

МЕХАНИЗМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ФОНТАНИРОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ВУЛКАНОВ (ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ И ПРИРОДНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ)

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее исследование посвящено периодическому фонтанированию раскаленных бомб, характерному для извержений жидких базальтовых магм, наблюдающихся в ходе гавайских и стромболианских извержений. Оно описано в работах [Влодавец, 1984; Лучицкий, 1971; Macdonald, 1972; Rittmann, 1960].

Периодическое фонтанирование раскаленных бомб – один из наиболее грандиозных процессов на Земле. Высота раскаленных фонтанов достигает 200–500 м. Эпизоды фонтанирования начинаются резко без предварительной сейсмической подготовки.

Этот тип активности представляет серьезную опасность для людей вследствие массового выпадения вулканических бомб и для самолетов в связи с обильным вулканическим пеплом, разносимым эруптивными шлейфами на сотни километров от места извержения. Несмотря на значимость, мощность и опасность, процесс фонтанирования остается одним из слабоизученных в вулканологии. До сих пор нет однозначного объяснения причин этого явления. В этой связи мы провели вулканологические, сейсмологические и экспериментальные исследования, которые позволили объяснить механизм этого процесса. Все они были объединены в единый комплекс работ.

Цель исследований – выявление механизма периодического фонтанирования раскаленных бомб при извержениях базальтовых вулканов, моделирование этого процесса на основе вулканологических, сейсмологических и экспериментальных данных.

Основной метод – создание оригинальной аппаратуры для исследований, экспериментальное моделирование кинетики двухфазных смесей в вертикальных трубах и сопоставление полученных данных с реальными вулканическими событиями.

Объект моделирования – процессы, происходящие в магматической колонне во время ее подъема по подводящему каналу вулкана (экспериментальная труба) и периодические эксплозивные эффекты извержений в кратере вулкана (верхний срез трубы).

В качестве *природного объекта* для исследований был принят Ключевской вулкан, где широко проявлены процессы периодического фонтанирования. Это – грандиозный вулкан, крупнейший в Евразии (высота 4822 м), типичный представитель базальтовых вулканов, изучавшийся многими исследователями, в том числе автором.

В работе будут приведены сведения, имеющие отношение к механизму фонтанирования, на основе которых сформулированы те требования, которые мы реализовали при проведении экспериментальных работ. В результате всех исследований представлен сценарий периодического фонтанирования базальтовых магм.

КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ ИЗВЕРЖЕНИЙ БАЗАЛЬТОВЫХ ВУЛКАНОВ

В конце XX века в вулканологии сформировался общий подход к пониманию процессов, происходящих в верхних частях питающих систем базальтовых вулканов. Основные особенности эруптивной активности жидких магм объясняются с помощью законов газогидродинамики. Впервые прямое сопоставление режимов течения двухфазных смесей с типом вулканических извержений было выполнено В.А. Дрозни-

ным в 1967 г. [Дроздин, 1969, 1980]. С тех пор его построения с небольшими изменениями вошли во все вулканологические публикации, связанные с механизмом извержений [Carrigan et al., 1992; Jaupart, 2000; Privitera et al., 2003; Vergnolle, Mangan, 2000].

Дальнейшее развитие вулканологии требовало детализации, более глубоких представлений о механизме эруптивного процесса, особенно в тех случаях, когда дело касалось периодического характера в динамике извержений. Надо было разобраться, что заставляет пузырьки собираться в крупные структуры/группы, которые периодически проявляются в кратере вулкана. Для моделирования этих процессов во Франции и России были созданы две газогидродинамические экспериментальные установки лабораторного моделирования процессов, происходящих в питающих системах базальтовых вулканов в процессе извержений: барьерный газожидкостной накопитель-дозатор Верниолле–Джапарта [Jaupart Vergnolle, 1989; Vergnolle, Jaupart, 1986] и комплекс аппаратуры моделирования базальтовых извержений – КАМБИ [Озеров, 2007; Озеров, 2009].

Эти установки имеют различные конструктивные решения, основаны на разных принципах моделирования, и результирующие модели, получаемые с их помощью, существенно отличаются друг от друга. Проведем краткое сопоставление обсуждаемых лабораторных установок.

Установка Верниолле–Джапарта создана для моделирования периодических явлений в динамике извержений вулканов. С ее помощью были изучены изменения в структуре двухфазного потока (жидкость – газ) при переходе его из широкой емкости в узкую трубку. Поднимающийся сквозь жидкость поток газовых пузырьков встречает на своем пути преграду в виде горизонтального свода. Под этим сводом пузырьки накапливаются, трансформируются в пену и затем отдельными порциями поступают в вертикальный канал. Таким образом, они вводят обязательный структурный барьер (кровля промежуточного очага), который существенно изменяет свойства поднимающегося газожидкостного потока и работает как накопитель-дозатор газовой фазы. Многие исследователи для объяснения периодического характера динамики извержений в той или иной степени используют модель Верниолле–Джапарта [Carrigan et al., 1992; Chouet et al., 1997; Delfa et al., 2001; Privitera et al., 2003].

Но для ряда базальтовых вулканов модель Верниолле–Джапарта неприменима, так как в их питающей системе по сейсмологическим и петрологическим данным нет близповерхностного очага. В то же время периодичность является характерной особенностью эксплозивной деятельности этих вулканов. К числу таких вулканов относится Ключевской вулкан [Арискин и др., 1995; Балеста и др., 1976; Горельчик, 1976; Горшков, 1956; Озеров и др., 1997; Федотов, 2006; Фирстов и Широков, 1971; Хренов и др., 2002; Lees et al., 2007; Utnasin et al., 1976]. Кроме того, установка Верниолле–Джапарта имеет небольшую вы-

соту канала – всего 80 см, что не позволяет газовым структурам в модельной жидкости самостоятельно развиваться в процессе их подъема подобно тому, как это происходит в протяженных питающих системах вулканов. Установка предназначена для моделирования только дискретных процессов и не может быть использована для случая равномерного поступления магматического материала или при чередовании различных режимов в процессе извержений. И наконец, в модели Верниолле–Джапарта не предусмотрено сопоставление результатов модельных экспериментов с данными по реальным извержениям.

Созданная нами установка – комплекс аппаратуры моделирования базальтовых извержений (КАМБИ, вариант газонасыщенной колонны, далее сокращенно «газонасыщенная колонна») позволил изучить процессы эволюции двухфазного потока в длинной (16,6 м) вертикальной трубе (подводящий канал). Конструкция лишена всех тех ограничений, которые присущи установке Верниолле–Джапарта. Кроме того, в конструкции КАМБИ учтены структурные особенности питающей системы реальных базальтовых вулканов. КАМБИ была создана для исследования механизма взрывов на базальтовых вулканах. Конструкция этой установки и экспериментальные исследования, проведенные с ее помощью, детально описаны в работах [Озеров, 2007; Озеров, 2009]. На основании вулканологических исследований динамики извержений, сейсмологических данных параметров эксплозивной активности и результатов экспериментальных исследований на КАМБИ (газонасыщенная колонна) был установлен механизм взрывов на базальтовых вулканах.

Особо отметим, что опыт, полученный при конструировании КАМБИ (газонасыщенная колонна), использован нами при создании КАМБИ (барботажная колонна). Эта установка специально предназначена для исследования процессов периодического фонтанирования раскаленных бомб на базальтовых вулканах; ниже она детально описана.

ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ФОНТАНИРОВАНИЕ РАСКАЛЕННЫХ БОМБ

Общая характеристика

Периодическое фонтанирование – это прекрасное и мощное проявление вулканической активности (рис. 1). Синонимы: фонтанирование раскаленных бомб, лавовые фонтаны, бомбовые фонтаны, магматические фонтаны и эруптивные фонтаны. Оно происходит при извержениях гавайского и стромболианского типов. Огненные фонтаны проявляются в ходе вершинных, побочных и латеральных извержений. Они наблюдаются при наземных и подводных извержениях.



Рис. 1. Фонтан раскаленных вулканических бомб, вершинный кратер Ключевского вулкана (1984 год). Диаметр кратера 750 м. Высота выброса бомб 200 м. Фотография А.Ю. Озерова

Периодическое фонтанирование характеризуется чередованием эпизодов усиления интенсивности, проявляющейся в увеличении высоты фонтанов, и эпизодов ослабления в деятельности огненных фонтанов. Эпизоды усиления и ослабления последовательно сменяют друг друга (рис. 2). Периодическое фонтанирование в ходе одного извержения продолжается от одного до 10 дней. Продолжительность активной фазы – десятки минут – первые часы. Фазы ослабления обычно более продолжительны. Раскаленные вулканические бомбы в виде веера или вертикальной струи выбрасываются на высоту, которая в зависимости от характера вулкана и интенсивности извержения изменяется в интервале 50–500 м. Во время гавайских извержений (магмы характеризуются ультранизкой вязкостью – 10^1 – 10^2 Па·с) вулканический пенел при фонтанировании отсутствует. В ходе стромболианских извержений (магмы низкой вязкости – 10^2 – 10^5 Па·с), наряду с выбросом раскаленных бомб, формируются пенеловые облака, поднимающиеся на высоту в сотни, тысячи метров, а затем разносятся ветром в виде эруптивных шлейфов на десятки и сотни километров. Периодическое фонтанирование иногда сопровождается одновременным излиянием лавовых потоков.

При фонтанировании средней мощности на поверхность Земли поступает примерно 25–50 т/с вулкани-

ческих бомб, при сильном – 250–1000 т/с. Процессы фонтанирования описаны на многих вулканах мира: Ключевском [Ozerov, Konov, 1988; Ozerov et al., 2007], Толбачинском [Горельчик и др., 1978], Этна [Delfa et al., 2001], Килауэа [Vergnolle, Mangan, 2000], Нирагонго [Kasereka et al., 2003]. Кроме того, в строении многих базальтовых шлаковых конусов наблюдается слоистость, свидетельствующая о проявлении здесь периодического/квазипериодического фонтанирования жидких магм.

Теперь приведем вулканологические и сейсмологические характеристики периодического фонтанирования раскаленных бомб, которые учитывались нами при конструировании КАМБИ (барботажная колонна) и при моделировании периодического фонтанирования.

Вулканологические исследования

Вулканологические исследования позволили составить общее представление о процессах, вызывающих периодическое фонтанирование. Существуют две главные альтернативные гипотезы. Первая гипотеза предполагает разделение магмы в питающей системе на слои, обедненные и обогащенные газовыми пузырьками.

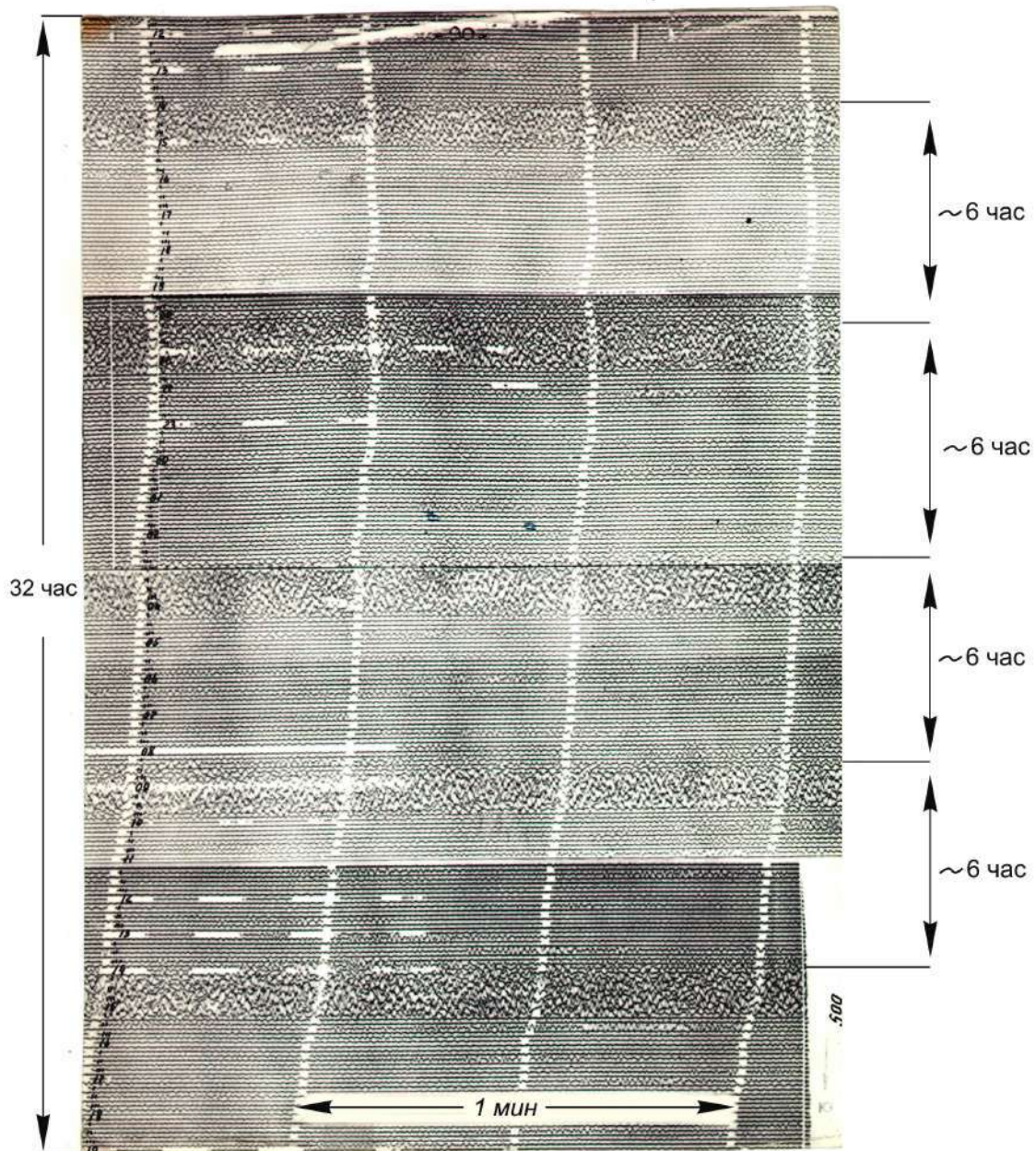


Рис. 2. Фрагменты четырех последовательно записанных сейсмограмм (по 8 часов каждая), зарегистрированных на сейсмостанции Апахончич, в 14 км от вершины Ключевского вулкана с 11 ч 37 мин 30 июля по 19 ч 00 мин 31 июля 1984 г. [Ozerov, Konov, 1988]. Темные полосы на сейсмограммах соответствуют интервалам фонтанирования раскаленных бомб ~ 1 ч, светлые – интервалам ослабления эксплозивной деятельности ~ 5 ч..

Обедненные порции магмы на поверхности продуцируют лавовые потоки, обогащенные порции – фонтаны, а последовательное чередование этих процессов обеспечивает периодическое фонтанирование. Согласно второй гипотезе группы пузырьков всплывают сквозь жидкую магматическую колонну (процесс барботирования). Эти группы, одна за другой, через равные промежутки времени достигают кратера и создают на поверхности периодическое фонтанирование.

Наши наблюдения извержений Ключевского вулкана и известные данные по извержениям вулкана

Этны показывают, что периодическое фонтанирование может проявляться и без излияния лавовых потоков. Это хорошо согласуется со второй гипотезой. В этом случае фонтанирование, как эксплозивная составляющая процесса извержения, в определенной степени зависит от расхода барботирующего газа, всплывающего сквозь жидкую магму. При этом на процесс подъема пузырьков к поверхности определенное влияние оказывает вертикальная скорость движения магматической колонны, но ведущим процессом подъема газовой фазы является барботиро-

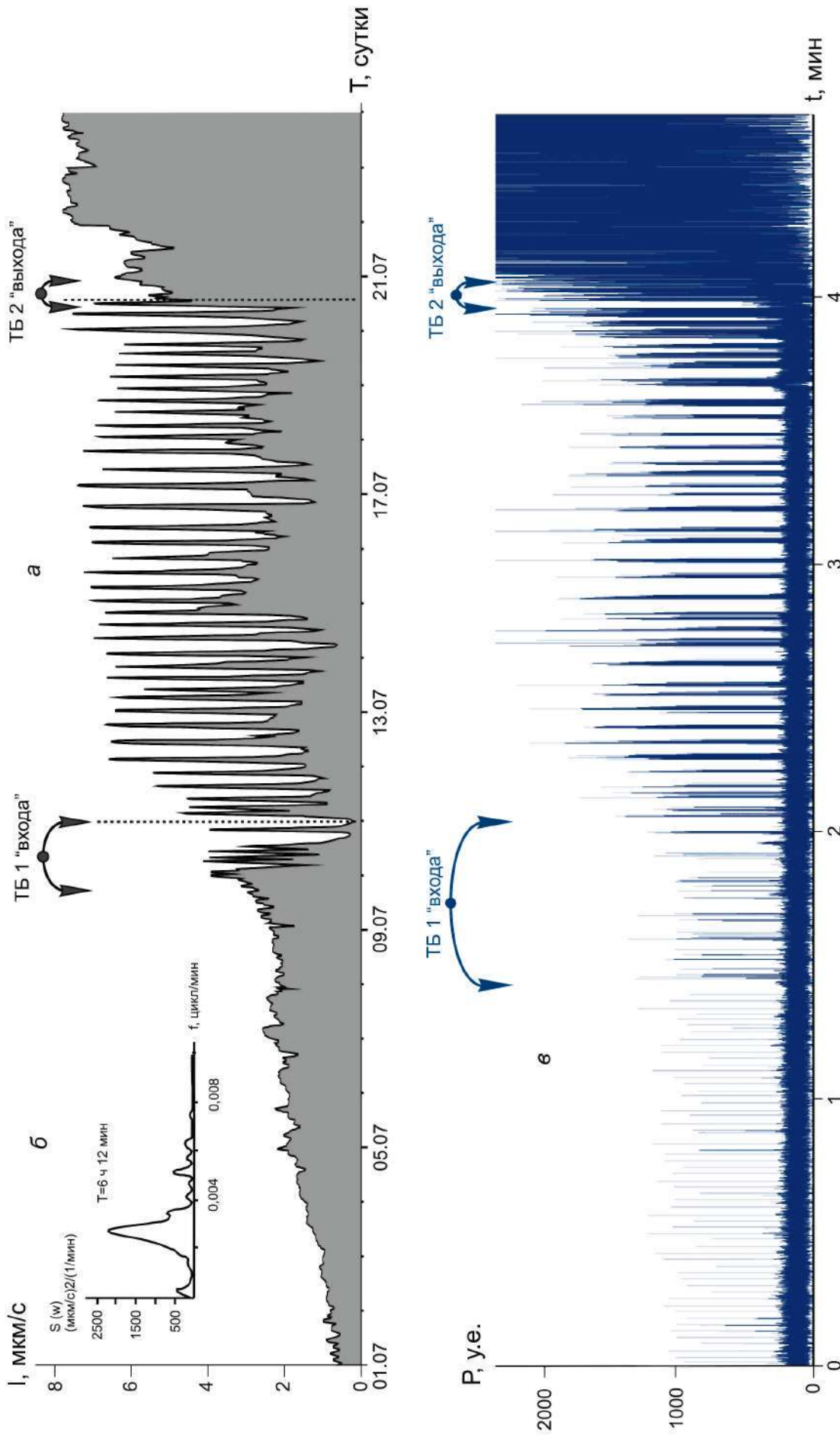


Рис. 3. Сопоставление характера эксплозивной активности Ключевского вулкана (1993 г.) с поверхностными проявлениями газогидродинамических режимов – по результатам экспериментальных исследований на КАМБИ:
 а – график изменения интенсивности вулканического дрожания Ключевского вулкана для интервала времени 1 июня – 24 июля 1993 г. [Ozerov et al., 2007]; по оси ординат интенсивность вулканического дрожания – I , $\mu\text{км/с}$, по оси абсцисс время – T , сутки;
 б – спектр плотности интенсивности вулканического дрожания для интервала времени 00 час 11 июля – 14 час 20 июля (показан на графике а вертикальными пунктирными линиями); по оси ординат спектральная плотность интенсивности вулканического дрожания – $S(\omega)$, $(\mu\text{км/с})^2/(1/\text{мин})$, по оси абсцисс частота – f , цикл/мин;
 в – график изменения давления звуковой волны, производимой лопающимися пузырями над поверхностью модельной жидкости – по результатам экспериментальных исследований на КАМБИ; по оси ординат давление звуковой волны в основных единицах – P , у. е., по оси абсцисс время – t , мин. Ось ординат по вертикали искусственно ограничено автором выше значения 2500 у. е.

вание газовых пузырьков сквозь жидкую магму. Это весьма важное заключение, позволившее проводить опыты с минимальным набором изменяющихся параметров и, как следствие, выявить ведущий процесс, отвечающий за конкретное событие. В нашем случае это означает, что вместо проведения весьма сложных экспериментов с движущимся двухфазным потоком газонасыщенной модельной жидкости можно работать с более простой, удобной и хорошо воспроизводимой системой – барботажной колонной.

Визуальные наблюдения структуры фонтанирующих струй позволяют полагать, что основу двухфазного потока, генерирующего фонтан, составляют наиболее крупные пузырьки одного размера, равномерно распределенные по всему объему потока (основные пузырьки). Именно в них заключена главная энергия фонтанирования. Остальные пузырьки меньших размеров расположены в перегородках между основными пузырьками и не играют значительной роли в формировании фонтанов.

В основании фонтана на выходе из жерла мы наблюдали раскаленную струю, в которой диаметр основных пузырьков в десятки раз меньше диаметра выводного канала.

Двухфазный газожидкостный поток, генерирующий фонтан, не следует рассматривать, как полагают некоторые исследователи, как пену. Она мало устойчива, особенно в условиях движения по каналу. Кроме того, в пене, где пузырьки отделены друг от друга тонкими пленками жидкости, каждый пузырек располагается в определенном месте, фактически впечатанный в каркас из остальных пузырьков, что не позволяет им свободно двигаться по колонне. Для реализации процесса фонтанирования перегородки между пузырьками должны быть достаточно толстыми, чтобы позволить жидкости протекать между пузырьками во время их подъема к поверхности.

Фонтаны достаточно быстро выходят с фонового уровня извержения на свой максимальный уровень и затем «работают» на этом уровне практически до конца эпизода фонтанирования, который заканчивается достаточно резко. Конечно, это весьма генерализованное представление деятельности фонтанов, но, тем не менее, резких (на 1–2 порядка) отклонений от описанного выше сценария мы не наблюдали.

Натурные исследования показали, что характер фонтанирования определяется суммарной интенсивностью импульсов пузырьков, достигающих поверхности. Этот параметр наилучшим образом описывается вибрационными сейсмологическими методами – по изменению уровня вулканического дрожания (ВД), непрерывно регистрируемого в районе извержения.

На основании вышеизложенных данных по вулканическим исследованиям сформулированы основные положения, которые необходимо было учитывать при моделировании процесса фонтанирования:

1 – процесс барботирования должен приводить к объединению пузырьков в группы, которые по-

следовательно, через равные промежутки времени, достигают поверхности; 2 – пузырьки в группах должны быть одного размера; 3 – диаметр пузырьков в десятки раз меньше диаметра выводного канала; 4 – перегородки между пузырьками должны быть достаточно толстыми; 5 – распределение пузырьков в группе должно быть равномерным по всему объему, верхняя и нижняя границы группы четкими; 6 – пузырьки, выходящие на поверхность модельной жидкости, должны генерировать сигнал, уровень которого устойчиво регистрируется вибрационной измерительной аппаратурой.

Сейсмологические исследования эруптивных периодичностей

В 1984 г. нами совместно с А.С. Коновым на Ключевском вулкане были начаты детальные исследования вулканического дрожания (ВД). Вулканическое дрожание – это непрерывно регистрируемая сейсмическая характеристика, наиболее полно отражающая флюктуации интенсивности периодического фонтанирования [Токарев, 1966, 1982; Гордеев, 1985].

Специально для этих исследований был разработан новый метод изучения вулканического дрожания – метод квазистационарного отсчета [Конов, Озеров, 1988]. С его помощью были построены графики огибающей вулканического дрожания и произведена их обработка методами статистического анализа. Это позволило впервые выделить устойчивые периодичности в динамике извержений Ключевского вулкана в широком диапазоне частот от первых минут до двух суток ($T_1 = 1$ мин 34 с, $T_2 = 6$ мин 10 с, $T_3 = 40$ мин, $T_4 = 5$ ч 30 мин, $T_5 = 36$ ч). T_1 и T_2 проявлялось в ритме одиночных выбросов бомб, а T_3 , T_4 и T_5 в усилении и ослаблении фонтанирования [Ozerov, Konov, 1988; Ozerov et al., 2007].

При обсуждении полученных данных мы учитывали также материалы Е.И. Гордеева, Ю.Ю. Мельникова, В.И. Синицына и В.Н. Чеброва [Гордеев и др., 1986]. В небольшом объеме были использованы гидроакустические данные, полученные во время извержения подводного вулкана NW Rota-1 в Марианской впадине [Chadwick et al., 2008].

Опишем известные данные по вулканическому дрожанию, зарегистрированному в ходе извержений Ключевского вулкана. Они весьма информативны. Графики на рис. 3, а, 4, а полно отражают характер периодического фонтанирования в различные эпизоды активности вулкана. Графики выполнены разными методами: это первичные записи и модифицированные ряды огибающей ВД.

Рассмотрим детальнее графики по ВД полученные нами во время извержения Ключевского вулкана в 1993 г. [Ozerov et al., 2007]. На рис. 3, а хорошо видно, что со 2 по 10 июля наблюдался плавный рост интенсивности ВД. При достижении значения 3,2 мкм/с 10 июля возникают резкие глу-

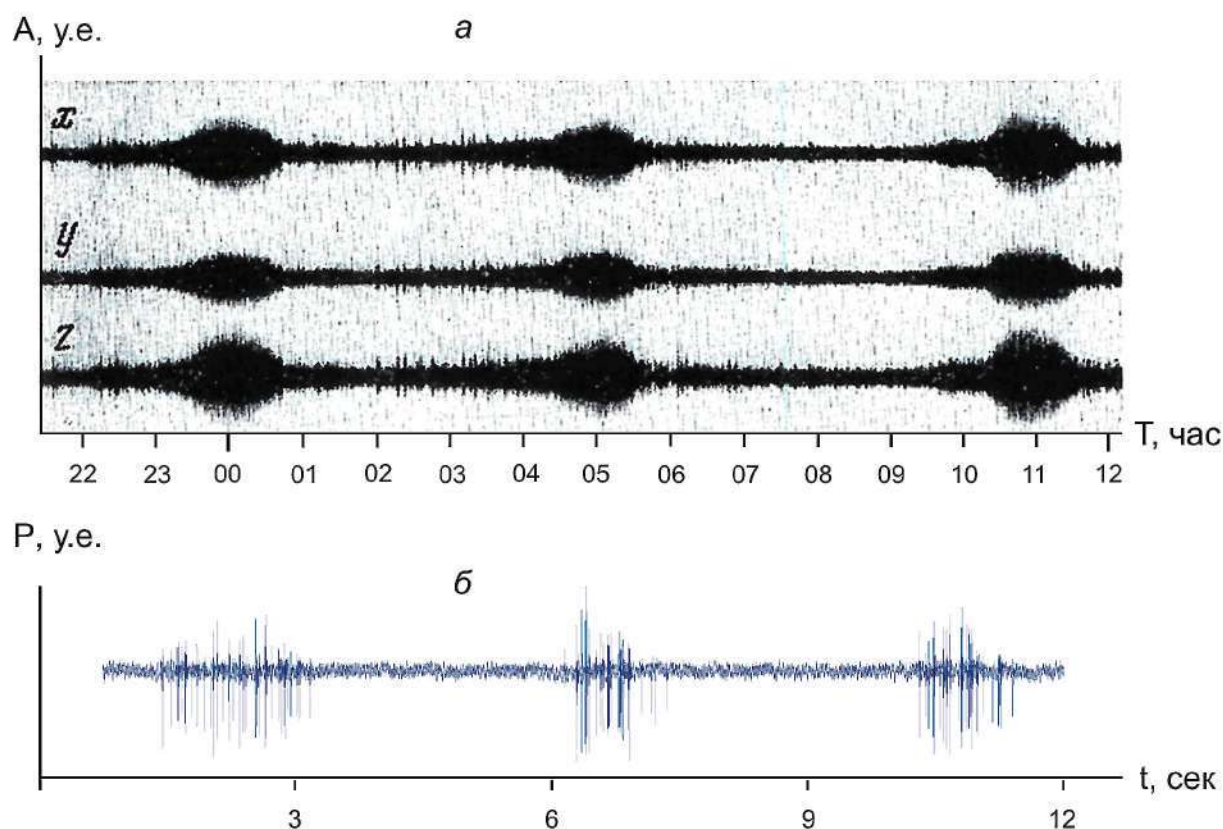


Рис. 4. Сопоставление сейсмической записи периодического фонтанирования Ключевского вулкана (1984 г.) с акустической записью кластерного газогидродинамического режима на поверхности модельной жидкости – по результатам экспериментальных исследований на КАМБИ:

а – сейсмическая запись амплитуды вулканического дрожания Ключевского вулкана для интервала времени 17 июля – 20 июля 1984 г. [Гордеев и др., 1986]; по оси ординат амплитуда вулканического дрожания (измеренная по трем каналам сейсмометра: x – север-юг, y – восток-запад, z – вертикальный) – A , у. е., по оси абсцисс время – T , час;

б – акустическая запись давления звуковой волны, генерируемой лопающимися пузырьками над поверхностью модельной жидкости – по экспериментальным исследованиям КАМБИ; по оси ординат давление звуковой волны – P , у. е., по оси абсцисс время – t , мин

бокие флуктуации амплитуды интенсивности ВД, которые 11 июля переходят в режим периодических колебаний; он сохранялся до 12 час 20 июля. С 11 по 20 июля зарегистрировано 38 четких пиков (периодический режим); спектральный максимум плотности мощности интенсивности ВД для этого интервала времени приходится на 6 часов 12 мин (рис. 3, б). Во время описываемого периодического режима 11–20 июля повышение уровня ВД фиксируется не очень выразительно: существуют интервалы возрастания (резкого – 11–12 июля и плавного – 12–17 июля) и убывания (17–20 июля), хотя в целом за 9,5 суток средний уровень ВД увеличился на заметную величину – 2,3 мкм/с. 21 июля он достиг значения 5,5 мкм/с. После этого периодические колебания интенсивности ВД исчезают, а затем в течение 3-х дней уровень ВД возрастает до 7,5–8 мкм/с.

Перейдем к обсуждению приведенных выше данных, представленных на графике рис. 3, а. В течение

10 суток в питающую систему Ключевского вулкана (1993 г.) происходила относительно равномерная подкачка энергии, которая на выходе, в кратере реализовалась в виде 3-х последовательно проявившихся режимов: равномерного повышения ВД, периодического изменения ВД и режима неравномерного его повышения. На фоне плавного увеличения энергии, в системе дважды происходила смена режимов. Участки на графиках, где зафиксирована смена режимов, и система приобретает новые качества (при постоянном незначительном повышении одного из ведущих параметров), называются точками бифуркации. В нашем случае установлены две принципиально различные точки бифуркации (ТБ). 10 июля при повышении уровня ВД система, достигнув отметки 3,2 мкм/с, входит в периодический режим – ТБ1 «входа». Затем, 20 июля, «отработав» 38 периодов при продолжающемся повышении уровня ВД и достигнув значения – 5,5 мкм/с, система выходит из периодического режима – ТБ2 «выхода». Проведенный анализ позволяет пола-

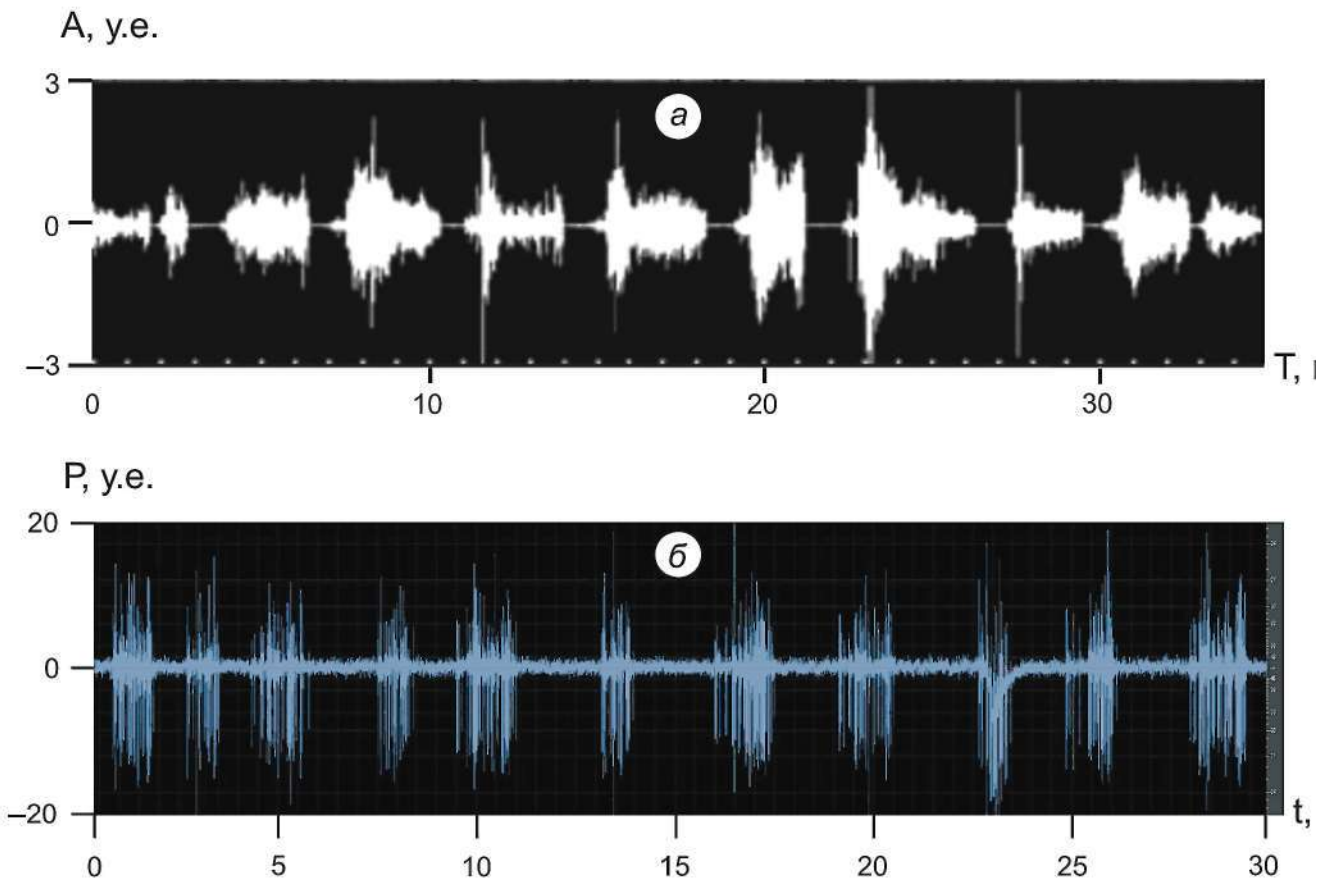


Рис. 5. Сопоставление акустических записей сигнала подводного извержения вулкана NW Rota-1 в Марианской впадине (2006 г.) и сигнала кластерного газогидродинамического режима на поверхности модельной жидкости – по результатам экспериментальных исследований на КАМБИ:

a – запись акустического сигнала при извержении вулкана NW Rota-1 для интервала времени 13 ч 00 мин – 13 ч 34 мин 27 апреля 2006 г. [Chadwick et al., 2008]; по оси ординат амплитуда акустического сигнала – A , у.е., по оси абсцисс время – T , мин;

б – запись акустического сигнала, генерируемого лопающимися пузырьками кластерного режима над поверхностью модельной жидкости – по экспериментальным исследованиям на КАМБИ; по оси ординат давление звуковой волны – P , у. е., по оси абсцисс время – t , с

гать, что описанные две точки бифуркации являются верхней и нижней границами периодического режима.

Рассмотрим немодифицированные записи сигналов, полученных при извержениях вулканов разными геофизическими методами. На рис. 4, *a* представлены записи ВД, регистрация которого была выполнена во время извержения Ключевского вулкана в 1984 году [Гордеев и др., 1986], а на рис. 5, *a* – запись акустического сигнала во время подводного извержения вулкана NW Rota-1 в 2006 году [Chadwick et al., 2008]. Записи сигналов выполнены от источников разной мощности, на разных расстояниях от излучателя (15 км и 60 м соответственно) и имеют разный масштаб. Они зарегистрированы разными приборами (сейсмическая станция и гидрофон) и выполнены с разной степенью детальности. Тем не менее, из рассмотрения записей отчетливо следует, что в обоих случаях проявлен квазипериодический устойчивый процесс. При этом отношение времени продолжи-

тельности фаз усиления и ослабления для p -извержений существенно различается. На Ключевом вулкане фазы усиления значительно короче ослабления, их отношение примерно 1:5, а на вулкане NW Rota-1 примерно 3:1.

Кроме вышеизложенного, следует обратить внимание на тонкую структуру сигналов (рис. 4, *a* и Немодифицированная запись ВД по Ключевому вулкану состоит из плотной череды тонких и кальных импульсов, амплитуда которых для фазы усиления больше, чем для фазы ослабления (рис. 4, *a*). Записи акустического сигнала при извержении вулкана NW Rota-1 также демонстрируют фазы усиления представлены совокупностью тонких вертикальных линий, соответствующих коротким импульсам, объединенным в плотные группы (рис. 4, *b*).

Рассмотренные материалы по сейсмическим исследованиям позволило сформулировать те положения которыми мы руководствовались при моделировании

1 – лабораторная установка должна позволить последовательно (при монотонном повышении ведущего параметра) воспроизводить три газогидродинамических режима: линейный, периодический и неравномерного повышения; 2 – система при возрастании ведущего параметра должна пройти две разные точки бифуркации: входа в периодический режим (ТБ1 «входа») и выхода из него (ТБ2 «выхода»); 3 – запись моделируемого сигнала должна состоять из коротких вертикальных импульсов; 4 – для создания периодического режима вертикальные импульсы должны быть объединены в плотные группы; 5 – первичная запись моделируемого периодического процесса должна иметь четочную структуру, когда сигнал записывается в обе стороны от нулевой линии; 6 – запись огибающей моделированного сигнала должна четко воспроизводить периодический процесс по амплитудным характеристикам и по расстояниям между фазами фонтанирования.

Мы перечислили динамические характеристики системы, которые должны быть зарегистрированы измерительной аппаратурой модельной установки. В случае совпадения рядов природных и экспериментальных данных, мы можем говорить о подобии процессов.

КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ – КАМБИ (барботажная колонна)

Основные принципы конструирования лабораторной установки

Природным прообразом создаваемой лабораторной установки является Ключевской вулкан – его питающая система, магматическое вещество, динамические характеристики извержений. При создании моделирующего комплекса мы пытались максимально приблизить его параметры к реальной питающей системе базальтового вулканического аппарата. Из всего многообразия литературных данных и результатов наших исследований на Ключевском вулкане были выбраны наиболее обоснованные параметры вулканической системы. Кроме того, мы старались избежать любых возможных структурных и энергетических барьеров, способных повлиять на характер движения вещества.

Ниже приводятся основные принципы, которыми руководствовался автор при конструировании аппаратуры для моделирования базальтовых извержений:

1 – высота питающего канала в сотни-тысячи раз больше его диаметра; 2 – сечение канала круглое или овальное; 3 – стенки канала упругие, исключаящие

возникновение каких-либо вибраций, способных вызвать резкие изменения в характере движения вещества; 4 – магматическое вещество, заполняющее питающий канал, однородное, без изменений вязкости; 5 – подъем вещества по колонне осуществляется вертикально вверх; 6 – расплав, находящийся в подводном канале, представляет собой двухфазную смесь – жидкость и движущийся в ней газ; 7 – реологические свойства магмы таковы, что газовые пузырьки движутся существенно быстрее жидкой фазы; 8 – в верхней части канала отсутствуют запирающие твердые пробки – система открытая; 9 – предусмотрено равномерное изменение расхода газовой фазы, поступающей в канал.

Технические характеристики КАМБИ (барботажный вариант)

Первые модельные лабораторные эксперименты с двухфазными смесями были проведены нами в 2003 году. За пять лет было сконструировано девять экспериментальных газогидродинамических установок. В итоге для моделирования периодического фонтанирования был создан комплекс аппаратуры для моделирования базальтовых извержений – КАМБИ (барботажная колонна) и проведена серия лабораторных экспериментальных работ.

Идея, расчеты, изготовление всех узлов и монтаж КАМБИ осуществлены коллективом сотрудников Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Руководитель работ – ведущий научный сотрудник А.Ю. Озеров, инженеры – А.В. Буткач, В.С. Шульга, О.И. Дьячкова, С.Ф. Лактионов. Статистическая обработка полученных данных проводилась по программе ДИМАС Д.В. Дрознина. Видеоподдержка осуществлялась С.П. Плотниковым. Ценные советы и консультации оказывал ведущий научный сотрудник В.А. Дрознин.

КАМБИ (барботажный вариант) позволил проводить всестороннее моделирование эффектов, возникающих при движении двухфазных модельных жидкостей по протяженным вертикальным трубам; исследовались режимы, возникающие в двухфазных смесях, их кинетика и проявление каждого отдельного режима на поверхности; особое внимание было уделено периодическому режиму).

Установка смонтирована в здании Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Общая высота КАМБИ – 18 метров. Установка состоит из двух систем – моделирующей и регистрирующей (рис. 6, а).

Моделирующая система представляет собой прозрачную пластиковую трубку, ее высота – 15 700 мм, внутренний диаметр 18 мм. Специальная система крепления позволяет держать трубку в вертикальном положении. Вдоль трубки протянута мерная лента с ценой деления 1 мм. Нижний торец трубки герметизирован металлической пробкой, сквозь которую в трубку введена полая игла.

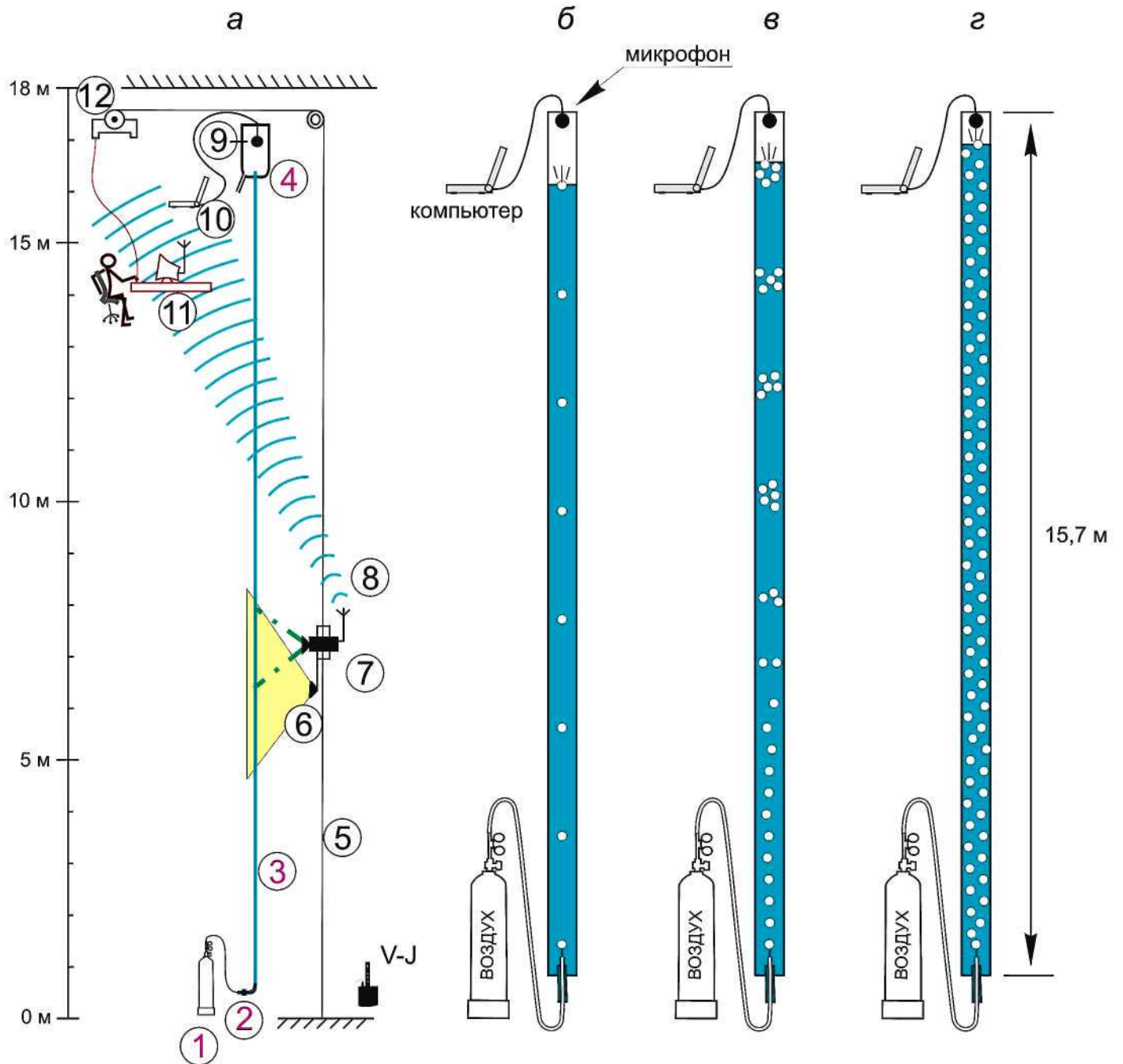


Рис. 6. Моделирование базальтовых извержений на КАМБИ (барботажная колонна:

а – схема моделирующей 1–4 (красным цветом) и регистрирующей 5–12 (черным цветом) систем КАМБИ: 1 – газовый баллон высокого давления с воздухом; 2 – кран точной регулировки подачи газа; 3 – прозрачный шланг; 4 – аквариум для приема жидкости; 5 – трос, направляющий движение платформы динамического видеослежения; 6 – источник света; 7 – видеокамера (зеленым штрих-пунктиром показан угол захвата при съемке); 8 – передатчик и телеметрическая антенна; 9 – микрофон; 10 – компьютер; 11 – приемник видеосигнала и монитор; 12 – электродвигатель. В верхней части рисунка – оператор, управляющий движением видеокамеры. Справа у основания колонны показана для сравнения установка Верниолле–Джапарта – V–J;

б–г – схематическое изображение газогидродинамических режимов при разных расходах подачи газа: *б* – пузырьковый (низкодебитный) режим, *в* – пузырьковый (среднедебитный) – в нижней части колонны, переходящий в кластерный – в средней части колонны, *г* – пузырьковый (высокодебитный)

Для проведения экспериментальных исследований в трубку заливается жидкость, в которую через иглу подается газ. Формируются пузырьки, которые всплывают в жидкости. Процесс пропускания газа или пара через жидкость в физике получил название барботаж, а само движение пузырьков барботирование. Поэтому трубку заполненную жидкость, сквозь которую поднимаются газовые пузырьки, в последующем будем называть барботажной колонной.

В этой части установки моделируются процессы, происходящие в питающем канале вулкана во время извержения. Отношение рабочего сечения внутреннего диаметра шланга к его длине (в нашем случае высоте) приблизительно 1:900, такое соотношение отвечает реальным параметрам вулканических питающих каналов.

В верхней части столба жидкости располагается граница двух сред: жидкость – воздух. Эта часть моделирующей системы дает возможность отслеживать процессы, происходящие при переходе пузырьков из барботажной колонны в открытое пространство. Природным аналогом этой части аппаратного комплекса является кратер вулкана или вулканическая бокка.

В работе используется жидкость и газ. В качестве модельной жидкости применяется 35 % раствор глицерина в дистиллированной воде (это соотношение было выбрано в результате предварительных экспериментов). В качестве барботирующего газа применяется обычный воздух, поступающий в колонну под давлением из газового баллона. Воздух в условиях эксперимента ($T - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{max}} - 1,6\text{ атм.}$, $P_{\text{min}} - 1\text{ атм}$) не растворяется в воде и остается в свободной фазе в виде газовых пузырьков до конца эксперимента. Газовый баллон, подающий воздух, снабжен редукторами, позволяющими регулировать расход газа.

Регистрирующая система включает систему динамического видеослежения, электронный высотомер и спидометр, блок видеорегистрации, блок акустической регистрации, синхронизирующее устройство и отключающую систему.

Система динамического видеослежения призвана в режиме реального времени осуществлять наблюдение за процессами, происходящими в прозрачном вертикальном шланге при движении по нему модельной жидкости. Вдоль шланга по системе направляющих тросов перемещается тележка с видеокамерой. Движение тележки обеспечивается электродвигателем. На тележке предусмотрен мощный источник света, позволяющий обнаруживать даже мелкие неоднородности в движущемся потоке. Изображение, получаемое видеокамерой слежения, по телеметрическому каналу в реальном времени передается на монитор. Оператор, следящий за видеоизображением, имеет возможность оперативно изменять скорость тележки в интервале от 1 см/с до 1,5 м/с. Это необходимо для того, чтобы постоянно держать в прицеле камеры пузырек или группу поднимающихся пузырьков, выбранных оператором для слежения.

Высотомер и спидометр. Для одновременного определения высоты и скорости движущейся тележки

создан специальный электронный блок. С помощью высотомера можно фиксировать вертикальное положение тележки с точностью до 10 мм, а с помощью спидометра определять изменение ее скорости в интервале 2 см/с – 1,5 м/с с точностью 2 см/с.

Видеорегистрация. Ход эксперимента фиксируется видеокамерой. Она расположена на движущейся тележке и записывает изображение пузырьков, поднимающихся (барботирующих) сквозь жидкость. Для удобства наблюдения процессов, происходящих в шланге, и обеспечивая при этом достаточное качество изображения, выбран оптимальный угол захвата изображения, позволяющий записывать видеоряд движущихся пузырьков в 30-сантиметровом интервале высоты.

Акустическая система позволяет регистрировать звуковой сигнал, образующийся при разрушении пузырьков, достигающих поверхности модельной жидкости. Для этого, над верхним срезом пластикового шланга устанавливается влагозащитный микрофон, сигнал от которого в цифровом виде передается и записывается на компьютер. Это аналог геофизической станции, записывающей колебания, возникающие в непосредственной близости от источника сигнала.

Блок синхронизации. Эта часть установки создана для синхронизации видео- и акустической информации. Она позволяет синхронизировать сигнал с точностью до миллисекунд.

Блок экстренного торможения. Установка снабжена устройством экстренной остановки тележки в случае выхода ее за пределы рабочей зоны.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования выполнялись по трем направлениям:

1-е – для выявления возможности возникновения периодического фонтанирования проводилось изучение изменения общей структуры двухфазного потока в условиях увеличения расхода барботирующего газа;

2-е – для определения механизма образования открытых пузырьковых кластеров исследовалось поведение нескольких пузырьков при их подъеме в вертикальной трубке;

3-е – для выяснения характера взаимодействия кластера с пузырьками большего и меньшего размера, а также с кластерными структурами, образованными этими пузырьками, изучалось совместное поведение разноразмерных пузырьков.

1-е экспериментальное направление. Выше, по материалам извержений Ключевского вулкана 1984 и 1993 гг. было показано, что при повышении интенсивности извержения в какой-то момент в характере извержения возникают периодические флюктуации. При дальнейшем увеличении интенсивности извер-

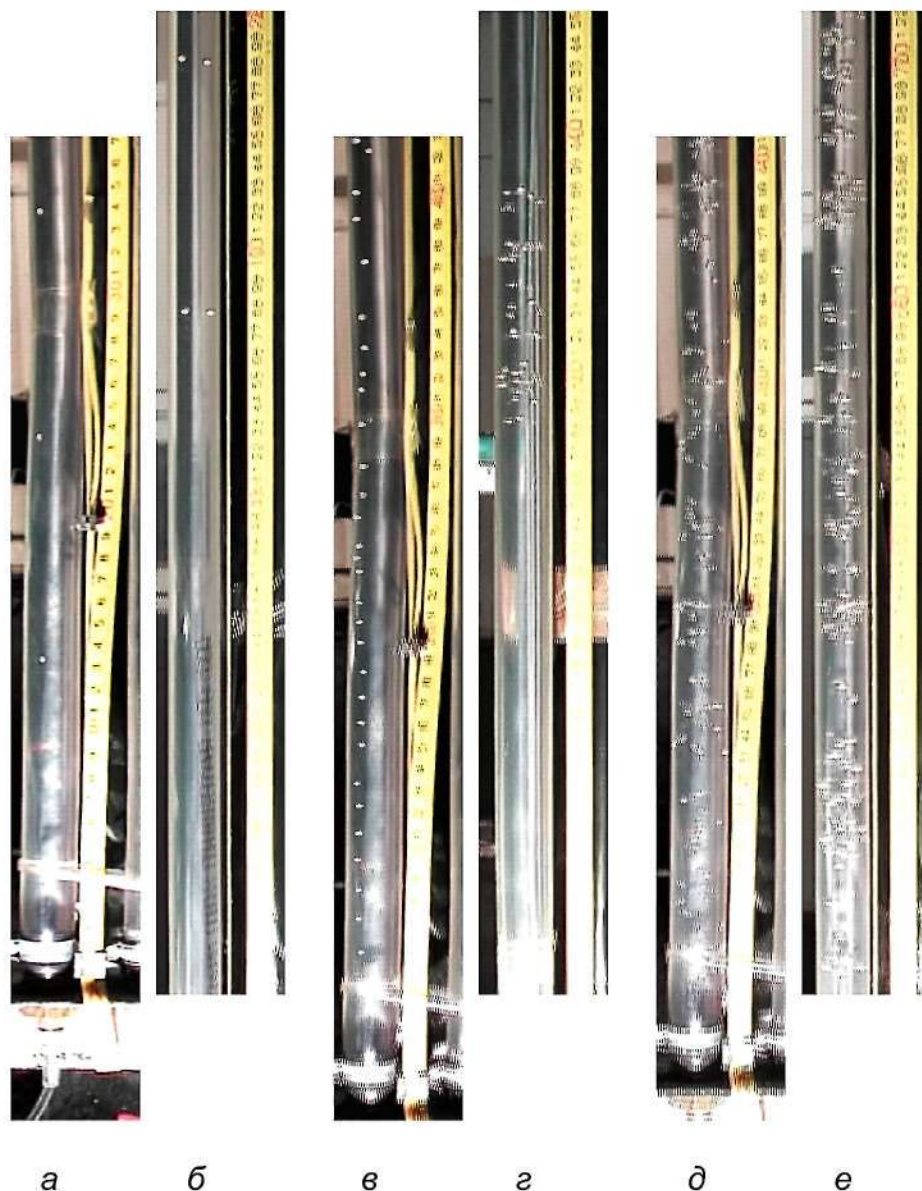


Рис. 7. Стоп-кадры видеозаписи газогидродинамических режимов при разных расходах газа:

a и *б* – низкодебитный пузырьковый режим, *в* и *г* – среднедебитный пузырьковый режим (*в*), переходящий в кластерный (*г*), *д* и *е* – высокодебитный пузырьковый режим. Для демонстрации поведения пузырьков при одном и том же расходе газа кадры сгруппированы по парам, соответственно для нижней и верхней частей барботажной колонны. Рис. *б* демонстрирует начальный этап кластеризации (две пары пузырьков в верхней части колонны); на рис. *г* – показан кластер, состоящий из ~ 40 пузырьков, образовавшийся из равномерного среднедебитного пузырькового режима (*в*)

жения периодичность исчезает, и начинают доминировать процессы постепенных (линейных) изменений ВД. Именно этот случай эруптивной активности мы и планировали воспроизвести в лабораторных экспериментах. При этом предполагалось проверить, существуют ли такие условия: расход газа, диаметр канала ($\varnothing_{\text{трубки}}$), размер пузырьков ($\varnothing_{\text{пузырька}}$), плотность жидкости, при которых равномерный поток мелких газовых пузырьков ($\varnothing_{\text{пузырька}} \ll \varnothing_{\text{трубки}}$), поднимающихся по вертикальной колонне, превращается в периодический газовый поток.

Трубка заполнялась раствором глицерина в воде, а затем подавался газ. В процессе эксперимента мы увеличивали расход газа, подаваемого в трубку. Размер пузырьков (диаметр) не изменялся, он примерно равен 1 мм. График на рис. 3, *в* демонстрирует запись давления звуковой волны лопочащихся газовых пузырьков в верхней части трубки при переходе их из жидкости в открытое пространство. Тонкие вертикальные линии на графике соответствуют акустическим импульсам от всплеска пузырьков, достигших поверхности. Они нагляднее всего представлены

в левой части графика, где каждый четкий импульс соответствует всплеску газового пузырька.

В результате экспериментов было установлено, что при постепенном увеличении расхода газа в вертикальной колонне последовательно возникают три типа режимов: пузырьковый (низкодебитный), кластерный (начальный и периодический) и пузырьковый (высокодебитный): рис. 6, б-г – схематическое изображение режимов, рис. 7, а-е – реальное изображение видеозаписи режимов (стоп-кадры). Эти режимы стабильны; при определенных расходах подачи газа каждый из них сохраняется в канале сколь угодно долго. Особенности внешнего проявления того или иного режима можно наблюдать на поверхности при переходе пузырьков из жидкости в открытое пространство.

Пузырьковый (низкодебитный) режим. Из проведенных экспериментов следует, что сначала, при низком расходе газа (1 пузырек отрывается от иглы через каждые 20 см), пузырьки проходят всю колонну не взаимодействуя друг с другом. Они появляются на поверхности практически через равные промежутки времени, соответствующие интервалу времени между отделением каждого пузырька от иглы. Описываемый режим характеризуется свободным подъемом пузырьков, что обусловлено минимальным влиянием их друг на друга.

Кластерный режим (начальный). Увеличение расхода газа (1 пузырек через каждые 10 см) приводит к тому, что четкий ритм отрыва пузырьков с кончика иглы по мере подъема сбивается. Некоторые пузырьки сближаются, объединяясь в группы, состоящие из нескольких пузырьков, между которыми сохраняются промежутки жидкости. В результате в верхней части трубки наблюдаются области с повышенной концентрацией пузырьков и разряженные области, которые незакономерно сменяют друг друга. Скорость движения пузырьков – 18,18 см/с. Режим характеризует начальный этап кластеризации, когда образуются первые группы, состоящие всего из нескольких пузырьков.

Кластерный режим (периодический). При последующем увеличении расхода газа (1 пузырек через каждый 1 см) происходит полная перестройка структуры потока. В процессе подъема, пройдя путь в 4–5 метров, пузырьки сближаются и объединяются в устойчивые группы – кластеры, содержащие 35–50 пузырьков. Кластеры разделяются между собой объемом жидкости, не содержащим газовых пузырьков. Размер кластеров в высоту – 3–8 диаметров трубки (50–140 мм), межкластерное пространство – 14–20 диаметров трубки (250–360 мм). Кластеры устойчиво следуют друг за другом на фиксированном расстоянии. Скорость движения кластеров – 17,07 см/с.

Пузырьки в кластере не сливаются, они движутся, соударяются, отскакивают, обгоняют или отстают друг друга, но при этом не выходят за пределы кластера. Распределение пузырьков в кластере в разные моменты времени может быть равномерным или неравномерным. В процессе движения тело кластера

иногда сжимается и становится более плотным, а иногда растягивается. В кластере часто образуются горизонтальные группы, состоящие из нескольких пузырьков, располагающихся по внутреннему периметру трубки и движущихся медленнее, чем во внутренней части кластера. Визуально их поведение похоже на волну, перемещающуюся сверху вниз. Горизонтальные группы пузырьков существуют в течение десятых долей секунды – нескольких секунд. В целом кластер представляет устойчивое образование: удаления или привноса новых пузырьков не происходит.

Поскольку все пузырьки в кластере одного размера и диаметр пузырьков значительно (на порядок) меньше внутреннего диаметра трубки, ни один из них не может тормозить движение поднимающихся снизу пузырьков и удерживать их под собой за счет своего размера. Мы предлагаем назвать группу пузырьков, имеющих один и тот же размер (который значительно меньше диаметра канала), ограниченную сверху и снизу слоем жидкости, не содержащим пузырьков, открытым пузырьковым кластером, а последовательность кластеров, поднимающихся друг за другом на фиксированном расстоянии, – кластерным режимом. Такой режим устойчив, он наблюдается в 10-метровом интервале высоты колонны – от 5-го метра снизу до выхода на поверхность.

Кластерный режим (периодический) – самый медленный из всех исследованных нами газогидродинамических режимов. В нем доминируют процессы образования уплотненных пузырьковых структур (кластеров) и группового самоторможения пузырьков. Но при этом в колонне одновременно сосуществуют равномерный пузырьковый (низкодебитный) режим, начальный кластерный, а позднее и устойчивый периодический кластерный режим.

Пузырьковый (высокодебитный) режим. Последующее увеличение расхода газа (1 пузырек через каждые 0,5 см) вновь приводит к изменению свойств потока газовых пузырьков, но теперь в обратную сторону – от периодического течения к равномерному пузырьковому. Структура потока пузырьков по всей колонне сохраняется постоянной, это самый устойчивый режим. Следует отметить, что в движущемся потоке могут иногда возникать уплотнения пузырьков и разреженные зоны, но они недолговечны. Скорость движения пузырьков – 20 см/с, максимальная среди всех полученных режимов.

Таким образом, при повышении расхода газа дважды происходит смена режимов, когда динамическая система переходит в новое качество в двух разных точках бифуркации: ТБ1 «входа» – при переходе из пузырькового режима в периодический кластерный и ТБ2 «выхода» – из кластерного режима в пузырьковый (высокодебитный).

2-е экспериментальное направление. В процессе исследований было установлено, что на пузырек, движущийся в составе кластера, действуют множество разнонаправленных, постоянно меняющихся сил. Это

не позволило получить элементарные характеристики образования и «жизни» кластеров. По этой причине мы решили изучить особенности объединения пузырьков и их последующее совместное движение на самой простой модели, включающей всего несколько единичных пузырьков. Эксперименты проводились при низких расходах газа (1–6 пузырьков на каждые 20 см). При таких расходах стало возможным выявить особенности группового поведения единичных пузырьков, а затем использовать полученные данные для объяснения поведения пузырьков в крупных газовых кластерах.

Эмпирически на КАМБИ установлено, что для единичных пузырьков одного размера, следующих друг за другом, существует критическое расстояние – $L_{кр} \approx 100$ диаметрам пузырька ($\Phi_{\text{пузырька}}$). Если между пузырьками расстояние больше $L_{кр}$, то они пройдут весь путь по колонне самостоятельно. При приближении к поверхности, расстояние между ними будет примерно таким же, как и в начале пути. Если это расстояние меньше $L_{кр}$, то нижний пузырек догонит верхний, и они продолжат свой путь вместе.

Теперь рассмотрим, как будет развиваться процесс кластеризации при минимальном количестве пузырьков ($L \approx 90 \Phi_{\text{пузырька}}$). Через 5–6 метров после отрыва от иглы два пузырька объединятся в минимальный кластер (рис. 7, б). Такой дуэт будет существовать продолжительное время, и пузырьки достигнут поверхности, пройдя еще 9 метров пути. При том же расходе газа, этот сценарий может иметь продолжение, поскольку скорость кластера, состоящего из двух пузырьков, ниже, чем у одиночного пузырька. Вследствие разницы скоростей кластерную структуру догонит еще один пузырек, и в результате образуется кластер из трех пузырьков. В экспериментах с описываемыми расходами газа таким путем формируются кластеры, содержащие до 5 пузырьков.

Увеличение расхода газа в 1,5–2 раза ($L \leq 55 \Phi_{\text{пузырька}}$) приводит к тому, что кластеры, состоящие из двух пузырьков, образуются раньше, на высоте всего лишь 2–3 метров от места отрыва от иглы, а кластеры из трех пузырьков – на высоте 4–5 м. При дальнейшем движении кластер из двух пузырьков догонит кластер из 3 пузырьков, и в итоге формируется структура из пяти пузырьков. Такую структуру легко догонят одиночные пузырьки и кластеры меньшего размера. При описываемых расходах газа размеры кластера могут изменяться от 5 до 13 пузырьков. При дальнейшем увеличении расхода газа размер кластера будет продолжать увеличиваться.

Выше уже упоминалось об одном важном обстоятельстве в поведении пузырьков. При всплытии они могут занять горизонтальное положение, образуя горизонтальный слой. Это следует из опытов с пузырьками диаметром 1 мм, которые показали, что неблокированные кластерные структуры, состоящие из 2-х пузырьков, могут двигаться в горизонтальном/субгоризонтальном положении несколько метров

(рис. 7, б), а кластеры, содержащие 3–13 пузырьков, лишь сантиметры – десятки сантиметров.

Дополнительно были проведены опыты с пузырьками большего диаметра – 2,5 мм при числе пузырьков 2–7. Все они занимали горизонтальное положение (рис. 8, а–е). В случае двух пузырьков в кластере они располагались на некотором расстоянии друг от друга. Во всех остальных случаях пузырьки занимали позицию по кругу, вдоль внутреннего периметра трубки. При этом, когда мы работали с 7 пузырьками, 6 из них занимали позицию по кругу, а 7 располагался в центре. В таком положении пузырьковые кластеры проходят путь от десятков сантиметров до нескольких метров. Затем в их структуре происходят нарушения, и пузырьки вновь превращаются в кластер, состоящий из хаотично соударяющихся и отскакивающих друг от друга шариков. А через некоторое время они могут вновь занять горизонтальное положение.

3-е экспериментальное направление. К этому направлению относятся опыты по исследованию взаимодействия двух кластеров, состоящих из пузырьков разного диаметра: 1 мм в первом кластере и 0,2 мм – во втором.

В барботажной колонне под кластером, состоящим из мелких пузырьков, мы генерировали кластер, состоящий из пузырьков, размер которых на порядок больше. Эксперименты показали, что движущийся снизу крупнопузырьковый кластер проходит насквозь через мелкопузырьковый кластер без каких-либо изменений своей структуры и скорости. Фактически крупнопузырьковый кластер не реагирует на мелкопузырьковый и проходит через него как через жидкость. Конфигурация мелкопузырькового кластера после прохождения через него крупнопузырькового сохраняется прежней.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Теперь опишем основные свойства пузырьков в барботажной колонне, изложим наши представления о кластерном периодическом режиме и причинах его возникновения, а также проведем сопоставление полученных результатов с вулканическими процессами.

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 учитывали ряд особенностей, которые ранее, другими исследователями не принимались во внимание.

1. Впервые была реализована модель, которая учитывала геометрические параметры питающего

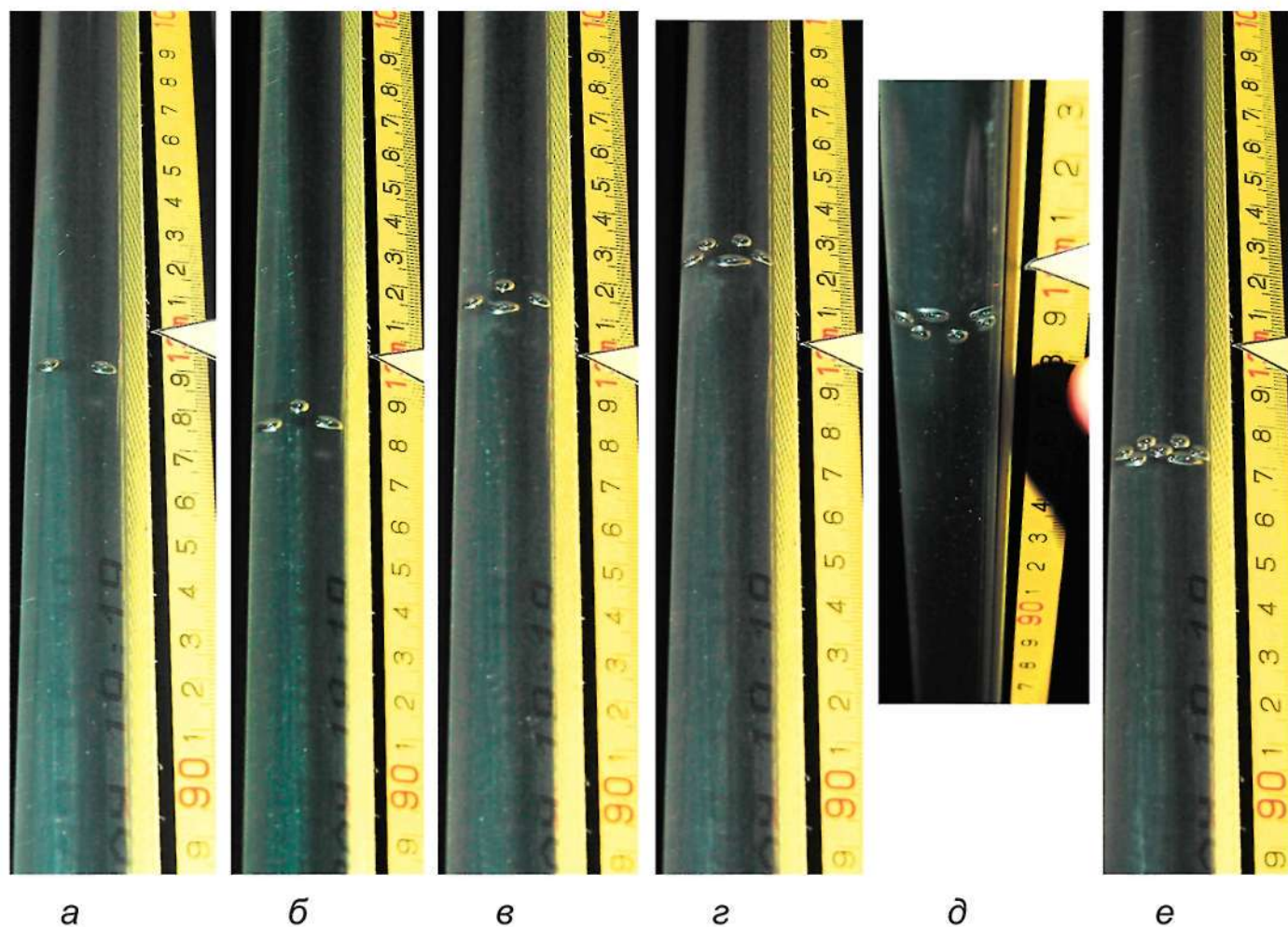


Рис. 8. Неблокированные пузырьковые кластеры с минимальным числом пузырьков в барботажной колонне: а – двухпузырьковый, б – трехпузырьковый, в – четырехпузырьковый, г – пятипузырьковый, д – шестипузырьковый, е – семипузырьковый; все пузырьки одного размера, диаметр ~ 2 мм. Наблюдаемые различия в форме и размерах пузырьков обусловлены искажением за счет изгиба пластикового шланга. Фотографии пузырьковых кластеров выполнены на участке вертикального прозрачного шланга КАМБИ на уровне 13-го метра

канала базальтового вулкана. Протяженность реальных вулканических каналов на несколько порядков больше их диаметра, поэтому на КАМБИ соотношение внутреннего диаметра канала к его высоте примерно 1:900.

2. При физическом моделировании процесса извержения были впервые реализованы условия барботирования пузырьков в жидкостях разной плотности при постепенно изменяющемся расходе подачи газа; это позволило исследовать процесс формирования однородных газовых структур и открытых пузырьковых кластеров.
3. При проведении экспериментов была обеспечена возможность естественного всплывания газовых пузырьков по всей колонне: исключены структурные барьеры и резкие флуктуации скорости подачи газовых пузырьков. Отношение диаметра пузырьков в эксперименте к внутреннему диа-

метру трубки примерно 1:20, что исключало запыление внутреннего сечения трубки крупным пузырьком и любые капиллярные эффекты.

4. Моделирование имело своей целью объяснение реального природного процесса – периодического фонтанирования на базальтовых вулканах. При анализе графиков вулканического дрожания Ключевского вулкана в сопоставлении с графиками акустической записи на КАМБИ мы в качестве критерия подобия приняли жесткие рамки совпадения двух непрерывных рядов данных, которые включают две точки бифуркации, и характеризуют линейное и периодическое развитие процесса.

II. В опытах использовался неподвижный раствор глицерина в воде, заполняющий протяженную вертикальную прозрачную трубку. В результате пред-

варительных опытов было выбрано оптимальное соотношение воды и глицерина – 2:1, при котором удалось установить влияние расхода газа на характер газожидкостных структур (рис. 3, 8 и 9). При низких расходах подачи газа по всей трубке наблюдался равномерный пузырьковый низкодебитный режим (рис. 8, б). При средних расходах фиксировался равномерный среднедебитный режим – в нижней части трубки, сменяющийся в средней части периодическим режимом открытых кластеров, которые без изменения достигают поверхности (рис. 8, в; 9, в и г). При высоких расходах газа система переходит к равномерному высокодебитному пузырьковому режиму, проявляющемуся по всей высоте барботажной колонны (рис. 8, г; 9, д и е). Эти материалы наглядно демонстрируют, что увеличение расхода подачи газа в колонну приводит к коренному нелинейному изменению структуры двухфазного потока в двух точках бифуркации: при переходе от пузырькового низкодебитного режима к кластерному периодическому режиму – ТБ1 «входа» и от кластерного периодического режима к пузырьковому высокодебитному – ТБ2 «выхода».

III. В результате экспериментальных исследований установлена новая, морфологически устойчивая газогидродинамическая структура – открытый пузырьковый кластер. Совокупность открытых пузырьковых кластеров, разделенных между собой слоем жидкости без пузырьков, следующих друг за другом на фиксированном расстоянии, представляет периодический кластерный режим (рис. 8, в и 9, г). Ранее этот режим не был известен и не описан в обобщающих монографиях [Кутателадзе и Накоряков, 1984; Эртель, 2007; Wallis, 1969] и в публикациях по моделированию работы нефтяных скважин на крупногабаритных установках [Абишев и др., 1981; Сахаров и Мохов, 2004].

Приведем основные характеристики открытого кластерного режима: 1 – главным элементом является пузырьковый кластер – объем жидкости с высокой концентрацией пузырьков, сверху и снизу ограниченный жидкостью, не содержащей свободной газовой фазы; 2 – пузырьки, формирующие кластер, имеют один размер, который на порядок меньше внутреннего диаметра канала; 3 – пузырьки в кластере не имеют постоянного места и находятся в непрерывном движении; 4 – совокупность пузырьковых кластеров, следующих друг за другом на фиксированном расстоянии, представляет кластерный режим; 5 – кластерные структуры при определенных расходах газа имеют устойчивый, периодический характер; 6 – кластерный режим проявляется как следствие эволюции в барботажной колонне среднедебитного пузырькового режима; 7 – кластерный режим на поверхности проявляется между двумя пузырьковыми режимами – низкодебитным и высокодебитным; 8 – вертикальная скорость движения пузырьков в открытом кластерном режиме ниже, чем в пузырьковом режиме; 9 – продолжительность «жизни» кластерного режима сопоставима со временем существования пузырькового:

единожды образовавшись, кластер, как правило, не разрушается; 10 – механизм образования открытых кластеров в вертикальном канале обусловлен свойствами одноразмерных пузырьков догонять друг друга, которые объединившись в группу, лишены возможности покинуть ее пределы.

Следует особо обратить внимание на то обстоятельство, что открытый пузырьковый кластер по морфологии и способу своего образования принципиально отличается от заблокированного пузырькового кластера, который был открыт нами в 2003 году и описан в работах [Озеров, 2007; Озеров, 2009]. Для образования заблокированных кластеров, в отличие от открытых, описываемых в настоящей статье, решающее значение имеют крупные пузырьки, запирающие (блокирующие) поднимающееся снизу пузырьки.

Режим открытых кластеров очевидно присущ не только вулканическим процессам. Его следует рассматривать 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. На основе полученных экспериментальных данных опишем механизм формирования нового, установленного нами режима открытых пузырьковых кластеров. Выше было показано, если расстояние между пузырьками одного размера меньше $L_{кр}$, то нижний пузырек воспользуется «следом» идущего выше пузырька и обязательно догонит его. Приблизившись друг к другу, эти пузырьки не слипаются и не сливаются, так как имеют свойства твердых пузырьков, поэтому их взаимодействие напоминает поведение соударяющихся твердых шариков. При этом, приблизившись друг к другу, они больше не выйдут за пределы созданной ими кластерной структуры и продолжат двигаться вместе.

Свойство равновеликих пузырьков таковы, что, объединившись в кластер, они стремятся занять в трубке горизонтальное положение максимального проявления силы лобового сопротивления. Это обеспечивает уменьшение скорости всплытия пузырьковой пары и, таким образом, формируется газогидродинамическая пробка минимального размера.

Последующее развитие системы определяется тем, что новообразованный кластер (медленно движущаяся пара пузырьков) является реальным природным барьером, улавливающим пузырьки того же размера, поднимающиеся снизу с более высокой скоростью. Таким образом, увеличивая свои размеры, этот кластер начинает улавливать не только одиночные пузырьки, но и более мелкие кластерные образования, идущие снизу. В итоге процесс приобретает лавиноподобный характер, что приводит к появлению кластера со все большим количеством пузырьков и возникновению крупного кластера.

Продолжающийся подниматься снизу поток пузырьков попадает в те же условия, в которых происходило вышеописанное кластерообразование, и на тех же уровнях высоты происходят сходные процессы объединения пузырьков. Таким образом, формирующиеся газовые структуры последовательно проходят одну и ту же морфологическую эволюцию. Эти циклы последовательно повторяются, и в барботажной колонне одновременно наблюдаются десятки равно-великих кластеров.

Заканчивая описание природы образования кластеров, подчеркнем что процесс кластерообразования и соответственно кластерный режим являются закономерным следствием эволюции пузырькового режима в вертикальной барботажной колонне.

Проведем сопоставление результатов экспериментальных данных и вулканических процессов (V–VII)

V. Опишем подробнее проявление каждого газогидродинамического режима на верхнем срезе трубы, поскольку именно в этой части КАМБИ моделируются процессы, происходящие в кратере базальтовых вулканов. В зависимости от расхода газа, поступающего в барботажную колонну, любой из описанных режимов может быть выведен на поверхность.

Приведем сопоставление поверхностных эффектов каждого режима с реальными динамическими параметрами базальтовых извержений.

Пузырьковый (низкодебитный) режим, проявленный в барботажной колонне, 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 будут весьма многообразными по характеру и масштабу. В жидких магмах будет наблюдаться слабое «кипение» на поверхности лавового озера или слабые всплески в кратере, а в более вязких – равномерная постоянная пепловая эмиссия за счет разрыва перегородок между пузырьками, достигающими поверхности.

Кластерный режим на выходе из барботажной колонны, характеризуется чередованием эпизодов разбрызгивания модельной жидкости, связанного с выходом пузырьковых кластеров на поверхность, с эпизодами спокойного состояния жидкости. Проявлением кластерного режима в жидких магмах в кратере вулкана является квазипериодическое образование бомбовых фонтанов. В более вязких расплавах фонтаны, кроме бомб, генерируют большое количество вулканического пепла. По мере выхода кластера на поверхность последовательно происходит многоактный процесс разрыва перегородок между пузырьками. При этом разрушение крупных перегородок приводит к появлению вулканических бомб, а разрушение тонких перегородок – к образованию более мелкой фракции тефры (вулканический пепел).

Пузырьковый (высокодебитный) режим характеризуется разбрызгиванием модельной жидкости при

выходе пузырьков из канала КАМБИ, но в отличие от кластерного этот режим «работает» непрерывно. Проявлением высокодебитного пузырькового режима в процессе вулканических извержений является продолжительное монотонное фонтанирование раскаленных бомб, которое в зависимости от вязкости магмы может сопровождаться эмиссией вулканического пепла.

Переходные режимы. Вышеописанные три режима являются основными устойчивыми состояниями двухфазного потока. Кроме того, существуют переходные режимы – от пузырькового (низкодебитного) к кластерному и от кластерного к пузырьковому (высокодебитному). Переходные режимы могут существовать в течение длительных интервалов времени и проявляются в нерегулярном характере эруптивной деятельности.

VI. В опытах было показано, что кластер может существовать и перемещаться продолжительное время при соблюдении обязательного условия: пузырьки в самом кластере, как и все пузырьки в потоке, должны обладать свойствами твердых пузырьков. Опыты на КАМБИ показали, что размер твердых пузырьков в растворе глицерина (35 %) в воде достигает 2,5 мм в диаметре.

При рассмотрении реальной магматической системы надо учитывать глубину, давление, температуру и плотность магмы. В этих случаях можно предположить, что размер твердых пузырьков в магме, в верхней части канала, будет на два порядка больше, в интервале 10–30 см. Как было установлено в проведенных нами экспериментах, коалесценции (слияние) твердых пузырьков в колонне не происходит. Поэтому пузырьки такого размера в магматическом канале образуются только в процессе своего роста, за счет падения давления и диффузии растворенного газа и в результате формируют пузырьковый кластер.

VII. Сформированный кластер имеет свойства сепарирующей динамической газовой пробки, состоящий из равновеликих пузырьков. По мере подъема вверх по колонне такая пробка обгоняет более мелкие пузырьки и не препятствует крупным пузырькам проходить через нее вверх. При этом кластер улавливает поднимающиеся снизу пузырьки, имеющие тот же размер, что и в кластере, и за счет этого наращивает себя. В результате к поверхности подходят крупные равнопузырьковые кластеры, которые в кратере реализуются впечатляющим эпизодом фонтанирования раскаленных бомб.

VIII. Теперь представим результаты сопоставления акустической записи на верхнем урезе колонны КАМБИ с графиками вулканического дрожания при извержениях Ключевского вулкана 1984 и 1993 гг. (рис. 3–4) и с акустической записью извержения вулкана NW Rota-I 2006 г. (рис. 5). Для корректности сопоставления данные экспериментальных акустиче-

ских измерений представлены в таком же формате, что и опубликованные данные сейсмологических исследований. На наш взгляд, сопоставление этих данных дает более наглядную картину и позволяет убедиться в подобии природного и моделированного процессов.

Наиболее информативен график ВД по извержению 1993 года (рис. 3, а). Он иллюстрирует три вулканических режима (равномерного повышения, периодический и неравномерного повышения), последовательно сменяющие друг друга, и две разные точки бифуркации (ТБ1 «входа» и ТБ2 «выхода») на границе этих режимов. Данные этого графика послужили основой для моделирования эруптивного процесса.

Аналогичный график мы получили и по результатам экспериментов на КАМБИ, варьируя плотность модельной жидкости, заполняющей барботажную колонну, и расход газа (рис. 3, в). На графике в той же последовательности представлены три режима и две разные точки бифуркации – ТБ1 «входа» и ТБ2 «выхода». Из сравнения природного и модельного графиков (рис. 3, а и в) очевидно, что они имеют большое сходство. На этом основании можно утверждать, что в экспериментах на КАМБИ мы получили данные, которые позволили установить механизм процессов, происходящих в питающей системе Ключевского вулкана во время извержения 1993 года.

Сходство природного и модельного процессов проявляется и в деталях (рис. 4, 5). Оно хорошо иллюстрируется на немодифицированных графиках для вулканического процесса и воспроизведенного на КАМБИ. Сопоставление этих графиков показывает, что в обоих случаях четко выражено закономерное чередование интервалов плотно сгруппированных высокоамплитудных импульсов с интервалами низкоамплитудных импульсов (рис. 4) или полного их отсутствия (рис. 5), характеризующее периодический характер процессов.

Высокое подобие представленных графиков дает основание полагать, что в результате проведенных исследований установлен ведущий процесс кластеризации газожидкостного потока в питающем канале, приводящий к формированию режима периодического фонтанирования базальтовых магм.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Для исследования процесса периодического фонтанирования раскаленных бомб при извержении базальтовых вулканов был создан комплекс аппаратуры моделирования базальтовых извержений КАМБИ (барботажная колонна). Он предназначен для изучения процессов, происходящих при подъеме и выходе на поверхность двухфазного газожидкостного потока, движущегося по вертикальному магматическому каналу.
2. Анализ разнообразия режимов течения показал, что три режима, последовательно возникающих в экспе-

риментальной колонне, – пузырьковый (низкодебитный), кластерный и пузырьковый (высокодебитный) являются продуктами закономерной эволюции двухфазного потока. Они имеют четкие морфологические особенности и определяются расходом газа, поступающего в систему. При определенных расходах газа вертикальный канал работает как сепаратор-дозатор газовой фазы.

3. При проведении экспериментов выявлен и описан новый, ранее неизвестный режим течения двухфазных смесей в вертикальной колонне – режим открытых кластеров. Он характеризуется закономерным чередованием скоплений газовых пузырьков – кластеров, разделенных между собой жидкостью, не содержащей свободной газовой фазы. Механизм образования открытых кластеров в вертикальном канале хорошо объясняется свойствами одномерных пузырьков догонять друг друга, создавать горизонтальные структуры максимального торможения, улавливать поднимающиеся снизу пузырьки и не давать им возможности покинуть границы кластера. Именно кластерный режим ответствен за проявление периодического фонтанирования раскаленных бомб при извержениях базальтовых вулканов.

4. Комплекс проведенных исследований позволил предложить новую модель газогидродинамического эволюционного движения магматического расплава в подводящем канале базальтового вулкана. Реализация на поверхности различных режимов течения двухфазного магматического расплава ответственна за многообразие эксплозивных явлений в кратере вулкана. В зависимости от проявления типа режима на базальтовых вулканах могут проявляться различные типы эксплозивной деятельности: пепловая эмиссия со слабым выбросом вулканических бомб, энергичное периодическое фонтанирование раскаленных бомб и интенсивная продолжительная «работа» раскаленных фонтанов.

Автор выражает искреннюю благодарность В.А. Дроздину за многолетнюю помощь при проведении исследований. Значительную поддержку работам оказывали директор Института вулканологии сейсмологии ДВО РАН академик Е.И. Гордеев, академик С.А. Федотов, Я.Д. Муравьев, директор Камчатского филиала Геофизической службы РАН В.Н. Чебров.

Большое содействие оказывала администрация Камчатского края: заместитель председателя Правительства В.Н. Карпенко, А.А. Гаврилов и С.И. Кравец.

Автор признателен иностранным коллегам за консультации и помощь в исследованиях – Дж. Айкельбергеру, Р. Джойлесу, Ф. Кайлу и Дж. Лису.

В процессе подготовки рукописи к печати большую помощь оказали академик В.И. Коваленко, академик В.В. Адушкин, профессор Ю.Д. Чашечкин и профессор Н.Н. Сысов.

Исследование поддержано грантами по Программе № 14 Президиума РАН, РФФИ № 09-05-00841-а и Правительства Камчатского края.

ЛИТЕРАТУРА

- 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.
- Арискин А.А., Бармина Г.С., Озеров А.Ю., Нильсен Р.Л. Генезис высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана // Петрология. 1995. Т. 3, № 5. С. 42–67.
- Балеста С.Т., Иванов Б.В., Утнасин В.К., Аносов Г.И. Строение земной коры района Ключевской группы вулканов, особенности тектоники и вулканизма // Глубинное строение и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток, 1976. С. 7–16.
- Владаев В.И. Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984. 340 с.
- Гегузин Я. Е. Пузыри. М.: Наука, 1985. 174 с.
- Гордеев Е.И. О возможном механизме низкочастотного вулканического дрожания // Вулканология и сейсмология. 1985. № 3. С. 68–77.
- Гордеев Е.И., Мельников Ю.Ю., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Вулканическое дрожание Ключевского вулкана (извержение вершинного кратера в 1984 г.) // Вулканология и сейсмология. 1986. № 5. С. 39–53.
- Горельчик В.И. Сейсмические проявления вулканической деятельности // Глубинное строение и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток, 1976. С. 108–118.
- Горельчик В.И., Степанов В.В., Ханзутин В.П. Вулканическое дрожание при Большом трещинном Толбачинском извержении 1975 г. // Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. Москва, 1978. С. 146–150.
- Горшков Г.С. О глубине залегания магматического очага Ключевского вулкана // Докл. АН СССР. 1956. Т. 106, № 4. С. 703–705.
- Дрозин В.А. О природе вулканических извержений // Материалы 1-й городской конференции молодых ученых и специалистов. Петропавловск-Камчатский: Дальневосточное книжное изд-во, 1969. С. 4–6.
- Дрозин В.А. Физическая модель вулканического процесса. М.: Наука, 1980. 92 с.
- 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.
- Лобанов П.Д. Двухфазное пузырьковое течение в вертикальной трубе при малых газосодержаниях. Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Новосибирск, 2006. 20 с.
- Луцицкий И.В. Основы палеовулканологии. Т. 1. Современные вулканы. М.: Наука, 1971. 480 с.
- Озеров А.Ю. Экспериментальный комплекс для моделирования базальтовых взрывов // Материалы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога (28–31 марта 2007). Петропавловск-Камчатский, 2007. С. 144–156.
- 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. Т. 5. № 6. С. 614–635.
- Сахаров В.А., Мохов М.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в вертикальных трубах и промысловых подъемниках. М.: Изд-во «Нефть и газ». 2004. 392 с.
- Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы // М.: Наука. 1966. 117 с.
- Токарев П.И. Низкочастотное вулканическое дрожание // Вулканология и сейсмология. 1982. № 6. С.56–68.
- Федотов С.А. Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 456 с.
- Фирстов П.П., Широков В.А. Локализация корней вулканов Ключевской группы по сейсмологическим данным // Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971. С. 113–117.
- Хренов А.П., Маханова Т.М., Богатиков О.А., Платэ А.Н. Результаты аэрокосмических исследований вулканов Камчатки (Ключевская группа вулканов) // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 3–20.
- Эртель Г. (мл.) Путеводитель Прандтля по гидроаэродинамике. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2007. 774 с.
- Carrigan C.R., Schubert G., Eichelberger J.C. Thermal and dynamical regimes of single- and two-phase magmatic flow in dikes // J. Geophys. Res. 1992. V. 97, N B12. P. 17.377–17.392.
- Chadwick W.W., Cashman K.V., Embley R.W., Matsumoto H., Dziak R.P., de Ronde C.E.J., Lau T. K., Deardorff N.D., Merle S.G. Direct video and hydrophone observations of submarine explosive eruptions at NW Rota-1 volcano, Mariana arc. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, B08S10. P. 1–23.
- Chouet B.A., Saccorotti G., Martini M., Dawson P., De Luca G., Milana, G., and Scarpa, R. Source and path effects in the wave fields of tremor and explosions at Stromboli Volcano, Italy // J. Geophys. Res. 1997. V. 102, N B7. P. 15129–15150.
- Delfa S.La., Patane G., Clocchiatti R., Joron J.L., Tanguy, J.C. Activity of Mount Etna preceding the February 1999 fissure eruption: inferred mechanism from seismological and geochemical data // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2001. V. 105. P. 121–139.
- Jaupart C. Magma ascent at shallow levels // Encyclopedia of Volcanoes. San Diego – Toronto: Academic Press, 2000. P. 237–245.
- Jaupart C., Vergnolle S. The generation and collapse of a foam layer at the roof of a basaltic magma chamber // J. Fluid Mech., 1989. V. 203. P. 347–380.
- Kasereka M., Wafula M., Kavotha K., Mavonga T., Lukaya N., Hamaguchi H. Surveillance of the lava lake activity of Nyiragongo volcano: before, during and after the 2002 eruption // IUGG-2003. June 30 – July 11, Sapporo, Japan. Abstract, Volume A, V11/03A/A02-007 1120. A.544.
- Lees J.M., Symons N., Chubarova O., Gorelchik V., Ozerov A.Yu. Tomographic images of Kliuchevskoy volcano P-wave velocity // Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. Geophysical Monograph Series. 2007. V. 172. P. 293–302.
- Macdonald G.A. Volcanoes. New Jersey. Prentice-Hall. Inc., Englewood Cliffs. 1972. 510 p.

- Ozerov A.Yu.* The evolution of high-alumina basalts of the Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, Russia, based on microprobe analyses of mineral inclusions // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2000. N 95. P. 65–79.
- Ozerov A.Yu.* Experimental Modeling of the Explosion Mechanism of Basaltic Magmas // *Petrology*, 2009, V. 17, N 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 the dynamics of the Klyuchevskoy volcano eruption // *Proceeding Kagoshima International Conference of Volcanoes*. Japan. 1988. P. 63–65.
- Privitera E., Sgroi T., Gresta S.* Statistical analysis of intermittent volcanic tremor associated with the September 1989 summit explosive eruptions at Mount Etna, Sicily // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2003. V. 120. P. 235–247.
- Rittmann A.* *Vulkane und ihre tatigkeit*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1960. 336 p.
- Umasin V.K., Abdurakhmanov A.I., Anosov G.I., Budyansky Y.A., Fedorchenko V.I., Markhinin Y.K., Balesta S.T.* Types of magma foci of island arc volcanoes and their study by the method of deep seismic sounding of Kamchatka // *Volcanoes and Tectonosphere*. Tokai University Press. 1976. P. 123–137.
- Vergnolle S., Jaupart C.* Separated two-phase flow and basaltic eruptions // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 12842–12860.
- Vergnolle S., Mangan M.* Hawaiian and Strombolian Eruptions // *Encyclopedia of Volcanoes*. San Diego – Toronto: Academic Press, 2000. P. 447–461.
- Wallis Graham B.* *One-dimensional two-phase flow*. New York – Panama: McGraw-Hill Book Company, 1969. 408 p.