



УДК 550.348.436+550.342

П. П. Фирстов<sup>1</sup>, А. Б. Белоусов<sup>2</sup>, Е. Р. Махмудов<sup>1</sup>,  
М. Г. Белоусова<sup>2</sup>, Д. Фи<sup>3</sup>, П. Э. Избеков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Камчатский филиал Геофизической службы РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский

<sup>2</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский

<sup>3</sup> Геофизический институт Аляскинского университета,  
г. Фэйрбанк, Аляска, США

## Оценка количества газа, выброшенного эксплозиями при извержении вулкана Толбачик в январе-феврале 2013 г., по данным регистрации воздушных ударных волн

На основании оценки расхода лавы и регистрации воздушных ударных волн в январе-феврале 2013 г., во время извержения трещинного Толбачинского извержение имени 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, сделана оценка весового содержания эксплозивного газа. Для рассматриваемого извержения, весовое содержание эксплозивного газа почти в два раза больше по сравнению с извержением Южного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения в 1976 г.

### Введение

Трещинное Толбачинское извержение имени 50-летия Института вулканологии (ТТИ-50) началось 26 ноября 2012 г. в южной ареальной зоне шлаковых конусов Плоского Толбачика, именуемой Толбачинским Долом (рис. 1). Здесь в 1975–1976 гг. произошло Большое трещинное Толбачинское извержение (БТТИ), в результате которого в 18 км от кратера Плоского Толбачика образовались три конуса Северного прорыва (СП) и на последней стадии в 28 км конус Южного прорыва (ЮП). Детальное описание БТТИ сделано в монографии [1], в которой подведен итог плодотворных работ на этом извержении всего коллектива Института вулканологии ДВО РАН.

БТТИ дало богатый материал для изучения воздушных ударных волн, сопровождающих различные формы проявления вулканической активности. Впервые в мировой практике вулканологических исследований было реально обосновано и показано, что акустические сигналы диапазона 1–10 Гц, связанные с разрушением газовых пузырей при стромболианском типе активности и нестационарными процессами, обусловленными фрагментацией магмы при вулканическом типе активности [5, 7], являются *слабыми воздушными ударными волнами* (ВУВ). Причём характерное время длительности импульса избыточного давления для вулканических ВУВ, в основном, определяется размером кратера [8].

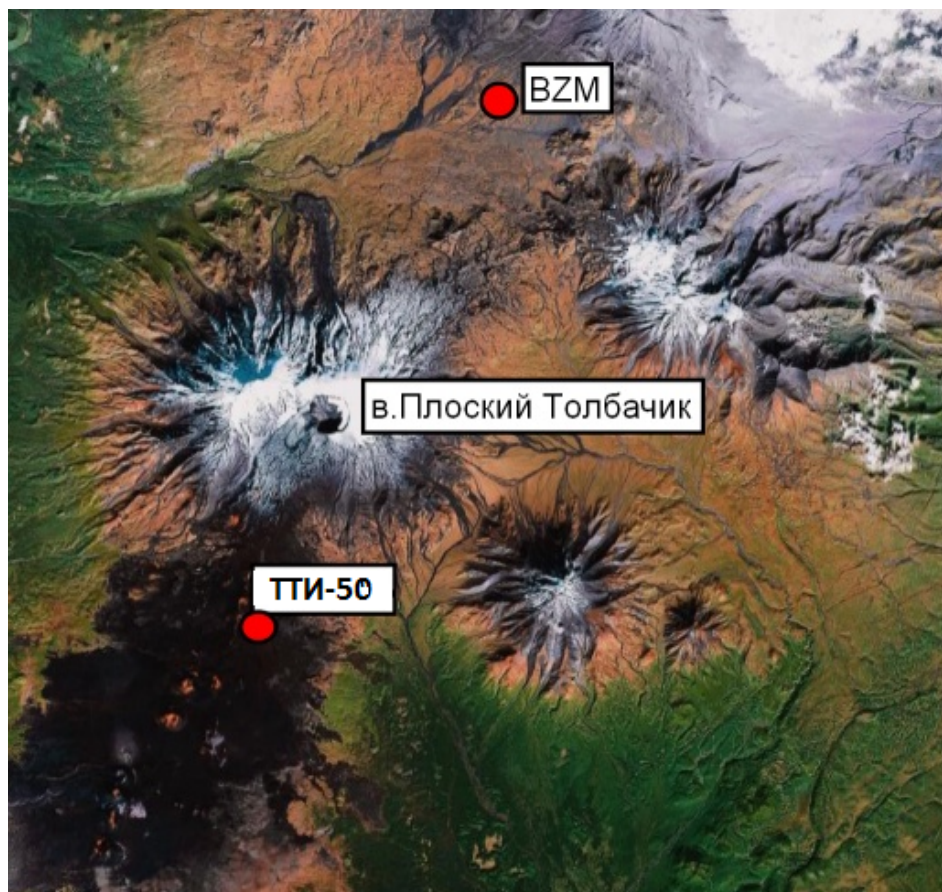
Лавы трещинных извержений Толбачинского дола имеют базальтовый состав и сходны с гавайскими лавами типа *пахоэхо* (волнистые лавы) и *аа* (обломочные или шлакомелкоглыбовые лавы), покрывающими значительные площади. Соответственно, трещинные извержения Толбачинского дола мож-

но отнести к стромболианскому типу, а в некоторых случаях даже к гавайскому типу. С точки зрения физики, эти типы извержений соответствуют барботирующему режиму истечения силикатного расплава на дневную поверхность, для которого характерна интенсивная дегазация с возникновением условий для быстрого роста и всплывания отдельных газовых «пузырей». При таком режиме разрушение оболочки «пузыря» на поверхности сопровождается возникновением как слабых ВУВ, так и сейсмического сигнала за счёт воздействия на магму волны разгрузки, распространяющейся в подводном канале.

Количество газа, участвующего в процессе извержения — одна из важнейших характеристик активности вулкана. Возможность оценки количества свободно выделяющегося газа по акустическому излучению, возникающему при разрушении газовых пузырей, на примере трёх извержений стромболианского типа, показана в работе [7]. При этом для ЮП БТТИ был оценён расход лавового материала, что дало возможность оценить весовое содержание газа. В данной работе осуществлена оценка эксплозивного газа и его весового содержания в лаве для ТТИ-50 в январе-феврале 2013 г.

### Описание извержения в феврале-январе 2013 г.

Исходными данными для данной работы послужили данные полученные за два периода наблюдений: в январе, выполненные А.Б. и М. Г. Белоусовыми; и в феврале 2013 г., выполненные П. Э. Избековым. По наблюдениям 23 января 2013 г. ТТИ-50 носило стромболианско-гавайский характер, с умеренной эксплозивной деятельностью во вновь об-



**Рис. 1.** Расположение центра излияния лавовых потоков ТТИ-50 в январе-феврале 2013 г. и радиотелеметрической сейсмической станции (РТСС) BZM.

разованном шлаковом конусе с диаметром кратера  $\sim 200$  м. На дне конуса располагалось озеро жидкой лавы, на поверхности которого в 3–4 местах происходил прорыв газовых пузырей. Разрушение пузырей проявлялось в частых разнообразных по форме (кинжальных вертикальных и косонаправленных, веерообразных) выбросах вулканических бомб и обрывков лавы (жидких, сильно вспененных) на высоту до 150 м (рис. 2а,г).

Одновременно отмечалась интенсивная эффузивная деятельность с резкими вариациями расхода лавы. Жидкая базальтовая лава текла по системе лавовых труб и появлялась на поверхность ниже шлакового конуса на расстоянии около одного километра (рис. 2б). Основной исток, через который разгружалось около 80% лавы, имел ширину около 5 метров при скорости течения  $\sim 2$  м/с. Резкое уменьшение расхода лавового материала (рис. 2в) позволило оценить глубину лавовода ( $\sim 5$  м) и общий расход лавы через основное русло в  $20\text{--}30$  м<sup>3</sup>/с. При объёмном весе лавы (содержащей взвешенные пузырьки газа)  $\rho = 2,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> это составит около  $5,8 \cdot 10^4$  кг/с.

По наблюдениям П. Э. Избекова, в середине февраля 2013 г. характер извержения мало чем отличался от январского, но был стабильным. Вблизи жерла извергающегося вулкана на расстоянии 1000 м был

установлен пьезокерамический микробарограф, позволяющий регистрировать волновые возмущения в атмосфере в диапазоне 0,01–30 Гц, который проработал почти трое суток (11–13 февраля).

#### Исходные данные и методика обработки

Объективной оценкой активности вулкана может быть интенсивность вулканического дрожания (ВД), квазигармонического колебания почвы в диапазоне частот 0,2–3 Гц, сопровождающие истечение лавы или пепло-газовой смеси из кратера вулкана. В работе [7] показано, что мощность вулканического дрожания при СП и ЮП БТТИ была пропорциональна расходу тefры. Исходя из этого, для сопоставления активности вулкана за рассматриваемые периоды привлекались спектральные и динамические характеристики ВД, зарегистрированного на ближайшей РТС BZM, расположенной в 20 км от извержения (рис. 1). Обработка цифровых сигналов осуществлялась программой DIMAS [4].

Спектральная плотность мощности ВД в январе и в феврале сохраняла стабильность с шириной спектрального пика 0,6–2 Гц по уровню  $-10$  дБ от максимума (рис. 3). На огибающих ВД с постоянной времени 100 с уровень ВД, составлял  $\sim 0,4$  мкм/с для сравниваемых дат – 23 января и 10–14 февраля 2014 г. (рис. 4а,б). Это даёт основание предпола-



**Рис. 2.** Эксплозивная активность ТТИ-50 23 января 2013 г. (а), русло основного лавовода при различном расходе лавы (б, в), эксплозивная деятельность 13 февраля 2013 г. (г). а, б, в — фото М. Г. Белоусовой, г — фото П. Э. Избекова.

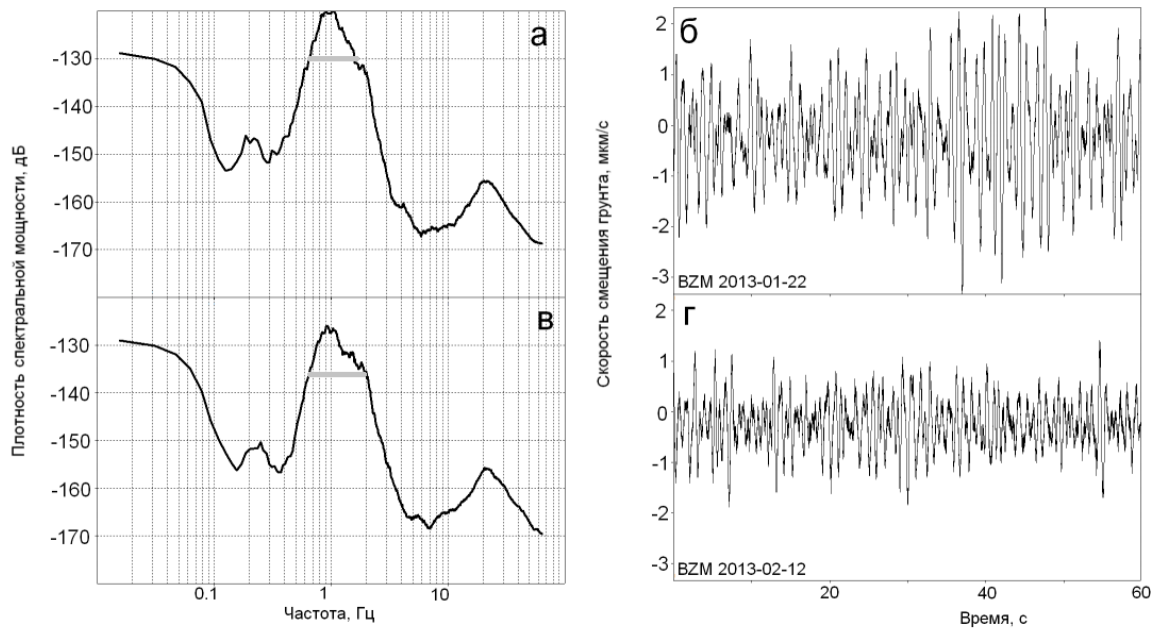
гать близкие значения интенсивности извержения и, соответственно, расхода лавы на эти даты. Но если в феврале все три дня амплитуда огибающей скорости колебания грунта была постоянной ( $\dot{A} = 4$  мкм/с), то 23 января наблюдались вариации огибающей ВД, хотя в среднем сохранила те же самые значения. Динамика акустического сигнала 11–13 февраля подвергалась незначительным вариациям с двойной амплитудой  $\sim 30$  Па (рис. 4б).

#### Особенности генерации воздушных ударных волн во время извержения ТТИ-50

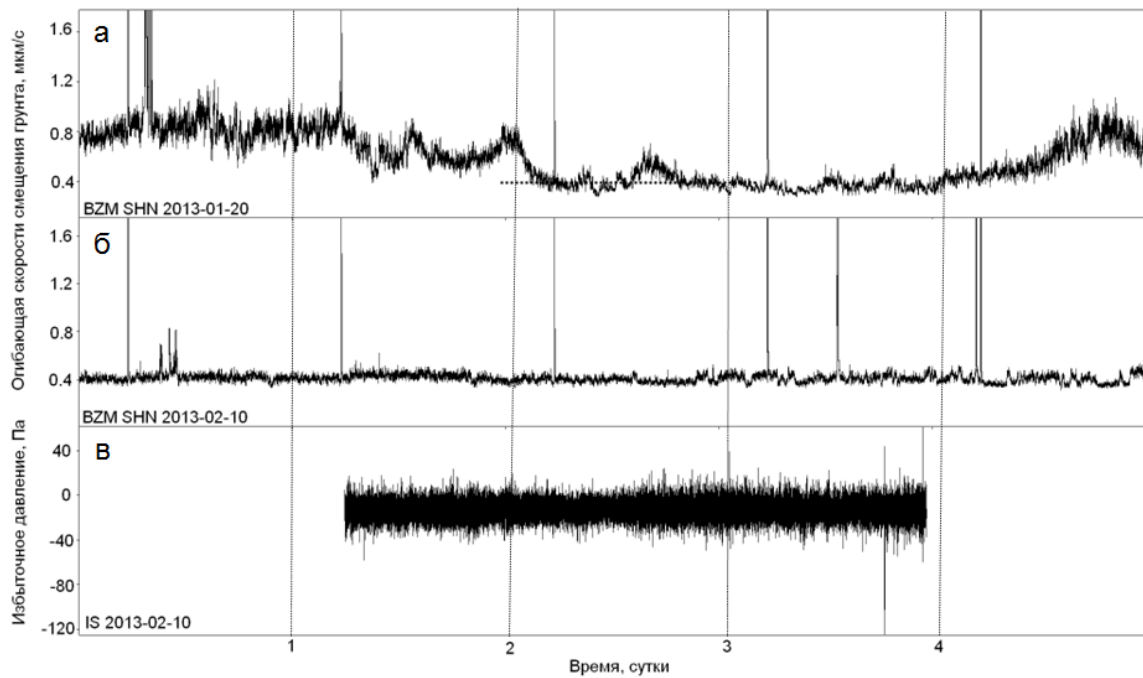
На рис. 5а приведён 6 минутный фрагмент записи акустического сигнала, сопровождающего извержение, на котором хорошо видны импульсные сигналы от извержения, наложенные на низкочастотные флуктуаций давления. Импульсные сигналы представляют воздушные ударные волна (ВУВ), которые по форме импульса, вписываются в классификацию, предложенную в работе [7], и представляют собой, в основном, тип ВУВ связанных с разрушением газовых пузырей на поверхности лавы.

Большинство акустических импульсов хорошо сбалансированы ( $I_+ \sim I_-$ ) с длительностью фазы сжатия  $\tau_+ = 0,3$  с. При этом радиус сферической области повышенного давления  $a = c_0 \tau_+$  (где  $c_0$  — скорость звука в воздухе), близкий к радиусу кратера, составит  $\sim 100$  м, что совпадает с визуальными данными. Форма фазы сжатия для таких ВУВ достаточно хорошо может быть описана синусоидой (рис. 4б). Реже встречаются ВУВ с несбалансированным импульсом и  $\tau_+ \sim 0,5$  с (рис. 5в,г). Такие импульсы, по-видимому, связаны с выбросом в атмосферу аномального количества ювенильного пара, конденсация которого ведёт к затягиванию фазы сжатия и разбалансировки импульсов в пользу фазы разрежения  $I_+ < I_-$  [9]. В некоторых случаях на временных отрезках, длительностью не более 30 с, наблюдалась квазипериодичность, с интервалом времени между импульсами  $\sim 2$  с (рис. 5б, выделено квадратом).

Оценка количества эксплозивного газа по параметрам АС для некоторых извержений стромболианского типа вулканов Камчатки сделана в работе [8],



**Рис. 3.** Спектральная плотность мощности (а, в) и образцы соответствующих записей вулканического дрожания длительностью в одну минуту (б, г) 22 января и 12 февраля 2013 г.



**Рис. 4.** Огибающая вулканического дрожания на РТСС BZM (20 км от кратера) с постоянной времени 100 с: а – 20–24 января, б – 10–14 февраля, в – запись микробарографом ударно-волновых эффектов на расстоянии один км, сопровождавших эксплозивную деятельность 11–13 февраля 2013 г.

поэтому представляют интерес оценки количества эксплозивного газа и для ТТИ-50, сделанные по той же методике, и сравнение с оценками, выполненными для ЮП БТТИ.

В акустическом приближении, по форме акустической волны в атмосфере, зарегистрированной на некотором расстоянии  $R$  от источника, объём вытесненного взрывом воздуха ( $\Delta V$ ) можно опреде-

лить по импульсу фазы сжатия ( $I$ ), который соответствует объёму эксплозивного газа, выброшенного в атмосферу [2]:

$$\Delta V = \frac{4\pi R}{\rho_0} \int_0^{\tau_1} I(R, \tau) d\tau \quad (1)$$

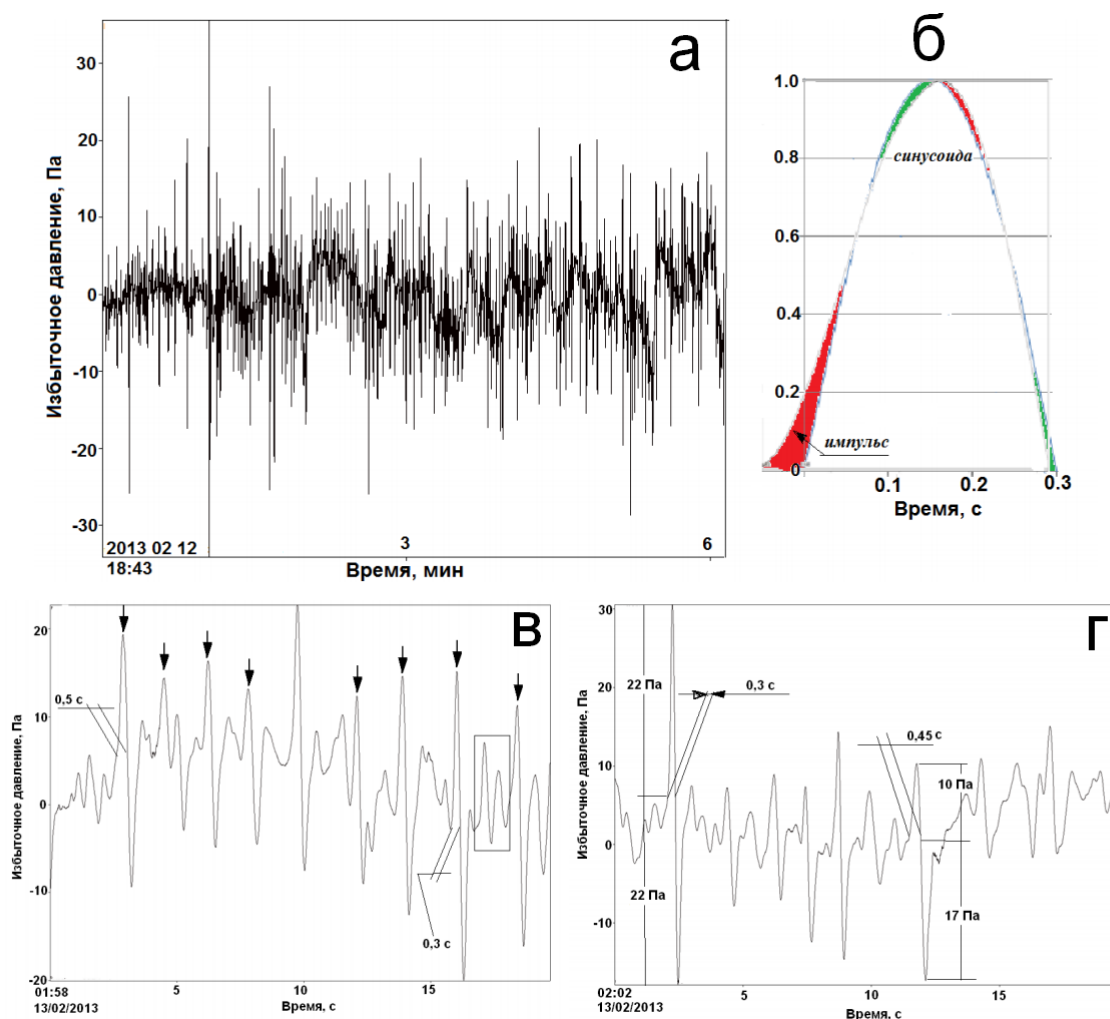


Рис. 5. Фрагмент записи ВУВ 12 февраля 2013/ г. длительностью 20/ с (а), сравнение формы фазы сжатия ВУВ с синусоидальным сигналом (б), фрагмент записи ВУВ длительностью 20/ с (в, г).

где:  $\rho_0$  — плотность атмосферного воздуха,  $\tau_1$  определяется из условия  $I(0, \tau_1) = 0$ . Интеграл для импульса фазы сжатия синусоидальной формы вычислялся по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \iint \Delta P_+ \cdot \sin \frac{\pi t}{\tau_+} dt &= - \int \Delta P_+ \frac{\tau_+^2}{\pi} \cdot \cos \frac{\pi}{\tau_+} t dt = \\ &= \Delta P_+ \frac{\tau_+^2}{\pi^2} \cdot 2 \sin \frac{\pi t}{\tau_+} \Big|_0^{\tau_+/2} = 2 \Delta P_+ \frac{\tau_+^2}{\pi^2} \quad (2) \end{aligned}$$

Рассчитаем весовое содержание взрывчатого газа, выбрасываемого в атмосферу при извержении ТТИ-50 в январе-феврале 2013 г., а также проведем сравнения с извержением ЮП БТТИ, исходя из данных приведенных в работе [8].

Объем газа в одном «пузыре» для ТТИ-50 в среднем составил  $2,6 \cdot 10^3 \text{ м}^3$  или при плотности перегретого пара  $0,17 \text{ кг/м}^3$  при температуре  $1000^\circ \text{C}$  [2] его масса составит  $442 \text{ кг/с}$ . Учитывая, что в среднем выбросы наблюдались с периодичностью  $1,8 \text{ с}$ , то расход взрывчатого газа, по данным акустических измерений, составлял  $245 \text{ кг/с}$ . Сопоставление рас-

хода газа и лавы даёт оценку весового содержания взрывчатого газа при извержении ТТИ-50 в начале 2013 г. почти в 2 раза большую, по сравнению с весовым содержанием газа для ЮП БТТИ.

Следует отметить, что количество взрывчатого газа рассчитанного на основании акустического излучения даёт нижний предел растворённого газа в магме, т. к. не учитывается газ, выделяющийся во время движения магмы, и оставшийся в ней в виде пузырьковых включений.

## Выводы

В настоящее время акустический метод для изучения физики взрывчатого процесса и определения динамических характеристик извержения получил широкое распространение в вулканологической практике [10, 11]. Опираясь на собственный опыт и опыт, полученный при вулканических извержениях в других районах мира, необходимо создавать пункты регистрации волновых возмущений в атмосфере вблизи активных вулканов Камчатки с целью мониторинга их взрывчатой активности.

**Список литературы**

1. Большое трещинное Толбачинское извержение 1975–1976. М.: Наука, 1984. 637 с.
2. Вукалович В. П. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. М.: Энергия, 1966. 398 с.
3. Губкин К. Е. О подобии взрывов // Физика Земли. 1978. № 10. С. 49–60.
4. Дроздин В. А., Дроздин Д. В. Активность вулкана Безымянного 9 мая 2006 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1. Вып. 9. С. 105–110.
5. Сторчевус А. В. Исследование параметров воздушных волн Южного прорыва Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 1987. № 1. С. 62–68.
6. Токарев П. И. Низкочастотное вулканическое дрожание // Вулканология и сейсмология. 1982. № 6. С. 56–78.
7. Фирстов П. П., Адушкин В. В., Сторчевус А. В. Ударные воздушные волны, зарегистрированные во время Большого трещинного извержения в сентябре 1975 г. // ДАН. 1978а. Том. 259. № 5. С. 1078–1081.
8. 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.
9. Фирстов П. П., Пономарёв Е. А. Влияние магматической воды на ударно-волновые эффекты взрывных вулканических извержений // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 282 – 290.
10. Johnson J. B., Aster R. C. Relative partitioning of acoustic and seismic energy during Strombolian eruptions // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2005. 148. P. 334–354.
11. Ripepe M., Marchetti E., Olivieri G. Infrasonic monitoring at Stromboli volcano during the 2003 effusive eruption: insights on the explosive and degassing process of an open conduit system // Journal of Geophysical Research 2007. 112. P. 256–271.