиями температурный градиент имеет наивысшее значение, следовательно, там имеют место наивысшие растягивающие напряжения и, следовательно, сильнее будут развиты трещины растяжения. В результате, интрузия становится *проницаема для флюидов* и под действием остаточного тепла в ней развиваются гидротермальные процессы. В работе [6] показан пример развитой сетки радиальных трещин растяжения в большом древнем (79 млн. лет) гранитом штоке. Трещины образовались на глубине около 2 км.

В-третьих, фреатомагматические взрывы в растресканных, проницаемых для флюидов интрузиях в питающем канале, если в него в течение длительного времени (несколько месяцев или лет) происходят интрузии свежей магмы. Они образуют новые каналы в центральном питающем канале, по которым магма может сравнительно свободно подниматься, порождая новое извержение (*открытая система*). На поверхности купола Шивелуча, по данным аэрофотосъемки от 16 мая 2001 г., эти каналы были выражены в виде огромных взрывных кратеров размерами в плане до 270×370 м, в которые поступали свежие порции лавы начавшегося извержения [5].

Графики условных деформаций для предваряющих вулканических землетрясений в связи с извержениями андезитовых вулканов Безымянный и Шивелуч на Камчатке. На рис. 2 показаны кумулятивные графики корней квадратных из сейсмической энергии предваряющих вулканических землетрясений ($\sum \sqrt{E_s}$, графики условных деформаций или графики Бенъоффа) в полулогарифмическом масштабе для четырех характерных извержений андезитовых вулканов на Камчатке. Они дают представление о трех основных режимах развития сейсмологических предвестников.

Режим 1. Экспоненциально-гиперболический (рис. 2а и б). Это наиболее агрессивный режим развития предвестников. Вначале график логарифма условных деформаций линеен, что указывает на экспоненциальный закон нарастания. Однако с приближением к началу извержения график нарастает неограниченно и имеет вертикальную асимптоту, примерно совпадающую с моментом извержения. Эта закономерность имела место как для пароксизмального извержения Шивелуча в 1964 г, так и для межпароксизмального извержения Безымянного в 1961 г. В результате предыдущих извержений 1944-1950 гг., кратер вулкана Шивелуч был заполнен огромным лавовым куполом «Суелич». Кроме того, перед извержением Шивелуча 11.XI.1964 г. (время UTC) не было отмечено видимых усилений

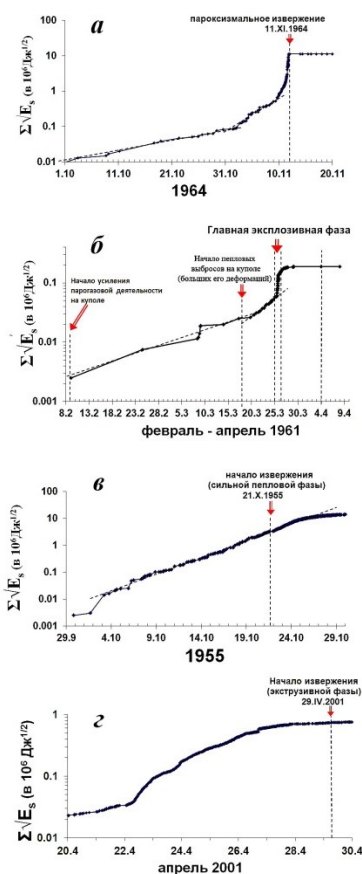


Рис. 2. Кумулятивные графики условных деформаций ($\sum \sqrt{E_s}$) для вулканических землетрясений I-III типов, предварявших извержения вулканов: Шивелуч в 1964 г. (а); Безымянный в 1961 г. (б); Безымянный в 1955 г. (в) и Шивелуч в 2001 г. (г). Стрелками на графиках показаны моменты начала извержений и их характерных фаз. Данные из каталогов П.И. Токарева и КФ ГС РАН. Время UTC.

активности вулкана. На этом основании мы полагаем, что к 1964 г. верхняя часть центрального питающего канала вулкана была заполнена лавовой пробкой, и подъем свежих порций магмы происходил в условиях закрытой системы. Аналогично, лавовая пробка в верхней части питающего канала существовала и перед извержением вулкана Безымянный в марте-апреле 1961 г. Разрушение этой пробки сопровождалось неограниченным нарастанием графика условных деформаций по гиперболическому закону (рис. 2б). Различие в величинах условных деформаций примерно на порядок было связано с существенной разницей в размерах интрузий магмы, связанной с подготовкой этих извержений (рис. 2а и б).

Режим 2. Экспоненциальный режим развития предвестников. Он наблюдался перед началом крупного извержения Безымянного вулкана (его сильной пепловой фазы 21 октября 1955 г. (время UTC) (рис. 2в)). Более детальный, чем ранее, анализ полученных Г.С. Горшковым материалов позволяет определенно заключить, что это извержение началось и происходило в пределах большого взрывного кратера, расположенного в восточной шарре вулкана. Этот кратер, вероятно, образовался в результате предыдущего сильного, чисто взрывного извержения вулкана. Во-первых, об этом сообщает в своей работе Г.С. Горшков [1]. Во-вторых, с этим, восточным, кратером связаны пять молодых лавовых потоков, изображенных в работе [2]. На этом основании мы полагаем, что центральный питающий канал Безымянного вулкана, расположенный под указанным восточным кратером и через который происходил подъем свежей магмы в связи с извержением 1955-1956 гг., в верхней своей части до значительных глубин был заполнен рыхлой пирокластикой. Лавовой пробки в нем не было (полуоткрытая система). Именно поэтому график условных деформаций развивался менее агрессивно (по экспоненциальному закону (рис. 2в)), чем в случае закрытой системы (рис. 2а и б).

Режим 3. Самый слабый, линейный режим нарастания условных деформаций. Он отмечался перед экстремально-эксплозивным извержением вулкана Шивелуч в 2001 г., которому предшествовала интенсивная взрывная активность на его лавовом куполе в течение четырех лет. По данным В.Н. Двигало, в результате на вершине купола образовались несколько крупных взрывных кратеров с максимальными размерами в плане 270×370 м. Именно в этих кратерах началось выжимание свежих порций лавы [5]. Мы полагаем, что подъем свежей магмы в этом случае происходил по образованным в результате предшествующей взрывной активности магматическим каналам (открытая система).

В случае почти непрерывного движения магмы в питающем канале наблюдается фоновая сейсмичность, что имело место, например, в 1956 г. на вулкане Безымянном.

Список литературы

1. Горшков Г.С. Извержение сопки Безымянной // Бюллетень вулканологической станции. 1957. № 26. С. 19-72.
2. Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955-1963 гг. М.: Наука, 1965. 172 с.
3. Иванов В.В. Извержения вулканов Шивелуч и Безымянный на Камчатке: Предвестники и возможные механизмы подъема магмы // Материалы XIX региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 29-30 марта 2016 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. С. 83-97.
4. Лебедев Е.Б., Хитаров Н.И. Физические свойства магматических расплавов. М.: Наука, 1979. 199 с.
5. 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.
6. Gerla J.P. Stress and fracture evolution in a cooling pluton: an example from the Diamond Joe stock, western Arizona, USA // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1988. V. 34. P. 267-282.
7. Minakami T. Prediction of volcanic eruptions. In Physical Volcanology. Elsevier, Amsterdam. 1974. P. 313-333.