

УДК 550.348.436+550.342

ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ОТ ЭКСПЛОЗИЙ ВУЛКАНА
КАРЫМСКИЙ (1997-1999 гг.)

П.П. Фирстов, А.Г. Маневич, А.Ю. Озеров

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

В течение 1997-1999 гг. вблизи вулкана Карымский ($\Delta = 1.5$ км) в рамках Российско-Американской экспедиции (начальник экспедиции с Российской стороны А.Ю. Озеров, научный руководитель Е.И. Гордеев) проводились комплексные наблюдения за сейсмическими и инфразвуковыми волнами, сопровождавшими эксплозивную активность вулкана. Регистрация сигналов осуществлялась цифровой аппаратурой с частотой дискретизации сигнала 125 Гц, амплитудно-частотные характеристики аппаратуры и ее калибровка приведены в работе [13]. В данной статье сделан предварительный анализ особенностей генерации акустических сигналов (АС) в атмосфере, сопровождавших эксплозивную деятельность вулкана.

Краткая характеристика эксплозивной активности вулкана

В 1997-1999 гг. для вулкана была характерна умеренная деятельность вулканостромболианского типа, которая в основном носила эксплозивный характер, несколько раз менявшийся на эффузивно-эксплозивный. Эксплозивная активность проявлялась в виде отдельных эксплозий (выбросов) с частотой от двух–трех в сутки до нескольких десятков в час. Непрерывная регистрация сейсмических явлений осуществлялась телеметрической сейсмической станцией Карымская (КРМ). При данной системе наблюдений эксплозивные землетрясения (ЭЗ), сопровождавшие выбросы, регистрировались почти без пропусков, и количество ЭЗ является достоверным отражением эксплозивной активности вулкана.



Рис.1. График ежедневного количества эксплозивных землетрясений (с/с КРМ, $\Delta = 1.5$ км, $V = 10000$) построенный по данным В.В. Иванова [6], диаметр кратера приведен по данным аэрофотосъемки, выполненной В.Н. Двигало [6]. Стрелками указаны периоды наблюдений, жирными линиями отмечены предполагаемые времена излияния лавовых потоков.

На рис.1 приведен график количества ЭЗ в сутки (N), на котором также приведены размеры кратера. Ориентируясь на соотношение эксплозивной и эффузивной активности в течение предшествующего цикла активности вулкана в 1970-1983 гг. [8], на рис.1 отмечены предполагаемые периоды излияния лавовых потоков.

Наблюдения за акустическим и сейсмическим излучениями проводились в течение нескольких недель в конце лета-начале осени 1997-1999 гг. В 1997 г. работы осуществлялись во время умеренной эксплозивной активности вулкана ($N \approx 100$ шт/сутки). В 1998 г. регистрация проводилась на фоне повышенной эксплозивной активности ($N \approx 200$ шт/сутки), а в 1999 г. – при умеренной активности.

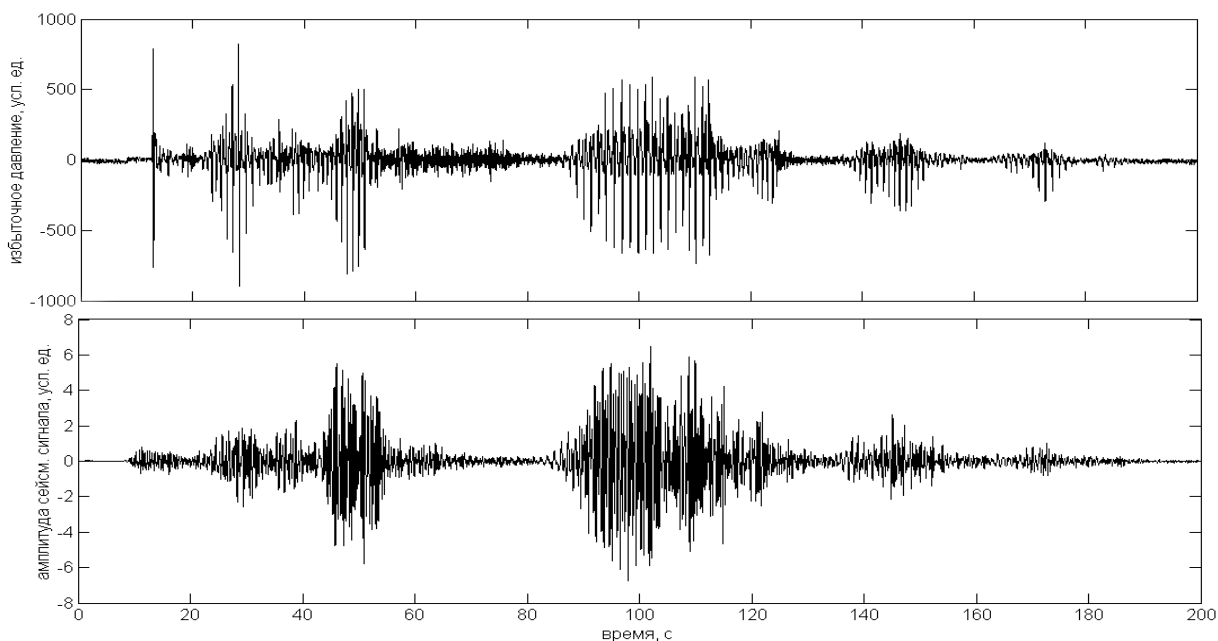


Рис.2. Пример записи флуктуаций атмосферного давления и колебаний грунта во время эксплозии вулкана Карымский (15 ч 23 мин, 21 августа, 1997 г.)

Среди большого разнообразия эксплозий по визуальным наблюдениям, как и в предшествующем цикле активности, можно выделить две крайние разновидности [5].

1. Кратковременные эксплозии, как правило, сильные. Высота подъема эруптивного облака более 500 м над кромкой кратера. В темное время суток хорошо виден веерообразный разброс обрывков светящейся лавы. Скорость фронта эруптивного облака в начальный момент, определенная по киносъемке, составляла не менее 50 м/с [8], а длительность выбросов – 5-10 секунд. По характеру разлета выбрасываемого материала и формированию эруптивного облака такие эксплозии напоминали заглубленный взрыв взрывчатого вещества (ВВ), и они условно были названы «взрывом». Этим эксплозиям соответствовали ЭЗ длительностью не более минуты.

2. При эксплозиях второй разновидности, названных «продувками», из кратера происходит продолжительное истечение (несколько минут) газо-пепловой или пепло-газовой сме-

си. При этом, если скорость подъема фронта эруптивного облака небольшая (менее 50 м/с), то в условиях «хорошей» погоды на расстоянии 4 км от кратера слышен шум с характерной периодичностью в интенсивности порядка 0.5-2 с. При более быстром процессе регистрируются квазипериодические АС с тем же характерным временем. В последних работах [10-14] такие эксплозии названы «чаггингом» (chugging).

Очень часто эксплозии, начинающие с «взрыва», переходят в «продувку» длительностью до нескольких минут. В этом случае на записях микрофлуктуаций атмосферного давления и ЭЗ, как правило, выделялась «головная» и «хвостовая» части (рис.2).

Особенности воздушных волн, сопровождавших эксплозии типа «взрыв»

На рис.3 приведены АС, сопровождавшие начало эксплозии («взрыв») для каждого года. Как было показано ранее [7], АС от «взрывов» в ближней зоне представляют слабые воздушные ударные волны (ВУВ), которые характеризуются следующими параметрами: избыточным максимальным давлением в фазе сжатия ΔP_+ [Па]; временем действия фазы сжатия τ_+ [с]; величиной импульса, вычисляемого по формуле $I_+ = \int_0^{\tau_+} \Delta P(t) dt$ [Па·с]; аналогичные параметры, характеризующие фазу разрежения – ΔP_- , τ_- , I_- . В связи с неопределенностью в калибровке каналов для анализа использовались только кинематические параметры.

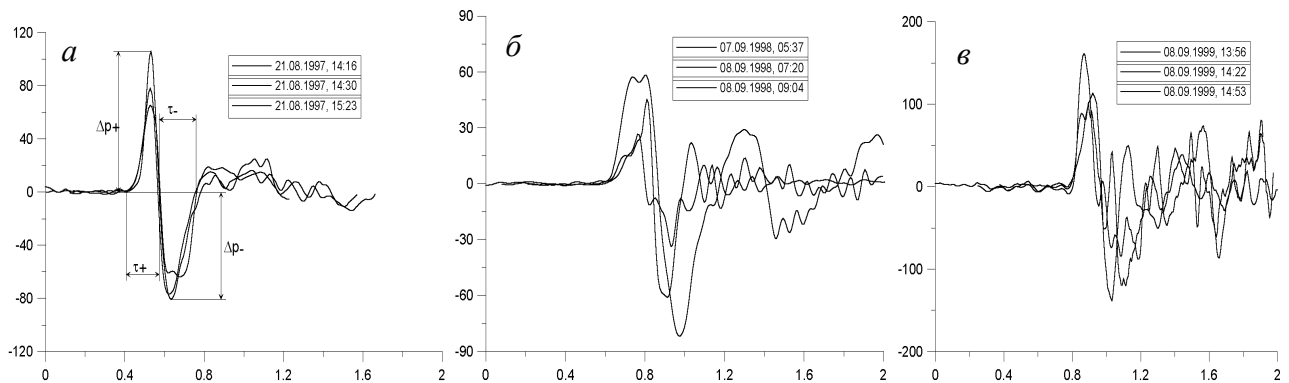


Рис.3. Примеры записи ВУВ, сопровождавших «взрывы» вулкана Карымский: а - 1997 г.; б - 1998 г.; в - 1999 г. (по горизонтальной оси – время в секундах, по вертикальной – амплитуда в условных единицах)

Как видно на рис. 3а, для 1997 г. характерен сбалансированный импульс с длительностью фазы сжатия $\tau_+ = 0.12$ с. В первом приближении радиус сферы сферической поверхности области повышенного давления, которая служит источником АС, можно определить как $a = C_0 \cdot \tau_+$, где C_0 – скорость звука в атмосфере на высоте h . Принимая $C_0 = 330$ м/с, получим $a = 39$ м.

Для начала эксплозий 1998 г. характерна двухактность процесса, о чем свидетельствует форма ВУВ, зарегистрированных в этот период. На рис. 3б видно, что наблюдается постепенное нарастание переднего фронта фазы сжатия, на котором четко выделяется перегиб,

свидетельствующий о двухактности процесса, а самый мощный импульс имеет классическую форму ВУВ от заглубленного взрыва на выброс. Как известно, при взрывах на выброс форма ВУВ определяется двумя импульсами – ударной волной, прошедшей через грунт, и выходом газов из полости взрыва. В нашем случае изменение динамики крутизны переднего фронта фазы сжатия говорит о том, что эксплозии начинаются с энергетически более слабого процесса.

В 1998 г. при $\bar{\tau}_+ = 0.14$ с радиус сферической поверхности области повышенного давления составит $a = 46$ м ($R_{\text{кр}} = 45$ м, см. рис.1), что несколько больше оценки для предшествующего года.

Для фазы разрежения ВУВ, зарегистрированных в 1999 г., характерны всплески длительностью 0,06 с (рис. 3,б), указывающие на взрывные процессы в формирующемся эруптивном облаке. Подобные взрывные процессы по данным киносъемки продуктов разлета наблюдались во время большого трещинного Толбачинского извержения [3,4]. При этом фаза сжатия составляет $\bar{\tau}_+ = 0.17$ с, что соответствует $a = 56$ м при радиусе кратера $R_{\text{кр}} = 62$ м. Прослеживается связь длительности фазы сжатия τ_+ с размером кратера. В случае наличия кратера формирование ВУВ происходит по типу излучения из свободного конца трубы, на что обращалось внимание ранее [9].

Данный анализ формы ВУВ подтверждается уникальной киносъемкой развития эксплозии вулкана Карымский, выполненной с вертолета 9 сентября 2003 г. А.В. Сокоренко (рис.4). На кинограмме четко зафиксирована двухактность процесса: начало эксплозии – прорыв газа (рис.4а). Через 0.08 с наблюдается выход на дно кратера ВУВ (рис.4б). В дальнейшем наблюдается движение продуктов взрыва в радиальном направлении и распространение ВУВ, которая через 0.26 с приходит на кромку кратера (рис.4в). Если считать диаметр кратера на этот период 240 м (устное сообщение В.Н. Двигало), то скорость распространения ВУВ составит около 480 м/с. Близкие скорости ВУВ наблюдались при киносъемке эксплозий вулкана Сакурадзима [10].



Рис.4. Киносъемка начала развития эксплозии, 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

Анализ инфразвуковых сигналов, сопровождающих эксплозии типа «продувка»

На рис.5 приведены фрагменты записей акустического и огибающей сейсмического сигналов (постоянная времени 0.4 с). В зависимости от скорости протекания процесса фрагментации верхней части магматической колонны в хвостовой части записи АС регистрируются ВУВ (рис.5а) или квазисинусоидальные цуги, названные нами по аналогии с вулканическим дрожанием, «акустическим дрожанием» (рис.5б). На фрагменте записи акустического и сейсмического сигналов (рис.5а), место которого в процессе развития эксплозии можно увидеть на рис.1 и 6, хорошо видна связь динамики ВУВ с генерацией сейсмического сигнала. На 86-ой секунде возникают ВУВ с глубокой фазой разрежения, что говорит о конденсации паров воды, которая приводит к затягиванию ΔP . На 91-ой секунде появляются сбалансированные по импульсу ВУВ и происходит «накачка» амплитуды сейсмических колебаний – общее повышение уровня с всплесками амплитуды синхронно с возникновением ВУВ.

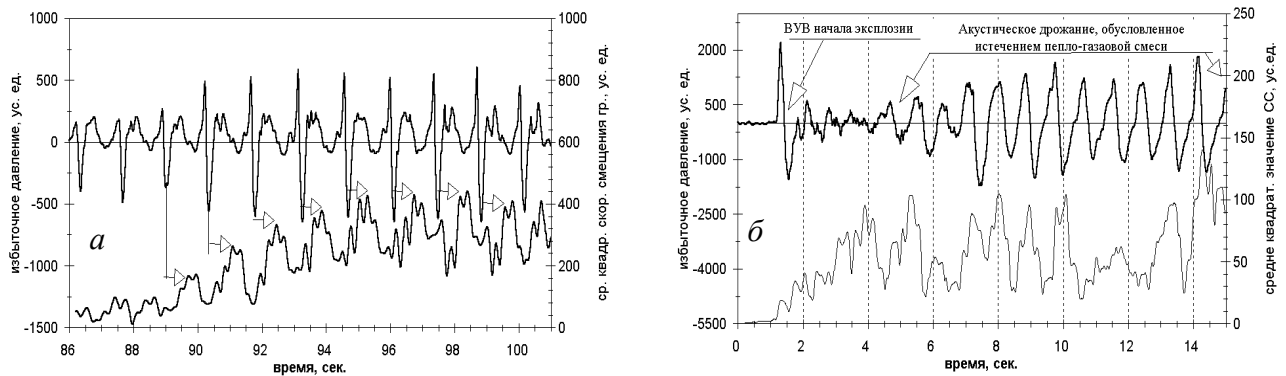


Рис.5. Фрагменты записей акустического и огибающей сейсмического сигналов для эксплозий: а – 21 августа 1997 г.; б – 9 августа 1999 г. На рисунках сигналы приведены к одному времени с учетом скоростей распространения соответствующих волн.

На рис.5б видно, что через две секунды после «взрыва» регистрируется «акустическое дрожание», по-видимому, связанное с истечением пепло-газовой смеси. В этом случае четкой корреляции между сейсмическим и акустическим сигналами не наблюдается.

Динамика развития эксплозивного процесса хорошо видна на рис. 6, на котором приведены огибающие акустического и сейсмического сигналов (постоянная времени 0.4 с), для эксплозии вулкана Карымский 21 августа 1997 г. (см. рис.2). Эксплозия начинается с «взрыва», которому предшествует сейсмический сигнал. По данным К. Ишихара [10] для вулкана Сакурадзима, который во многом подобен вулкану Карымский, глубина очага ЭЗ, определенного по первым вступлениям, оценивается в 0.8-1.2 км от уровня моря. Соотношение между сейсмическим и акустическим сигналами «продувки» на качественном уровне определяет глубину источника. Поверхностные процессы порождают более интенсивные АС (участок 1 на рис.6), а заглубленные процессы больше «накачивают» сейсмику (участок 2 на рис.6). Наряду с взрывоподобными процессами, эксплозия сопровождается (рис.6, интервал време-

ни 60–80 с) мощным истечением пепло-газовой смеси с образованием аэродинамического шума сильной интенсивности.

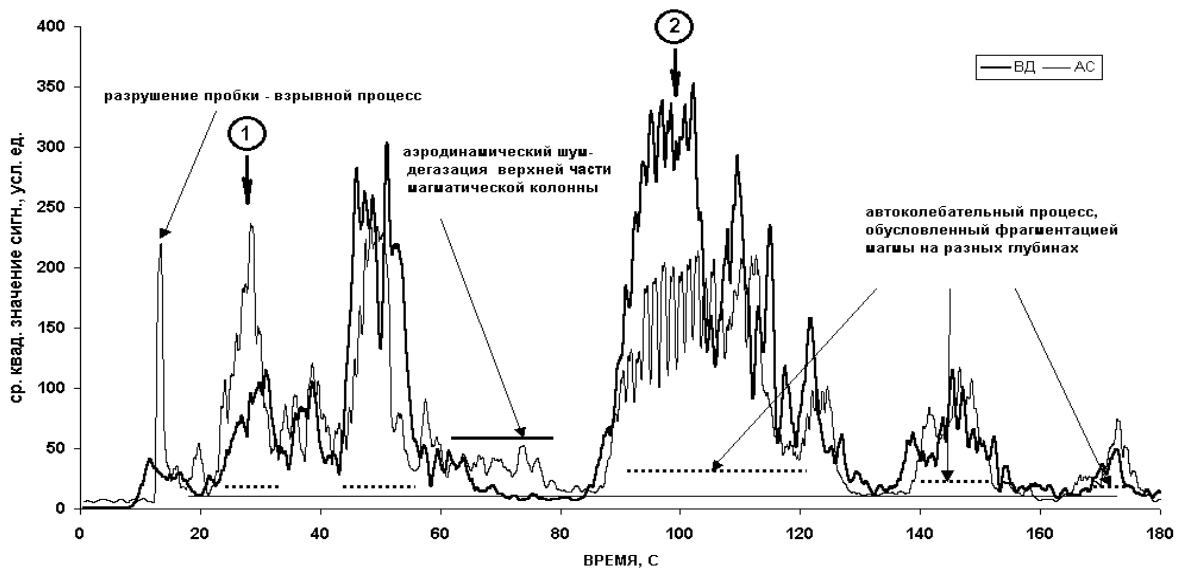


Рис.6. Огибающие записи акустического и сейсмического сигналов (постоянная времени 0.4 с) эксплозии 21 августа 1997 г.

Обсуждение результатов

К настоящему времени предложен ряд моделей механизма слабых эксплозий при вулканском типе активности вулканов с вязкой магмой среднего или кислого состава (андезитового и дацитового). В работах [10-12] эксплозии и их периодичность 0.5-2 с объясняются отделением газовой составляющей после декомпрессии с последующим истечением газа через диафрагму (засыпка, пробка). В работе [14] предлагается модель, объясняющая периодичности тем, что движение расплава по магматическому каналу происходит с проскальзыванием (падающее трение) за счет фазового перехода в граничном слое «пробка-стенка канала». В этом случае при увеличении сдвигового напряжения вещество переходит в более жидкое состояние, происходит падение трения, что приводит к движению пробки относительно стенок канала. Весьма обоснованной является модель фрагментации вязкой магмы за счет волны дробления [1,2]. Согласно этой модели в верхней части магматического канала формируется взрывоспособное пористое магматическое тело, которое в случае декомпрессии разрушается с фрагментацией некоторого объема магмы.

Анализ сейсмического и акустического сигналов дают возможность представить феноменологическую модель динамики эксплозий вулкана Карымский. Предполагается, что подача магмы по магматическому каналу происходит с небольшой скоростью. При этом может работать механизм падающего трения [14], регулирующий скважность появления отдельных эксплозий. Верхняя часть магматической колонны состоит из засыпки, которая представлена холодными продуктами предшествующих эксплозий. После засыпки идет слой дегазированной магмы, представляющий пористый объем с отвердевшими межпузырьковы-

ми перегородками, способный к взрывоподобному разрушению [1]. Мощность этого слоя определяется скоростью движения магматического материала. И, наконец, столб магмы до магматического очага, в котором объемная доля летучих по мере возрастания глубины уменьшается. Идеализированная эксплозия в этом случае может быть разбита на следующие этапы:

1. Дегазация магмы под засыпкой приводит к увеличению избыточного давления, приводящего к разрушению пробки и прорыву газов (рис.3а). В качестве «спускового крючка» могут выступить ряд причин (приливные деформации, сильные тектонические землетрясения и т.д.), в том числе и импульс движения верхней части колонны.

2. Засыпка играет роль диафрагмы, после ее разрушения происходит декомпрессия. В пористом объеме верхней части магмы возникает волна дробления [1] и происходит взрывоподобный процесс. На этом эксплозия типа «взрыв» заканчивается.

3. После снятия литостатического давления в результате «взрыва», при определенных условиях происходит дегазация магмы и ее фрагментация в более глубоких частях магматического канала, что приводит к развитию пульсирующего пепло-газового потока с автоколебательным режимом («продувка»). Обратной связью в этом случае будет волна разгрузки, которая, распространяясь по магматическому каналу, подвергает последующие слои магмы растяжению и способствует высвобождению потенциальной энергии сжатых газов [2]. При этом, в зависимости от механических и фильтрационных свойств магмы, фрагментация может проходить с различной скоростью. При больших скоростях происходит образование ВУВ (рис.5а), а при низких – воздушных волн инфразвукового диапазона – акустического дрожания (рис.5б).

В работе проведено детальное исследование волновых возмущений в атмосфере, сопровождавших эксплозии вулкана Карымский, и предложен еще один вариант феноменологической модели механизма эксплозий. Этот вариант модели эксплозивного процесса занимает равноправное положение среди других моделей, предложенных ранее и основанных на совершенно иных подходах [1-2, 10-14]. Для разработки более универсальной модели механизма эксплозий необходимо проводить дальнейшие комплексные полевые исследования, сопоставляя их результаты с теоретическими разработками физики этого сложного природного процесса.

Авторы выражают глубокую признательность Е.И. Гордееву и Д. Лису за большой вклад в организацию и проведение полевых исследований.

Настоящее исследование поддержано грантами РФФИ № 03-05-64881, 02-05-64467, 02-05-64979, НШ – 2294.2003.5.

Список литературы

1. Алидибиров М.А. Модель высвобождения энергии при вулканических взрывах вулканического типа // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С.50-58.
2. Алидибиров М.А. Физическая природа и механизм вулканических взрывов. Автореф. дис. доктора физ.-матем. наук М., 1998. 44 с.
3. 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.
4. Сторчеус А.В., Самойленко Б.И. Исследования вулканических взрывов Толбачинского извержения с помощью кино съемки // Вулканология и сейсмология. 1983. № 5. С.102-105.
5. Токарев П.И., Фирстов П.П. Сейсмологические исследования вулкана Карымского // Бюл. вулканол. станций 1967. № 43. 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. 2002. С.117-160.
7. Фирстов П.П., Адушкин В.В., Сторчеус А.В. Ударные воздушные волны, зарегистрированные во время Большого трещинного извержения в сентябре 1975г. // Докл. АН СССР. 1978. Т.259. № 5. С.1078-1081.
8. Фирстов П.П., Лемзиков В.К., Руленко О.П. Сейсмический режим вулкана Карымского (1970-1973 гг.) // Вулканизм и геодинамика. М. Наука, 1977. С.161-179.
9. Фирстов П.П., Кравченко Н.М. О возможности использования воздушных волн для оценки количества взрывчатого газа, высвобождаемого во время вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4-5. С.160-171.
10. Ishihara K. Dynamic analysis of volcanic explosion // J. of Geodynamics. 1985. V.3. N 3/4. P.327-349.
11. Johnson J.B., Lees J.M. Plugs and chugs – seismic and acoustic observation of degassing explosions at Kamchatka, Russia and Sangay, Ecuador // J.V.G.R. 2000. V.101. N. P.67-82.
12. Johnson J.B. Lees J.M. Gordeev E.I. Degassing Explosions at Karymsky Volcano, Kamchatka G. R. L. // 1998. N. 21. Vol.25. P.3999-4002.
13. Johnson J.B. Interpretation of infrasound generated by erupting volcanoes and seismo-acoustic energy partitioning during Strombolian explosions // Washington. 2000. 159 p.
14. Ozerov A.Y., Ispolatov I., Lees J.M. Modeling Strombolian eruptions of Karymsky volcano, Kamchatka, Russia // J. V. G. R. 2003. N122. P.265-280.