

МЕХАНИЗМ БАЗАЛЬТОВЫХ ВЗРЫВОВ

А.Ю. Озеров

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,
e-mail: ozerov@ozerov.ru

Объектом исследований выбран наиболее часто встречающийся на базальтовых вулканах тип вулканической активности – стромболианский [Лучицкий, 1971; Rittmann, 1960]. Стромболианский взрыв – это мощное, резкое и, как правило, неожиданное событие. Взрывы происходят в ходе вершинных, побочных и латеральных извержений. Средний по мощности базальтовый взрыв выбрасывает на поверхность 30-50 тонн твердых магматических продуктов, сильный 250–1000 тонн.

Поскольку нет однозначного универсального объяснения причин стромболианских взрывов, мы провели цикл экспериментальных исследований, которые позволили понять механизм стромболианской активности. В 2002 году были начаты лабораторные эксперименты с двухфазными смесями, за пять лет было сконструировано девять газогидродинамических экспериментальных установок. В результате автором создан Комплекс Аппаратуры Моделирования Базальтовых Извержений – КАМБИ.

Задача настоящих исследований – выявление причин возникновения дискретного режима извержения базальтовых магм в виде ритмических взрывов. Экспериментальные исследования включали изучение кинетики газожидкостных двухфазных смесей в вертикальных трубах (от момента зарождения первых газовых пузырьков до появления зрелых стабильных газовых структур) и сопоставление полученных данных с реальными вулканическими событиями.

Экспериментальные исследования

При создании установки мы стремились максимально учесть соотношения параметров реальных питающих магматических систем; за основу принят вулкан Ключевской (Камчатка) – типичный представитель базальтовых вулканов [Озеров и др., 1997]. Кроме того, мы старались избежать любых возможных структурных, запирающих и энергетических барьеров, способных повлиять на характер движения вещества. Установка смонтирована в здании Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Общая высота КАМБИ - 18 метров. Установка состоит из двух систем - моделирующей и регистрирующей (рис. 1). Поскольку КАМБИ создан для изучения вулканических процессов, поэтому для удобства последующего обсуждения результатов экспериментальных исследований названия составляющих модельной системы условно приближены к терминам вулканической системы.

Моделирующая система. включает емкость для приготовления газонасыщенной модельной жидкости (магматический очаг), прозрачный шланг (питающий канал), аквариум для приема поступающей модельной жидкости (кратерную область/жерло) (рис. 1). Описание магматической системы приводится снизу вверх.

В работе используется жидкость и два вида газа. В качестве жидкости применяется вода (H_2O). В качестве растворимого газа выбран углекислый газ (CO_2). Он хорошо растворяется в воде (в 1 литре H_2O при температуре эксперимента $20^{\circ}C$ и давлении 1 атм. растворяется - 828 мл CO_2), кроме того, этот газ достаточно легко переходит в свободную фазу. Газ азот (N_2) практически нерастворим в воде и используется в качестве поршня, выдавливающего модельную жидкость из бака. В результате предварительных опытов было установлено, что полный спектр проявления всех газогидродинамических режимов достигается при давлении газонасыщения - 1,6 атм.

Регистрирующая система. Она включает систему динамического видеослежения, электронный высотомер и спидометр, блок видеорегистрации, блок акустической регистрации, синхронизирующее устройство и отключающую систему (рис. 1).

В ходе экспериментов, при движении газонасыщенной жидкости по вертикальной колонне, изучалась перестройка структуры модельной жидкости. Описаны последовательно возникающие газогидродинамические режимы – жидкостный, пузырьковый, кластерный и снарядный. Следует добавить, что любой из установленных газогидродинамических режимов, в зависимости от давления газонасыщения в баке, может быть выведен на поверхность – на

верхний срез шланга, что позволяет моделировать разные типы вулканических извержений. Особое внимание уделено ранее неизвестному режиму, связывающему пузырьковый и снарядный режимы. Это новый, морфологически устойчивый газогидродинамический режим – кластерный режим.

Обсуждение результатов исследований

I. Результаты экспериментов на КАМБИ существенно дополняют известные газогидродинамические представления, на которых базируются вулканологические построения, связанные с динамикой движения базальтовых расплавов. Это связано с тем, что наши экспериментальные исследования характеризуются рядом особенностей, которые не принимались в расчет в ранее проводимых работах по гидродинамическому моделированию извержений:

1. Впервые была реализована модель, которая учитывала геометрические параметры питающего канала базальтового вулкана. Протяженность реальных вулканических каналов на несколько порядков больше их диаметра, поэтому на КАМБИ соотношение внутреннего диаметра канала к его высоте примерно 1:1 000.

2. Впервые при физическом моделировании извержений были реализованы условия подъема газонасыщенной жидкости по колонне, что дало возможность наблюдать процесс нуклеации газовых пузырьков, их последующий рост, формирование кластеров и снарядов.

3. При проведении экспериментов была обеспечена возможность естественного подъема и выхода на поверхность модельной жидкости, исключены любые структурные барьеры и флюктуации скорости подачи газонасыщенной жидкости.

II. В экспериментах однофазная модельная жидкость в процессе подъема по колонне превращается в двухфазную систему, при этом последовательно (снизу вверх) реализуются четыре режима: жидкостной, пузырьковый, кластерный и снарядный (рис. 2).

III. В результате экспериментальных исследований выявлено ранее неизвестное звено, связывающее пузырьковый и снарядный режимы. Мы предлагаем назвать его кластерным режимом (рис. 2, 13-й и 14-й метры). Это новый, морфологически устойчивый газогидродинамический режим. Описание этого режима мы не найдем в обобщающих монографиях [Кутателадзе и Накоряков, 1984, Prandtl-Fihrer durch die Stromungslehre, 2001; Wallis, 1969] и в публикациях по моделированию работы нефтяных скважин на крупногабаритных установках [Сахаров и Мохов, 2004].

Приведем основные характеристики кластерного режима: 1 - главным элементом режима является пузырьковый кластер, представляющий собой объем жидкости с высокой концентрацией пузырьков, сверху и снизу ограниченный жидкостью, не содержащей свободной газовой фазы; 2 - совокупность пузырьковых кластеров, следующих друг за другом на определенном расстоянии, создает кластерный режим; 3 - он всегда проявляется между пузырьковым и снарядным режимами; 4 - кластерные структуры на отдельных интервалах колонны имеют устойчивый, повторяющийся характер; 5 - морфологически выделяются кластеры двух видов – открытые и блокированные; 6 - скорость подъема кластеров ниже, чем у зрелого пузырькового и снарядного режимов; 7 -

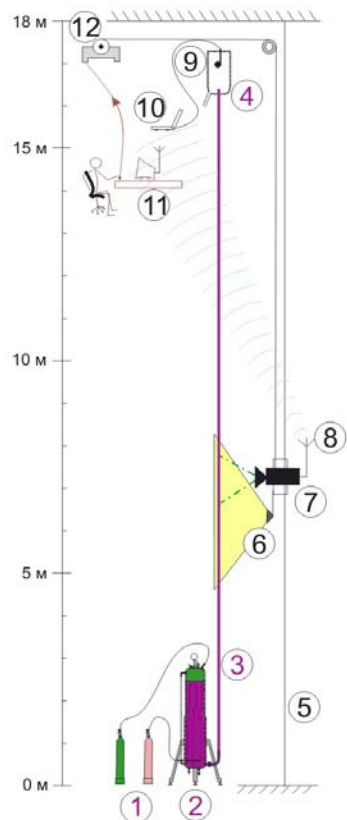


Рис. 1. Комплекс аппаратуры для моделирования базальтовых извержений – КАМБИ (моделирующая (1-4) и регистрирующая (5-12) системы). 1 - газовые баллоны высокого давления с CO₂ и N₂; 2 – герметичный бак для приготовления модельной жидкости; 3 – прозрачный шланг; 4 – аквариум для приема жидкости; 5 – трос, направляющий движение платформы динамического видеослежения; 6 - источник света; 7 – видеокамера; 8 – передатчик и телеметрическая антенна; 9 – микрофон; 10 – компьютер; 11 – приемник видеосигнала и монитор; 12 – электродвигатель. В верхней части рисунка – оператор управляющий движением камеры

продолжительность существования кластерного режима сопоставима со временем существования пузырькового и снарядного; 8 – кластерный режим возникает в широком диапазоне гидродинамических условий: в барботажной колонне (при нулевой скорости движения жидкости и без растворенного газа) и в движущейся газонасыщенной колонне (в интервале скоростей жидкости 1 - 10 см/с), 9 - механизм образования кластеров обусловлен взаимодействием крупных газовых структур со стенками канала, эффектами самозапираания и торможения.

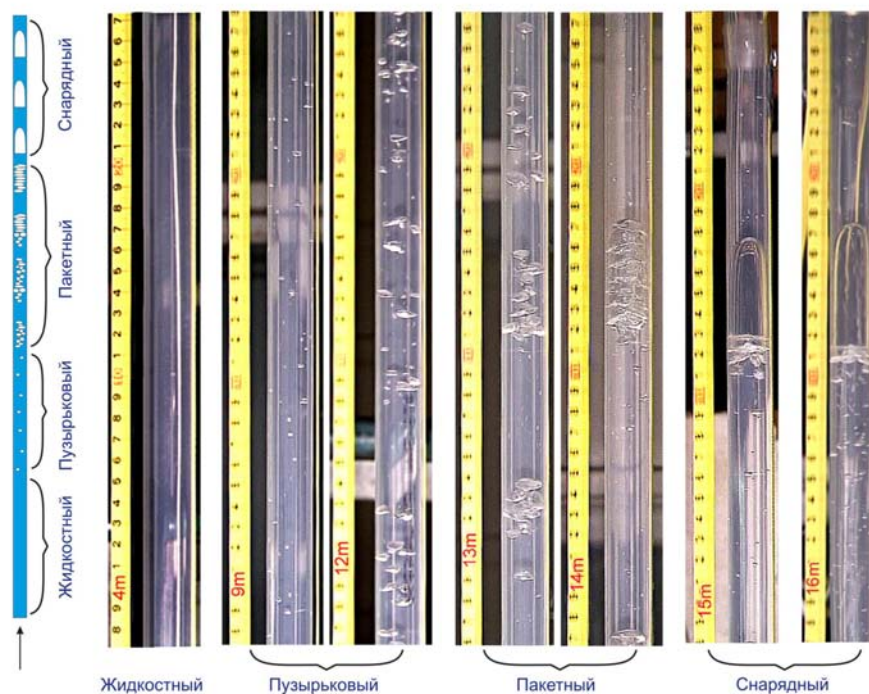


Рис. 2. Фрагменты газогидродинамических режимов, возникающих в процессе подъема газонасыщенной жидкости в вертикальном прозрачном шланге.

Схематическое положение газогидродинамических режимов по колонне (левый рисунок). Видеокadres режимов течения газонасыщенной модельной жидкости в вертикальном канале. Слева от шланга – мерная лента, с указанием высоты в метрах для каждого кадра (цифры показаны красным цветом). Все кадры последовательно эволюционирующей модельной жидкости получены в ходе одного проезда видеокамеры вдоль колонны, со скоростью подъема газовой фазы

Автор полагает, что кластерный режим присущ не только вулканическим процессам; его следует рассматривать более широко, как самостоятельный режим в физике газожидкостных смесей; например, на природных объектах (гидротермальные системы и грязевой вулканизм), при моделировании работы буровых скважин (гидротермальные и нефтяные) и в химической промышленности.

IV. Рассмотрим подробнее проявление каждого газогидродинамического режима на верхнем срезе трубы, поскольку именно в этой части КАМБИ моделируются процессы, происходящие в жерловой зоне базальтовых вулканов. В зависимости от количества растворенного газа в модельной жидкости любой из описанных режимов может быть выведен на поверхность. Приведем сопоставление поверхностных эффектов каждого режима с реальными динамическими параметрами базальтовых извержений.

Жидкостной режим. Газ в свободной фазе отсутствует, происходит равномерное излияние модельной жидкости на верхнем срезе трубы. В природных условиях, в кратерной зоне вулкана, жидкостной режим соответствует спокойному (без взрывов) равномерному излиянию лавы.

Пузырьковый режим обусловлен равномерным потоком пузырьков, лопающихся на поверхности жидкости. В процессе базальтовых извержений в зависимости от количества пузырьков, их размера и вязкости магмы внешние проявления этого режима могут быть весьма многообразными по своему характеру и масштабу. В жидких магмах может наблюдаться слабое «кипение» на поверхности лавового озера или слабое фонтанирование в жерле, а в более вязких – равномерная постоянная пепловая эмиссия, обусловленная разрывом перегородок

между пузырьками, достигающих поверхности. Главной особенностью этого режима является равномерное поступление газовых пузырьков к поверхности в течение длительного времени.

Кластерный режим характеризуется дискретными «всплесками» модельной жидкости на выходе из канала, обусловленными появлением пузырьковых кластеров; всплески чередуются со спокойным излиянием модельной жидкости. Проявлением кластерного режима в жидких магмах в кратерной зоне вулкана является квазипериодическое образование надувающихся пузырей или кратковременных дискретных лавовых фонтанов (всплески). В более вязких расплавах происходят пепловые выбросы без бомб или с небольшим их количеством. Образование вулканических бомб обусловлено утончением и разрывом верхнего слоя магмы над кластером и разрушением крупных «перегородок» в нем, а мелкая фракция тефры (вулканический пепел) образуется при разрушении тонких стенок более мелких пузырьков, формирующих кластер. В зрелом кластерном режиме эти явления проявляются более энергично и эффективно.

Снарядный режим при выходе из канала характеризуется резкими всплесками модельной жидкости, обусловленными разрывом слоя жидкости над газовым снарядом, достигшим поверхности; всплески чередуются со спокойным излиянием или подъемом жидкости по колонне. Проявление собственно снарядного режима в процессе вулканических извержений в жидких магмах – «выскакивающие» лавовые пузыри или резкие выбросы жидкой лавы. В более вязких магматических расплавах происходит стремительный разрыв кровли снаряда на поверхности, что приводит к обособленным сильным дискретным выбросам бомб.

Возникновение кластерного и снарядного режимов приводит к существенному перераспределению потенциальной энергии по магматической колонне, причем с повышением вязкости расплава при прочих равных условиях значительно увеличивается интенсивность газового импульса, вплоть до реальных взрывов.

Основные выводы

1. Для исследования характера движения магматического расплава в питающей системе вулкана создан комплекс аппаратуры моделирования базальтовых извержений (КАМБИ);

2. Анализ разнообразия режимов течения одной и той же модельной жидкости показал, что четыре режима: жидкостный, пузырьковый, кластерный и снарядный – являются продуктом закономерной эволюции газонасыщенного потока и имеют свои четкие морфологические особенности;

3. В ходе экспериментов выявлен и описан новый, ранее неизвестный режим течения двухфазных смесей в вертикальной колонне – кластерный, характеризующийся закономерным чередованием плотных скоплений газовых пузырьков (кластеров), разделенных между собой жидкостью, не содержащей свободной газовой фазы. Механизм образования кластеров обусловлен взаимодействием крупных газовых структур со стенками канала, в результате чего возникают эффекты самозапираания и торможения, и создается относительно медленно движущаяся динамическая газовая пробка - кластер;

4. Комплекс проведенных исследований позволил предложить новую модель газогидродинамического эволюционного движения магматического расплава в подводном канале базальтового вулкана. Реализация на поверхности различных режимов течения двухфазных смесей ответственна за многообразие эксплозивных событий в кратере вулкана.

Список литературы

Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука, 1984. 302 с.

Лучицкий И.В. Основы палеовулканологии. Том 1. Современные вулканы. М.: Наука, 1971. 480 с.

Озеров А.Ю., Арискин А.А., Кайл Ф., Богоявленская Г.Е., Карпенко С.Ф. Петролого-геохимическая модель генетического родства базальтового и андезитового магматизма вулканов Ключевской и Безымянный, Камчатка // Петрология, 1997. № 6. С. 614–635.

Сахаров В.А., Мохов М.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в вертикальных трубах и промысловых подъемниках. Издательство Нефть и газ. Москва, 2004. 392 с.

Prandtl - Führer durch die Strömungslehre. 2001. 718 p.

Rittmann A. Vulkane und ihre Tätigkeit. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1960. 336 p.

Wallis G.B. One-dimensional two-phase flow. McGraw-Hill Book Company, 1969. 408 p.