

## Определение причины фонтанирования раскаленных бомб во время извержений базальтовых-андезиобазальтовых вулканов

Озеров А.Ю.

### Defining the cause of igneous bombs spouting during the eruptions of basalt–basaltic-andesite volcanoes

Ozerov A. Yu.

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

e-mail: ozerov@ozerov.ru

Исследования динамики извержений базальтовых-андезиобазальтовых вулканов и экспериментальные работы на созданных автором лабораторных установках показали, что на границе двух сред – при переходе газового пузыря из магматического расплава в открытое атмосферное пространство – возникает кумулятивная сила, преобразующая расплав, окружающий пузырь, в вулканическую бомбу, выбрасываемую вверх на сотни метров.

Доклад посвящен исследованию причин фонтанирования раскаленных бомб в ходе извержений базальтовых-андезиобазальтовых вулканов. Такой тип деятельности характерен для гавайских, исландских и стромболианских извержений.

### Фонтанирование раскаленных бомб

Это яркое и зрелищное явление, которое наблюдается во время извержений вулканов с низковязкими, высокоподвижными магмами. Струя раскаленных вулканических бомб в виде узкого вертикального столба (рис. 1а), веера, или огненной стены поднимается на высоту десятков-сотен метров, в редких случаях – до ~1 км. В процессе фонтанирования поверхностное сечение кратера одномоментно пересекают раскаленные вулканические бомбы, количество которых, в зависимости от интенсивности извержения, достигает первых десятков или даже сотен. Крупная фракция бомб обладает сходным размером. Общей особенностью фонтанов является то, что высота выброса бомбы в среднем на 3 порядка превышает диаметр бомбы.

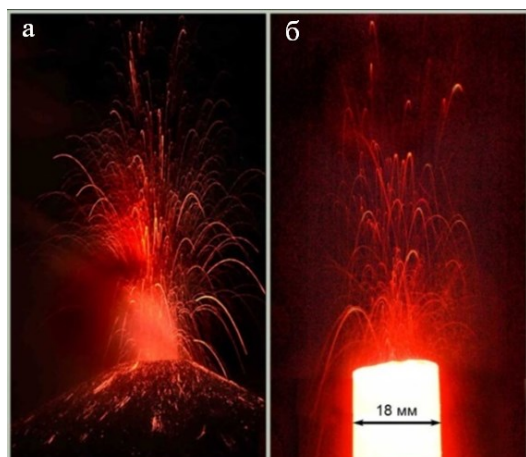


Рис. 1. а – фонтанирование раскаленных бомб в вершинном кратере Ключевского вулкана. Фото Ю.В. Демянчука.

б – фонтанирование водяных капель в процессе экспериментальных исследований с помощью низкотемпературной аэро-, газо-, гидродинамической установки. Фото А.Ю. Озерова.

Фонтанирование может продолжаться минуты, часы, сутки и более, обычно оно возникает в динамике уже происходящего извержения. В некоторых случаях, над кратером, кроме бомб, наблюдается вулканический пепел. Фонтанирование может сопровождаться одновременным излиянием лавовых потоков или происходить без них. Это явление наблюдается в ходе вершинных, побочных, трещинных и моногенных извержений. В результате эпизодов фонтанирования на поверхности земли в прикратерной зоне могут образовываться шлаково-бомбовые слои мощностью от первых сантиметров до метров.

Совокупный анализ данных о фонтанировании, полученных в результате наших исследований, и литературных обобщений, позволил сформировать критерии, которые были положены в основу экспериментальных работ.

Состояние изученности. Несмотря на значительную мощность, непредсказуемость и большую опасность, природа фонтанирования остается одним из слабоизученных вопросов в вулканологии. Общеизвестно, что взрывчатая составляющая базальтовых-андезитовых извержений обеспечивается свободной газовой фазой (газовыми пузырями, находящимися в поднимающемся магматическом расплаве). Важно отметить, что в физической науке были проведены исследования, направленные на изучение трансформации газового пузыря в каплю при переходе границы жидкость-воздух [1], результаты этих работ были учтены при интерпретации наших данных. Участие в конференциях и литературный обзор вулканологических данных показали, что конкретный механизм, объясняющий причину фонтанирования раскаленных бомб на базальтовых-андезитовых вулканах, до сих пор не установлен. В этой связи мы провели комплекс работ: вулканологические и сейсмологические исследования, конструирование аппаратуры и лабораторные эксперименты, которые позволили объяснить механизм этого явления.

Цель исследований – выявление механизма фонтанирования раскаленных бомб при извержениях жидких магматических расплавов и моделирование этого процесса на основе вулканологических, сейсмологических и экспериментальных данных.

Основные методы: 1 – экспедиционное изучение фонтанирования раскаленных бомб на вулканах, 2 – исследование сейсмических записей фонтанирования; 3 – создание барботажных лабораторных установок физического моделирования, 4 – экспериментальное изучение процессов на границе расплав-воздух и на границе жидкость-воздух, превращающих пузырьки в капли, 5 – синтез природных и экспериментальных результатов, определение природы фонтанирования.

Объект изучения – газогидродинамические процессы, происходящие на верхней границе жидкого магматического расплава в кратере вулкана во время извержения (поверхность экспериментальной жидкости) и взрывчатые аэрогидродинамические эффекты во время извержений над кратером вулкана (над лабораторной барботажной установкой).

Главным природным объектом исследований является Ключевской вулкан, где широко проявлены процессы периодического фонтанирования. Это грандиозный вулкан, крупнейший в Евразии (высота 4 822 м), типичный представитель базальтового-андезитового вулканизма, изучавшийся многими исследователями, в том числе автором. Учитывались данные по фонтанированию на вулканах Килауэа, Ньирагонго, Питон-де-ля-Фурнез, Стромболи, Толбачик, Эребус, Этна, Ясур.

Экспериментальное моделирование. В современной литературе нет объяснения природы фонтанирования раскаленных бомб, поэтому мы приступили к созданию 2 лабораторных установок (высокотемпературной и низкотемпературной) для проведения физического моделирования процессов, определяющих фонтанирование.

### **Высокотемпературная аэро-, газо-, гидродинамическая лабораторная установка**

Конструкция установки включает (рис. 2а): высокотемпературную печь для получения расплава, тугоплавкий тигель, газовый баллон, редуктор тонкой настройки, барботажную систему; в качестве модельной жидкости используется легкоплавкое стекло. Максимальная температура нагрева в печи ~1 350 °С.

Задача использования высокотемпературной установки – моделирование формирования единичных капель расплава из пузырей, находящихся в расплаве, и выброса этих капель вверх, на высоту, на 3 порядка превышающую диаметр капли.

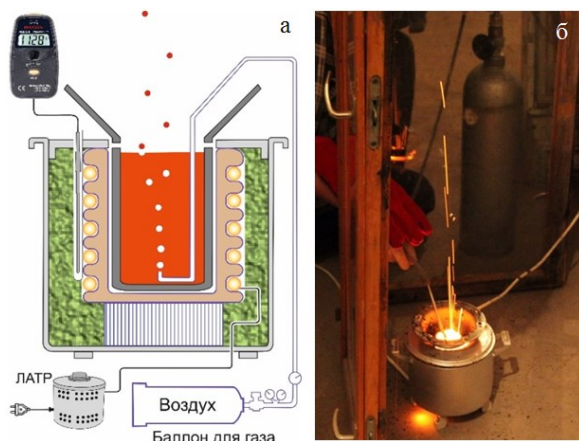


Рис. 2. а – высокотемпературная экспериментальная лабораторная установка, для изучения выброса одиночных капель, формирующихся из пузырьков, барботирующих сквозь расплав. б – фотография трасс раскаленных капель, выброшенных над поверхностью расплава кумулятивными силами лопающихся пузырьков.

Экспериментальные исследования на высокотемпературной установке. При температуре  $1\ 000\ ^\circ\text{C}$  расплав становится жидким, в него помещается барботер, сквозь который в расплав поступает воздух со скоростью несколько пузырьков в секунду. Достигая поверхности расплава, пузыри трансформируются в капли расплава ( $\varnothing \sim 3\ \text{мм}$ ), которые на большой скорости отлетают вверх от поверхности. Движение капель фиксируется фотоаппаратом в виде протяженных ярко желтых трасс. При температуре расплава  $1\ 128\ ^\circ\text{C}$  и при внутреннем диаметре сопла барботера  $5\ \text{мм}$  была достигнута максимальная высота выброса капель. Наибольшее их количество вылетало на высоту  $40\text{-}90\ \text{см}$  (рис. 2б), но некоторые достигали высоты около  $3\ \text{метров}$ .

Результат эксперимента: установлено, что максимальная высота вылета капель над поверхностью расплава на  $3$  порядка превышает размер капли. В вулканическом масштабе такое значение соответствует высоте выброса реальной раскаленной бомбы над кратером.

### Низкотемпературная аэро-, газо-, гидродинамическая лабораторная установка

Конструкция установки включает (рис. 3): прозрачную трубку ( $h=300\ \text{мм}$ ,  $\varnothing_{\text{внутр.}}=18\ \text{мм}$ ), герметичную в нижней части, механизм крепления иглы, газовый баллон, редуктор тонкой настройки, мощный источник света; в качестве модельной жидкости используется слабо-солевой водный раствор. Фото-регистрация выброса капель производится в темноте при мощном источнике красного цвета, который придает каплям цвет магматического расплава. Это необходимо для визуального сопоставления структуры экспериментального и реального вулканического фонтанирования.

Задача низкотемпературной установки – моделирование группового поведения образующихся из пузырей капель, вылетающих из жидкости и создающих непрерывно фонтанирующую струю, которая имеет максимальное структурное сходство с фонтанами раскаленных вулканических бомб.

Экспериментальные исследования на низкотемпературной установке. В нижнюю часть трубки через иглу поступает газ, и в слабо-солевом растворе воды формируются пузырьки, которые, создавая поток, барботируют вверх (рис. 3), вплоть до поверхности жидкости. На границе раздела двух сред (вода – атмосферный воздух) пузырьки трансформируются в капли, которые отрываются от поверхности воды и вылетают вверх. Диаметр капли  $\sim 2\ \text{мм}$ , высота вылета до  $200\ \text{мм}$ , т.е. максимальная высота вылета на  $2$  порядка превышает диаметр капли (см. рис. 1б).

Результат эксперимента: установлено, что поток барботирующих пузырьков, достигая поверхности жидкости, трансформируется в поток фонтанирующих капель. Сопоставление структур фонтанов раскаленных бомб и лабораторных фонтанов капель воды, показывает их большое морфологическое сходство, см. рис. 1а-б.

### Природа фонтанирования раскаленных бомб во время извержений жидких магматических расплавов

Использование результатов экспериментальных исследований и анализ литературных источников [1] позволил автору составить поэтапную схему преобразования пузырька в каплю (рис. 4).

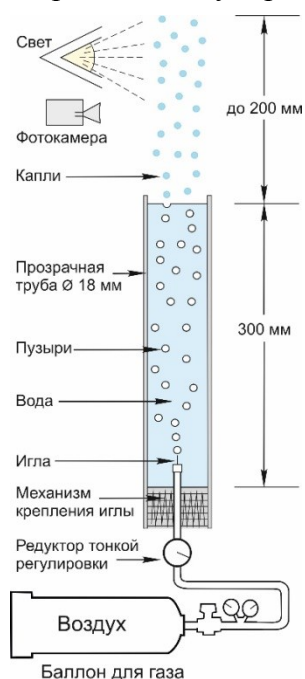


Рис. 3. Низкотемпературная установка для изучения эффектов группового выброса капель, формирующихся из пузырьков, барботирующих сквозь воду и создающих непрерывно фонтанирующую капельную структуру.

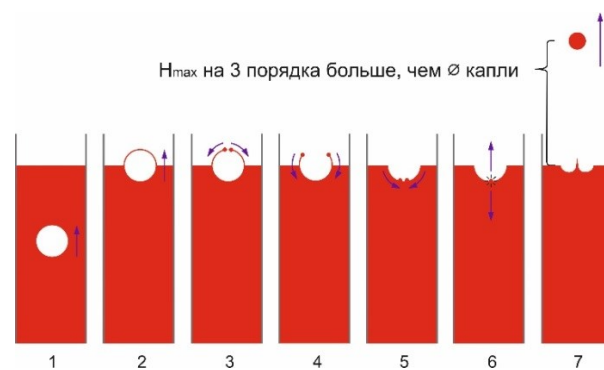


Рис. 4. Схематическое изображение механизма формирования одиночной капли из газового пузырька, всплывающего в жидкости и реализуемого на границе жидкость-атмосфера, составлено А.Ю. Озеровым.

Синтез результатов представленных исследований позволяет сформулировать следующее заключение: установлен механизм фонтанирования раскаленных бомб на вулканах с жидкими магматическими расплавами на основе анализа извержений, результатов лабораторного моделирования на специально сконструированных авторских аэро-, газо-, гидродинамических установках и литературных данных о трансформации пузырей в капли. Экспериментально установлено, что максимальная высота вылета капель над поверхностью расплава на 3 порядка превышает собственный размер капель и, что поток пузырьков в жидкости, достигая поверхности, трансформируется в поток капель. Эти данные позволяют объяснить как отдельные элементы процесса фонтанирования раскаленных бомб, так и весь процесс в целом. Показано, что выброс вулканических бомб на высоту десятки-сотни метров происходит при давлении близком к 1 атмосфере за счет силы поверхностного натяжения, существующей в пузырях. Предложен принципиально новый механизм фрагментации жидких магм, обусловленный поверхностным натяжением пузырей, достигающих поверхности раздела двух сред: магматический расплав – атмосфера.

Автор выражает благодарность инженерам ИВиС ДВО РАН А.В. Буткачу и В.С. Шульге за высокий профессионализм, изобретательность и терпение, а также Н.А. Озеровой за подготовку графических материалов.

#### Список литературы

1. *Brennen C.E. Fundamentals of Multiphase Flows. Cambridge University Press, 2005. 410 p.*