

Научные статьи

УДК 551.1/4

ПУЛЬСИРУЮЩЕЕ ФОНТАНИРОВАНИЕ РАСКАЛЕННЫХ БОМБ И ПРИРОДА ЕГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ

©2018 А.Ю. Озеров

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, 683006, Россия;
e-mail: ozerov@ozerov.ru*

В ходе исследований извержений Ключевского вулкана установлен новый тип взрывной активности — пульсирующее фонтанирование раскаленных бомб. Оно выражается в резких импульсах усиления интенсивности выброса бомб, ритмично следующих друг за другом с интервалом первые секунды на фоне более слабого фонтанирования. Анализ литературных и видео материалов показал, что этот тип извержения проявляется на вулканах Толбачинский, Килауэа, Этна, для которых характерны жидкие базальтовые и андезибазальтовые магмы. Для изучения природы пульсирующего фонтанирования был модернизирован созданный автором Комплекс Аппаратуры Моделирования Базальтовых Извержений. В процессе лабораторных экспериментов в прозрачной колонне ($h = 16.6$ м, $\varnothing = 50$ мм) установлен новый газогидродинамический режим пенных пузырьковых кластеров. Анализ природного вулканического и лабораторного процессов позволяет полагать, что пульсирующее фонтанирование раскаленных бомб определяется возникновением режима пенных пузырьковых кластеров в газожидкостном магматическом потоке, поднимающемся по подводящему каналу вулкана.

Ключевые слова: извержение, пульсирующее фонтанирование, газогидродинамическое моделирование, режим пенных кластеров.

ВВЕДЕНИЕ

Современная общепринятая классификация извержений базируется на пяти основных типах вулканической деятельности — гавайском, стромболианском, вулканском, пелейском и плинианском. Выделение этих типов было обосновано в работах (Lacroix, 1904; Mercalli, 1907; Wolff, 1914). Эта классификация является базовой и широко применяется при описании извержений (Влодавец, 1984; Лучицкий, 1971; Макдоналд, 1975; Ритман, 1964). В результате 35-летних исследований извержений вулканов Камчатки автором был установлен новый тип вулканической деятельности — периодическое фонтанирование раскаленных бомб (Конов, Озеров, 1988; Ozerov, Konov, 1987; Ozerov, et al., 2007) и определен механизм генерации этого процесса (Озеров, 2011). По имени вулкана Ключевской (рис. 1 на 1 стр. обложки), на котором

этот тип извержения был детально исследован, автор предложил называть его ключевским типом вулканической деятельности (Озеров, 2012; 2016).

Кроме того, изучение динамических параметров извержений Ключевского вулкана позволило выделить и еще один тип вулканической деятельности, принципиально отличающийся от ранее описанных. Его представлению и определению механизма его действия, посвящена настоящая работа.

Объектом исследования является пульсирующее фонтанирование раскаленных бомб — новый тип вулканической деятельности, установленный при изучении извержений Ключевского вулкана (Камчатка, Россия).

Это одно из наиболее мощных и феерических явлений на Земле, когда в фонтанирующей струе раскаленных вулканических бомб возникают ритмичные импульсы усиления,

происходящие с секундными интервалами и значительно увеличивающие интенсивность извержения. Описания этого явления нет в научной вулканологической литературе (Влодавец, 1984; Лучицкий, 1971; Макдоналд, 1975; Ритман, 1964; Davidson et al., 1997; Encyclopedia ..., 2000, 2016; Lockwood, Hazlett, 2010; Schmincke, 2004).

Данный тип активности представляет серьезную опасность для людей вследствие массового выпадения вулканических бомб, а также для авиации в связи с обильными выбросами вулканического пепла, разносимого эруптивными шлейфами на сотни километров от места извержения.

Причины возникновения пульсирующего фонтанирования неизвестны. Это связано с тем, что ни в физике, ни в физической вулканологии не описаны аналоги подобных процессов, поэтому реальная модель извержения такого типа не разработана. В этой связи мы провели комплексные вулканологические и экспериментальные исследования, которые позволили представить это явление и объяснить механизм его генерации.

Цель исследований — выделить и охарактеризовать процесс пульсирующего фонтанирования раскаленных бомб, а также определить его механизм.

Основной метод — экспериментальное моделирование динамики движения двухфазных смесей в вертикальных трубах и сопоставление полученных данных с реальными вулканическими событиями.

Объект моделирования — процессы, происходящие в магматической колонне во время подъема магмы по подводящему каналу вулкана (экспериментальная колонна), и эффекты пульсирующего фонтанирования в кратере вулкана (верхний срез колонны).

Исследования проводились на Ключевском вулкане, где широко проявлены процессы пульсирующего фонтанирования. Это один из самых активных вулканов на Земле, крупнейший вулкан в Евразии (высота 4 822 м), типичный представитель базальтовых-андезиобазальтовых вулканов (Озеров, 1997).

В настоящей публикации приведены сведения о пульсирующем фонтанировании, на основе которых сформулированы те принципы, которые мы реализовали при проведении экспериментальных работ (Озеров, 2007; 2010). Это позволило установить процессы, проходящие в подводящем магматическом канале Ключевского вулкана во время извержения. В результате исследований представлен сценарий пульсирующего фонтанирования базальтовых-андезиобазальтовых магм.

ПУЛЬСИРУЮЩЕЕ ФОНТАНИРОВАНИЕ РАСКАЛЕННЫХ БОМБ НА КЛЮЧЕСКОМ ВУЛКАНЕ

Сведения о секундных периодичностях в динамике извержений в научной литературе крайне скудны. Чтобы составить представление об этом явлении приведем описания всех имеющихся данных.

Первые наблюдения секундных периодичностей на Ключевском вулкане относятся к вершинному извержению 24 января 1938 г.: «Выбросы бомб происходили, примерно, через 1 сек» (Меняйлов, Набоко, 1939, с. 4). Наблюдения проводились с расстояния 45 км, высота выброса бомб не сообщалась. Учитывая дистанцию наблюдения и наши представления о характере деятельности Ключевского вулкана, можно предположить, что высота выброса бомб составляла первые сотни метров.

Следующее описание секундных периодичностей было выполнено И.Т. Кирсановым в 1966 г. во время побочного извержения имени Б.И. Пийпа. 11–12 октября взрывы происходили через 0.66–0.7 с — «... фонтаны раскаленной лавы достигали здесь высоты 300–400 м, отдельные бомбы выбрасывались на высоту 800–1000 м» (Кирсанов, 1968, с. 17). В конце октября — первой половине ноября интервал составлял 2 с, а 16 ноября — 2.5–3 с.

Во время вершинного извержения Ключевского вулкана 1978 г., по устному сообщению И.Т. Кирсанова, 2–4 августа взрывы происходили через 1 с, высота выбросов бомб достигала 100–150 м. 10 июля интервал между взрывами составлял 2–3 с. 20 июля взрывы следовали через 3 с, с высотой выброса раскаленного материала до 250–300 м.

При побочном извержении прорыва Предсказанный в 1983 г. 23 марта — «Из конуса происходили выбросы шлаки и пористых вулканических бомб высоту до 40 м над кромкой кратера. Взрывы следовали с интервалом 3–5 с». 10 июня — «... взрывы следовали с интервалом 3–4 с с высотой полета бомб до 80 м» (Хренов и др., 1985, с. 7 и 11).

Наиболее детальные наблюдения секундных периодичностей были выполнены автором настоящей публикации во время вершинного извержения в июле–августе 1984 г. с расстояния 14 км от кратера. Деятельность вулкана в это время характеризовалась интенсивным фонтанированием — струя раскаленных бомб поднималась на высоту 200–800 м над кратером. В динамике фонтанирующей струи было выделено два режима — равномерный и пульсирующий. Во время равномерного режима бомбовая струя имела достаточно постоянную форму

однородного факела. Пульсирующий режим характеризовался тем, что по струе раскаленных бомб, через каждые несколько секунд снизу вверх проскакивала более плотная, более яркая, более насыщенная порция бомб, своеобразный резкий, кратковременный, высокоинтенсивный импульс. Временами каждый импульс выглядел как фронт распространяющейся волны, в других случаях — как общее кратковременное усиление, иногда верхняя часть движущейся порции приобретала форму стрелы или нескольких стрел. В отдельные моменты каждый последующий импульс был похож на взрыв в нижней части струи раскаленных бомб. В результате складывалась динамическая картина периодически повторяющихся взрывов, происходящих через секундные интервалы. Этот процесс мы определяем как режим пульсирующего фонтанирования.

Интервалы между пульсирующими усилениями интенсивности выбросов не всегда одинаковы. В одних случаях они составляли около 2 с (20 июля 1984 г.), в других — около 3 с (4 августа 1984 г.). Иногда пульсирующий характер исчезал, и струя фонтана выглядела довольно однородной (режим равномерного фонтанирования).

Важно отметить, что выделение режима пульсирующего фонтанирования было проведено по результатам наших визуальных наблюдений 1983–1984 гг., а также по данным литературных источников (Кирсанов, 1968; Меняйлов, Набоко, 1939; Хренов и др., 1985). Использование данных региональных сейсмических станций (<http://www.emsd.ru/rtss/stations>), расположенных на Ключевском вулкане на расстоянии около 14 км от места извержения и регистрирующих низкочастотное вулканическое дрожание, не позволяет выделять периодические флуктуации пульсирующего фонтанирования из-за ослабления, рассеивания и преломления сейсмического сигнала.

Анализ вулканологических и петрологических данных показывает, что описанное пульсирующее фонтанирование не обусловлено последовательными периодическими флуктуациями состава магматического вещества, не является следствием перестройки подводной системы вулкана. Оно также не связывается нами с аэродинамическим преобразованием бомбовой струи, так как периодические импульсы начинаются непосредственно от кромки кратера. Мы пришли к заключению, что процесс пульсирующего фонтанирования является следствием эндогенного структурирования, происходящего в поднимающемся магматическом потоке. Определяющее значение при формировании пульсирующего режима играет физическое состояние магматического расплава. Представленный

режим следует рассматривать как поверхностное проявление свойств газожидкостного магматического потока, движущегося по вертикальному подводному каналу и приобретающего периодический/пульсирующий характер за счет структурирования газовой фазы в магме в процессе подъема.

Подводя итог описанию, дадим определение обсуждаемого природного явления.

Пульсирующее фонтанирование — это периодический/квазипериодический процесс резкого, кратковременного усиления интенсивности выброса раскаленных бомб, происходящий на фоне более слабого фонтанирования в ходе извержения жидких базальтовых-андезитовых-базальтовых магматических расплавов. Общий интервал периодов импульсов усиления интенсивности фонтанирования для разных вулканов и в разные фазы извержения может колебаться от 0.6 до 5 с. Период между импульсами в пределах каждой конкретной временной последовательности событий близки между собой.

Пульсирующее фонтанирование осуществляется в широком диапазоне интенсивности извержений при высоте выброса бомб от 80 до 800 м. Режим пульсирующего фонтанирования усиливает интенсивность извержения — бомбы вылетают выше и разлетаются дальше. Пульсирующее фонтанирование возникает во время вершинных и побочных извержений, может происходить при одновременном излиянии лавовых потоков, но может происходить и без них. Режим пульсирующего фонтанирования обычно существует десятки секунд, минуты, десятки минут, затем он может сменяться равномерным фонтанированием и через некоторое время возникать вновь.

ПУЛЬСИРУЮЩЕЕ ФОНТАНИРОВАНИЕ РАСКАЛЕННЫХ БОМБ НА ДРУГИХ ВУЛКАНАХ МИРА

После того, как на Ключевском вулкане был открыт и описан обсуждаемый новый тип извержения, автором была поставлена задача обнаружить аналогичные явления на других базальтовых-андезитовых-базальтовых вулканах мира. Конкретных описаний этого явления установить не удалось, поэтому были использованы общие описания динамических характеристик извержений, видео- и фотоматериалы. Анализ этих данных показал, что пульсирующее фонтанирование проявлялось во время извержений вулканов Килауэа, Толбачинский, Этна.

В книге (Большое ..., 1984) при описании Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–76 гг. (БТТИ), многократно приводятся данные о кратковременных усилениях

в динамике фонтанирования раскаленных бомб, наблюдавшихся через секундные интервалы. Приведем несколько цитат из этой монографии.

1975 г. 6–8 июля — *извержение Первого конуса, Северный прорыв, БТТИ*. «Серии взрывов стромболианского типа, сопровождаемые грохотом, ритмично следовали один за другим через 0.5–1.0 с. Продолжительность серий была от 2 до 20 мин». (Большое ..., 1984, с. 12).

1975 г. 9 июля — *извержение Первого конуса, Северный прорыв, БТТИ*. «...серии взрывов продолжительностью несколько минут или часов, когда взрывы следовали один за другим с интервалом 1–2 с». (Большое ..., 1984, с. 13).

1975 г. 9 августа — *извержение Второго конуса, Северный прорыв, БТТИ*. «Истечение раскаленного материала было пульсирующим с частотой пульсаций 60–80 в мин». (Большое ..., 1984, с. 31).

1975 г. 21 августа — *извержение Второго конуса, Северный прорыв, БТТИ*. «21 августа Второй конус извергался в режиме непрерывного струйного истечения с пульсациями-взрывами через 2–3 с, во время которых высота раскаленной части столба составляла 300 м». (Большое ..., 1984, с. 42).

1975 г. 20 сентября — *извержение шлакового конуса, Южный прорыв, БТТИ*. «Эксплозивная деятельность проявлялась в виде фонтанов лавы, среди которых с 20 сентября стало возможно различать отдельные взрывы, следовавшие с частотой от 20 до 40–50 в минуту». (Большое ..., 1984, с. 90).

1975 г. октябрь — *извержение шлакового конуса, Южный прорыв, БТТИ*. «Выбросы из жерла бывали вертикальными и наклонными, под углом 60–70° к горизонту. Бомбы падали в 1 км от конуса. Частота взрывов составляла 30–60 в минуту». (Большое ..., 1984, с. 94).

Приведенные данные, по нашему мнению, определенно демонстрируют, что во время БТТИ в 1975 г., пульсирующее фонтанирование (от 0.5 до 3 с) проявлялось в режиме деятельности разных шлаковых конусов и в разные моменты извержения.

Другие свидетельства пульсирующего фонтанирования раскаленных бомб были получены нами по фотографиям, опубликованным в статьях, и при просмотре документальных видеофильмов об извержениях (рис. 2а–г).

На рис. 2а представлен фрагмент извержения вулкана Килауэа 29 ноября 1959 г. Фонтан раскаленных бомб поднимается на высоту 450 м. В строении фонтана отчетливо видны три следующих друг за другом яркие порции бомб, формирующие режим пульсирующего фонтанирования.

На рис. 2б представлен фрагмент извержения конуса Пу-Оо, вулкан Килауэа, 1984 г. Фонтан

раскаленных бомб поднимается на высоту 450 м. В строении фонтана отчетливо видны три следующих друг за другом порции бомб. Фотография наглядно демонстрирует характерные особенности, по которым представленный эпизод извержения отнесен к типу пульсирующего фонтанирования.

На рис. 2в приведен стоп-кадр из документального фильма о вулкане Этна (Сицилия, 2000 г.). Общая высота фонтанирования достигала 800 м. На фоне струи фонтана отчетливо видна яркая, стреловидная порция бомб. При просмотре видеофильма хорошо видно, что такие порции, следующие друг за другом примерно через 1 с, формируют динамическую картину пульсирующего фонтанирования.

На рис. 2г приведен стоп-кадр из видеоматериалов, полученных во время Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС ДВО РАН 2012–2013 гг. В январе 2013 г., было зарегистрировано, что единая, на первый взгляд, эруптивная колонна раскаленных бомб, достигающая высоты 200 м, состоит, на самом деле, из следующих друг за другом примерно через одну секунду кратковременных интенсивных периодических импульсов, формирующих режим пульсирующего фонтанирования. Один из развивающихся импульсов усиления виден в правой части на фоне более слабого фонтанирования.

Представленные литературные материалы, фото- и видеокadres извержений убедительно свидетельствуют о том, что выделенное нами на Ключевском вулкане пульсирующее фонтанирование — достаточно распространенное явление, наблюдаемое в динамике извержений еще нескольких вулканов мира — Килауэа, Толбачинский, Этна.

Описанные периодичности и закономерности в эруптивной деятельности вулканов могут быть рассмотрены, как эталонные данные, с которыми следует сопоставлять результаты экспериментального моделирования, направленного на определение и изучение механизма извержений базальтовых-андезитобазальтовых вулканов.

КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

Создание лабораторной аппаратуры физического моделирования было обусловлено необходимостью определения механизмов периодических процессов, проявляющихся в динамике извержений Ключевского вулкана. Изучение периодичностей разного уровня было начато 35 лет назад и продолжается до настоящего времени (Конов, Озеров, 1988; Озеров, 2003,

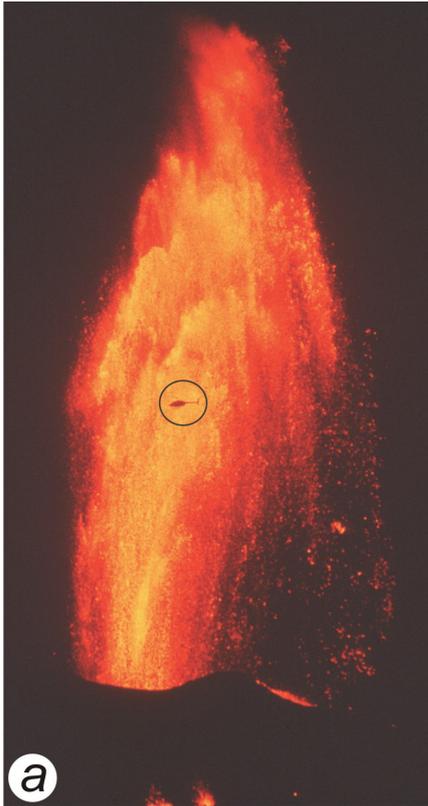


Рис. 2. Пульсирующее фонтанирование раскаленных бомб на вулканах Килауэа, Толбачинский, Этна: *a* — извержение вулкана Килауэа, Большой остров, Гавайи, высота фонтана 450 м, 29 ноября 1959 г., фото Джерри Итона (Jerry Eaton); *б* — извержение конуса Пу-Оо, вулкан Килауэа, Большой остров, Гавайи, высота фонтана 450 м, 1984 г., фото Марди Лэйн (Mardie Lane); *в* — извержение вулкана Этна, остров Сицилия, общая высота фонтанирования 800 м, 2000 г., стоп-кадр из документального фильма «Вулканы, раскаленные убийцы» оператора Джефа Мекли (Geoff Mackley); *г* — извержение кратера им. С.И. Набоко, Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия ИВиС ДВО РАН, высота фонтанирования 200 м, январь 2013 г., стоп-кадр из видеоматериалов И.Е. Далецкой.

2016; Ozerov, Konov, 1987; Ozerov et al., 2007). В результате было установлено новое свойство базальтового-андезиобазальтового вулканизма — устойчивые периодичности в динамике извержений. Определены три основные группы периодичностей: пульсирующее фонтанирование — 0.66–5 с; стромболианские взрывы — 20 с–20 мин и периодическое фонтанирование — 1.5–8 ч.

Для выяснения причин установленных периодичностей, автор обратился к физическим основам, на которых базируется моделирование вулканических процессов. В настоящее время для объяснения процессов, происходящих в подводных системах базальтовых-андезиобазальтовых вулканов, используются законы движения газожидкостных смесей в вертикальных трубах. Первое системное исследование режимов течения двухфазных смесей в вертикальных трубах было представлено в работе (Козлов, 1954), где установлены и описаны пять основных режимов течения двухфазных смесей — пузырьковый, пробковый (снарядный), эмульсионный (смешанный), пленочный (кольцевой) и капельный.

Прямое сопоставление этих режимов с типами вулканических извержений впервые было проведено в работах (Дроздин, 1969, 1980), в которых показано, что конкретный тип извержения должен быть связан с определенным газогидродинамическим режимом. С тех пор, для объяснения особенностей динамики извержений вулканологи используют пять газогидродинамических режимов в вертикальных трубах, установленных Б.К. Козловым (1954).

За 64 года, прошедших с момента открытия этих режимов (Козлов, 1954), представления о процессах движения двухфазных смесей в вертикальных трубах фактически не изменились. Не было выполнено принципиально новых разработок, не было открыто ни одного нового режима течения двухфазных смесей, поэтому вулканологи вынуждены использовать газогидродинамические режимы практически в «первозданном» виде. Это не позволяет корректно интерпретировать результаты вулканологических наблюдений и геофизические данные, полученные во время извержений при помощи современной аппаратуры.

Анализ исследований, проводимых до нас, показал, что для моделирования природы периодичностей, установленных на Ключевском вулкане, необходимо иметь более полное представление о процессах, протекающих в вертикальных газогидродинамических системах. Именно поэтому в 2003 г. мы были вынуждены перейти к проектированию и строительству оригинального авторского лабораторного Комплекса Аппаратуры Моделирования Базальтовых Извержений — КАМБИ (Озеров, 2007, 2010).

К настоящему времени в результате экспериментальных исследований на КАМБИ установлены механизмы стромболианских взрывов (Озеров, 2009; Озеров, 2010) и периодического фонтанирования (Озеров, 2011, 2012). После этого был начат третий цикл лабораторных исследований, направленных на определение механизма пульсирующего фонтанирования.

Для изучения процессов, происходящих в питающих системах вулканов во время пульсирующего фонтанирования, экспериментальная установка была модернизирована. Кратко представим ее конструктивные особенности.

КАМБИ имеет общую высоту 18.6 м и состоит из двух систем — моделирующей и регистрирующей. Установка расположена в здании Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН в г. Петропавловске-Камчатском.

Моделирующая система включает «очаг», «подводящий канал», «кратер» лабораторного «вулкана».

«Очаг» представляет собой герметичный бак объемом 350 л. Бак заполняется водой, затем производится ее насыщение газом CO_2 . Этот газ хорошо растворяется в воде — 828 мл в 1 л воды. Давление растворения 1.6 технической атмосферы. В результате мы получаем однородную газонасыщенную модельную жидкость, которая является экспериментальным аналогом магматического расплава.

«Подводящий канал». Из нижней части бака выходит вертикальная прозрачная колонна. Ее высота 16.6 м. Специально для экспериментального моделирования пульсирующего фонтанирования была установлена новая прозрачная колонна с большим внутренним диаметром — 50 мм. Отметим, что использование такой колонны в опытах с газонасыщенными жидкостями проводится впервые. Отношение рабочего сечения колонны к ее длине 1:332. Такое соотношение, по нашему мнению, близко к реальным параметрам вулканических питающих каналов. Во время экспериментов газонасыщенная модельная жидкость поднимается по подводящему каналу. В результате падения давления происходит выделение газовой фазы и ее структурирование.

«Кратер». Эта часть установки позволяет отслеживать процессы, происходящие при переходе модельной жидкости из прозрачной колонны в открытое пространство.

Регистрирующая система предназначена осуществлять динамическое видеослежение за процессами в прозрачных колоннах.

КАМБИ является лабораторным аналогом извергающегося вулкана. Его назначение — экспериментальное моделирование газогидродинамических процессов в магматическом потоке во

время подъема по подводящему каналу вулкана (экспериментальная колонна) и периодических взрывных эффектов извержений в кратере вулкана (верхний срез колонны).

Задача экспериментальных исследований — изучение физических процессов, обеспечивающих формирование в подводящем канале вулкана газовых структур, определяющих возникновение в кратере режимов пульсирующего фонтанирования.

Отметим, что задача прямого моделирования динамических параметров пульсирующего фонтанирования в вулканологии поставлена впервые.

Особенность экспериментальных исследований заключается в сопоставлении результатов газогидродинамического моделирования с реальными, ярко выраженными, природными эффектами извержений.

Важно подчеркнуть, что в экспериментах на КАМБИ мы имеем дело с протяженной вертикальной колонной, имеющей неизменный диаметр по всей длине. Отсутствуют какие-либо неоднородности, способные повлиять на движение двухфазного потока как в колоннах, так и при выходе на поверхность, то есть система является открытой.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ФОНТАНИРОВАНИЯ РАСКАЛЕННЫХ БОМБ

В экспериментах установлено, что при движении модельной жидкости по вертикальной 50-миллиметровой колонне, в зависимости от расхода модельной жидкости, могут реализовываться два сценария развития двухфазного потока: 1 — периодический (режимы: жидкостной, пузырьковый и пенных кластеров), 2 — равномерный (режимы: жидкостной, пузырьковый и пенный).

Опишем эксперимент, приводящий к периодическому структурированию модельной жидкости, именно этот случай позволяет понять природу пульсирующего фонтанирования.

Во время подъема по вертикальной колонне модельная жидкость претерпевает значительные структурные изменения. Приведем их описание в направлении снизу вверх. В скобках после названия режима, выделенного курсивом, будем указывать интервал его проявления в вертикальной колонне.

Жидкостный режим (0–4 м). В этом интервале по колонне движется однородная модельная жидкость. Это режим однофазного течения, он не имеет пузырьков, весь газ находится в растворенном состоянии. По мере подъема, в жидкости

падает давление, что приводит к мобилизации растворенного газа, создаются условия для выделения газа в свободную фазу.

Пузырьковый режим (5–8 м). На высоте 5 м в колонне начинают появляться первые газовые пузырьки размером ~1 мм. По мере подъема количество пузырьков постепенно возрастает. Ранее образовавшиеся увеличиваются в размерах, и на высоте 8 м пузырьки достигают 2–4 мм (диаметр по горизонтали), средняя скорость их подъема — 30–35 см/с. Продолжается образование новых пузырьков, это приводит к тому, что в колонне наблюдается непрерывный размерный ряд пузырьков от мелких (вновь образованных) до крупных (сформировавшихся на более низких уровнях колонны). Примыкание, слипание и слияние пузырьков не происходит.

В интервале 5–8 м поведение пузырьков можно охарактеризовать, как стабильный устойчивый равномерный процесс — происходит плавный рост образовавшихся пузырьков и постепенное появление новых мелких пузырьков. Пузырьки движутся по всему сечению колонны. Каких-либо резких изменений в колонне не происходит. Количество пузырьков в потоке таково, что жидкость в колонне сохраняет прозрачность — хорошо видны пузырьки, находящиеся у задней стенки колонны, и объекты, расположенные непосредственно за экспериментальной колонной.

Режим пенных кластеров (9–16.6 м). На высоте 9 м равномерный характер развития пузырькового потока нарушается, внутри него возникают завихрения пузырьков. По мере подъема эти завихрения становятся более отчетливыми. Последующее развитие завихрений приводит к тому, что в какой-то момент в потоке образуется пузырьковый сгусток. Он состоит из пузырьков одного размера, который является максимальным для развивающегося потока ~ 5 мм в диаметре. На высоте 12 м темп нуклеации возрастает, количество мелких пузырьков лавинообразно увеличивается, в результате чего на 13 м движущийся по экспериментальной колонне двухфазный поток становится мутным и начинает утрачивать свою прозрачность. Здесь же, ранее образовавшийся пузырьковый сгусток, превращается в клубок плотно прижатых друг к другу пузырьков. По мере подъема, количество пузырьков в клубке возрастает, а расстояние между ними уменьшается, происходит своеобразное «уплотнение» пузырьков клубков. В образованной структуре объемная доля газовых пузырьков значительно превосходит объем жидкости, находящейся между этими пузырьками. На 15-ом метре колонны объем газовой фазы (по оценкам, полученным по стоп-кадрам) превышает 75%, что позволяет говорить о пенном

состоянии описываемого двухфазного потока. Движущиеся по пенному потоку более плотные скопления пузырьков, могут быть определены, как пенный пузырьковый кластер (рис. 3а). В процессе подъема кластер увеличивается в размере, начинает занимать практически все сечение колонны, верхняя часть приобретает выпуклую обтекаемую форму. На 15–16 метрах изменяются качественные характеристики пенного кластера — он приобретает свою собственную скорость — 90–100 см/сек, которая значительно превышает среднюю скорость пузырьков в общем потоке — 35–40 см/сек. Движущиеся на больших скоростях пенные кластеры отжимают пузырьки из пенного потока, и над кластером формируется слой жидкости (несколько сантиметров) без газовых пузырьков (рис. 3б). По мере подъема пенный кластер увеличивается за счет присоединения к нему новых пузырьков, длина кластера значительно возрастает, и верхней части колонны (15–16.6 м) наблюдается уже крупный протяженный пенный кластер. Выход пенного кластера на поверхность сопровождается резким, хорошо заметным всплеском газожидкостной смеси.

Приведенное описание было направлено на получение четкого представления об образовании и движении единичного кластера в потоке. Рассматривая картину движения в целом, следует сделать акцент на том, что продолжающий подниматься по экспериментальной колонне газонасыщенный поток на тех же уровнях высоты попадает в те же газогидродинамические условия, в которых происходили вышеописанные морфологические преобразования. Это приводит к формированию следующего кластера и т.д. В результате, по колонне одновременно друг за другом движутся несколько (5–7) пенных кластеров. Последовательное движение кластеров по колонне создает периодический режим пенных кластеров. Интервал между поступлением кластеров на поверхность составляет примерно секунду. Таким образом, следующие друг за другом пенные кластеры, достигая поверхности, генерируют периодические/квазипериодические всплески модельной жидкости.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для изучения процессов, происходящих в питающих системах базальтовых-андезитобазальтовых вулканов при пульсирующем фонтанировании раскаленных бомб, установленном во время наших экспедиционных работ на Ключевском вулкане, проведен цикл экспериментальных лабораторных исследований. Использовалась крупногабаритная установка



Рис. 3. Фрагменты газогидродинамических режимов, возникающие в газонасыщенной модельной жидкости верхней части вертикальной прозрачной экспериментальной колонны ($\Phi_{\text{внутр.}} = 50$ мм, $h = 16.6$ м, протяженность демонстрируемых фрагментов = 40 см). а — режим пенных кластеров (без разрыва сплошности пенного потока); б — режим пенных кластеров (с разрывом сплошности пенного потока).

КАМБИ (Озеров, 2007, 2010), которая была существенно модернизирована для настоящих исследований. Выделен новый тип вертикального газогидродинамического течения — режим пенных пузырьковых кластеров — структурные характеристики которого являются ключевыми для понимания механизма пульсирующего фонтанирования раскаленных бомб. Отметим главные свойства установленного в эксперименте потока пузырьков, затем проведем сопоставление вулканологических и эмпирических лабораторных данных.

Индивидуальное поведение пузырьков (пузырьковый режим и режим пенных кластеров). В результате лабораторных исследований в экспериментальной колонне установлены три газогидродинамических режима, в скобках приведены интервалы их проявления снизу вверх: жидкостный (0–4 м), пузырьковый (5–8 м), пенных кластеров (9–16.6 м). Поведение пузырьков в пределах пузырькового и кластерного режимов имеет разные тенденции в динамике роста, представим их более полно.

По всему интервалу пузырькового режима происходит нуклеация пузырьков и последующий их закономерный рост. Пузырьки, образовавшиеся в начале пузырькового режима (5-й метр), поднявшись по колонне на 3–4 метра, на 8-ом метре вырастают до размера 4–5 мм. Пузырьки, выделившиеся позже, на 6–7 метре, достигнув уровня 8-го метра, вырастают до 2–3 мм. В результате, в переходной области между пузырьковым и кластерным режимами, на высоте колонны 8–9 м, наблюдается непрерывный размерный ряд пузырьков — от 1 мм до 5 мм. Для интервала пузырькового режима существует прямая связь между уровнем нуклеации пузырька и его размером — чем раньше возник пузырек, тем на более значительную величину вырос.

В интервале кластерного режима 9–16.6 м ожидаемое, по мере движения вверх, продолжение роста пузырьков не происходит. Наблюдается иная картина — процесс выравнивания размера пузырьков. Крупные пузырьки, выделившиеся раньше, прекращают свой рост, а мелкие, зародившиеся позже, растут значительно быстрее, «подтягиваясь» в размерах до крупных. В результате геометрические параметры пузырьков, имеющих максимальный величину, в потоке выравниваются, и они приближаются к одному размеру — диаметр по горизонтальной оси ~5 мм. Нуклеация в потоке продолжается, и пространство в плотной упаковке близко расположенных крупных пузырьков занимают более мелкие пузырьки. Для кластерного режима прямая связь между уровнем образования пузырьков в колонне и их

размером отсутствует. Пузырьки не вырастают выше одного максимального размера, в нашем случае, ~5 мм. Одноразмерность пузырьков — одна их характерных черт режима пенных кластеров.

Таким образом, в ходе представленного эксперимента нами выявлены две различные тенденции эволюции пузырьков во время их подъема по экспериментальной колонне. В пузырьковом режиме — закономерный рост пузырьков. В кластерном — выравнивание размера пузырьков, стремление к одноразмерности.

Групповое поведение пузырьков, мягкие и отжимающие пенные кластеры. Рассмотрение режима пенных кластеров (9–16.6 м) позволяет выделить две фазы режима: начальную и зрелую. Для них характерны индивидуальные разновидности пенных кластеров: 1 — кластеры мягкие и 2 — кластеры отжимающие.

Мягкие кластеры (интервал в колонне 14–16.6 м) представляют собой небольшие сгустки пузырьков, которые имеют поперечный диаметр 3–4 см. В процессе своего движения мягкие кластеры не нарушают сплошность пенного потока (рис. 3а).

Отжимающие кластеры (интервал в колонне 14–16.6 м) представляют собой удлиненные (20–40 см) сгустки пузырьков, которые на всем своем протяжении примыкают к экспериментальной колонне (рис. 3б). Отжимающие кластеры нарушают сплошность пенного потока. В процессе своего подъема они развивают большую скорость — в 2–3 раза выше, чем пенный поток, вмещающий кластеры. Разница в скоростях, по-видимому, обусловлена незначительным боковым трением кластера. В результате кластеры отжимают пузырьки из пены перед собой, и перед движущимся кластером формируется слой жидкости от 1 до 7 см (разные опыты) без газовых пузырьков. За счет этого, в структуре пенного потока происходит разрыв сплошности — формируется слой жидкости без пузырьков, располагающейся над верхней кромкой кластера. Периодическое чередование пенных кластеров и разрывов в структуре пенного потока формирует режим пенных пузырьковых кластеров.

Теперь дадим определение нового газогидродинамического режима.

Режим пенных пузырьковых кластеров представляет собой последовательное движение тугих сгустков пузырьков — кластеров — в газонасыщенном пенном потоке, движущемся вверх по вертикальной колонне большого диаметра.

В процессе формирования пенных кластеров основную роль играют крупные одноразмерные пузырьки. Зрелые кластеры по всему своему протяжению занимают все сечение колонны.

Всплывающий в потоке пены зрелый пенный кластер имеет большую скорость — в 2–3 раза выше, чем вмещающий его пенный поток. Выход кластера на поверхность создает явно выраженный всплеск. Последовательное движение кластеров по колонне, примерно, на одинаковом расстоянии друг от друга, формирует периодическую/квазипериодическую структуру потока.

Описания этого режима нет ни в известных публикациях по исследованию газогидродинамических процессов (Брилл, Мукерджи, 2006; Исаев, 2009; Козлов, 1954; Кутателадзе, Накоряков, 1984; Путеводитель ..., 2007; Уоллис, 1972; Taitel et al., 1980), ни в работах по моделированию функционирования нефтяных скважин на крупногабаритных установках (Абишев и др., 1981; Сахаров, Мохов, 2004). Представленный режим пенных пузырьковых кластеров является новым, впервые установленным в эксперименте на КАМБИ свойством вертикальных газожидкостных систем.

Механизм пульсирующего фонтанирования раскаленных бомб. Проведем сопоставление экспериментальных и вулканологических данных, представленных выше. Опишем внешнее проявление режима пенных пузырьковых кластеров при выходе пузырьков из газожидкостного потока в открытое пространство, и сравним его с реальными динамическими параметрами пульсирующего фонтанирования раскаленных бомб.

Режим пенных пузырьковых кластеров представляет собой структурированный поток пузырьков, которые лопаются на поверхности. Выход такого потока характеризуется периодическими, кратковременными, резкими, хорошо заметными «всплесками» модельной жидкости, обусловленными выходом на поверхность пенных кластеров; всплески происходят на фоне постоянного поступления пенной модельной жидкости.

Режим пульсирующего фонтанирования в кратере вулкана — это периодические, кратковременные, резкие, мощные, ярко выраженные импульсы усиления выбросов вулканических бомб, проявляющиеся на фоне струи раскаленных фонтанов базальтовых-андезибазальтовых извержений.

В результате сопоставления внешних проявлений лабораторного и вулканического процессов, нами получены идентичные динамические характеристики реализации рассматриваемых явлений. Теперь, учитывая структурное подобие экспериментальной колонны КАМБИ и подводящего канала вулкана, а также полученные в эксперименте данные о формировании режима пенных пузырьковых кластеров, мы приходим к расшифровке природы исследуемого типа извержения. Механизм пульсирующего фон-

танирования раскаленных бомб определяется возникновением в поднимающемся по подводящему каналу газожидкостном магматическом потоке режима пенных пузырьковых кластеров. Соответственно, проявление мощных, периодических, кратковременных импульсов выбросов раскаленных вулканических бомб на фоне более слабого фонтанирования является результатом последовательного выхода пенных кластеров на поверхность.

ВЫВОДЫ

Установлен новый тип базальтовых и андезибазальтовых извержений — пульсирующее фонтанирование раскаленных бомб. В основе выделения — результаты наши исследования динамики извержений Ключевского вулкана и анализ литературных данных. Пульсирующее фонтанирование — это периодические, кратковременные, резкие, мощные, ярко выраженные импульсы усиления выбросов вулканических бомб, проявляющиеся на фоне струи раскаленных фонтанов вулканических извержений. Интервалы между импульсами усиления в разные этапы извержения находятся в пределах — 0.66–5 с, но в каждой конкретной череде событий они близки между собой. Пульсирующее фонтанирование осуществляется в широком диапазоне интенсивности извержений при высоте выброса бомб от 80 до 800 м от уровня кратера. Пульсирующее фонтанирование — впервые выделенный на Ключевском вулкане тип базальтовых-андезибазальтовых извержений, в последующем установлен автором и на других вулканах мира (Килауэа, Толбачик, Этна). Динамические параметры пульсирующего фонтанирования могут служить эталоном для лабораторного физического моделирования вулканических процессов.

В ходе лабораторных экспериментов выявлен и описан новый, ранее неизвестный, режим течения газонасыщенных двухфазных смесей в вертикальной колонне — пенных пузырьковых кластеров. Режим пенных кластеров определяется тугими сгустками пузырьков, которые последовательно движутся вверх по колонне в потоке пены на примерно одинаковом расстоянии друг от друга, создавая в потоке периодический/квазипериодический режим. Скорость движения пенных кластеров в 2–3 раза выше, чем средняя скорость пенного потока. Для режима пенных кластеров характерен одинаковый размер крупных пузырьков, пространство между которыми заполнено более мелкими пузырьками. Выход на поверхность отдельного пенного кластера формирует хорошо заметный всплеск модельной жидкости. Соответственно, выход

потока пенных кластеров на поверхность характеризуется резкими, периодическими, кратковременными всплесками модельной жидкости на фоне ее спокойного истечения.

Комплекс проведенных исследований (натурных, во время изучения извержений Ключевского вулкана, и лабораторных, при изучении движения двухфазных смесей на КАМБИ) позволил установить механизм пульсирующего фонтанирования раскаленных бомб на базальтовых и андезибазальтовых вулканах. Пульсирующее фонтанирование определяется возникновением в газожидкостном магматическом потоке, поднимающемся по подводящему каналу вулкана, режима пенных пузырьковых кластеров. Соответственно, проявление мощных, периодических, кратковременных импульсов усиления выброса раскаленных вулканических бомб на фоне более слабого фонтанирования является результатом процесса последовательного выхода пенных пузырьковых кластеров на поверхность в кратере вулкана.

Автор выражает искреннюю благодарность А.В. Буткачу, И.Е. Далецкой, О.А. Далецкой, О.И. Дьячковой, В.А. Дрознину, С.Ф. Лактионову, В.А. Рашидову, А.Н. Рогозину, Т.Ю. Самковой, А.Ф. Сашенковой, А.Л. Собисевичу, Ю.В. Фроловой, Ю.Д. Чашечкину, В.С. Шульге, Jerry Eaton, Keith R. Joels, Mardie Lane, Geoff Mackley, John Seach.

Исследование поддержано грантами РФФИ 13-05-12030, 15-05-05502, ДВО 15-1-2-069, грантом Правительства Российской Федерации 14.Z50.31.0017 и проектом Программы № 10 (науки о Земле РАН).

Список литературы

- Абишев С.К., Булгаков Р.Р., Сахаров В.А.* Экспериментальная установка по исследованию движения газожидкостных смесей в вертикальных трубах для подъема высоковязких нефтей // Тр. МИНХ и ГП. 1981. Вып. 156. С. 98–104.
- Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка. 1975–1976 гг. / Отв. ред. Федотов С.А. М.: Наука, 1984. 637 с.
- Брилл Дж.П., Мукерджи Х.* Многофазный поток в скважинах. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, Библиотека нефтяного инженеринга, 2006. 384 с.
- Влодавец В.И.* Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984. 338 с.
- Дрознин В.А.* О природе вулканических извержений // Материалы 1-й городской конференции молодых ученых и специалистов. Петропавловск-Камчатский: Дальневосточное книжное издательство, 1969. С. 4–6.
- Дрознин В.А.* Физическая модель вулканического процесса. М.: Наука, 1980. 92 с.
- Исаев В.И.* Гидродинамика двухфазных смесей в процессах бурения нефтяных и газовых скважин. Дисс. докт. техн. наук. Москва, 2009. 331 с.
- Кирсанов И.Т.* Извержение Ключевского вулкана в 1966 г. с прорывом побочных кратеров им. Пийпа // Бюллетень вулканологических станций. 1968. № 44. С. 11–29.
- Козлов Б.К.* Формы течения газожидкостных смесей и границы их устойчивости в вертикальных трубах // Журнал технической физики. 1954. № 12. С. 2285–2288.
- Конов А.С., Озеров А.Ю.* Закономерности в динамике извержений Ключевского вулкана и сопровождающем их вулканическом дрожании // Вулканология и сейсмология. 1988. № 3. С. 21–38.
- Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е.* Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука, 1984. 302 с.
- Луцицкий И.В.* Основы палеовулканологии. Современные вулканы. Т. 1. М.: Наука, 1971. 480 с.
- Макдоналд Г.* Вулканы. М.: Мир, 1975. 432 с.
- Меняйлов А.А., Набоко С.И.* Деятельность Камчатских вулканов за 1 квартал 1938 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1939. № 6. С. 3–12.
- Озеров А.Ю.* Периодичности в динамике извержений вулканов Камчатки // Современный вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2003. С. 26–28.
- Озеров А.Ю.* Экспериментальный комплекс для моделирования базальтовых взрывов // Материалы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога (28–31 марта 2007). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. С. 144–156.
- Озеров А.Ю.* Механизм базальтовых взрывов (экспериментальное моделирование) // Вулканология и сейсмология. 2010. № 5. С. 3–19.
- Озеров А.Ю.* Механизм периодического фонтанирования базальтовых вулканов (по экспериментальным исследованиям и природным наблюдениям) // Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 2. Геология урана геоэкология гляциология. М.: ИФЗ РАН, 2011. С. 279–298.
- Озеров А.Ю.* Механизм периодичностей в динамике фонтанирования раскаленных бомб на базальтовых вулканах // Вестник РФФИ. 2012. № 4. С. 28–36.
- Озеров А.Ю.* Динамика извержений и петрохимические особенности глиноземистых базальтов Ключевского вулкана // Дисс. докт. геол.-мин. наук. Москва, 2016. 428 с.

- (http://www.ozerov.ru/papers/Ozerov__2016__Dissertation.pdf)
- Озеров А.Ю., Арускин А.А., Кайл Ф. и др.* Петролого-геохимическая модель генетического родства базальтового и андезитового магматизма вулканов Ключевской и Безымянный, Камчатка // *Петрология*. 1997. Т. 5. № 6. С. 614–635.
- Прандтль Л.* Путеводитель Прандтля по гидроаэродинамике / Под ред. Эртель Г. (мл.) Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2007. 776 с.
- Ритман А.* Вулканы и их деятельность. М.: Мир, 1964. 438 с.
- Сахаров В.А., Мохов М.А.* Гидродинамика газожидкостных смесей в вертикальных трубах и промысловых подъемниках. М.: Изд-во «Нефть и газ», 2004. 392 с.
- Уоллис Г.* Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. 440 с.
- Хренов А.П., Озеров А.Ю., Литасов Н.Е. и др.* Побочное извержение Ключевского вулкана (прорыв Предсказанный, 1983 г.) // *Вулканология и сейсмология*. 1985. № 1. С. 3–20.
- Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, 1999. 1417 p.
- Davidson J.P., Reed W.E., Davis P.M.* Exploring Earth: An Introduction to Physical Geology. Prentice Hall, 1997. 477 p.
- Lacroix A.* La Montagne Pelee et ses eruptions. Masson et Cie. Paris, 1904. 662 p.
- Lockwood J.P., Hazlett R.W.* Volcanoes: global perspectives. Wiley-Blackwell, 2010. 541 p.
- Mercalli G.* I vulcani attiva della Terra. Milano, 1907. 508 p.
- Ozerov A.Yu.* Experimental Modeling of the Explosion Mechanism of Basaltic Magmas // *Petrology*. 2009. V. 17. № 7. P. 653–668.
- Ozerov A.Yu., Firstov P.P., Gavrilov V.A.* Periodicities in the dynamics of eruptions of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. Geophysical Monograph Series*. 2007. V. 172. P. 283–291.
- Ozerov A.Yu., Konov A.S.* Regularities in the dynamics of the Klyuchevskoy volcano eruptions // *Proceedings Sofia International Conference of Geological Science and Mineral-Resource Base. Bulgaria*. 1987. P. 20.
- Schmincke Hans-Ulrich.* Volcanism. Springer, 2004. 324 p.
- Taitel Y., Barnea D., Dukler A.E.* Modelling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes // *Journal American Institute of Chemical Engineers*. 1980. V. 26. P. 345–354.
- The Encyclopedia of Volcanoes / Academic Press* is an imprint of Elsevier, Second Edition? 2015. 1421 p.
- Tilling R.I., Heliker Ch., Swanson D.A.* Eruptions of Hawaiian Volcanoes — Past, Present and Future U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2010. 63 p.
- Wolff F.* Der Vulkanismus. Stuttgart: Verl. von F. Enke, 1914. 750 p.

PULSATING SPOUTING OF INCANDESCENT VOLCANIC BOMBS AND ITS MECHANISM

A.Yu. Ozerov

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS
683006, Petropavlovsk-Kamchatsky*

Studies of Klyuchevskoy Volcano eruptions have revealed a new type of explosive activity classified as pulsating spouting of incandescent bombs. These are series of abrupt impulses of increased rate of bomb ejection which occur at fixed intervals of first few seconds and accompany the weaker spouting. Analyses of published data and video records has shown that the same type of eruptive activity is typical for Tolbachinsky, Kilauea and Etna volcanoes which produce liquid andesite-basaltic magmas. In order to investigate the mechanism of pulsating spouting, authors upgraded the Complex Apparatus for Modeling Basaltic Eruptions (KAMBE) that had been designed earlier. A series of laboratory experiments in a transparent column ($h = 16.6$ m, $\varnothing = 50$ mm) allowed us to reveal a new gas-hydrodynamic regime of foamy bubble clusters. Analysis of natural volcanic and laboratory processes allows assuming that pulsating spouting of incandescent bombs is preceded by the regime of foamy bubble clusters occurring in the gas-liquid magmatic flow ascending along a volcano conduit.

Keywords: eruption, pulsating spouting, gas-hydrodynamic modeling, regime of foamy clusters.