

## Механизм взрывов на андезитовых и дацитовых вулканах (Карымский, Авачинский, Шивелуч)

Озеров А.Ю.

### Mechanism of andesitic and dacitic volcanoes' explosions

Ozerov A.Yu.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: ozerov@ozerov.ru

Исследования и эксперименты показали, что механизм вулканических взрывов обусловлен силами трения вязко-упругого движения магматической колонны вдоль стенок выводного канала, которые создают условия для накопления упругой энергии с ее последующей взрывной реализацией за счет газовой фазы, находящейся в магме под высоким давлением.

Доклад посвящен исследованию природы взрывной деятельности в ходе извержений вязких и высоковязких магм андезитовых и дацитовых вулканов. Такой тип деятельности характерен для извержений вулканического типа и проявляется на Камчатке на вулканах Карымский, Авачинский и Шивелуч.

**Вулканические взрывы.** Это яркое и зрелищное явление, которое проявляется во время извержений вулканов с вязкими, высоковязкими малоподвижными магмами. В процессе взрывных эпизодов сечение кратера одномоментно пересекают десятки-сотни раскаленных вулканических бомб, лапилли и пепел, которые в виде узкого вертикального столба/струи или веера выбрасываются на высоту десятков-сотен метров, в редких случаях – нескольких километров (рис. 1а, б). Затем, по мере подъема вверх, обычно формируется пепловая колонна, которая в последующем преобразуется в пепловые шлейфы. Во время вулканической деятельности многократно фиксировались ударные волны, наличие которых является главным критерием взрыва [1].

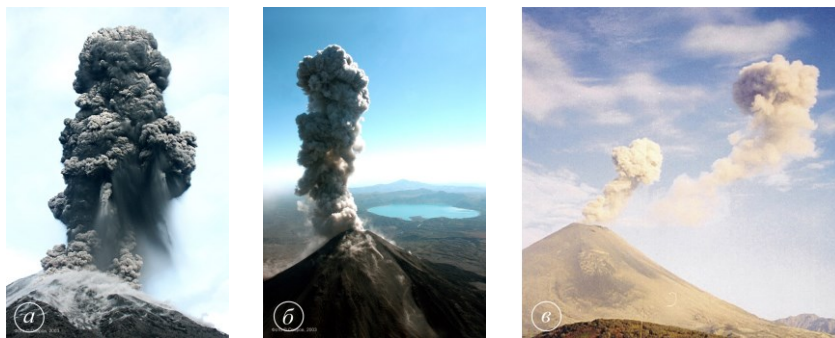


Рис. 1. Вулканические взрывы в вершинном кратере вулкана Карымский. Фото А.Ю. Озерова.

а) высота выброса 6 км;  
б) высота выброса 1.3 км;  
в) периодический характер взрывов,  $T \sim 4$  мин.

Важной чертой вулканической деятельности, изученной нами на вулкане Карымский, является существование двух уровней устойчивой периодичности/квазипериодичности [2]. 1-й уровень (минутный) – взрыв и последующий интервал тишины; такая многократно повторяющаяся последовательность в различные этапы извержения имеет период от 3 до 30 мин (рис. 1в, рис. 2а). 2-й уровень (секундный) – во время продолжительных (более 20 сек) взрывов часто возникает чаггинг (процесс с периодом  $\sim 1$  сек), который явно регистрируется в модуляциях акустического и сейсмического сигналов. Типичный чаггинг состоит из 10-25 циклов (рис. 3а, б). После взрыва следует интервал тишины, характеризующийся полным отсутствием активности в кратере и обычно длящийся намного дольше, чем сам взрыв.

Именно этот, имеющий четкую последовательность реализации минутных и секундных повторяющихся явлений, уникальный тип динамической активности – двухуровневая периодичность – был выбран автором для моделирования механизма вулканических взрывов.

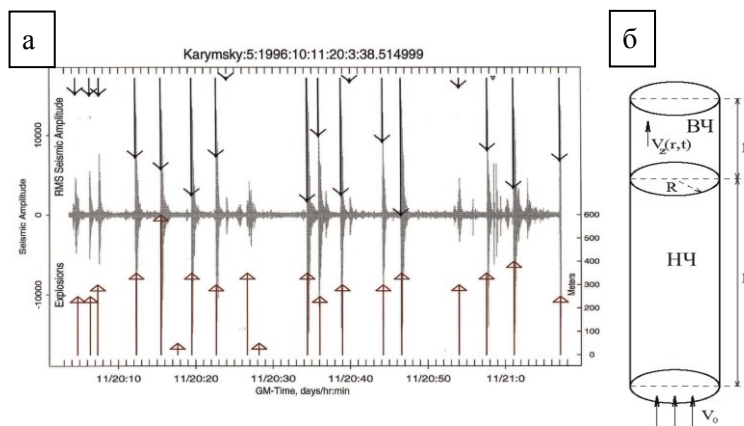


Рис. 2. а) сейсмическая запись периодических/квазипериодических вулканических взрывов на вулкане Карымский. Продолжительность записи 1 ч 10 мин; б) гипотетическая модель магмоподводящей системы Карымского вулкана, состоящая из 2 частей: НЧ – более пластичная магма, ВЧ – более вязкая магма.

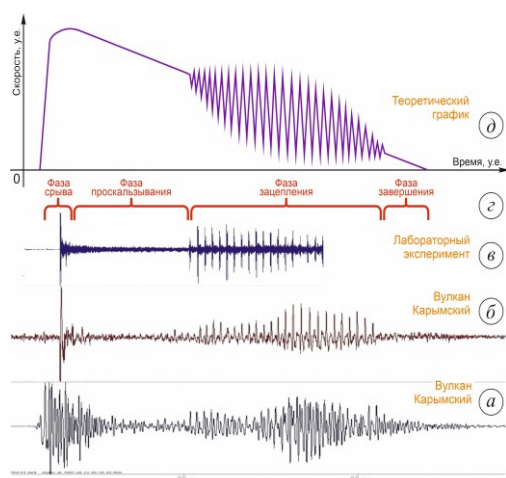


Рис. 3. Периодические модуляции в ходе взрывного процесса на вулкане Карымский и их экспериментальное моделирование. а) сейсмический и б) акустический сигналы взрывного процесса; в) лабораторный эксперимент; г) динамические фазы протекания взрывного процесса; д) скоростные режимы периодических модуляций; е) лабораторные установки для моделирования взрывной активности.

**Состояние изученности.** В процессе наших исследований было установлено, что во время извержений вулкана Карымский 1996-1999 гг. и вулкана Авачинский 2001 г. выбрасывались вулканические бомбы, имеющие на поверхности раковистый излом, то есть в момент выброса они находились в застывшем, хрупком состоянии и не обладали пластичными свойствами. Это свидетельствует, что верхняя часть магматической колонны была в твердом состоянии и в процессе подъема, равно как и в условиях взрывных сотрясений, не способна удерживать крупные (десятки см и более) газовые пузыри под большим давлением.

Важно отметить, что обсуждаемые расплавы не обладают таким взрывным потенциалом, как тротил или иное взрывчатое вещество. Они не способны к детонации ни при комнатных температурах, ни при температурах извержения (800-1000 °С). Они не характеризуются величиной бризантности, то есть не обладают свойствами обычных взрывных веществ.

Дополнительно отметим, что в физической вулканологии до настоящего времени не были получены воспроизводимые результаты, проливающие свет на механизм трансформации вязких, высоковязких расплавов, приводящий к взрывообразной фрагментации поступающих магм. В этой связи мы провели комплексные исследования, которые позволили подойти к пониманию механизма вулканических взрывов.

**Цель исследований** – выявление механизма взрывной активности при извержении вязких, высоковязких андезитовых-дацитовых магм, моделирование этого процесса на основе геологических, вулканологических, сейсмологических, акустических и экспериментальных данных.

**Основные методы** – 1 – экспедиционное изучение взрывной активности на андезитовых-дацитовых вулканах; 2 – исследование сейсмических записей взрывной активности; 3 – исследование акустических записей взрывной активности; 4 – создание лабораторных установок для физического моделирования вязкоупругого движения; 5 – экспериментальное изучение динамики движения тел, обладающих различной вязкостью, упругостью, силой взаимодействия; 6 – синтез природных и экспериментальных данных, определение/выявление природы вулканических взрывов.

**Объект изучения.** Природный: динамические процессы вулканических взрывов, происходящие в кратерах андезитовых-дацитовых вулканов, сейсмические и акустические записи взрывной активности. Лабораторный: плоско-параллельное движение прижатых друг другу вязко-упругих тел.

Главным природным объектом исследований является вулкан Карымский, где широко проявлены процессы дискретных вулканических взрывов. Это один из наиболее активных вулканов нашей планеты, типичный представитель андезитового-дацитового вулканизма, изучавшийся многими исследователями, в том числе автором. Учитывались данные о взрывной активности вулканов Авачинский и Шивелуч.

**Экспериментальное моделирование.** В современной науке нет объяснения природы/механизма вулканических взрывов на андезитовых и дацитовых вулканах, поэтому мы приступили к созданию лабораторных установок (плоскостной, плоскопараллельной и трубообразной) для проведения физического моделирования процессов, определяющих взрывную деятельность рассматриваемых вулканов.

**Лабораторная установка моделирования вязко-упругого движения.** Конструкция установки включает (рис. 3е): поверхности скольжения (плоские, плоскопараллельные, трубообразные), имеющие различные свойства шероховатости; ползунки (плоский, плоскопараллельный, цилиндрический), состоящие из резины или различных видов вспененных пластиков. Сдвиговое усилие прикладывается к ползунку при помощи металлического троса или динамической веревки; записи акустического сигнала, возникающего в процессе движения регистрируются микрофоном; выполняется фото-, видео регистрация.

**Задачи установки** – моделирование прерывистого скольжения с разным усилием сжатия и динамических особенностей сдвигового перемещения вязко-упругих тел; сопоставление структур сейсмических и акустических сигналов от вулканических взрывов с лабораторными акустическими сигналами (см. рис. 3а-д); определение механизма взрывов андезитовых и дацитовых магм.

**Динамические процессы в магматической колонне.** Магматранспортирующая структура представляет собой протяженный трубообразный магмавод, в нижнюю часть (НЧ) которого с постоянной скоростью поступает новая, выплавляющаяся магма, выше по магмаводу движется ограниченный со всех сторон вертикальный поток невязкой и сжимаемой (за счет пузырьков, способных к деформации), магмы (рис. 2б). В верхней части (ВЧ) поток меняет свойства и превращается в короткую твердую, несжимаемую пробку, в которой под большим давлением в запечатанном виде находятся миллиарды мелких пузырьков, не способные к компенсаторному сжатию-расширению.

Взаимодействие движущегося потока со стенками магматранспортирующей структуры определяется напряжением сдвига, которое зависит от тангенциальной составляющей силы и от площади ее воздействия. Вязкость магмы в НЧ колонны ниже, чем в ВЧ колонны, соответственно, граничные условия сдвига в НЧ менее существенны, чем в ВЧ, поэтому перейдем к рассмотрению наиболее контрастных сдвиговых напряжений, происходящих именно в ВЧ колонны, поведение которой мы аппроксимировали с динамической пробкой. В последующем для этой структуры будем использовать словосочетание – «Динамическая Пробка-ВЧ».

Рассмотрим два характерных случая взрывной активности на вулкане Карымский – кратковременной реализации импульса взрыва (сценарий 1) и более сложной взрывной

реализации, когда взрывной импульс сопровождается продолжительным интервалом модуляции секундных колебаний (сценарий 2).

**Механизм взрыва – подготовка и реализация. Стадия покоя.** Когда граничное сдвиговое напряжение мало, динамическая Пробка-ВЧ «прилипает» к стенкам канала и скорость на границе раздела равна нулю. В это время в кратере отсутствует какая-либо эксплозивная деятельность. Постоянное поступление нового расплава в НЧ магматранспортирующей колонны приводит к увеличению давления в расположенном выше расплаве. Причем, в НЧ колонны происходит упругая деформация расплава за счет сжатия газовых пузырьков. Прилипшая Динамическая Пробка-ВЧ препятствует движению НЧ колонны, что приводит к возрастанию сдвигового напряжения в ВЧ.

**Стадия взрыва (1-й сценарий, кратковременный импульс).** Стадия покоя заканчивается, когда возбуждающая сила превышает пороговое значение сдвига. Динамическая Пробка-ВЧ скачкообразно срывается и переходит в состояние движения. Верхняя часть пробки достигает поверхности в кратере. В этот момент огромное количество пузырьков, находящихся в породах Динамической Пробки-ВЧ под большим давлением, попадает в зону декомпрессии. Пузырьки мгновенно разрывают породу, и в кратере происходит взрыв – выбрасываются бомбы, лапилли, пепел. Реализовав сдвиговой потенциал, Динамическая Пробка-ВЧ останавливается, подлипает/прилипает к стенкам, и в кратере начинается интервал тишины – стадия покоя, которая будет продолжаться вплоть до следующего взрыва.

Одновременно с взрывным процессом в ВЧ колонны, в НЧ колонны расплав испытывает релаксацию и в пузырьках восстанавливается давление. Затем, продолжающие поступать в нижнюю часть колонны расплавы начинают новый цикл сжатия магматического расплава, и процесс циклически повторяется.

**Стадия взрыва (2-й сценарий; взрывной импульс, сопровождаемый чаггингом, рис. 3а-д).** Этот сценарий реализуется тогда, когда сила отлипания и/или прилипания Динамической Пробки-ВЧ не столь сильна, как в 1-м сценарии, или когда из-за высокой скорости Динамическая Пробка-ВЧ останавливается не сразу, а продвигается на более значительное расстояние. В этом случае реализуется скоростная последовательность, представленная на рис. 3д. **Фаза 1** – срыв пробки и взрыв в кратере; **фаза 2** – Динамическая Пробка-ВЧ движется с высокой скоростью, при которой пробка и стенки выводного канала не успевают зацепиться друг за друга; **фаза 3** – в некотором интервале скоростей, возникающих при торможении Динамической Пробки-ВЧ, она начинает зацепляться за стенки выводного канала, и реализуется последовательность мгновенных прилипаний и срывов; которая может состоять из десятков циклов, характеризующихся кратковременным периодом; **фаза 4** – низкая скорость движения перед остановкой Динамической Пробки-ВЧ, уменьшается энергия жесткого взаимодействия, и процесс зацепления теряет свою яркую периодическую компоненту. Затем происходит остановка, стадия взрыва заканчивается, и вулкан переходит в стадию покоя.

Работа выполнена в рамках «Межведомственной программы комплексных научных исследований Камчатского полуострова и сопредельных акваторий в 2024-2026 гг.» государственного задания Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН по теме НИР № FWME-2024-0015 «Изучение механизмов извержения Авачинского вулкана и создание методик оценки вулканической опасности».

#### Список литературы

1. Фирстов П.П., Маневич А.Г., Озеров А.Ю. Волновые возмущения в атмосфере от эксплозий вулкана Карымского (1997-1999 гг.) // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: Изд-во «Наука – для Камчатки», 2004. С. 26-32.
2. Ozerov A.Y., Ispolatov I., Lees J.M. Modeling Strombolian eruptions of Karymsky volcano, Kamchatka, Russia // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2003. V. 122. P. 265-280.