

УДК 550.348.+551.594

УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В АТМОСФЕРЕ ПРИ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЯХ (ОБЗОР)

© 2009 П.П. Фирстов

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: firstov@kscnet.ru*

В статье дан обзор работ, посвященных ударно-волновым и акустическим эффектам в атмосфере от вулканических извержений. Кратко показано развитие направления «акустика вулканических извержений» (АВИ) и информативность волновых возмущений в атмосфере о динамике извержений и параметрах эксплозивного процесса. Приведено обоснование феноменологической классификации волновых возмущений в атмосфере от вулканических извержений.

Ключевые слова: извержение, эксплозии, аэродинамический шум, ударные воздушные волны, инфразвуковые колебания.

КЛАССИФИКАЦИЯ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ И ЕЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В зависимости от химического состава продуктов извержения, различают три типа вулканической деятельности: *эффузивный* (излияние лавы), *эксплозивный* (взрывной, являющийся следствием повышения давления магматических газов), *экструзивный* (выжимание вязкой лавы в виде купола или обелиска). На разных стадиях вулканической деятельности сочетание типов активности меняется; довольно широко распространенное сочетание — эффузивно-эксплозивные извержения, при которых излияния лавы сопровождаются выбросами пирокластики.

Наиболее интересной, с точки зрения генерации ударно-волновых и акустических эффектов, является эксплозивная деятельность, сопровождающаяся ударно-волновыми и акустическими эффектами, обусловленными процессом быстрой дегазации магмы, ведущим к ее фрагментации с последующим выносом в атмосферу мелкой раскаленной пирокластики. Следует отметить, что в магматических газах пары воды составляют более 90 %, а массовая доля их в магме в зависимости от ее химического состава колеблется от нескольких долей до 6 %.

Многие известные классификации вулка-

нических извержений основаны на различиях в силе, характере и продуктах извержений и базируются на результатах визуальных наблюдений на конкретных вулканах (Лучицкий, 1971; Макдональд, 1975; Ритман, 1964). Также этими классификациями учитываются физические характеристики и типы продуктов процесса извержения. Наиболее распространенной является классификация, в которой различным типам извержений присваиваются названия вулканов, в чьей деятельности наиболее характерна какая-либо из сторон процесса. При этом в качестве исходных характеристик в классификации вулканических извержений используют характер взрывной деятельности, типы лавовых потоков, виды выбрасываемого материала и сформировавшихся построек.

Схема такой классификации, заимствованная из работы (Макдональд, 1975), с некоторыми добавлениями автора, приведена в табл. I. Здесь в качестве исходных характеристик принимаются следующие параметры: тип активности, характер эксплозивной деятельности, вид выбрасываемого материала, типы лавовых потоков и вулканических отложений, а также физические характеристики магмы. В деятельности одного и того же вулкана в разное время могут проявляться различные типы извержений.

Во второй половине XX века для классификации извержений все шире стали привлекаться

Таблица 1. Классификация вулканических извержений по Г. Макдональду (1975) с добавлениями автора.

Тип извержения	Характеристика взрывной деятельности и выбрасываемого материала	Характер эффузивной деятельности	Физические характеристики магмы
Стромболианский	Эксплозии от слабых до мощных, в основном, связанные с разрушением газовых «пузырей» на поверхности лавы. Сферический разлет пластичных бомб, шлак, небольшое количество стекловатого пепла.	Протяженные потоки умеренно жидкой лавы, иногда потоки могут отсутствовать.	Маловязкая магма, течение по каналу двухфазной смеси (силикатный расплав – газ) близкое к снаряжному режиму (барботирующий режим).
Вулканский	Эксплозии от умеренных до мощных, выбросы твердых и весьма вязких горячих обломков вновь образованной лавы. Вулканические бомбы типа «хлебной корки», пепел и пемза.	Потоки лавы обычно отсутствуют, а если присутствуют, то короткие и мощные; пепловые потоки редки.	Вязкая
Пелейский	Похож на вулканский тип, обычно, сопровождается раскаленными лавинами. Пепел, пемза.	Купола и (или) короткие очень мощные потоки, но могут и отсутствовать	Вязкая
Плинианский	Внезапные пароксизмальные выбросы больших объемов пепла, сопровождаемые обрушением вулканической постройки и образованием кальдера. Стекловатый пепел и очень большое количество пемзы.	Пирокластические и пепловые потоки от небольших до очень значительных по объему, но могут и отсутствовать.	Очень вязкая магма, дисперсионный режим течения.

представления о физических процессах, доминирующих при подъеме магмы к поверхности. При этом для движения магмы к поверхности по магматическому каналу весьма продуктивным оказалось рассмотрение этого движения, как течения двухфазной смеси (жидкость – газ). В зависимости от содержания газа для такого потока возможны несколько типов течений, в первом приближении отождествляемых с тем или иным типом извержения (Дрознин, 1969):

1. При движении двухфазной смеси в вертикальном канале с относительно небольшим расходом, газ (летучие) движется в виде отдельных пузырьков со скоростью, несколько превышающей скорость жидкой фазы (силикатный расплав-магма) – пузырьковый режим. При увеличении расхода газовой фазы пузырьки растут, и их диаметр приближается к диаметру канала, происходит их слияние и образование газовых пробок с длиной несколько диаметров – снарядный режим. Структура потока становится четочной, по каналу движутся чередующиеся между собой газовые пробки и жидкость. На качественном уровне к этому режиму близок *стромболианский тип* извержений.

2. При больших расходах газа часть жидкости из центра канала отбрасывается потоком газа к стенке, затормаживается и потом вновь включается в общий поток. Четочная структура разрушается, газ принимает переменную пробкодиспергированную структуру – диспергиро-

ванный режим.

3. Следующий режим двухфазного потока имеет эмульсионный вид и характеризуется пространственной сотовой структурой, элементы которой непрерывно разрушаются и создаются вновь.

4. При еще больших расходах газа наблюдается режим кольцевого течения: двухфазная смесь представляет эмульсию газа с диспергированной жидкостью, движущейся в центральной части, а по стенке течет пленка жидкости, становящаяся все тоньше и тоньше по мере увеличения расхода.

На рис. 1, взятом из работы (Дрознин, 1969), показаны соответствия режимов течения двухфазной смеси и типов извержений. *Барботирующий* режим характерен для основных маловязких магм, в то время как *дисперсионный* режим типичен для кислых высоковязких магм. С определенной долей условности барботирующий режим можно отождествлять со *стромболианским*, а дисперсионный с *вулканским* и *плинианским* типами активности.

В более поздней работе (Слезин, 1979), посвященной математическому моделированию процесса выделения летучих из расплава в вертикальном магматическом канале, по характеру взаимоотношения расплав – летучие, в магматическом канале выделено четыре характерные зоны:

1. Наиболее глубинная зона, в которой по

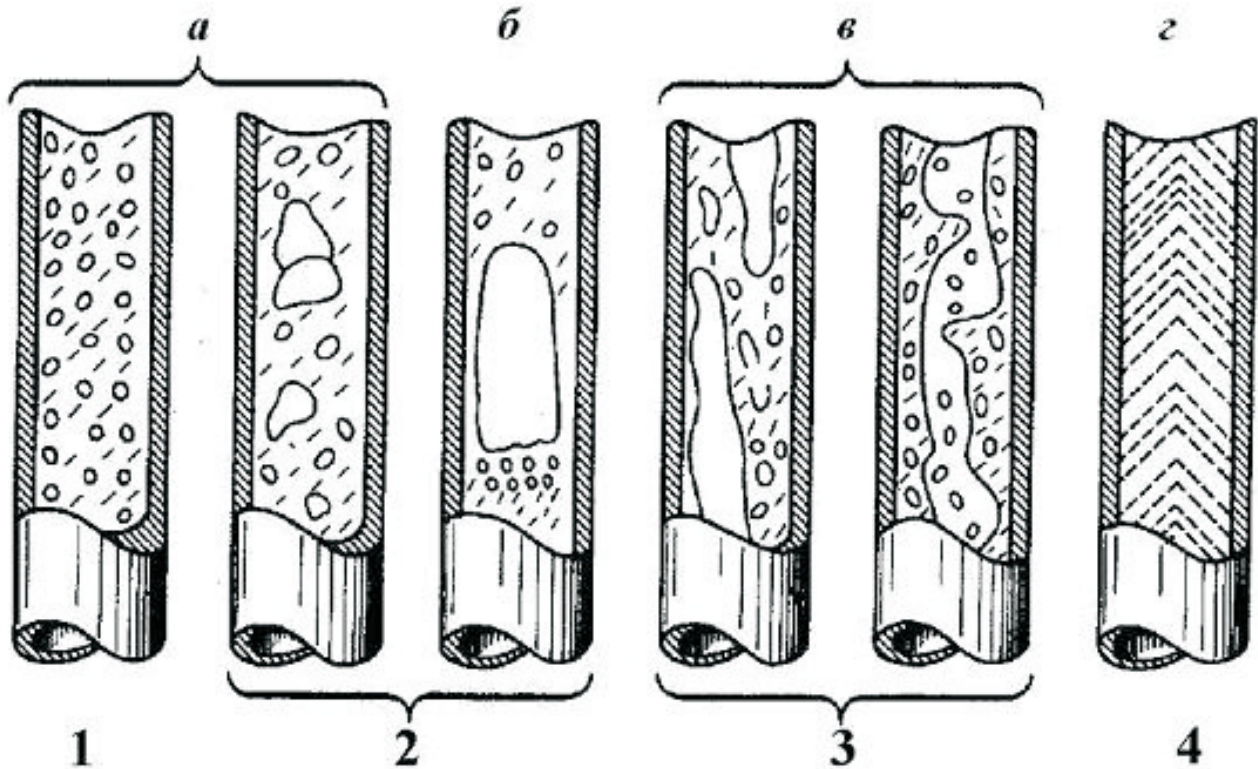


Рис. 1. Режимы течения двухфазной смеси как аналоги типов извержений (Дрознин, 1969). Режимы течений; *а* – пузырьковый, *б* – снарядный, *в* – диспергированный, *г* – дисперсный. Типы извержений; 1 – гавайский, 2 – стромболианский, 3 – этно-везувийанский, 4 – вулканский.

каналу течет жидкость.

2. Выше – пузырьковая зона с газожидкостным дисперсионным потоком, в котором сплошная фаза – жидкость.

3. Зона «разрушающейся пены».

4. Зона дисперсного потока, где непрерывной фазой является газ (*дисперсионный режим*).

Исходя из такой зональности, согласно работе (Слезин, 1998), возможны три основных режима извержений:

1. На дневную поверхность поступает расплав с распределенным в нём газом в виде дискретных объемов (пузырей). Такой режим возможен только при условии эффективного удаления газа всплывающими пузырями (*барботирующий режим*).

2. На поверхность поступает непрерывный поток газовой взвеси (*дисперсионный режим*).

3. На дневную поверхность поступает двухфазная среда, обе фазы которой непрерывны, но движутся с разными скоростями. Среда представляет собой высоковязкую магматическую массу, пронизанную системой связанных пор и каналов, по которым с опережающей скоростью движется газ (*режим разрушающейся пены*).

Представление о движении магмы по выводящему каналу, как о транспортировке двухфазной смеси по вертикальной трубе, нашло отражение в ряде работ. Механизм формирова-

ния газовых пузырей в зависимости от вязкости магмы детально рассмотрен в работе (Sparks, 1978). Рассмотрению базальтового извержения, как течения двухфазного потока, посвящена работа (Vergnolle, Jaupart, 1986), в которой извержения вулканов с базальтовым составом магмы характеризуются отдельными потоками фаз. Для стромболианского типа активности характерны режимы от пузырькового до пробкового, а для гавайского типа активности – от пузырькового до кольцевого. Для характеристики режимов введен параметр – поверхностная скорость расплава (поток объема на единицу площади), который принимает значения от 10^{-3} до 10^{-2} м/с для пузырьковых и пробковых режимов и порядка 1 м/с – для кольцевого режима.

В работе (Сторчеус, 1983) рассмотрены условия перехода перенасыщенной летучими вязкой магмы из неустойчивого метастабильного состояния к устойчивому сосуществованию пузырьков газа и жидкого расплава. Оценено максимально возможное количество пузырьков в магме ($3 \times 10^{24} / \text{м}^3$), которое определяет «взрывоспособность» вязких магм. При массовом объединении пузырьков происходит вулканический «взрыв», обусловленный высвобождением избыточного давления в пузырьках, которое контролируется силой поверхностного натяжения.

Вулканический пепел, возникающий во время фрагментации магмы, в определенной мере является индикатором процессов дегазации перед разрушением пенной структуры магмы. В одной из последних работ (Proussevitch et al., 2008), с помощью электронного микроскопа большой разрешающей способности, оценена плотность пузырьков в пеплах извержений двух вулканов на Аляске (Катмай в 1912 г., Сент-Огастин в 2006 г.). Плотность пузырьков достигала $10^{15} / \text{м}^3$, при размере пузырьков от 5 до 12 мкм и объемом от 100 до 1000 мкм³.

В работах (Алидибилов, 1998; Alidibirov, Dingwell, 1996) предложена модель механизма извержений вулканов с сильновязкой магмой при допущении, что в верхней части вулканического канала магма представляется закристаллизовавшейся пенной структурой с относительно большим (значительно больше атмосферного) давлением в «замороженных» пузырьках. Сброс давления в магме, насыщенной пузырьками, сдерживается давлением вышележащего слоя («пробкой») пород. После разрушения «пробки», в результате декомпрессии происходит фрагментация слоя закристаллизованной магмы волной дробления с вертикальным выбросом потока пирокластического материала. Эта модель может быть применена к извержениям вулканов с андезитовым составом магм, для которых характерен *вулканский или плиннианский тип* извержений.

Более сложная модель эксплозивной деятельности предложена в работе В.К. Кедринского с соавторами (2005). В ней на основании экспериментальных исследований структуры жидких образцов с вязкостью 0.001-2.6 Па·с показано, что при их декомпрессии развитие процесса разрушения идет по комбинационному механизму: развитие пузырьковой кавитации, формирование системы крупных пузырьковых кластеров и газовых снарядов в них в результате коалесценции пузырьков. Причем поток магмы в верхней части магматического канала рассматривается как трехфазная среда «магма — пузырьковые зоны — кристаллические и стекловидные кластеры (с внутренними кавитационными зонами)». На качественном уровне эта модель нашла подтверждение при физическом моделировании.

Из приведенного обзора ясно, что *отделение летучих в процессе извержений, приводящее к фрагментации поступающей магмы на поверхность, является основной причиной, порождающей в атмосфере ударно-волновые и акустические эффекты в атмосфере. В зависимости от вязкости магмы, количества растворенной воды и состава летучих, процесс дегазации происходит различным образом, что и определяет тип активности вулкана.*

ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В АТМОСФЕРЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

В начале XX века воздушные волны, возникающие во время катастрофических извержений, были единственным источником, который использовался для зондирования атмосферы с целью изучения ее строения. Первое решение задачи о распространении акустического возмущения в атмосфере для расчета температурного профиля было выполнено Ф. Пекерисом (Pekeris, 1939) при изучении распространения воздушной волны, сопровождавшей извержение вулкана Кракатау, Индонезия в 1883 г. Во время этого извержения воздушная волна оказалась столь мощной, что была зарегистрирована на многих метеостанциях мира даже барографами с низкой чувствительностью. В более поздних работах тротиловый эквивалент взрыва, генерирующего подобную волну при взрыве в воздухе, был оценен в 100÷150 Мт (Press, Harkrider, 1966). В работе (Yokoyma, 1981) детально рассмотрена последовательность этого грандиозного извержения на основе изучения воздушных волн, записанных водным барографом в Джакарте, и волн цунами, возникших в результате обрушения постройки вулкана с выбросом в акваторию океана больших масс вулканических продуктов.

По характеру, длительности и интенсивности извержения вулканов отличаются большим разнообразием, что находит отражение в спектральных характеристиках атмосферных волновых возмущений — периоды которых могут изменяться от несколько десятков минут (длинноволновые возмущения) до значений, соответствующих частотам звукового диапазона.

В начале 1960-х годов, когда технические возможности регистрации акустических сигналов *звукового диапазона* уже были хорошо развиты, на многих вулканах мира исследовался шум *звукового диапазона*, сопровождавший извержения с истечением фумарольных струй (Richards, 1963), и были приведены первые описания ожидаемых ударно-волновых и акустических эффектов в атмосфере в зависимости от типов вулканических извержений. К сожалению, на период публикации работы экспериментального материала по регистрации инфразвукового диапазона было недостаточно, и поэтому автор ее не мог в деталях рассмотреть ударно-волновые и акустические эффекты вулканических извержений. В целом же возможные типы волновых возмущений в зависимости от характера вулканической активности были спрогнозированы верно (табл. 2).

Таблица 2. Характеристика ударно-волновых и акустических эффектов в атмосфере в зависимости от типа вулканической активности (Richards, 1963).

Тип активности	Характер извержения	Характер звука
Гавайский	Спокойное истечение лавы.	Относительно тихий устойчивый белый шум.
Стромболианский	Умеренное, в основном, ритмичное извержение с выбросом газа и пирокластики в виде лавовых фонтанов.	Широкополосный шум с хорошо выраженной основной частотой и ее гармониками.
Вулканский	Сильное эксплозивное извержение с образованием пепловых туч и выбросом раскаленных бомб.	Нет инструментальных данных. Четко выделяются основная частота, вероятно, связанная с размерами кратера, и резонансные колебания.
Пелейский	Очень сильное эксплозивное извержение с образованием раскаленных лавин.	Нет инструментальных данных. Ударные волны, генерируемые сверхзвуковым потоком, шум реактивного двигателя.
Плинианский	Извержение взрывного типа в некоторых случаях с образованием кальдеры.	Сильные ударные волны, низкочастотный рев.

Изучению аэродинамического шума фумарол, гейзеров, парогидротермальных скважин посвящено достаточно много работ (Руленко, Ким, 1987; Фирстов 2005; Woulff, McGetchin, 1976). Теоретические основы генерации акустических сигналов при вулканических извержениях рассмотрены в работе (Woulff, McGetchin, 1976), развивающей идеи М. Лайтхилла (Lighthill, 1952, 1954) об источниках звука. С использованием уравнения Стокса при различных граничных условиях получены решения для нескольких типов (моно, дипольный и квадрупольный) источников излучения акустических волн. Было показано, что вулканические взрывы со сверхзвуковым истечением газа, создают моноисточник, а при непрерывном истечении пеплогазовой струи из кратера вулкана реализуется квадрупольный источник (аэродинамический шум). Теоретические оценки были подтверждены наблюдениями вулканических взрывов на вулкане Стромболи (Италия) в 1971 г. и регистрацией аэродинамического шума фумарол на вулкане Акотенанго (Гватемала) в 1973 г.

Весьма сильным катализатором развития направления «акустика вулканических извержений» послужило извержение вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. (Камчатка), когда длинноволновое акустическое возмущение (ДАВ), длительностью ~30 минут, было зарегистрировано метеорологическими барографами в ближней зоне 46 км (рис. 2а) и акустическими станциями в дальней зоне (рис. 2б); СССР (Пасечник, 1958), Япония (Murayama, 1969).

О масштабности извержения типа «направленный взрыв» (по классификации Г.С. Горшкова (1962)) вулкана Безымянный говорят следующие цифры: объем обвала материала постройки составил 0.6-0.8 км³; объем вулканического пепла выброшенного в атмосферу 0.4-0.5 км³. При изучении последствий этого

извержения было обращено внимание на ДАВ, и высказано предположение об информативности воздушных волн для мониторинга эксплозивных извержений, что дало толчок к развитию АВИ (Горшков, Богоявленская, 1966; Gorshkov, 1960).

Планомерное изучение слабых воздушных волн диапазона 1-10 Гц в ближней зоне вулканических извержений стало возможным после появления микробарографов, созданных для использования в системах контроля воздушных ядерных взрывов. Наибольшую активность в исследовании воздушных волн, как параметров, характеризующих динамику вулканических извержений, проявили японские исследователи. К сожалению, из-за малой разрешающей способности аппаратуры в этот период ими не рассматривалась форма воздушной волны. В работах (Minakami et al., 1970; Tanaka et al., 1974) были сделаны первые оценки глубины источников вулканических эксплозий, на основе использования соотношений кинематических параметров акустических и сейсмических сигналов при эксплозивных землетрясениях. Так для вулканов Асама (Minakami et al., 1970) и Акита-Комага-Таке (Tanaka et al., 1974) эти глубины оценены в 100 м и 50 м от дна кратеров.

В России на полуострове Камчатка в районе Ключевской группы вулканов первые микробарографы были установлены в 1962 г. П.И. Токаревым (1964). Большой удачей была регистрация волновых возмущений, сопровождавших извержение типа «направленный взрыв» вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. На основании записей акустического и сейсмического сигналов был дан вариант реконструкции динамики этого извержения (Токарев, 1967).

После пароксизмального извержения вулкана Карымского (май 1970 г.) в созданной вблизи вулкана обсерватории был установлен микробарограф, регистрировавший воздушные

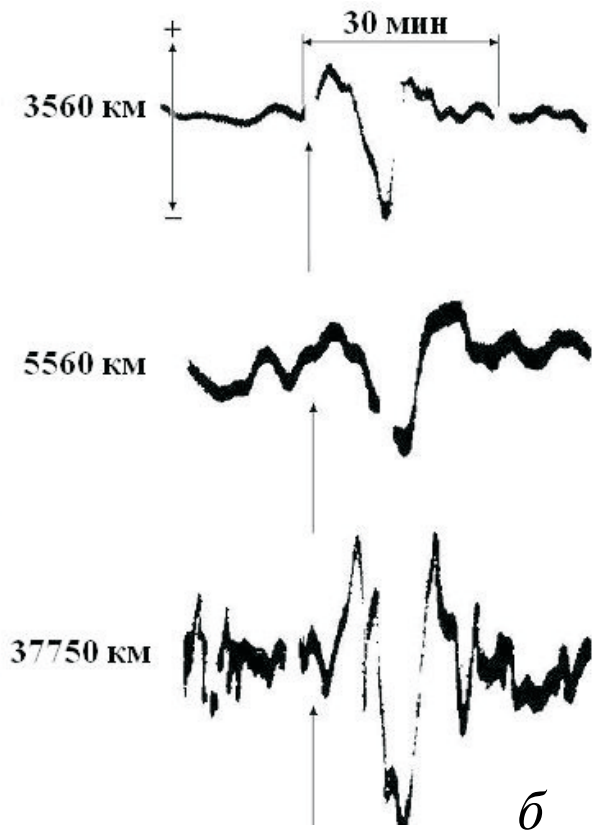
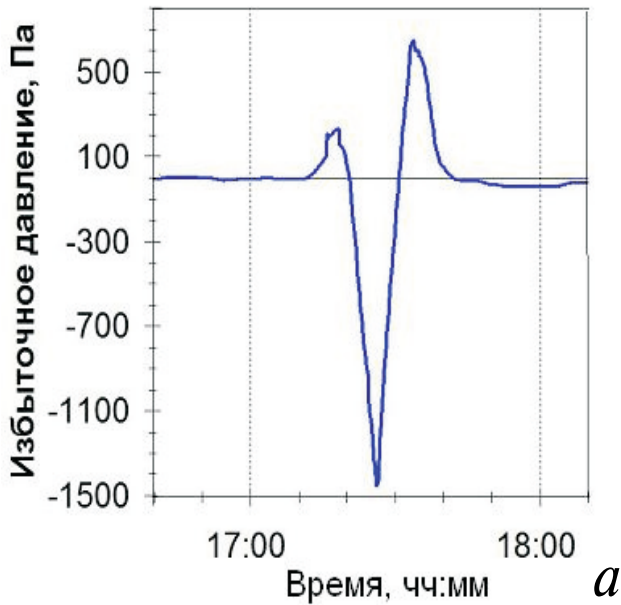


Рис. 2. Длинноволновое возмущение, сопровождавшее катастрофическое извержение вулкана Безымянный (Россия, Камчатка) 30 марта 1956 г.: а – копия записи ДАВ метеорологическим барографом (Gorshkov, 1960); б – копии записи ДАВ микробарографами акустических станций СССР (Пасечник, 1958).

волны отдельных эксплозий вулкана (Дубик и др., 1970; Фирстов и др. 1978), следовавших с периодичностью от нескольких минут до нескольких часов.

Одной из первых работ с описанием эффектов, связанных с генерацией воздушных ударных волн (ВУВ) при извержениях вулканов, является работа (Nain, 1976). На основании оптических наблюдений распространения волны сжатия, вызывающей конденсацию воды в облаке над кратером, во время эксплозий вулкана Нгаурухое (Новая Зеландия) была показана возможность генерации ВУВ во время вулканических эксплозий.

Камчатскими учеными был получен богатый экспериментальный материал при наблюдениях на Северном прорыве Большого трещинного Толбачинского извержения в 1975 г. (СП БТТИ), для которого в период регистрации воздушных волн была характерна мощная *вулкано-стромболианская* деятельность. На основании полученных данных впервые в вулканологической практике было показано, что по форме записанных сигналов и ряду параметров воздушные волны в ближней зоне относятся к классу слабых воздушных ударных волн (Фирстов и др., 1978а; Сторчеус, 1987). По аналогии с ударными волнами, возникающими при взрывах взрывчатых веществ в воздухе (Садовский, 1945), рассматривались следующие параметры зарегистрированных АС:

1. избыточное максимальное давление в фазе сжатия ΔP_+ [Па];
2. время действия фазы сжатия τ_+ [с], под которым подразумевается промежуток времени между моментом регистрации переднего фронта и моментом, когда избыточное давление уменьшится до нуля;
3. величина импульса, вычисляемого по

$$\text{формуле } I_+ = \int_0^{\tau} \Delta P(t) dt \text{ [Па} \cdot \text{с];}$$

4. параметры, характеризующие фазу разряжения $\Delta P_-, \tau_-, I_-$

По формам записи и среднестатистическим параметрам в АС, зарегистрированных при СП БТТИ, выделены пять характерных типов сигналов (рис. 3). Также были рассмотрены возможные физические процессы, в результате которых могли генерироваться те или иные типы АС:

I – классическая форма слабой ВУВ на большом расстоянии от источника (Садовский, 1945), характеризующаяся сбалансированным импульсом ($I_+ = I_-$), резким фронтом положительного импульса и более продолжительным отрицательным импульсом, меньшим по амплитуде ($\Delta P_+ > \Delta P_-$).

II – форма записи с резким передним фронтом положительного и отрицательного импульсов, как $\Delta P_+ \approx \Delta P_-$, а задний фронт отрицательного импульса близок к экспоненте;

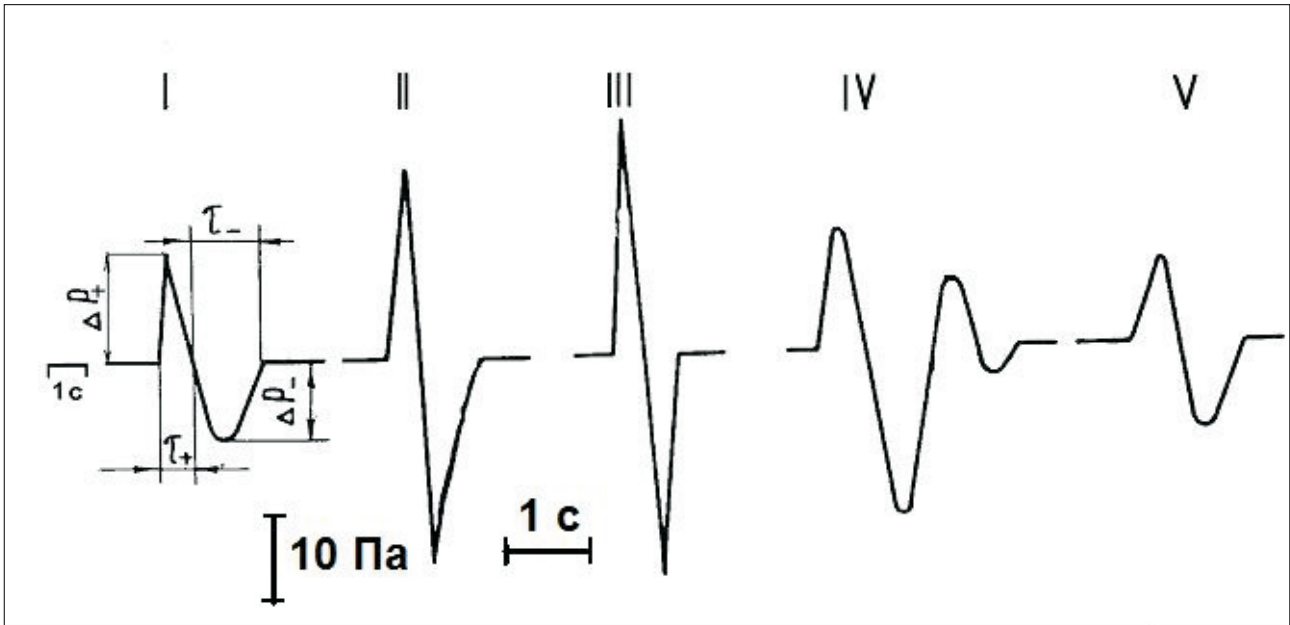


Рис. 3. Формы типов воздушных волн, возникавшие во время взрывной активности СП БТТИ, построенные по среднестатистическим параметрам (Фирстов и др., 1978а).

III – отличается от II резким фронтом отрицательного импульса;

IV – представляет колебания, состоящие из четко выраженных двух положительных и одного отрицательного импульсов;

V – квазисинусоидальная форма с нерезкими фронтами импульсов обеих полярностей.

I тип АС является слабой воздушной ударной волной со следующими характерными особенностями: $\Delta P_+ > \Delta P_-$; $\tau_+ < \tau_-$; $I_+ \approx I_-$. Не исключено, что возникновение этого типа воздушных волн связано с воздушными взрывами, в результате детонации взрывоспособных вулканических газов при окислении их кислородом воздуха.

Особенностью АС *II типа* является отличие от нуля величины суммарного импульса фаз сжатия и разрежения ($\Delta P_+ < \Delta P_-$ и $I_+ < I_-$). При этом спад давлений на заднем фронте отрицательного импульса близок к экспоненциальному. Воздушные волны этого типа связаны с нестационарными процессами при истечении пепло-газовой струи из кратера вулкана (сверхзвуковой скачок). Экспоненциальная форма заднего фронта отрицательного импульса объясняется быстрой конденсацией водяного пара, содержание которого в вулканических газах превышает 90 %.

III тип АС близок к АС II типа по динамическим характеристикам: $\Delta P_+ > \Delta P_-$; $\tau_+ < \tau_-$. АС II и III типов имеют наименьшее значение τ_+ (по сравнению с другими типами АС), что указывает на меньший размер их источников. По-видимому, АС II и III типов возникают в результате быстрого движения струи пепло-

газовой смеси из жерла вулкана. В первом приближении такое движение можно рассматривать, как истечение газа из сопла с возникновением скачка уплотнения на границах струи (Livshits, Bolkhovitinov, 1977).

АС *IV типа* представляет импульс, состоящий из двух фаз сжатия и фазы разрежения, причем амплитуда фазы разрежения сравнима с амплитудой начальной фазы сжатия, а иногда и превосходит её. По форме записи IV тип АС напоминает воздушную волну, регистрируемую при взрывах на выброс. Первый импульс при подземных взрывах связан с развитием каверны и образованием купола за счет вытеснения грунта в сторону свободной поверхности, а второй – с прорывом газов в атмосферу. Применительно к взрывному процессу, первый импульс связан с развитием купола от пузыря при его всплытии на поверхность, а второй – с его разрушением. При этом скорость разлета грунта в эпицентральной области была близка к скорости движения свободной поверхности при взрыве на выброс (Докучаев и др., 1963).

В этом случае давление на границе купола зависит от скорости (v) подъема свободной поверхности: $\Delta P_0 = v\rho_0 c$; где $\rho_0 = 1.29 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха, c – скорость звука. Наибольший характерный размер источника соизмерим с размером кратера вулкана и составляет около 100 м. Тогда для АС IV типа с $\Delta \bar{P} = (3 \div 9) \cdot 10^4 \text{ Па}$ имеют $v = 60 \div 240 \text{ м/с}$. Это хорошо согласуется с определенной по киносъемке скорости разлета бомб для Северного прорыва БТТИ.

Пятый тип воздушных волн имеет много

общего с IV и рассматривается, как предельный случай, когда происходит только прорыв газов с дозвуковой скоростью. Следует отметить, что изменение глубины заложения выбросов объясняет разнообразие форм воздушных волн переходного типа от IV к V.

На рис. 4 в падающем пепле видны тонкие оптически более плотные слои, распространяющиеся со скоростью более 1000 м/с вдоль эруптивной колонны. В работе (Livshits, Bolkhovitinov, 1977) при объяснении этого явления, движение пепло-газовой смеси из кратера вулкана рассматривается как истечение совершенного газа из сопла с возникновением скачков уплотнения, порождающих слабые ВУВ. Задаваясь некоторыми граничными условиями и считая процесс адиабатическим, авторы на основании уравнения Бернулли получили оценки скоростей газа на выходе сопла ($V_G = 1100$ м/с) и распространения ВУВ по мощной раскаленной эруптивной струе ($V_{ВУВ} = 2200$ м/с). В результате в атмосфере

формируется цилиндрическая волна, которая на удалении регистрируется, как ВУВ II типа.

В работах (Ковалев и др., 1980; Сторчеус, Самойленко, 1983) на основании анализа кинограмм, убедительно показано, что во время СП БТТИ возникали воздушные взрывы, связанные с окислением взрывоспособных вулканических газов с кислородом атмосферы, порождавших ВУВ I типа.

Как показали дальнейшие наблюдения извержений на других вулканах Камчатки (терминальное извержение вулкана Ключевского в 1983, 1986-1988 гг.; побочное в 1983 г.), предложенная классификация воздушных волн близка к универсальной, характеризуя нестационарные процессы фрагментации (разрушения) магматического материала при его выносе на дневную поверхность (Фирстов, 2003).

Японским исследователям удалось зарегистрировать ВУВ при комплексных наблюдениях во время извержений *вулканского* типа вулкана



Рис. 4. Извержение второго конуса Северного прорыва БТТИ в сентябре 1975 г. Линиями показаны оптически более плотные слои, трассирующие двигающиеся по колонне ВУВ (Фото Н.П. Смелова).

Сакурадзима (Ishihara, 1985; Ishihara et al., 1983). Плотная сейсмическая сеть позволила определять время в очаге эксплозивного землетрясения, а киносъемка – регистрировать возникновение и прохождение ВУВ через облако над кратером, а затем формирование эруптивного шлейфа. Такой комплекс наблюдений дал возможность детально проанализировать соотношение времен возникновения ВУВ и развития эруптивного облака при эксплозиях вулканского типа (рис. 5). При этом на расстоянии 2.8 км регистрировались ВУВ с амплитудой $\Delta P_+ > 100$ Па. Процесс начинался с землетрясения под кратером на глубине $0.8 \div 1.1$ км. При принятой скорости продольных сейсмических волн в 2.5 км/с ВУВ начинала формироваться на дне кратера через $1.1 \div 1.3$ с после возникновения землетрясения. Если предположить существование единого источника для землетрясения и ВУВ, то скорость распространения ударной волны по магматическому каналу составит $1.3 \div 1.6$ км/с.

В 1997-1999 гг. в рамках российско-амери-

канской экспедиции велась регистрация сейсмических и акустических сигналов, сопровождающих отдельные эксплозии *вулканского типа* вулкана Карымский (Johnson, 2007; Johnson, Lees, 2000). Необходимо отметить, что в этой работе активность вулкана была отнесена к стромболианскому типу, хотя во всех работах российских вулканологов она рассматривается как вулканская или вулcano-стромболианская (Дубик и др., 1972; Иванов, 1970; Хренов и др., 1982). На основании проведенных совместных работ был предложен ряд моделей периодического взрывного процесса, генерирующего воздушные волны и вулканическое дрожание. В качестве источника рассматривалось истечение из кратера в атмосферу выделявшихся из магмы вулканических газов, (Johnson et al., 1998). В дальнейшем был рассмотрен и механизм истечения газов через «пробку» в кратере вулкана, играющую роль клапана (Johnson, Lees, 2000).

Физическая модель пульсирующего истечения газо-пепловой смеси из жерла вулкана Ка-

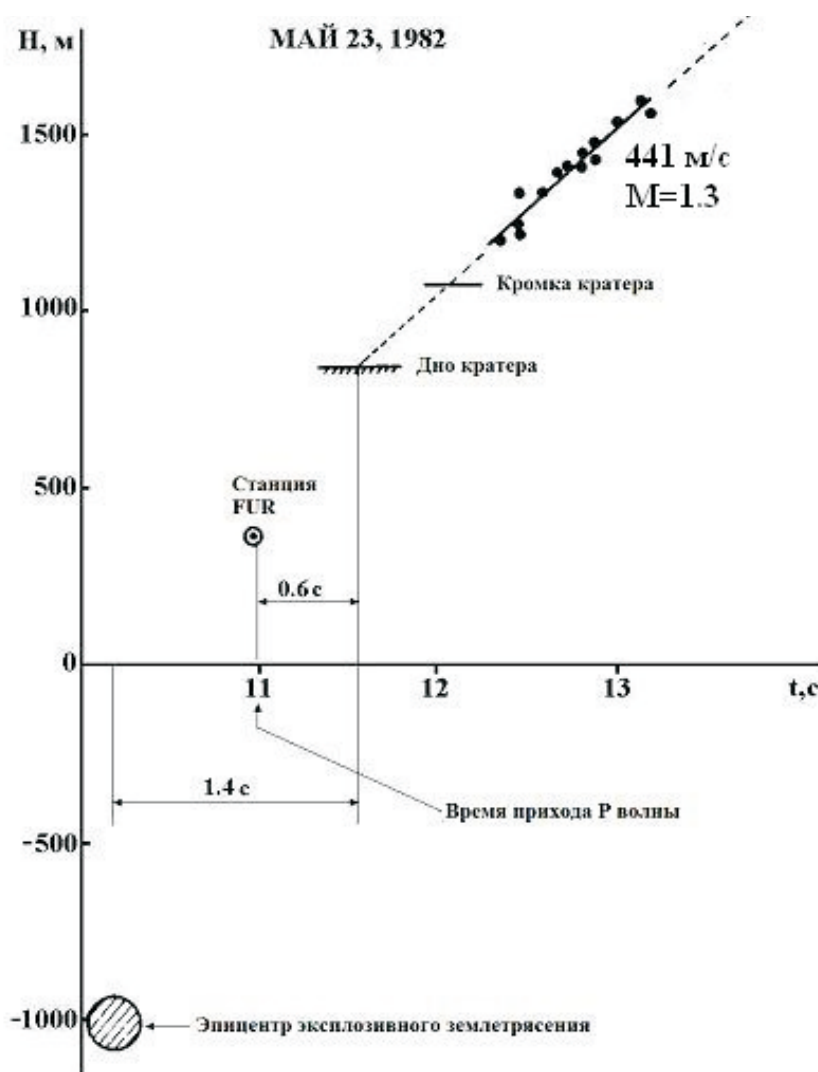


Рис. 5. Схема развития эксплозии и временные соотношения между возникновением акустического и сейсмического сигналов на вулкане Сакурадзима (Ishihara, 1985).

рымский, на основании акустических и сейсмических сигналов, рассмотрена в работе (Сторчеус и др., 2006). Анализ записей сигналов показал, что в их формировании основную роль играют автоколебательные свойства системы, в которой генерируются эти сигналы. В качестве генератора акустических колебаний предложен резонатор Гельмгольца – газовая полость, формирующаяся в верхней части магматического канала при определенных свойствах и скорости поступления магмы. Возможность существования такой полости подтверждается соотношением разного типа взрывов (взрыв – продувка). Источником энергии автоколебательной системы, включающей в себя акустический и сейсмический генераторы, является заключенный в пузырьках газ, находящийся под избыточным давлением. На возбуждение акустического генератора расходуется значительно большая часть энергии газа, чем на генерацию сейсмических волн. В работе дан краткий анализ условий возбуждения и стабилизации автоколебаний в системе и сделана оценка размеров акустического резонатора. Максимум сейсмической энергии приходится на 2-ую или 3-ю гармоники вынуждающей силы, возникающей в результате периодической фрагментации верхнего слоя магматической колонны.

В серии работ итальянских ученых рассмотрены математические модели генерации воздушных волн при стромболианском типе активности, проверявшиеся по экспериментальным данным регистрации АС при извержении вулкана Стромболи (Италия) в 1992 г. (Vergniolle, Brandeis, 1996; Vergniolle et al., 1996). В этих работах подтверждено, что воздушные волны возникают в результате разрушения газовых пузырей на поверхности лавы. На основании их динамических и кинематических параметров рассчитаны основные характеристики пузыря: начальный радиус (около одного метра), длина (до нескольких десятков метров), максимальная радиальная скорость роста (~ 30 м/с). По форме записи эти АС напоминают IV тип по классификации, данной в работе (Фирстов и др., 1978а).

Для неоднородной движущей среды, какой является атмосфера, типично непостоянство на больших временах ($T > 20$ час.) стратификации метеорологических величин (температура воздуха, скорость и направление ветра), что естественно влияет на распространения АС даже в ближней зоне. В работе (Чунчuzов, Фирстов, 1992) приводятся экспериментальные данные АС, зарегистрированных от взрывов вершинного кратера вулкана Ключевского (4750 м) на расстоянии 15 км. Оказалось, что форма АС определяется особенностями взаимного расположения «источник – пункт регистрации» и

стратификацией скорости звука. При наличии инверсионного слоя на высоте ~ 2000 м в пункте приема наблюдается сложная форма записи АС, отображающая наложение прямой и отраженной (с фазовым сдвигом 180°) волн.

На значительных расстояниях ВУВ эволюционируют и превращаются в воздушные волны (Коротков, 1958), которые при благоприятной стратификации атмосферы могут распространяться на значительные расстояния (Куличков, 1992). Так, в работах (Tahira, 1982; Tahira et al., 1988) рассматривается возможность мониторинга эксплозивной активности вулкана Сакурадзима с помощью трехточечной акустической станции, расположенной на расстоянии 710 км от вулкана. При сравнении микробарограмм ближней и дальней зон выяснилось, что запись АС в дальней зоне неустойчива, что связано с непостоянством стратификации скорости звука в направлении источник – пункт приема. В зимний период в дальней зоне регистрировалось до 80 % от числа сигналов ближней зоны, а в летний период сигналы от взрывов вулкана в дальней зоне не регистрировались. Это объясняется сильными зимними струйными течениями, образующимися в тропосфере и стратосфере волноводы, способствующие дальнейшему распространению звука в атмосфере.

В связи с созданием в развитых странах служб контроля ядерных испытаний, оснащенных акустическими антеннами, начали регистрировать на больших расстояниях и волновые возмущения в атмосфере от вулканических извержений. Одной из первых таких работ была регистрация волновых возмущений при извержении вулкана на острове Бали в Индонезии (Goerke et al., 1965). Начало новых эруптивных циклов извержений вулкана Карымского на Камчатке в мае 1970 г. и январе 1996 г. сопровождалось столь мощной эксплозивной активностью, что волновые возмущения при этом регистрировались в дальней зоне на расстоянии 120 км от вулкана (Токарев, Фирстов, 1977; Фирстов, Филиппов, 1997).

В работах (Алидибиров и др. 1988; Фирстов, 1988) проанализированы записи акустического излучения в виде инфразвуковых колебаний, сопутствовавших формированию и сходу пирокластических потоков при извержениях вулкана Безымянного в 1983-1985 гг. В этих случаях волновые возмущения представляли продолжавшиеся более минуты инфразвуковые колебания с частотами ~ 0.2-1.0 Гц. Впервые было показано, что формирование над отложениями пирокластических потоков восходящей конвективной колонны горячих мелкодисперсных продуктов и вулканических газов генерируют инфразвуковой сигнал за счет турбулентных пульсаций.

Причем его мощность зависит от интенсивности теплоотдачи с поверхности и определяется температурой, площадью, газонасыщенностью и характером материала отложений пирокластических потоков. Соотношения энергий и интенсивности акустических и сейсмических сигналов позволили разделить пирокластические потоки по их генезису и дать детальную реконструкцию динамики извержения вулкана 29 июня-2 июля 1985 г. (Фирстов, 1988)

С целью изучения процессов, связанных с акустическими сигналами инфразвукового диапазона, генерируемыми гравитационными потоками, в 1988 г. проводилась регистрация АС при искусственном спуске снежных лавин с северного склона г. Чегет (Россия, Кавказ). Впервые в мировой практике были зарегистрированы, сопутствующие движущимся массам лавины, АС с частотой ~ 0.5 Гц, генерируемые

турбулентным снеговоздушным облаком над телом лавины (Фирстов и др. 1990).

В работах (Yamasato, 1993, 1995, 1997, 1998) приведены результаты исследования инфразвуковых сигналов, генерированных при сходе и формировании пирокластических потоков на вулкане Унзен (Япония) в 1992-1993 гг. С применением хорошо развитой сети сейсмических и микробарографических станций при обвале купола и формировании пирокластических потоков были идентифицированы очаги отдельных источников. Источники максимальных амплитуд сейсмического и акустического сигнала привязаны к концу зоны транзита (рис. 6). Когда пирокластический поток достигает зоны торможения, происходит резкое падение скорости его движения и активно развивается эруптивное облако, отдельные конвективные ячейки которого становятся источниками инфразвука.

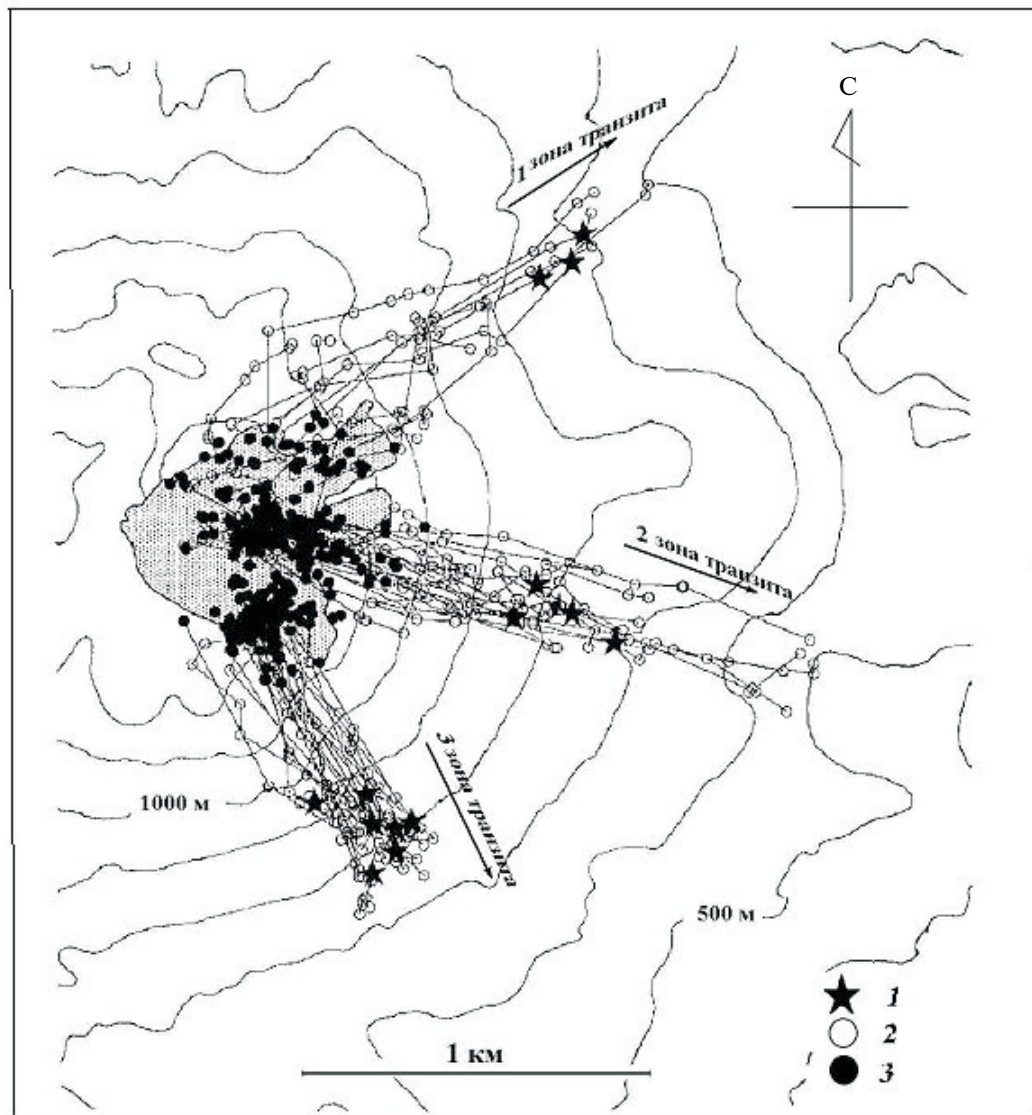


Рис. 6. Схема распределения источников инфразвуковых сигналов (Yamasato, 1993) на вулкане Унзен (Япония): 1 – при обрушении экструзивного купола; 2 – при движении пирокластических потоков в зоне транзита; 3 – с максимальными амплитудами сейсмического и акустического сигналов.

Интерес к «акустике вулканических извержений» значительно возрос после извержения «типа направленный взрыв» вулкана Сент Хеленса (США) 18 мая 1980 г., сопровождавшегося мощной воздушной волной в атмосфере. В большой серии работ рассматривались механизмы возникновения и распространения в атмосфере волновых возмущений этого извержения (Banister, 1984; Delclos, et al., 1990; Donn, Balachandran, 1981; Mikoto, Bolt, 1985; Reed, 1980, 1987), порожденных обвалом 2.5 км³ горных пород и выбросом ~1.2 км³ ювенильного материала в виде пирокластических потоков и пепла (Богоявленская и др., 1985). Кульминационная стадия извержения вулкана Сент-Хеленс, в отличие от извержений «типа направленный взрыв» вулканов Безымянного в 1956 г. и Шивелуч в 1964 г., была детально задокументирована с помощью наземной фотосъемки и наблюдений со спутника, что позволило американским вулканологам скрупулезно изучить динамику и геологический эффект этого извержения (The 1980 eruption..., 1981).

Особенности длинноволновых акустических возмущений (ДАВ), сопровождавших извержения «типа направленный взрыв», рассматривались в работах (Адушкин и др., 1984). Для всех ДАВ этих извержений характерна глубокая фаза разряжения длительностью от 9 до 20 минут. Она формируется за счет мощного подсоса воздуха, который связан с суммарной мощностью тепловыделения, — как с площади распространения «взрывных отложений», так и от выносимого в атмосферу горячего пепла во время плинианской деятельности. Кроме того, конденсация большого количества перегретого ювенильного пара также способствует формированию глубокой фазы разрежения. Не исключена возможность подпитки струи теплом в результате окислительных реакций вулканических газов с кислородом воздуха по периферии колонки (Фирстов, 2007).

Для извержения вулкана Шивелуч 11 ноября 1964 г. в работе (Фирстов, 1996) на основании микробарографических данных убедительно показана возможность генерации волновых возмущений в атмосфере за счет турбулентных эффектов в атмосфере в эруптивном облаке и дана реконструкция динамики извержения.

В настоящее время значительный интерес к «акустике вулканических извержений» проявляют исследователи США и Японии. В этих странах вблизи активных вулканов, как правило, установлены микробарографы для регистрации волновых эффектов в атмосфере. Кроме того, в США в рамках международной системы контроля (IMS) несанкционированных ядерных взрывов работают 5 акустических станций. Станции оснащены акустическими фильтрами,

позволяющими регистрировать волновые возмущения в дальней зоне при извержениях вулканов Каскадных гор, Алеутских и Гавайских островов. Кроме микробарографических станций метеорологического агентства (JMA) (о. Хоккайдо — 3, о. Хонсю — 2, о. Кюсю — 4), в Японии работает еще ряд станций, принадлежащих Университетам. Разветвленная сеть акустических станций позволяет регистрировать волновые возмущения, сопровождающие все извержения вулканов Японии и США.

С 2003 г. издается международный электронный журнал «InfraMatic. The newsletter of subaudible sound», посвященный атмосферной акустике и публикующий оперативную информацию о волновых возмущениях, зарегистрированных на действующих вулканах мира (<http://www.inframatics.org/>). К сожалению, так как в России на вулканах нет акустических станций, российским вулканологам в настоящее время печатать нечего.

Большой цикл работ, посвященных теоретическим разработкам механизма генерации волновых возмущений от вулканических извержений, был выполнен М. Гарсисом с соавторами (Garces et al., 1997, 1998, 1999).

В последнее десятилетие серия интересных работ по изучению ударно-волновых эффектов, сопровождавших извержения вулканов Маунт-Эребус (Антарктика), Карымский (Камчатка), Ревентадор и Тангурауа (Эквадор), Сантьягито (Гватемала), выполнена Дж. Джонсоном с соавторами (Johnson, 2007; Johnson, Aster, 2005; Johnson et al. 1998, 2004; Johnson, Lees, 2000). С более подробной информацией и иллюстративным материалом можно ознакомиться на сайте: http://www.ees.nmt.edu/johnson_j/INFRAVOLC/infravolc.htm.

С использованием записей воздушных волн в работе (Vergiolle, Caplan-Auerbach, 2004) рассмотрен механизм разрушения вязкого пузыря на поверхности лавы при стромболианском типе извержения вулкана Шишалдин в 1999 г. (Аляска, США). Показано, что при всплытии пузыря на поверхность лавы происходит формирование полусферы, размер которой определяется избыточным давлением в пузыре и вязкостью лавы, а перед разрушением этой полусферы происходит её вибрация, регистрируемая на записях воздушных волн. На основании записей воздушных волн в работе сделаны оценки скорости развития полусферы, избыточного давления в пузыре и его длины для двух стадий извержения. На основании энергетических соотношений скорость формирования полусферы оценивается в 30-60 м/с, а длина пузыря и избыточное давление в нем для первой стадии -82 ± 11 м и 0.083 МПа, а для второй -24 ± 12 м и 0.15 МПа. Сделаны также оценки

объема и расхода взрывчатого газа для двух периодов активности: 1 - $3.3 \cdot 10^7 \text{ м}^3$, $2.9 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{с}$; 2 - $1.0 \cdot 10^8 \text{ м}^3$, $2.2 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует массовому расходу в $1.2 \cdot 10^3$ и $8.7 \cdot 10^2 \text{ кг/с}$ для первой и второй стадий извержения.

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ ОТ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

На основании оригинального экспериментального материала и литературных данных выполнена феноменологическая классификация ударно-волновых и акустических эффектов в атмосфере при вулканических извержениях. В качестве основных характеристик выделенных классов приняты характерные диапазоны частот и физические процессы, сопутствующие генерации АС (Фирстов, 2003; Фирстов, Филиппов, 1997; Firstov, 1994, 1996)

Несмотря на многочисленные работы по акустике вулканических извержений, еще не совсем ясен целый ряд вопросов, связанных с механизмом возбуждения ударно-волновых и акустических эффектов в атмосфере при вулканических извержениях различных типов. Поэтому, наряду с основными классами ударно-волновых и акустических эффектов, рассматриваются вопросы, которые, по мнению автора, подлежат первоочередному изучению.

1. Аэродинамический шум ($f = 20 \div 1000 \text{ Гц}$), возникающий в результате аэродинамического воздействия на окружающую среду потока дисперсионного материала. В определенных условиях шум возникает в моменты истечения из кратера струй любого состава при извержениях всех типов.

Основной задачей является разработка теоретических основ возбуждения аэродинамического шума высокотемпературной струей, нагруженной мелкодисперсной фракцией твердых частиц, и проверка основных выводов теории в ходе наблюдений при вулканических извержениях.

2. Импульсные АС, воздушные ударные волны ($f = 1 \div 10 \text{ Гц}$), генерирующиеся при нестационарных процессах в кратерной зоне во время дегазации и фрагментации, поступающей на дневную поверхность, магмы. Акустические сигналы второго класса возникают при разрушении отдельных газовых пузырей в кратере при стромболианском типе извержения или при взрывных процессах, связанных с фрагментацией «пенных пакетов» (при вулканическом типе извержения). В редких случаях возможно их образование за счет воздушных взрывов при окислении воздухом взрывоспособных ювенильных газов

(Ковалев и др., 1979).

Хотя процесс разрушения газовых пузырей при стромболианском типе извержений достаточно изучен, но для вулканического типа извержений процесс генерации ударных воздушных волн окончательно не разработан, несмотря на наличие множества моделей. Что является «вулканической взрывчаткой», при каких условиях происходит «вулканический взрыв» при этом типе извержений – вопросы, требующие дальнейших исследований.

3. Инфразвук ($f = 0.003 \div 1 \text{ Гц}$), возникающий в результате сильных конвективных процессов, происходящих во время возникновения и формирования эруптивных облаков в результате выноса продуктов извержений и их отложений на дневную поверхность, в результате чего происходит формирование, восходящей конвективной колонки, турбулентные пульсации в которой служат источниками инфразвукового сигнала.

Требуется математическое и физическое моделирование с целью адаптации, разработанных Ю.А. Гостинцевым с соавторами (1985, 1989), теоретических основ генерации волновых возмущений, а также обоснование (на основе информации об интенсивности инфразвуковых колебаний) методики оценки количества выбрасываемого в атмосферу мелкодисперсного пепла.

4. Длинноволновые возмущения ($f < 0.003 \text{ Гц}$), обусловленные формированием мощной эруптивной колонки, иногда достигающей тропопазузы, во время пароксизмальных извержений («направленный взрыв») с выносом в атмосферу большого количества мелкодисперсного вулканического материала и вулканических газов.

Основное внимание при разработке механизма генерации длинноволновых возмущений должно быть обращено на вклад ювенильной воды, поступающей в больших объемах на дневную поверхность в виде перегретого пара при катастрофических извержениях андезитовых вулканов типа «направленный взрыв». В этом случае конденсация водяного пара приводит к формированию глубокой фазы разряжения, длительностью до десятков минут (Фирстов, Пономарев, 2006). Но изучение этого процесса требует математического и физического моделирования с целью получения модели, приемлемой для практических целей (оценка количества ювенильной воды на основании интенсивности ДАВ).

На рис. 7 показаны классы волновых возмущений в атмосфере, характерные для разных типов вулканической активности. Первые два класса связаны с процессом отделения летучих от поднимающегося по магматическому каналу силикатного расплава и его фрагментацией (разрушением) с образованием раскаленных обрывков лавы и вулканического пепла.

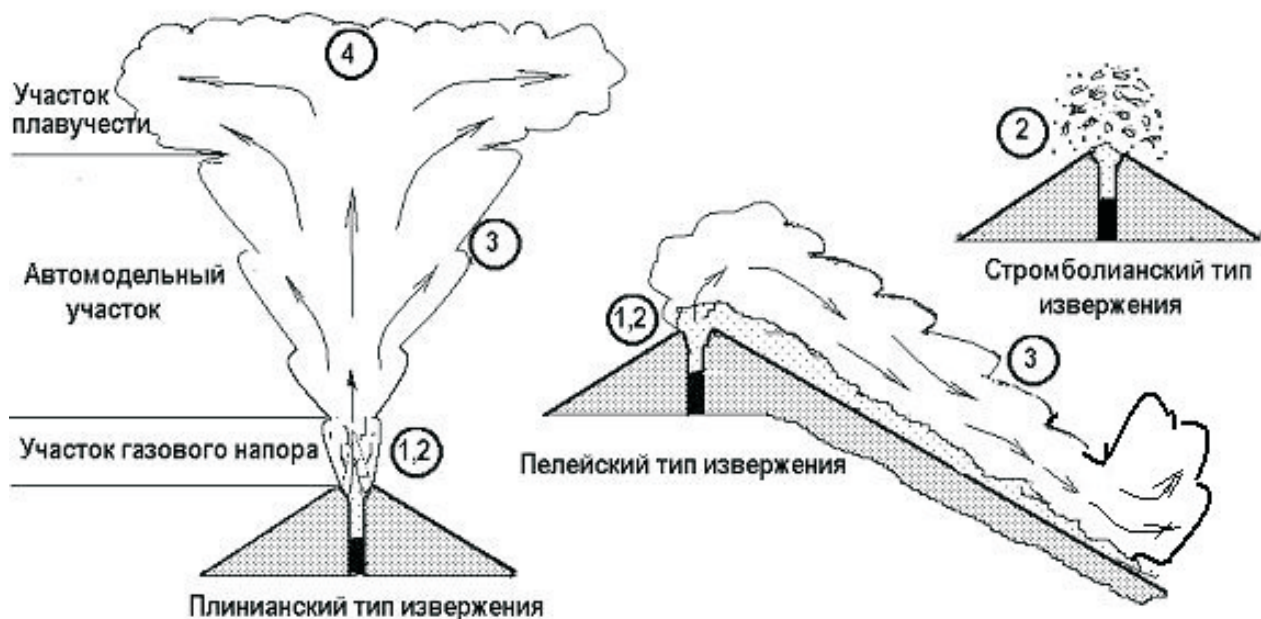


Рис. 7. Основные типы вулканической активности и преобладающие для них классы волновых возмущений в атмосфере.

Два следующих класса связаны с образованием в атмосфере эруптивного облака в виде конвективной колонны с хорошо развитой турбулентностью, являющейся источником инфразвуковых и длинноволновых возмущений в атмосфере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Роль ударно-волновых и акустических эффектов в изучении эксплозивного процесса очевидна. Во второй половине XX века на камчатских вулканах в России интенсивно велись работы по направлению «акустика вулканических извержений» (Самойленко, 1983; Сторчеус, 1987; Сторчеус, Токарев, 1964, 1967; Токарев, Фирстов, 1977; Фирстов, 1988, 1996; Фирстов, Сторчеус, 1987; Фирстов и др., 1978, 1990). К сожалению, регистрация волновых возмущений на стационарных пунктах вблизи активных вулканов Камчатки в 1985 г. была прекращена.

В полевые сезоны 1986-1989 гг. вблизи от вулкана Ключевского (14.6 км) работала акустическая станция, на которой были получены уникальные записи акустических сигналов, позволившие оценить количество эксплозивного газа, выбрасываемого в атмосферу во время извержения вершинного кратера стромболианского типа (Фирстов, Кравченко, 1995).

В настоящее время силами Камчатского филиала ГС РАН и Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН планируется организовать сеть цифровых акустических станций вблизи активных вулканов Камчатки и создать две стационарные акустические станции в поселках

Паратунка и Ключи. Это позволит российским вулканологам продолжить работы по научному направлению «акустика вулканических извержений» и участвовать в международном сотрудничестве.

Список литературы

- Адушкин В.В., Гостинцев Ю.А., Фирстов П.П. О природе воздушных волн при сильных эксплозивных извержениях // Вулканология и сейсмология. 1984. № 5. С. 3-11.
- Алибидиров М.А. Модель высвобождения энергии при вулканических взрывах вулканского типа // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 50-58.
- Алибидиров М.А., Богоявленская Г.Е., Кирсанов И.Т. и др. Извержение вулкана Безымянный в 1985 г. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 3-17.
- Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. и др. Катастрофические извержения типа направленных взрывов на вулканах Сент-Хеленс, Безымянный, Шивелуч // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 3-26.
- Горшков Г.С. Направленные вулканические взрывы // Геология и геофизика. 1962. № 12. С. 41-46.
- Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955-1963 г. М.: Наука, 1965. 170 с.
- Гостинцев Ю.А., Иванов Е.А., Куличков С.Н. и др. О механизме генерации инфразвуковых волн в атмосфере большими пожарами // ДАН.

1985. Т. 283. № 3. С. 573-576.
- Гостинцев Ю.А., Шацких Ю.В.* Генерация длинноволновых акустических возмущений в атмосфере всплывающими продуктами горения и взрыва // Препринт. Черниголова, 1989. 34 с.
- Докучаев М.М., Радионов В.Н., Ромашов А.Н.* Взрывы на выброс. М.: Наука, 1963. 86 с.
- Дроздин В.А.* О природе вулканических извержений // Труды I городской конференции молодых ученых и специалистов. Петропавловск-Камчатский: Дальневосточное книжное из-во, 1969. С. 4-6.
- Дубик Ю.М., Огородов Н.В., Абдурахманов А.А. и др.* Начало нового эруптивного цикла активности вулкана Карымский в мае 1970 года // Бюл. вулканол. ст. 1972. № 48. С. 3-30.
- Иванов Б.В.* Извержение Карымского вулкана в 1962-1965 гг. и вулканы Карымской группы. М.: Наука, 1970. 131 с.
- Ковалев Г.Н., Самойленко Б.И., Слезин Ю.Б.* Воздушные вулканические взрывы // Докл. АН СССР. 1979. Т. 248. № 1. С. 310-314.
- Коротков П.Ф.* Об УВВ на значительных расстояниях от места взрыва // Изв. АН СССР ОТН. 1958. № 3. С. 85-87.
- Кедринский В.К., Макаров А.И., Стебновский С.В., Такаяма К.* Взрывное извержение вулканов: некоторые подходы к моделированию // ФГВ. 2005. Т. 42. № 6. С. 193-201.
- Куличков С.Н.* Дальнее распространение звука в атмосфере (обзор) // ФАО. 1992. Т. 28. № 4. С. 339-360.
- Лучицкий И.В.* Основы палеовулканологии. М.: АН СССР, 1971. Т. 1. 478 с.
- Макдональд Г.* Вулканы. М.: Мир, 1975. 431 с.
- Пасечник И.П.* Сейсмические и воздушные волны, возникшие при извержении вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. // Изв. АН СССР. Сер. геоф. 1958. № 9. С. 1121-1126.
- Ритман А.* Вулканы и их деятельность. М.: Мысль, 1964. 158 с.
- Руленко О.П., Ким К.П.* Измерение акустического шума и высоты выбросов воды при извержении гейзеров Великан, Большой и Малый // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 88-92.
- Садовский М.А.* Опытные исследования механического действия ударной волны взрыва // Труды сейсмол. ин-та. 1945. № 116. 114 с.
- Слезин Ю.Б.* Условия возникновения дисперсионного режима течения при вулканических извержениях // Вулканология и сейсмология. 1979. № 3. С. 69-76.
- Слезин Ю.Б.* Механизм вулканических извержений (стационарная модель). М.: Научный мир, 1998. 127 с.
- Сторчеус А.В.* К вопросу о природе вулканических взрывов // Вулканология и сейсмология. 1983. № 4. С. 72-78.
- Сторчеус А.В.* Исследование параметров воздушных волн Южного прорыва Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 1987. № 1. С. 62-68.
- Сторчеус А.В., Самойленко Б.И.* Исследования вулканических взрывов Толбачинского извержения с помощью киносъемки // Вулканология и сейсмология. 1983. № 5. С. 102-105.
- Сторчеус А.В., Фирстов П.П., Озеров А.Ю.* Возможный механизм генерации акустических и сейсмических волн при пульсирующем истечении газо-пепловой смеси на вулкане Карымском // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 3-16.
- Токарев П.И.* Регистрация взрывов Ключевского вулкана в 1962 г. // Бюл. вулканол. ст. 1964. № 37. С. 52-59.
- Токарев П.И.* Гигантское извержение вулкана Шевелуч 12 ноября 1964 г. и его предвестники // Физика Земли. 1967. № 9. С. 11-22.
- Токарев П.И., Фирстов П.П.* Извержение вулкана Карымского в 1970-1973 гг. Геофизические исследования. Вулканизм островных дуг. М.: Наука, 1977. С. 65-76.
- Фирстов П.П.* Особенности акустических и сейсмических волн, сопровождавших извержение вулкана Безымянный в 1983-1985 гг. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 81-97.
- Фирстов П.П.* Реконструкция динамики катастрофического извержения вулкана Шивелуч 11 ноября 1964 г. на основании данных о волновых возмущениях в атмосфере и вулканическом дрожании // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4-5. С. 33-47.
- Фирстов П.П.* Вулканические акустические сигналы диапазона 1.0/10 Гц и их связь с эксплозивным процессом. Петропавловск-Камчатский: из-во КамГПУ, 2003. 90 с.
- Фирстов П.П.* Особенности спектрального состава аэродинамического шума пароводяных скважин Мутновского геотермального месторождения (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2005. № 4. С. 47-55.
- Фирстов П.П.* Длинноволновые акустические возмущения – источник информации о сильных эксплозивных землетрясениях // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский. 2007. С. 83-94.
- Фирстов П.П., Адушкин В.В., Сторчеус А.В.* Ударные воздушные волны, зарегистрированные во время Большого трещинного извержения в сентябре 1975 г. // ДАН. 1978а. Т. 259. № 5.

- С. 1078-1081.
- Фирстов П.П., Лемзиков В.К., Руленко О.П.* Сейсмический режим вулкана Карымского (1870-1973 гг.). Вулканизм и геодинамика. М.: Наука, 1978. С. 161-179.
- Фирстов П.П., Сторчеус А.В.* Акустические сигналы, сопровождавшие извержение вулкана Ключевского в марте-июне 1983 года // Вулканология и сейсмология. 1987. № 5. С. 66-80.
- Фирстов П.П., Суханов А.А., Пергамент В.Х., Радионовский М.В.* Акустические и сейсмические сигналы от снежных лавин // ДАН. 1990. Т. 312. № 1. С. 67-71.
- Фирстов П.П., Кравченко Н.М.* О возможности использования воздушных волн для оценки количества взрывного газа, высвобождаемого во время вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4-5. С. 160-171.
- Фирстов П.П., Филиппов Ю.А.* Система хранения и обработки волновых возмущений в атмосфере от вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 2. С. 36-46.
- Фирстов П.П., Пономарев Е.А.* Влияние магматической воды на ударно-волновые эффекты взрывных вулканических извержений // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский. 2008. С. 283-290.
- Хренов А.П., Дубик Ю.М., Иванов Б.В. и др.* Эруптивная деятельность вулкана Карымский за 10 лет (1970-1980) // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 29-48.
- Чунгузов И.П., Фирстов П.П.* Особенности распространения акустического импульса от вулканических взрывов, происходящих в вершинном кратере вулкана Ключевского (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1992. № 2. С. 96-106.
- Alidibirov M.A., Dingwell D.B.* The fragmentation mechanisms for highly viscous magma under rapid decompression // J. Volcan. Geotherm. Res. 2000. V. 100. № 1-4. P. 413-421.
- Delclos C. et al.* Processing and interpretation of microbarograph signals generated by the explosion of Mount St. Helens // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. P. 5485-5494.
- Donn W.L., Balachandran N.K.* Mount St. Helens eruption of 18 May 1980: Air waves and explosive yield // Science. 1981. V. 213. P. 539.
- Firstov P.P.* Wave Perturbation in the atmosphere as a method of remote monitoring of volcanic eruptions // Intern. Volcanol. Congress. JAVEI. Ankara. 1994. P. 675.
- Firstov P.P.* Wave disturbances in the atmosphere as a source of information on dynamics of volcanic eruptions // EOS. 1996. V. 318-3 (F813).
- Garces M.A., Hagerty M.T., Schwartz S.Y.* Magma acoustics and time-varying melt properties at Arenal Volcano, Costa Rica // Geophys. Res. Lett. 1998. V.25. № 13. P. 2293-2296.
- Garces M., Iguchi M., Ishihara K., Morrissey M., Tsutsui T.* Infrasonic precursors to a Vulcanian eruption at Sakurajima volcano, Japan // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26. № 16. P. 2537-2540.
- Garces M.A., McNutt S.R.* Theory of the airborne sound field generated in a resonant magma conduit // J. Volcan. Geotherm. Res. 1997. № 78. P. 155-178.
- Goerke V.H., Young J.M., Cooke R.K.* Infrasonic observations of the May 16, 1963 volcanic explosion on the island of Bali // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. № 24. P. 6017-6022.
- Gordon W. and McGetchen Th. R.,* Acoustic noise from volcanoes: theory and experiments // Geophys. Astron. Soc. 1976. V. 45. № 3. P. 601-616.
- Gorshkov G.S.* Determination of the explosion energy in some volcanoes according to barograms // Bull. Volcanol. 1960. V. 23. Ser. 2. P. 141-144.
- Hagerty M.T. et al.* Analysis of seismic and acoustic observations at Arenal Volcano, Costa Rica, 1995-1997 // J. Volcan. Geotherm. Res. 2000. V. 101. № 1-2. P. 27-65.
- Ishihara K.* Dynamic analysis of volcanic explosion // J. Geodynamics. 1985. V. 3. № 3/4. P. 327-349.
- Ishihara K., Igushi M., Kamo K.* Emission of volcanic cloud gases on the process of a volcanic explosion // Annual Disaster Prevention Res. Inst. Kyoto Univ. 1983. V. 26. № B1. P.1-7.
- Johnson J.B.* On the relation between infrasound, seismicity, and small pyroclastic explosions at Karymsky volcano // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. B08203.
- Johnson J.B., Lees J.M., Gordeev E.I.* Degassing explosions at Karymsky volcano, Kamchatka // Geophysical Research Letters, 1998. V. 25. № 21. P. 3999-4002.
- Johnson J.B., Lees J.M.* Plugs and chugs – seismic and acoustic observations of degassing explosions at Karymsky, Russia and Sangay, Ecuador // J. Volcan. Geotherm. Res. 2000. V. 101. № 1-2. P. 67-82.
- Johnson J.B., Aster R.C., Kyle F.R.* Volcanic eruptions observed infrasound // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L14604.
- Johnson J.B., Aster R.C.* Relative partitioning of acoustic and seismic energy during Strombolian eruption // J. Volcan. Geotherm. Res. 2005. V. 148. P. 334-354.
- Lighthill M.G.* On sound generated aerodynamically. Part I. General theory // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1952. V. 211. P. 564-587.
- Lighthill M.G.* On sound generated aerodynamically. Part II. Turbulence as a sources of sound // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1954. V. 222. P. 1-32.
- Livshits L.D., Bolhovitinov L.G.* Weak shock in the eruption column // Nature. 1978. V. 267. № 5610. P. 420-421.
- Minakami T.* Fundamental research for predicting of

- volcanic eruptions. Part I // Bull. Earthquake Res. Ins. 1960. № 38. P. 497-544.
- Mikomo T., Bolt B.A.* Excitation mechanism of atmospheric pressure waves from the 1980 Mount St. Helens eruption // Geophys. J. R. astr. Soc. 1985. V. 81. P. 445-461.
- Murayma N.* Microbarographic waves associated with the explosions of Japanese volcanoes, 1960-1966. Quality G. of Seismol. 1969. V. 37. № 1. P. 13-18.
- Nain I.A.* Atmospheric shock waves and condensation clouds from Ngauruhoe explosive eruptions // Nature. 1976. V. 256. P. 190-191.
- Pekeris F.* The propagation of a pulse in the atmosphere // Proc. Roy. Soc. Am. 1939. V. 171. P. 131-149.
- Press F., Harkrider D.* Air-sea waves from the explosion of Krakatau // Seismic. 1966. V. 154. № 3754. P. 1325-1327.
- Reed J.W.* Air pressure waves from Mt. St. Helens eruptions // Presented at the American Geophysical Union Meeting in San Francisco, 1980. P. 1-13.
- Reed J.W.* Barograph recodes of Mount St. Helens eruptions of May 18, 1980. Rep. 6/9/80, Sandia Natl. Lab. Environ. Res. Div. 1980. P. 31.
- Reed J.W.* Air pressure waves from Mount St. Helens eruptions // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. P. 11979-11992.
- Richards A. F.* Volcanic Sounds: Investigation and Analysis // J. Geophys. Res. 1963. V. 68. № 3. P. 919-928.
- Sparks R.S.* The dynamics of bubble formation and growth in magmas: A review and analysis // J.V.G.R. 1978. V. 3. № 1/2. P. 1-37.
- Tahira M.A.* Study of the Infrasonic Wave in the Atmosphere (II) Infrasonic Waves Generated by the Explosions of the Volcano Sakura-jime // J. Meteorol. Soc. of Japan. 1982. V. 60. № 3. P. 896-907.
- Tahira M.A.* Study of the long Range Propagation of Infrasonic Waves in the Atmosphere (I) Observation of the Volcanic Infrasonic Waves Propagating through the Thermosphere Duct // J. Meteorol. Soc. of Japan. 1988. V. 66. № 1. P. 17-26.
- Tanaka K., Kasahara M., Hori S.* Research on Akita-Komage-take (II)-Focal depth of explosion earthquakes // Sci. Rep. Toh. Univ. Ser. V. Geop., 1974. V. 5. № 1. P. 9-18.
- The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington. Washington: D.C., 1981. 843 p.
- Vergniolle S., Jaupart C.* Separated two-phase flow and basaltic eruptions // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. P. 12842-12860.
- Vergniolle S., Brandeis G.* Strombolian explosions 1. A large bubble breaking at the surface of a lava column as a source of sound // J. Geophys. Res. 1996. V. 101 (B9). P. 20433-20447.
- Vergniolle S., Brandeis G., Mareschal J.C.* Strombolian explosions 2. Eruption dynamics determined from acoustic measurements // J. Geophys. Res. 1996. 101 (B9). P. 20449-20466.
- Vergniolle S., Caplan-Auerbach J.* Acoustic measurements of the 1999 basaltic eruption. 2. Precursor to the subplinian phase // JVGR. 2004. № 137. P. 135-151.
- Woulff G., McGetchin T.R.* Acoustic noise from volcanoes: theory and experiment // Geophys. I. R. Astr. Soc. 1976. V. 45. P. 601-616.
- Yamasato H.* Infrasonic and seismic waves associated with lava dome activity of Unzen volcano // 50th Anniversary Showa Shinzan. 1995. P. 206-207.
- Yamasato H., Fukui K., Uhira K. et al.* Analysis of Seismic and Acoustic Signals Excited by Pyroclastic Flows at Unzendake Volcano // Bull. Volcanol. Soc. Japan. 1993. V. 38. P. 79-90.
- Yamasato H.* Quantitative Analysis of Pyroclastic Flows Using Infrasonic and Seismic Data at Unzen Volcano, Japan // J. Phys. Earth. 1997. V. 45. P. 397-416.
- Yamasato H.* Nature of Infrasonic Pulse Accompanying Low Frequency Earthquake at Unzen Volcano, Japan // Bull. Volcanol. Soc. Japan. 1998. V. 43. № 1. P. 1-13.
- Yokoyama I.* A geophysical interpretation of the 1883 Krakatau eruption // J. Volcan. Geother. Res. 1981. V. 61. № 9. P. 359-378.

УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ
**SHOCK-WAVE AND ACOUSTIC EFFECTS IN TO ATMOSPHERE
AT VOLCANIC ERUPTIONS (REVIEW)**

P.P. Firstov

*The Kamchatka Branch of Geophysical Service Russian Academy of Science,
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006*

The paper provides an overview of recent studies related to the shock-wave and acoustic effects in the atmosphere from volcanic eruptions. Brief description is given to the development of a new trend known as Acoustics from Volcanic Eruptions (AVE) and informational content of wave disturbances in the atmosphere regarding the dynamics of eruptions and parameters of explosive process. Wave disturbances in the atmosphere from volcanic eruptions were classified and presented in the paper to explain their unique nature.

Keywords: eruption, aerodynamic noise, shock air waves, infrasound of fluctuation.