



УДК 551.596

П. П. Фирстов¹, Д. Фи², Е. Р. Махмудов¹, С. Б. Самойленко³

¹ Камчатский филиал Геофизической службы РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: firstov@emsd.ru

² Геофизический институт Аляскинского университета, г. Фэрбанкс,
Аляска, США

³ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский

Особенности акустического и сейсмического излучений от эксплозий вулкана Карымского

Для вулкана Карымского характерна эксплозивная деятельность с большими вариациями частоты и энергии эксплозий. Это продемонстрировано в статье для двух временных отрезков активности вулкана в 1970–1980 и 1996–2000 г. Форма записи воздушных ударных волн в августе 2011 г., говорит в пользу того, что для этого периода основным механизмом эксплозий является волна дробления, возникающая в газонасыщенной пористой вязкой магме в случае её декомпрессии. В статье рассмотрены некоторые детали этого механизма.

Введение

Для вулкана Карымского характерна умеренная эксплозивная деятельность вулcano-стромболианского типа в течение длительных периодов, сменяющаяся иногда на эффузивно-эксплозивную. Частота эксплозий в различные периоды активности вулкана варьирует от одной в несколько суток до одной в минуту. В течение длительного периода активности происходят изменения в характере отдельных эксплозий, форме кратера, изменяется и характер ударно-волновых и акустических эффектов, сопровождающих отдельные эксплозии (пепловые, пепло-газовые и газо-пепловые выбросы). Предшествующий цикл активности вулкана 1970–1983 гг. детально был изучен. Этому способствовало то, что у подножия вулкана работала обсерватория, оснащённая комплексом аппаратуры, обслуживаемой операторами, которые вели непрерывные визуальные наблюдения за активностью вулкана. Настоящий цикл активности, начавшийся в 1996 г., изучался в основном дистанционными методами. Сейсмические эффекты регистрировались радиотелеметрической сейсмической станцией «Карымская» (KRY), расположенной в 1,6 км от кратера вулкана. В течение 1997–1999 гг. в летний период проводились совместные русско-американские экспедиции с целью регистрации акустических и сейсмических сигналов, сопровождавших эксплозии вулкана Карымского [10, 11]. В августе 2011 г. регистрация инфразвуковых сигналов проводилась под руководством Дэвида Фи. В данной работе сделаны некоторые обобщения об особенностях сейсмических, ударно-волновых и акустических

эффектах, сопровождавших отдельные эксплозии вулкана Карымского.

Динамика эксплозивных землетрясений вулкана Карымского

С 1970 г. до 1986 г. непрерывная регистрация сейсмических явлений осуществлялась сейсмической станцией КРМ, расположенной у подножия конуса на расстоянии 3,5 км от кратера. С 1986 г. мониторинг сейсмичности вулкана осуществляется с помощью радиотелеметрической сейсмической станции КРУ, расположенной в 1,6 км от кратера вулкана, с передачей информации в центр обработки в г. Петропавловск-Камчатский. При существующей системе наблюдений эксплозивные землетрясения (ЭЗ), сопровождавшие выбросы, регистрировались почти без пропусков. И количество ЭЗ и их характер являются достоверным отражением эксплозивной активности вулкана.

Среди большого разнообразия эксплозий на вулкане Карымском по визуальным наблюдениям были выделены две крайние разновидности [5]:

1. Кратковременные эксплозии, нагруженные пеплом, как правило, сильные. По характеру разлета выбрасываемого материала и формированию эруптивного облака, такие эксплозии напоминали заглубленный взрыв взрывчатого вещества, и они условно были названы «взрывом». Им соответствовали ЭЗ длительностью не более минуты.

2. При эксплозиях второй разновидности, названных «продувками», из кратера происходило продолжительное (до десятка минут) истечение газо-пепловой или паро-газовой смеси, которое в определённые этапы носило пульсирующий характер.

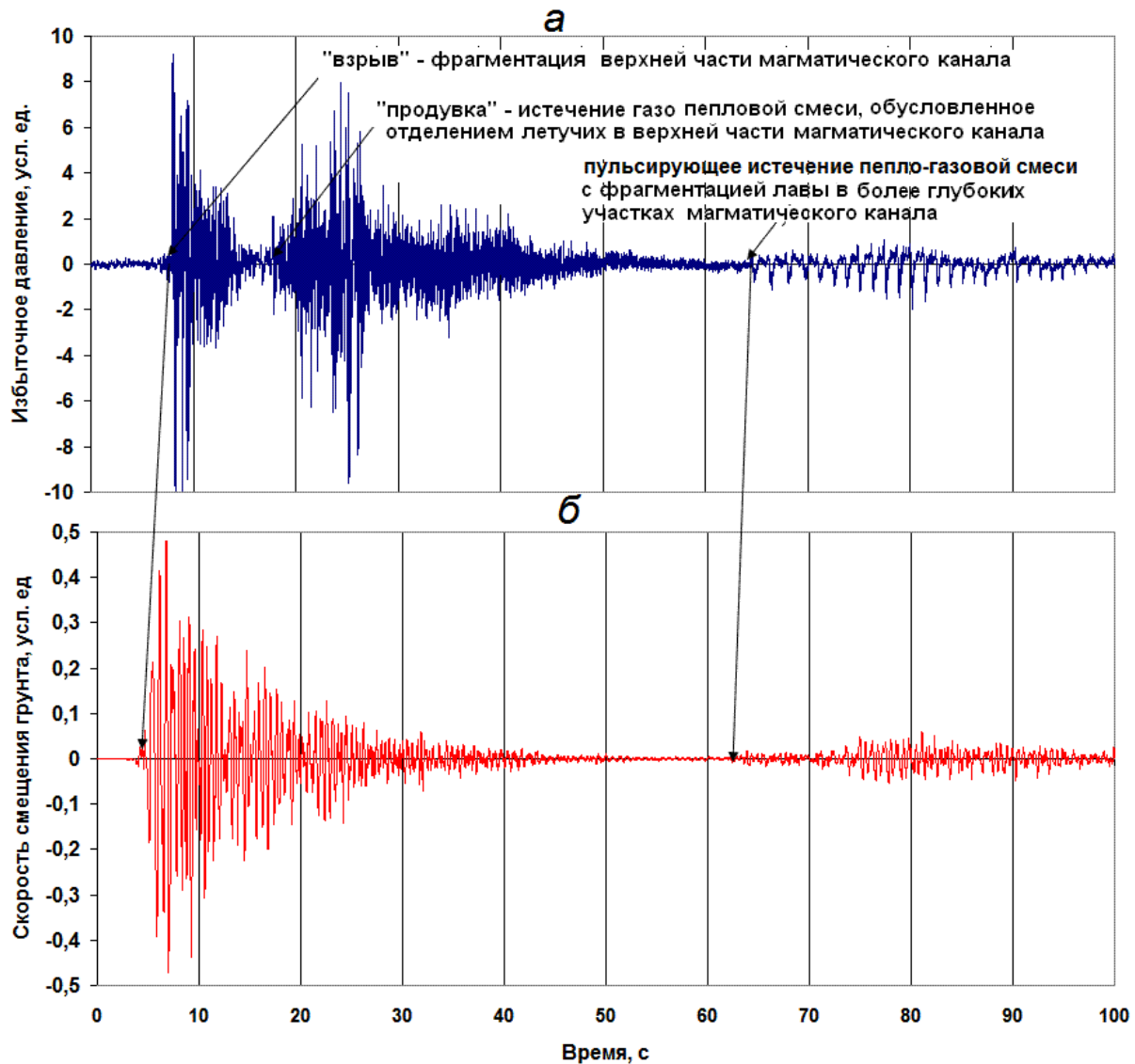


Рис. 1. Запись волновых возмущений в атмосфере (а) и скорости смещения грунта (б), сопровождавших эксплозию вулкана Карымского 9 августа 1999 г.

При этом в условиях хорошей погоды на расстоянии 3,5 км от кратера (Карымская обсерватория), как правило, был слышен шум с характерной периодичностью интенсивности от 0,5 до 2,0 секунд, на микробарограммах с такой же периодичностью регистрировались воздушные волны, а на сейсмограммах соответственно наблюдался квазисинусоидальный сигнал — вулканическое дрожание (ВД).

Часто эксплозии, начавшиеся «взрывом», переходили в «продувку» длительностью до нескольких минут. В этих случаях на микробарограммах выделялась «головная» и «хвостовая» части. Это хорошо видно на рис. 1, где в обоих сигналах хорошо отразилась фаза «взрыва» — фрагментации магмы (разрушения) верхней части магматического канала. После этого произошло интенсивное выделение газообразных летучих из некоторого объёма магмы и истечение газо-пепловой смеси из кратера,

которое сопровождалось аэродинамическим шумом, зафиксированным акустическим каналом, но было слабо выражено в сейсмическом излучении. Через 20 с за счёт декомпрессии происходит фрагментация магмы на большей глубине магматического канала в автоколебательном режиме и возникает пульсирующее истечение пепло-газовой смеси из кратера вулкана.

На рис. 2 по сейсмическим данным за период 1970–1980 гг. приведены вариации числа ЭЗ в сутки (N) и процентное отношение числа землетрясений (n), соответствующих «продувкам» к общему количеству ЭЗ. На нём видно, что максимумы «продувок» ($n \approx 60\%$) наблюдались при небольшом количестве эксплозий ($N < 25$), а при увеличении общего числа эксплозий, которое наблюдалось во время излияния лавовых потоков, процентное отношение «продувок» резко уменьшалось. Этот факт,

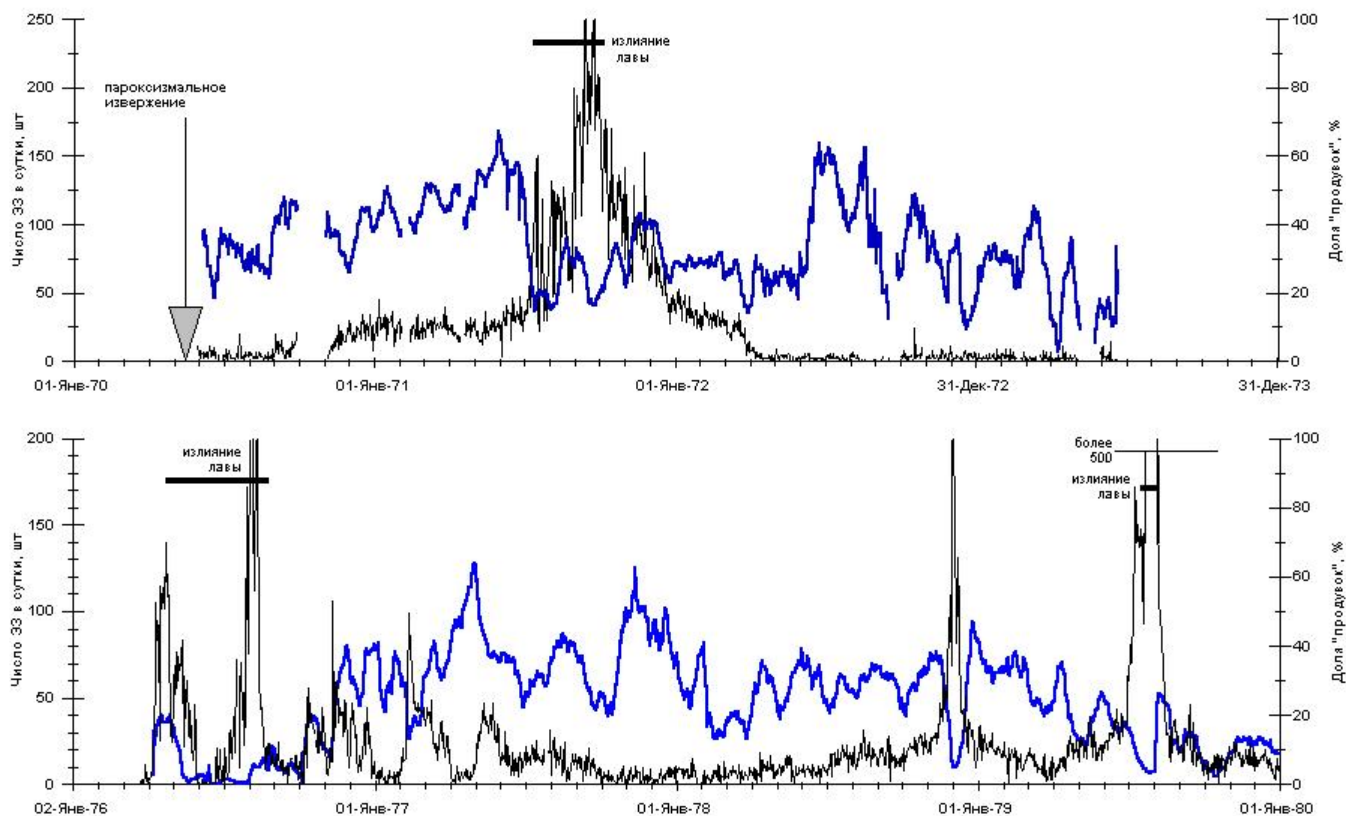


Рис. 2. Ежесуточное число эксплозивных землетрясений (1) и процентное отношение землетрясений, соответствующих эксплозиям типа «продувка», к общему числу землетрясений (2) для вулкана Карымского с 1970 по 1980 гг. [4].

по-видимому, указывает на зависимость условий возникновения «продувок» от скорости поступления и физических свойств силикатного расплава, находящегося в верхней части магматического канала.

На рис. 3 приведено количество ЭЗ по данным В. В. Иванова за период 1997–2000 гг., а также приведён диаметр кратера по данным аэрофотосъёмки, выполненной В. Н. Двигало [5]. Стрелками отмечены периоды проведения полевых работ русско-американской экспедиции. Регистрация акустических и сейсмических сигналов, сопровождавших эксплозии вулкана Карымского в 1997–1999 гг., проводилась цифровой аппаратурой [10, 11]. Пульсирующее истечение газо-пепловой струи из кратера, которое наблюдалось в этот период, в иностранной литературе получило название «чаггинг» (chagging) из-за подобия звукового эффекта с пыхтением паровоза, возникающим при сбросе пара из котла [10].

Зависимость параметров ударно-волновых и акустических эффектов от характера процесса извержения вулкана

Одним из параметров, качественно характеризующую эксплозивную активность вулкана Карымского, является состояние кратера вулкана. Так за несколько месяцев перед окончанием извержения (ноябрь 1972 г., см. рис. 2) кратер вулкана имел блюдцеобразную форму диаметром 220 м. На его

дне аэровизуально хорошо просматривались следы отдельных выбросов в виде воронок диаметром от 10 до 50 м. Логично рассматривать такие выбросы, как аналог взрывов взрывчатых веществ на выброс. Для этого периода были характерны редкие выбросы с широким интервалом интенсивности, что говорит о хаотической работе отдельных зон подводящего магматического канала.

Совершенно по другому выглядел кратер в сентябре 2003 г. На его дне просматривалась одна воронка, которая свидетельствовала о площади рабочей поверхности магматического канала, которая была источником выбросов (рис. 4а-в). В ноябре 2005 г. в кратере образовалась экструзивное выжигание, которое было источником только продувок (рис. 4г).

Как известно, при взрывах на выброс взрывчатых веществ (ВВ) форма воздушной ударной волны (ВУВ) зависит от глубины заложения заряда. При этом начальная ударная волна, прошедшая сквозь грунт, действует на воздух как поршень, образуя импульс «наведённой грунтовой ударной волны». Вслед за ним следует импульс «выхода газа», когда образуется воронка и происходит прорыв газов. В связи с тем, что сильновязкую газированную магму вулкана Карымского можно рассматривать как «вулканическую взрывчатку» с низкой плотностью энергии, скорости выброса фрагменти-

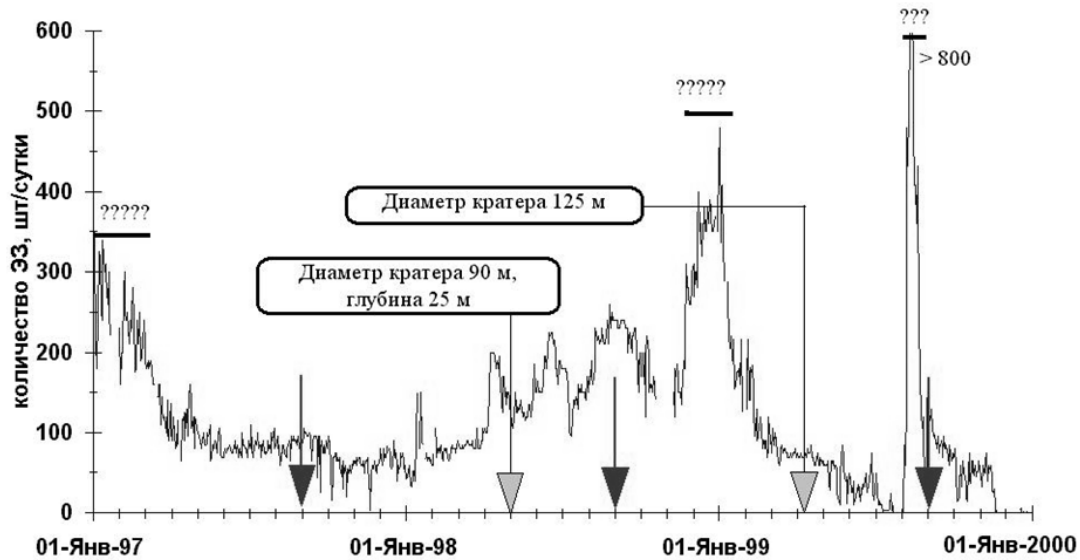


Рис. 3. График ежедневного количества взрывных землетрясений (KRY, $\Delta = 1,5$ км) построенный по данным В.В. Иванова, а также приведён диаметр кратера по данным аэрофотосъёмки, выполненной В. Н. Двигало [5]. Стрелками указаны периоды наблюдений за ударно-волновыми эффектами от взрывов вулкана, а жирными линиями отмечены предполагаемые времена излияния лавовых потоков.

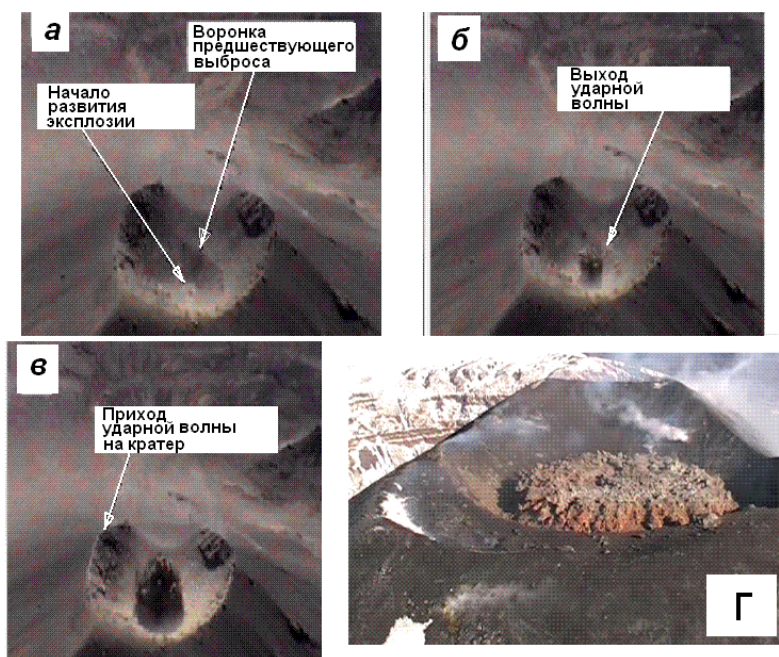


Рис. 4. Киносъемка начала развития взрыва, выполненная А. В. Сокоренко 9 сентября 2003 г.: а — начало процесса, прорыв газов — 0 с; б — выход ударной волны на дно кратера — 0,08 с; в — приход ударной волны на кромку кратера — 0,26 с; г — состояние кратера в ноябре 2005 г. (Фото П. П. Фирстова)

рованного материала в редких случаях превосходят скорость звука.

Развитие взрыва, возникновение и формирование ВУВ хорошо прослеживаются на уникальной киносъемке кратера вулкана Карымский, выполненной с вертолёта 9 сентября 2003 г. А.В. Сокоренко. На рис. 4а приведён третий кадр кинограммы, где хорошо видно начало прорыва газов в центре воронки от предшествующей взрыва. Через 0,083 с на-

блюдается выход на дно кратера, на площади, ограниченной размером воронки от предшествующей взрыва, ударной волны, которая трассируется возникновением белого пылевого следа (рис. 4б). В дальнейшем наблюдается движение взрывного облака в вертикальном и распространение ВУВ в радиальном направлениях. Движение фронта ВУВ хорошо трассируется белёсым фронтом за счёт подъёма в воздух мелкодисперсной фракции, который

через 0,17 с достигает кромки кратера (рис. 4в). Если считать диаметр кратера на этот период 240 м (устное сообщение В. Н. Двигало), то скорость распространения ВУВ составит ~ 720 м/с, а скорость подъёма кромки выбрасываемых продуктов оценивается около 240 м/с.

Несколько меньшие скорости ВУВ (~ 450 м/с) и подъёма эруптивного облака наблюдались при киносъёмке взрывов вулкана Сакурадзима, когда выбросу пепла предшествовала ВУВ, трассируемая по изменению оптической плотности облака над кратером в результате конденсации паров воды [9]. Учитывая, что в случае вулкана Сакурадзима ВУВ и эруптивное облако наблюдались на расстоянии около 500 м от дна кратера, оценки величин характерных скоростей ВУВ для обоих вулканов можно считать соизмеримыми.

На рис. 5, где совмещены по три АС, сопровождавших взрывы типа «взрыв», для трёх годов (1997–1999), видно их удовлетворительное совпадение по форме записи, что свидетельствует об идентичности параметров взрывного процесса на непродолжительном интервале времени. Для 1997 г. характерен сбалансированный импульс с длительностью фазы сжатия $\tau_+ = 0,12$ сек (рис. 5а). Оценка радиуса сферической поверхности области повышенного давления, которая служила источником АС в этот период, определённая как $a = c_0\tau_+$, составляет $a = 39$ м при принятой скорости звука $c_0 = 330$ м/сек. Начальные стадии взрывов 1998 г. характеризуются двухфазностью процесса, о чём свидетельствует форма переднего фронта фазы сжатия, зарегистрированных в этот период взрывов. На рис. 5б видно, что наблюдается постепенное нарастание переднего фронта фазы сжатия, на котором чётко выделяется перегиб, свидетельствующий о двухфазности процесса. В этом случае изменение динамики крутизны переднего фронта τ_+ говорит о том, что взрывы начинаются с энергетически более слабого процесса. В 1998 г. при $\tau_+ = 0,14$ сек радиус сферической поверхности области повышенного давления составлял $a = 46$ м, что несколько больше оценки для предшествующего года.

Особенностью ВУВ, зарегистрированных в 1999 г., являются характерные всплески длительностью 0,06 сек в фазе разрежения (рис. 5в), указывающие на взрывные процессы в формирующемся эруптивном облаке. По данным киносъёмки продуктов разлёта, во время Большого трещинного Толбачинского извержения наблюдались воздушные взрывы, обусловленные смешиванием взрывоспособных вулканических газов с кислородом воздуха, а также взрывы выбрасываемых в воздух вулканических бомб [2, 3]. По-видимому, для взрывов вулкана Карымский в 1999 г. характерны вторичные взрывные процессы во время формирования эруптивного облака. Средняя длительность фазы сжатия в 1999 г. составляла $\tau_+ = 0,17$ сек, что соответствует радиусу сферической поверхности повышенного давления $a = 56$ м, при радиусе кратера по данным аэрофото-

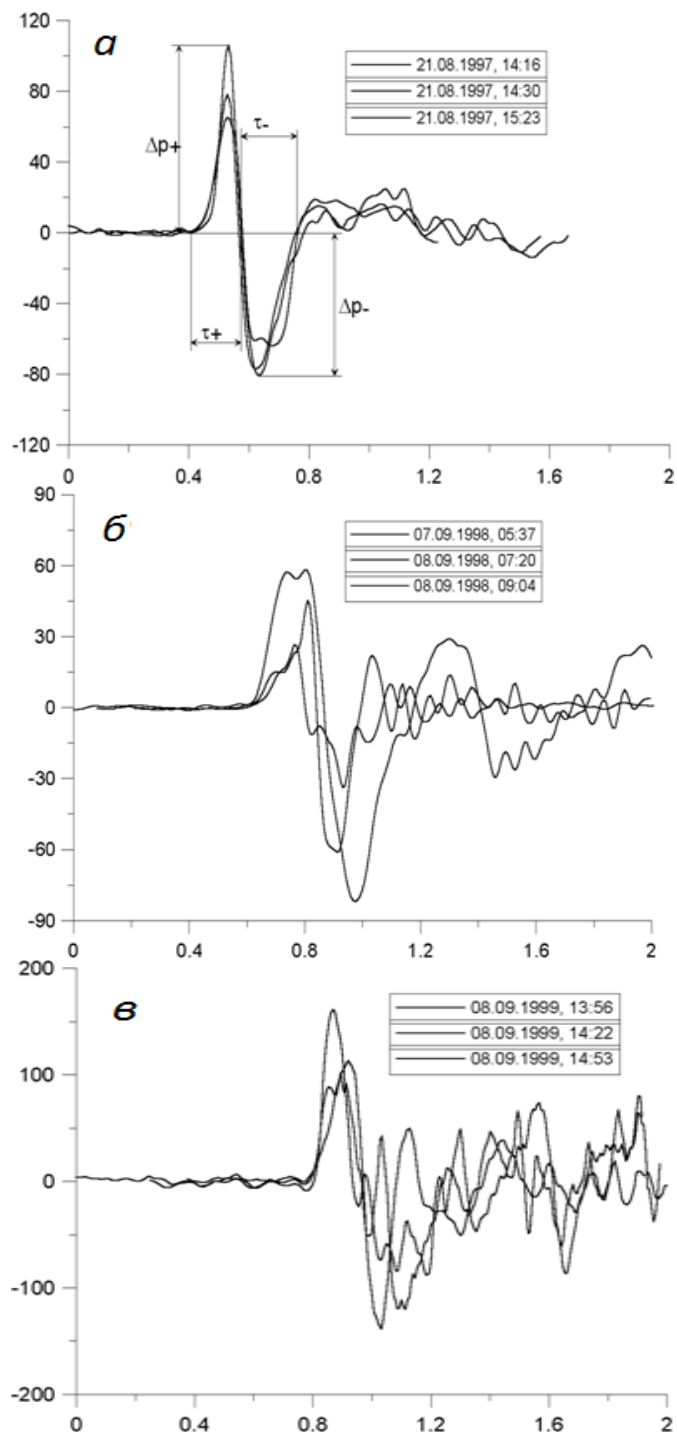


Рис. 5. Примеры записи ВУВ, сопровождавших «взрывы» вулкана Карымский: а — 1997 г.; б — 1998 г.; в — 1999 г. (по горизонтальной оси — время в секундах, по вертикальной — амплитуда в условных единицах).

съёмки $R_{кр} = 62$ м. Сопоставимость длительности фазы сжатия τ_+ с размером кратера вулкана Карымский в 1997–1999 гг., подтверждает вывод, что формирование ВУВ вулканических извержений связано с размером «рабочей» части подводящего канала, которая в процессе извержения может меняться.

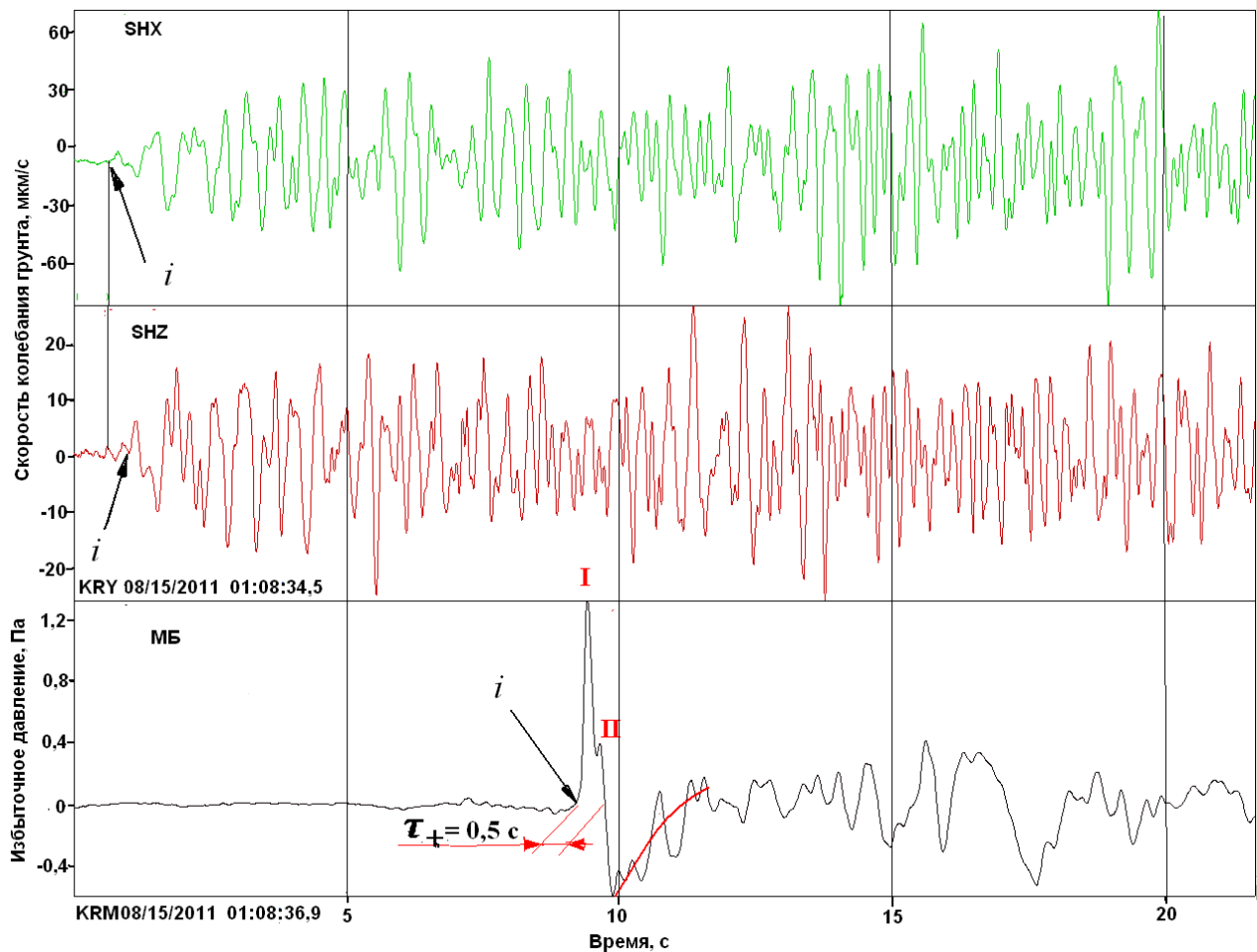


Рис. 6. Пример записи сейсмического и акустического сигналов, сопровождавших эксплозию средней силы.

Регистрация акустического излучения во время эксплозивной активности вулкана Карымского в августе 2011 г.

В августе 2011 г. регистрация инфразвуковых сигналов проводилась под руководством Дэвида Фи с помощью антенны из 4 микробарографов с апертурой ~ 180 м расположенной в 3,8 км от кратера вулкана. Активность вулкана в этот период характеризовалась эксплозиями вулcano-стромболианского типа с широким диапазоном интенсивности – от мощных типа «взрыв», сопровождающихся ВУВ с $\Delta P_+ > 100$ Па, которые ощущались в лагере, до слабых паргазовых «продувок» во время которых генерировалось инфразвуковые сигналы с $\Delta P_+ < 1,0$ Па. В среднем интервал между эксплозиями в этот период был заключён в пределах 3–5 мин.

На рис. 6 приведён пример записи сейсмического (Z и X составляющие) и акустического сигналов, сопровождавших эксплозию средней силы. ВУВ имеет несбалансированный импульс, с фазой сжатия, свидетельствующей о двухактности процесса. Экспоненциальный характер заднего фронта фазы разряжения свидетельствует о конденсации пере-

гретого ювенильного пара, выброшенного в атмосферу. Влияние воды на формирование ВУВ при фрагментации магмы андезитового состава рассмотрено в работе [8]. Амплитуда радиальной составляющей сейсмического сигнала почти в три раза больше амплитуды вертикальной, что говорит о принципиально ином характере механизма очагового сигнала, нежели центр расширения, который характерен для взрывов ВВ.

Рассмотрим изменение эволюции акустического излучения вулкана в период 14–17 августа (рис. 7). В течение этого периода наблюдались изменения формы и увеличение амплитуды инфразвуковых сигналов. Так 14 августа эксплозии сопровождались АС, начинающимися последовательно несколькими воздушными волн с избыточным давлением в фазе сжатия $\Delta P_+ < 0,6$ Па (рис. 7а), после которых регистрировалось «акустическое дрожание» с периодом 0,5–1,0 сек, связанное с истечением газо-пепловой смеси из кратера (продувка). Длительность фазы сжатия для этого периода составляла не более 0,25 сек.

Форма АС зарегистрированных 15 августа совсем иная. Фаза сжатия с $\Delta P_+ > 0,6$ Па имеет два-три

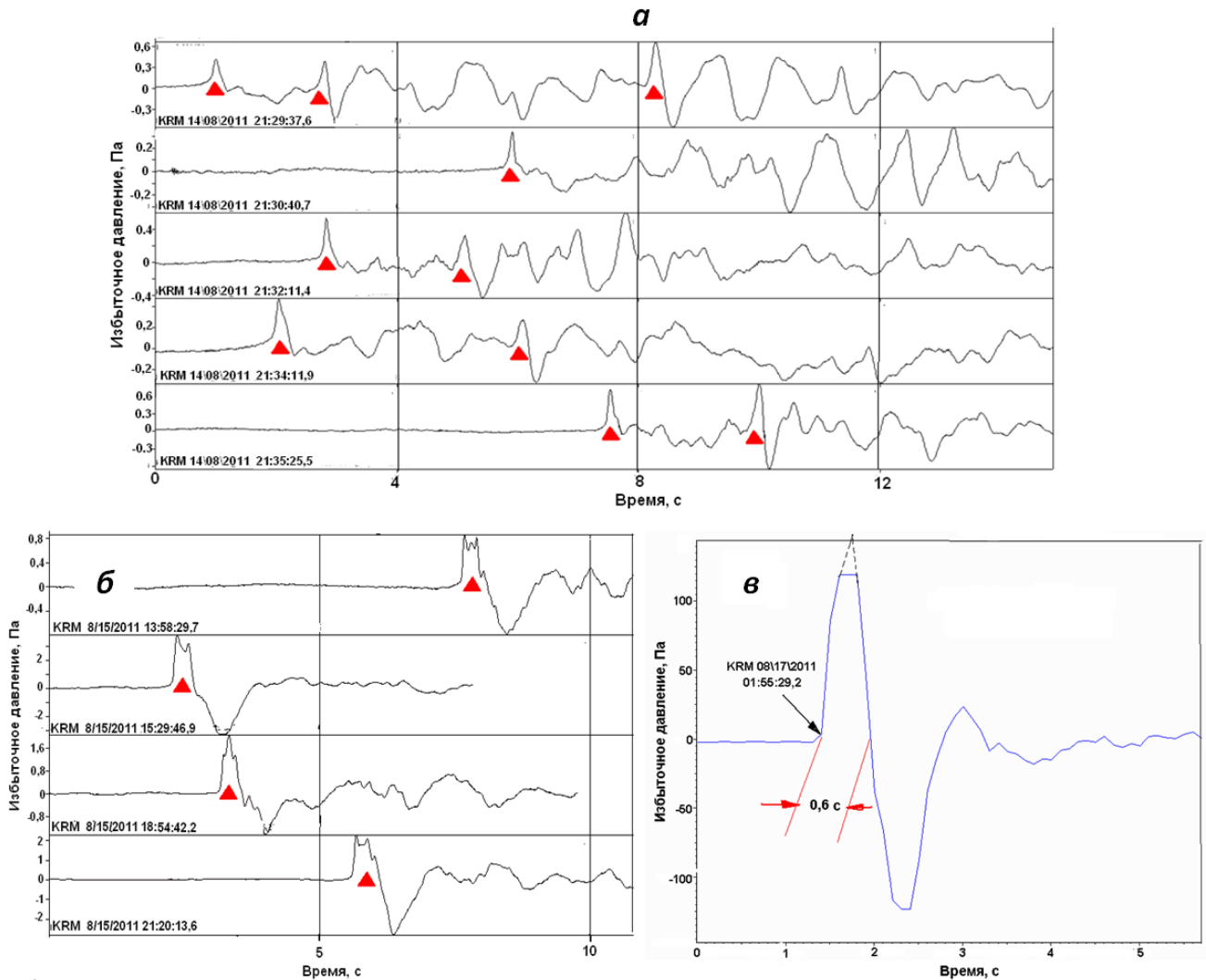


Рис. 7. Эволюция акустического излучения, сопровождавшее извержение вулкана Карымского 14–17 августа.

вступления, которые свидетельствуют о многоактивности процесса фрагментации магмы в этот период. При $\tau_+ = 0,4 - 0,5$ сек длительность единичного акта составляет $\sim 0,1 - 0,25$ сек.

Мощная эксплозия, произошедшая 17 августа, сопровождалась ВУВ с $\tau_+ = 0,6$ сек, и $\Delta P_+ \approx 160$ Па (динамический диапазон регистрирующей аппаратуры не позволил точно определить амплитуду). Данная эволюция АС указывает на изменения процесса газоотделения летучих компонентов из магмы в течение достаточно короткого времени — трое суток.

Обсуждение результатов

Газоотделение летучих из магмы является основным фактором эксплозивного процесса. В случае вязких газированных магм (андезитовая, андезибазальтовая) в верхней части магматического канала формируется объём пористой магмы, обладающей потенциальной энергией сжатого газа, заключённого в порах (вулканическая взрывчатка). В случае декомпрессии происходит фрагментация (разруше-

ние) некоторого объёма и происходит эксплозия. «Вулканическая взрывчатка» имеет низкую плотность энергии и, по-видимому, её разрушение осуществляется путём распространения фронта разрушения (волна дробления) движущегося с конечной скоростью [1]. Формирование объёма, плотности распространения фронта её разрушения в первую очередь зависят от массового содержания летучих в лаве и скорости её подъёма по магматическому каналу. Но в силу различных физико-химических процессов эти параметры могут меняться в сравнительно короткое время, что иллюстрирует изменение характера акустического излучения в течение 14–17 августа 2011 г.

В первом приближении может быть предложена следующая схема развития эксплозивного процесса 14–17 августа 2011 г. Вначале (14 августа) происходило резкое газоотделение летучих вблизи дна кратера, что приводило к фрагментации объёма радиусом, определённым по τ_+ , около 60 м. Характер фрагментации резко изменился 15 августа. Возрос-

ла скорость фрагментации, о чём свидетельствует увеличение крутизны переднего фронта фазы сжатия, и появилась многоактность, чётко выраженная в максимуме фазы сжатия, связанная, по-видимому, с послонной фрагментацией магмы в результате движения волны дробления. Мощная эксплозия 17 августа — это результат фрагментации значительного объёма газонасыщенной пористой вязкой магмы, который образовался в верхней части магматического канала и смог сработать как единое целое.

Вулкан Карымский является природной лабораторией, где можно с большим успехом изучать физику эксплозивного процесса. Для этих целей необходима организация комплексного геофизического мониторинга активности вулкана, с использованием регистрации сейсмических эффектов, акустического излучения в двух диапазонах инфразвукового (импульсные сигналы) и звукового (аэродинамический шум), инфракрасного излучения, а также концентрации газов SO_2 и CO_2 . Экспериментальные данные могут подтвердить или опровергнуть теоретические модели эксплозивного процесса вязких, газонасыщенных андезитовых магм.

Список литературы

1. *Алидибиров М.А.* Физическая природа и механизм вулканических взрывов. Автореф. дис. доктора физ.-матем. наук. М., 1998. 44 с.
2. *Самойленко Б. И.* Особенности вулканических взрывов // Проблемы современного естествознания: Материалы Научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 25–28 марта, 2001. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ. 2002. С. 101–103.
3. *Сторчеус А. В., Самойленко Б. И.* Исследования вулканических взрывов Толбачинского извержения с помощью киносъёмки // Вулканология и сейсмология. 1983. № 5. С. 102–105.
4. *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. № 4. С. 62–68.
5. *Токарев П. И., Фирстов П. П.* Сейсмологические исследования вулкана Карымского // Бюл. вулк. ст. 1967. М.: Наука, С. 9–22.
6. *Федотов С. А. и др.* Извержение Карымского вулкана в 1998–2000 гг., связанные с ним сейсмические, геодинамические и поствулканические процессы и их воздействие на окружающую среду // Катастрофические процессы и их влияние на природную среду. М.: Наука, 2002. С. 117–160.
7. *Фирстов П. П.* Вулканические акустические сигналы диапазона 1,0–10 Гц и их связь с эксплозивным процессом. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. 90 с.
8. *Фирстов П. П., Озеров А. Ю., Маневич А. Г.* Акустические и сейсмические эффекты, сопровождающие пепло — газовые эксплозии вулкана Карымского // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2004. С. 26–32.
9. *Фирстов П. П., Пономарёв Е. А.* Влияние магматической воды на ударно-волновые эффекты эксплозивных вулканических извержений // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 282 — 290.
10. *Ishihara K.* Dynamic analysis of volcanic explosion // J. of Geodynamics. 1985. Vol. 3. N3/4. P. 327–349.
11. *Johnson J. B., Lees J. M., Gordeev E. I.* Degassing Explosions at Karymsky Volcano, Kamchatka // Geophys. Res. Lett. 1998. № 21. Vol. 25. P. 3999–4002.
12. *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. Vol. 101. № 1–2. P. 67–82.