



АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ МИКРОСЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ ФУМАРОЛЬНЫХ ПОЛЕЙ МУТНОВСКОГО ВУЛКАНА

А. Рзабекова¹, С.С. Абраменков^{1,2}, А.В. Яковлев², И.Ю. Кулаков^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

e-mail: s.abramenkov@nsu.ru

Частотно-временной анализ 40 часов сейсмических записей временной сейсмологической сети, выполненный с помощью систематической визуальной инспекции сейсмограмм, спектрограмм и спектров сигналов в небольших временных окнах (от 30 с до 10 мин), позволил выделить в районе Мутновского фумарольного поля несколько проявлений вулканической сейсмичности, а также сигналы невулканического характера. К первым относятся сигналы, интерпретируемые как вулкано-тектоническое землетрясение (найдено в единственном экземпляре), множественные рои гибридных и длиннопериодных землетрясений, а так же устойчивый (постоянный в течение 40 часов) микросейсмический сигнал газо-гидротермальной активности фумарольных полей в северо-восточном кратере вулкана. Для конкретных станций сети были рассмотрены различия между одновременно записанными сигналами, сделана оценка влияния естественных факторов, характерных для изучаемого района: гидрогеологического и метеорологического.

Фумаролы, газо-гидротермальная активность, вулканическая сейсмичность, частотно-временной анализ

MICROSEISMICITY SPECTRAL FEATURES ANALYSIS OF THE MUTNOVSKY VOLCANO FUMAROLE FIELDS AREA

A. Rzabekova¹, S.S. Abramenkov^{1,2}, A.V. Jakovlev², I.Yu. Koulakov^{1,2}

¹Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

e-mail: s.abramenkov@nsu.ru

Time-frequency analysis of 40-hour seismic records of the temporary seismological network, performed using a systematic visual inspection of seismograms, spectrograms, and signal spectra in small time windows (from 30 s to 10 min), made it possible to identify several manifestations of volcanic seismicity in the Mutnovsky fumarole field area, as well as some non-volcanic signals. The former includes signals interpreted as a volcano-tectonic earthquake (only a single event was found), multiple swarms of hybrid and long-period earthquakes, as well as a stable (constant for 40 hours) microseismic signal likely related to the gas-hydrothermal activity of fumarole fields in the northeastern crater of the volcano. For specific stations of the network, the differences between simultaneously recorded signals were considered, an assessment was made of the influence of natural factors characteristic of the study area: hydrogeological and meteorological.

Fumaroles, gas-hydrothermal activity, volcanic seismicity, time-frequency analysis

ВВЕДЕНИЕ

Целью данного исследования является детальное изучение поля сейсмических волн в относительно компактном временном промежутке на конкретном геологическом объекте. Объект исследования – активные фумарольные поля внутри кратера вулкана Мутновский, который находится в южной части полуострова Камчатка, в 75 км от г. Петропавловск-Камчатский. Данный вулкан известен повышенной газо-гидротермальной активностью, на периферии вулкана находится крупнейшая в России геотермальная электростанция – Мутновская ГеоЭС с установленной мощностью в 50 МВт.

Мутновский – стратовулкан сложного строения с абсолютной высотой 2324 м, склоны которого местами весьма круто взбираются с высоты всего в 500 м. В тектоническом плане он обычно рассматривается совместно с вулканом Горелый, располагающимся в 15 км к северо-западу. Обе магматические системы относятся к современному этапу эволюции Курило-Камчатской островной дуги, а точнее, к южному сегменту восточного вулканического фронта [Gavrilenko et al., 2016]. Морфологически вулкан Мутновский представляет собой хребтообразный горный массив, состоящий из врезанных друг в друга разновозрастных конусов (пронумерованных от 1 до 4, однако наиболее древний, Мутновский-1, полностью эродирован) [Мелекесцев и др., 1987]. Современный этап деятельности вулкана связан с активной воронкой (active funnel – AF, рис. 1) – молодым взрывным кратером, возникшим на общем гребне Мутновского-3 и Мутновского-4 (рис. 1, а). Воронка имеет овальную форму с длиной осей 300 и 450 м, пологое днище на 1530 м и крутые скальные стенки высотой от 80 до 190 м.

С момента своего возникновения активная воронка Мутновского является местом проявления не только эруптивной, но и интенсивной газо-гидротермальной деятельности. Здесь находятся самые мощные, ответственные за 80 % всей эмиссии вулкана, фумаролы, которые имеют наивысшее содержание магматических компонентов и отличаются высокой температурой (520 °C) [Zelenski, Bortnikova, 2005]. В северо-восточном кратере (NE) также располагаются группы газо-гидротермальных источников. Несмотря на то что терминология в литературе несколько различается, в целом, исследователи выделяют две основные группы: верхнее (UF) и нижнее (BF) фумарольные поля (см. рис. 1).

Несмотря на близкое расположение двух групп газо-гидротермальных систем, разделяют их по причине различий в составе газов. В обоих случаях основным источником пара, судя по его изотопному составу, являются метеорные воды соседнего кратерного ледника на высоте 1500 м [Eichelberger et al., 2009]. В случае BF газы имеют крайне высокие соотношения HCl/S. Разительно отличается состав UF: здесь преобладает довольно высокая концентрацией метана, однако кислотный состав гораздо сильнее разбавлен водяным паром [Zelenski et al., 2012]. Растворы же в гидротермальной системе уникальны из-за чрезвычайно высокого содержания Cl, Cr, Ni, Co, Ti, V и B [Бортникова и др., 2007].

Для специалистов-сейсмологов интерес представляет множество сейсмических сигналов вулканического характера, в особенности, сигнал, связанный с газо-гидротермальной активностью конкретного вулкана. На удивление авторов, в литературе не так много примеров подобных исследований. В статье [Giudicepietro et al., 2019] описан эксперимент в чем-то схожий с рассматриваемым в данной работе. Объектом исследования авторов была фумарола Pisciarelli (Италия), вокруг которой на расстоянии в 8, 20 и 42 м располагались три сейсмические станции, оснащенные трехкомпонентными сенсорами. Авторы отмечают узкий спектральный пик на частоте порядка 10 Гц. Однако в данном исследовании использовались всего три сейсмические станции в практически идеальных для регистрации данного сигнала условиях. Как может выглядеть подобная сейсмичность в более сложных условиях?

СЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В августе 2020 г. сотрудники лаборатории сейсмической томографии и лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН установили сеть из 16 временных сейсмических станций внутри северо-восточного кратера вулкана Мутновский. Геометрическое покрытие включало район верхнего и нижнего фумарольных полей, а также южные подступы активной воронки (см. рис. 1). Сеть была установлена 16 августа и демонтирована 18 августа: итоговое время одновременной работы всех станций составило около двух суток (чуть более 40 часов).

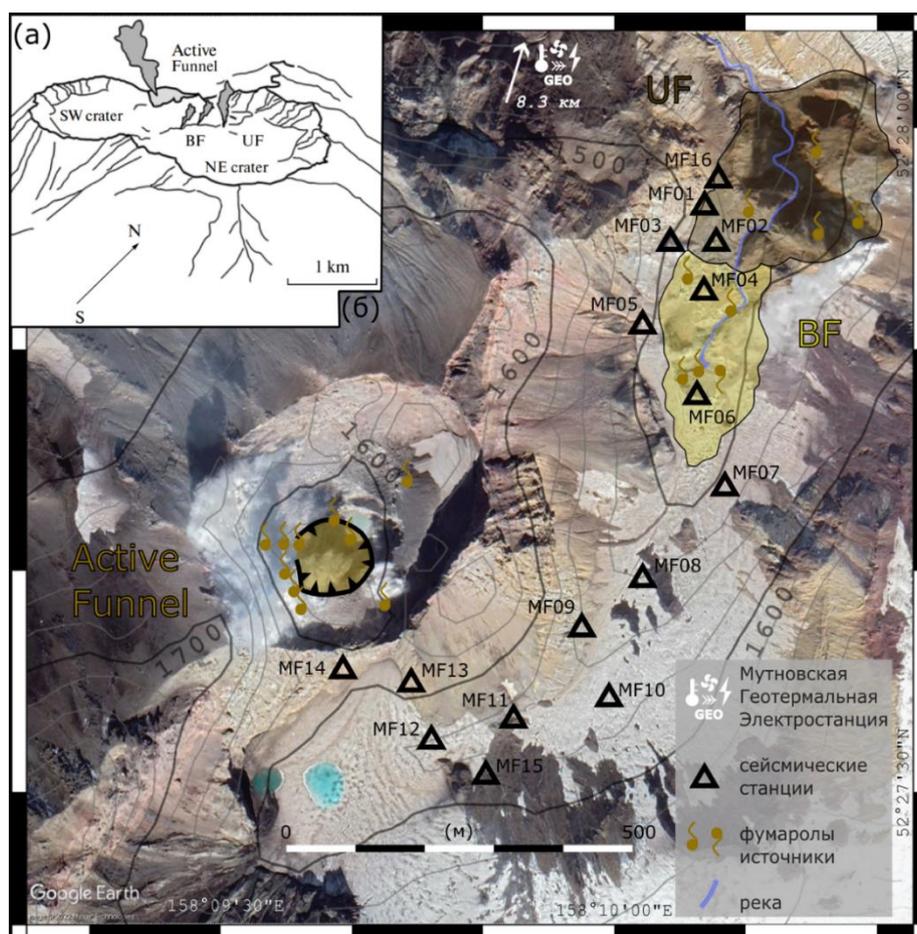


Рис. 1. Эскиз вулкана с основными структурными особенностями, приведенный в [Zelenski et al., 2012] (a); б – расположение сети сейсмических станций, использованных в эксперименте, топография и геологические особенности вулкана, нанесенные на спутниковый снимок местности

Большинство постоянных и временных сейсмологических станций довольствуются дискретизацией в 50 Гц, т. к. целевые сейсмические волны от тектонических землетрясений обычно не содержат частоты выше 5–15 Гц. Как правило, чем глобальнее задача исследования, тем более низкие частоты (и соответственно более длительные периоды) волн интересуют специалистов (океанские микросейсмы, собственные колебания Земли). В этом плане эксперимент на Мутновском фумарольном поле отличается нестандартно высокой для сейсмологии частота дискретизации – 400 Гц (частота Найквиста – 200 Гц). Характеристики инструментов и выбранные параметры позволяют взглянуть не только на целевые сигналы вулканической природы, но и на более высокочастотные сейсмические сигналы антропогенного и естественного происхождения, которые обычно остаются за рамками сейсмологических исследований с более традиционными параметрами системы наблюдения.

АНАЛИЗ

Суть данной работы заключается в изучении частотно-временных характеристик записанных сигналов и попытке их интерпретации. Анализ выполнялся путем систематической визуальной инспекции сигнала во временной и частотной области. Для этого в дополнение к исходным сейсмограммам строились спектрограммы и амплитудные спектры сигналов в скользящем окне. Длительность окна была зафиксирована в 10 мин для исходных сейсмограмм (рис. 2), однако для более детального анализа найденных спектральных особенностей сигналов применялись различные комбинации с меньшим размером окна и фильтрацией исходных записей. Записанные в районе Мутновского фумарольного поля сигналы можно разделить на проявления вулканической сейсмичности и источники сигнала невулканического характера.

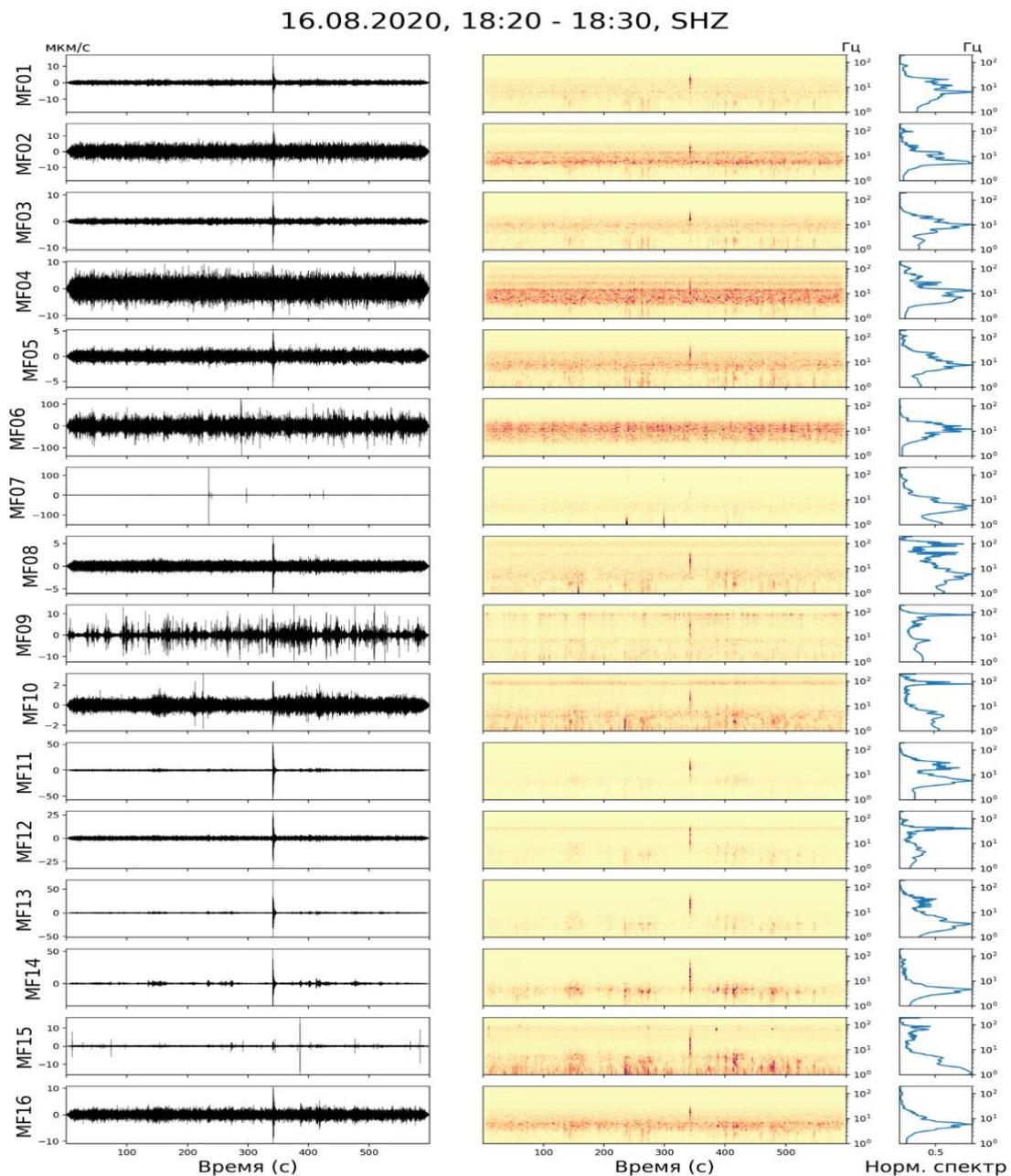


Рис. 2. Пример визуализации данных (окно длительностью 10 мин, вертикальная компонента) для последующего частотно-временного анализа. Амплитудная нормировка спектрограмм линейная, спектрограммы получены быстрым преобразованием Фурье с размером окна 2 с, без перекрытия

ВУЛКАНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ, ДЛИННОПЕРИОДНЫЕ И ГИБРИДНЫЕ СОБЫТИЯ

Вулкано-тектонические (volcano-tectonic, VT) землетрясения, как следует из названия, родственны по своему механизму с тектоническими землетрясениями и присутствуют во всех классификациях вулканической сейсмичности [Abramenkov, 2021]. Длительность и амплитуда сигналов могут существенно различаться, однако, в спектральной области вулкано-тектоническое землетрясение сложно отличить от чисто-тектонического, что говорит о схожем механизме: разрядка напряжений, накопленных упругой средой (вызванных тектонической обстановкой или же движением магматического расплава). Радикально отличный (не столь деструктивный) механизм, по-видимому, имеют крайне характерные для вулканической сейсмичности *длиннопериодные* (long-period, LP) землетрясения, которые под разными названиями также существуют в различных классификациях вулканической сейсмичности: землетрясение типа-B [Minakami, 1961, 1974], землетрясение IV-типа [Токарев, 1966], или же низкочастотное (low-frequency, LF) событие [McNutt, 1996]. Сигнал LP землетрясения в некоторых случаях имеет четкое первое вступление с коротким высокочастотным спектром, однако в целом характеризуется отличительной гармонической структурой волновой формы и соответственно практически монохромным частотным составом. Наконец, в некоторых классификациях вулканической сейсмичности выделяют *гибридные* землетрясение (hybrid earthquake), для которых в частотно-временной области характерны общие черты с сигналами как от VT, так и LP землетрясений [Lahr et al., 1994].

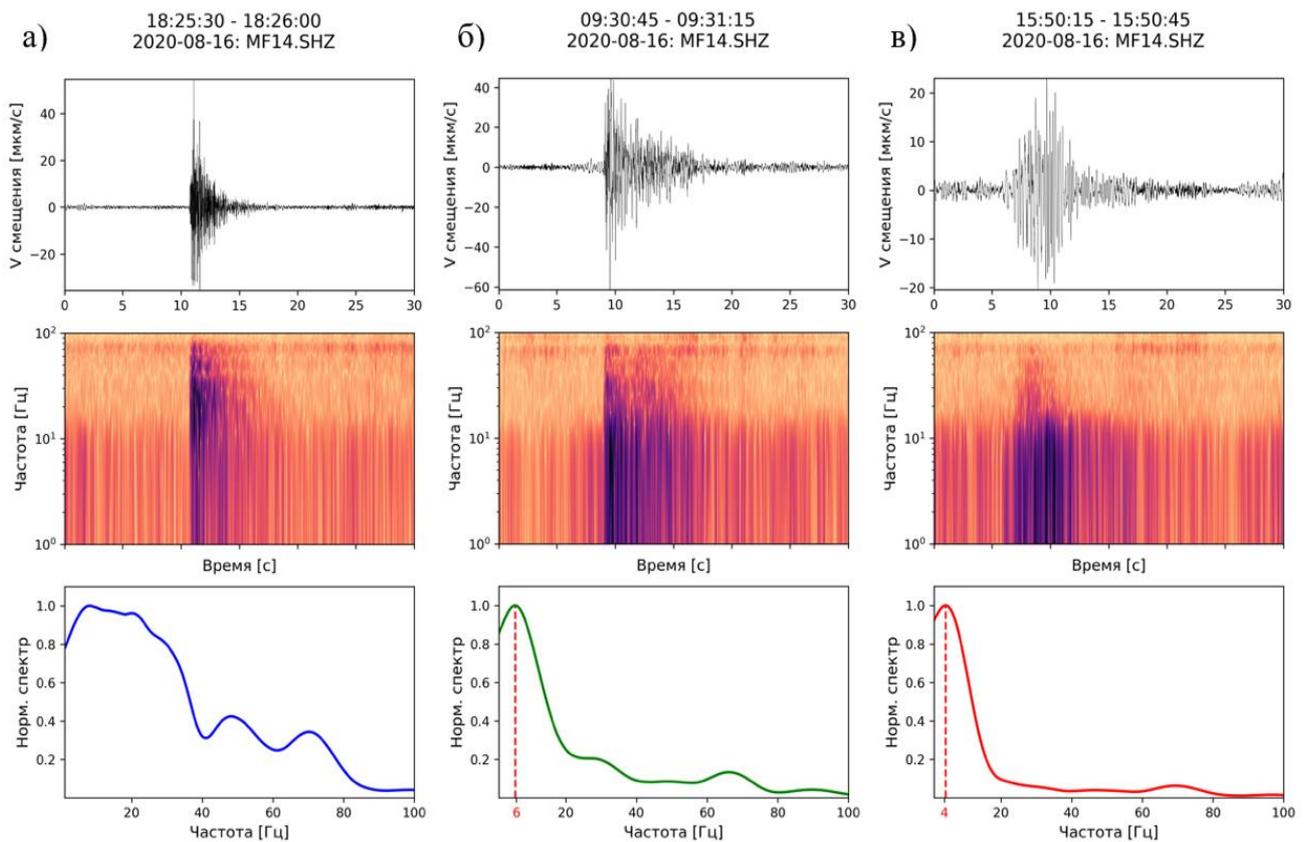


Рис. 3. Сигналы от для трех типов вулканических землетрясений на Мутновском вулкане, записанные ближайшей к активной воронке станцией MF14. Длительность временного окна 30 с; применен полосовой фильтр 1–100 Гц; сверху вниз приведены: сигнал вертикальной компоненты скорости смещения (верхний ряд), соответствующие спектрограммы (средний ряд) и спектры (нижний ряд). Интерпретация: а – вулкано-тектоническое землетрясение, б – гибридное и в – длиннопериодное

При визуальном частотно-временном анализе сигналов в 240 окнах длительностью по 10 минут (все 40 часов одновременной записи) было найдено всего одно вулcano-тектоническое (VT) событие (рис. 3, а), зарегистрированное 16 августа в 18 часов 25 минут по UTC (17 августа в 6:25 по местному времени). Оно имеет наибольшие амплитуды (пиковые порядка 50 мкм/с) на станции MF14 – на станции, наиболее близкой к активной воронке Мутновского вулкана, что сразу же позволяет предположить весьма вероятное положение его гипоцентра в области под активным кратером. Особенности сигнала характерны для VT землетрясения: выраженные первые вступления объемных волн, экспоненциально затухающая coda, широкий спектр первого вступления, а также специфичная форма спектрограммы, связанная с дисперсией энергии поверхностных волн. С учетом различия в системе регистрации эти параметры в целом согласуются с характеристиками вулcano-тектонических землетрясений на данном вулкане, полученными другими исследователями [Кугаенко и др., 2011].

Для изученных данных в районе Мутновского фумарольного поля LP события являются доминирующими на записях сигнала. Можно заметить, что для LP землетрясений действительно характерен узкий спектр с частотами меньше 10 Гц и пиком на ~4 Гц. Амплитуды имеют широкий диапазон до 20 мкм/с. Гибридные же события на Мутновском фумарольном поле проявлены более четкими первыми вступлениями (сходны с VP событиями), однако спектр их coda больше похож на LP события (рис. 3). Таким образом, суммарный спектр гибридного землетрясения, вероятно, представляет собой комбинацию двух «чистых» типов, что позволяет, например, предположить механизм генерации, включающий как хрупкое разрушение, так и последующий резонанс стенок трещины, заполненной флюидом [Chouet, Matoza, 2013].

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ НА ФУМАРОЛЬНОМ ПОЛЕ

Наибольший же интерес в 40 часах данных сейсмичности Мутновского фумарольного поля представляют продолжительные (или даже постоянные на промежутке наблюдения) сигналы. Для демонстрации основных результатов анализа были выбраны пять станций (рис. 4).

Станция MF14, уже знакомая по предыдущему параграфу, выбрана в качестве своеобразного базиса – эта станция сети ближе всего находится к активной воронке и достаточно удалена от верхнего и нижнего фумарольных полей. Четыре другие станции (MF1, MF5, MF3 и MF7 – в порядке относительной удаленности) расположены вблизи фумарольных полей и оказались меньше подвержены воздействию гидрогеологического и метеорологического факторов, чем другие станции. Наблюдаемые спектры сигнала хорошо согласуются с результатами, полученными на фумароле Pisciarelli [Giudicepietro et al., 2019]: на четырех ближних станциях выражен пик в спектре на частотах в 7–12 Гц. Однако на станции возле активной воронки, повторяющаяся эпизодическая, но более амплитудная сейсмичность доминирует в суммарном сигнале.

Гидрологический фактор

Априорные данные об изучаемом районе и сети наблюдения включают информацию о нахождении некоторых станций вблизи реки (рис. 1), текущей по образовавшемуся в северо-восточном кратере ущелью и подпитываемой таянием снежников в юго-западном кратере. Устойчивый сигнал на частоте около ~10 Гц, который был рассмотрен в предыдущем разделе, прослеживается на трех выбранных для анализа станциях (рис. 5). Например, в данных станции MF05, расположенной на склоне в некотором удалении от реки, решающий вклад в спектр, в рамках нашей интерпретации, вносит именно сигнал,

связанный с газо-гидротермальной активностью нижнего фумарольного поля (7–12 Гц). Тем не менее, на спектрограмме и в итоговом спектре можно отметить присутствие соизмеримой по амплитуде и устойчивости во времени добавки более широкополосного сигнала в полосе частот 5–25 Гц. На станциях, находящихся ближе к реке, эта добавка выражена намного сильнее и в частотно-временной области практически маскирует устойчивый «фумарольный» сигнал на 7–12 Гц.

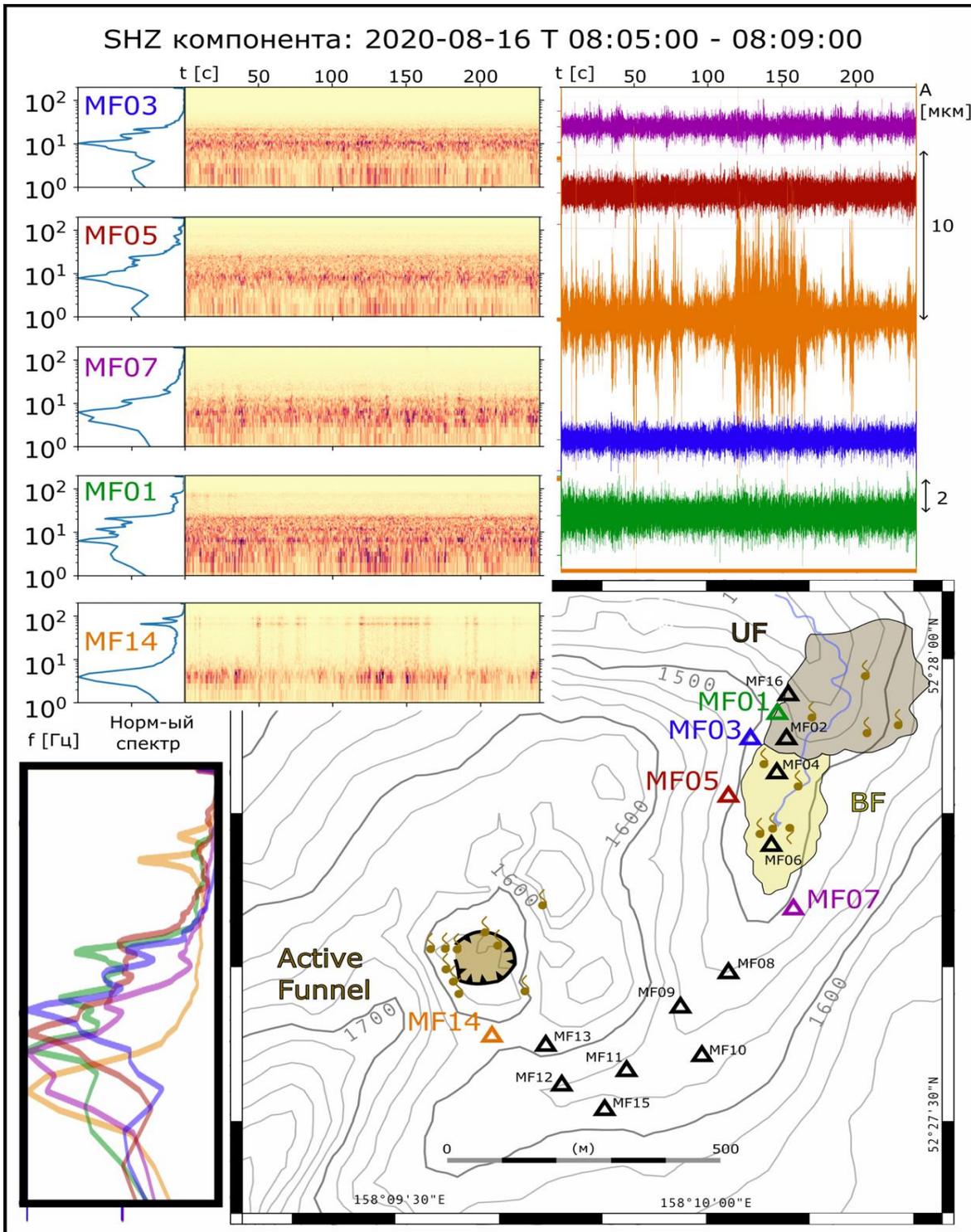


Рис. 4. Примеры частотно-временного анализа сейсмичности для 4-минутного отрезка записей пяти станций, выделенных цветом. Нормированные спектры (левая колонка), спектрограммы (по центру сверху), амплитудно-масштабированные сейсмические записи (справа сверху) и упрощенная геометрия изучаемого района (карта в нижней части, подробности на рис. 1). Применен высокочастотный фильтр с граничной частотой 1 Гц

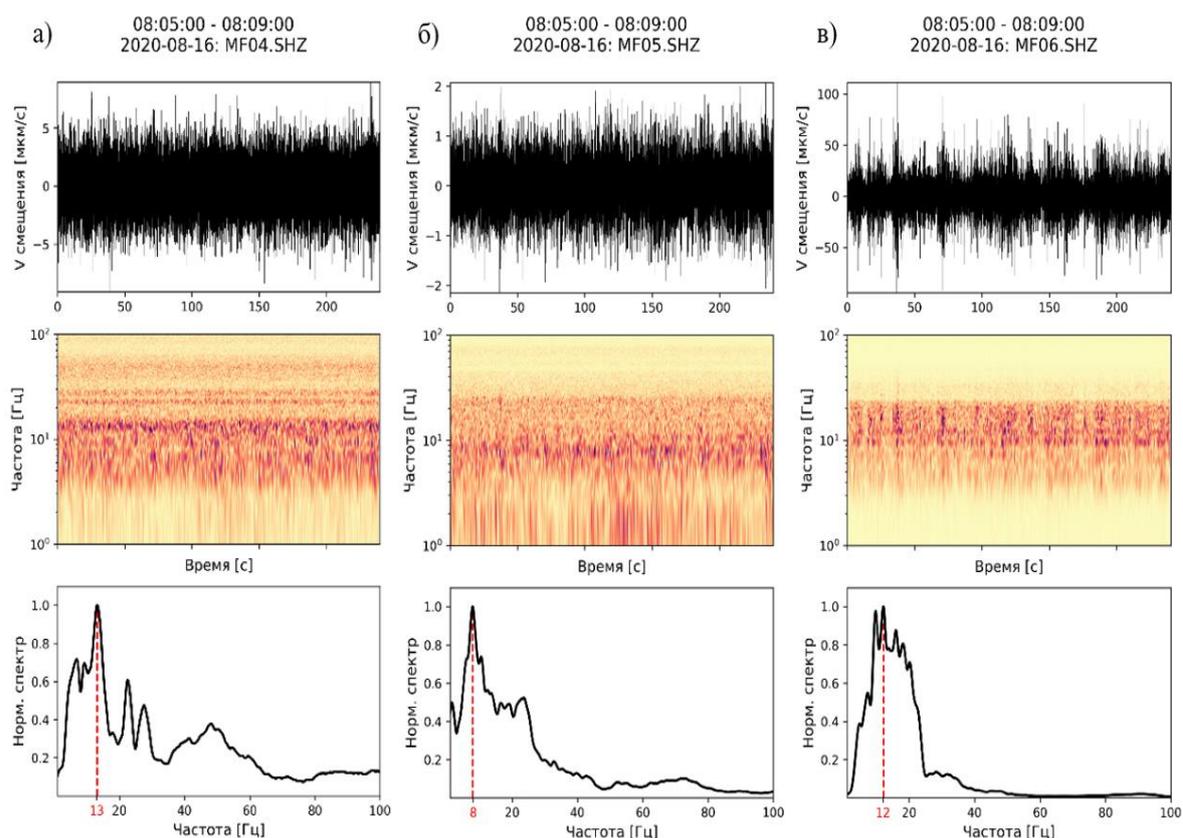


Рис. 5. Особенности сейсмических сигналов, связанные с гидрогеологическим фактором, на примере трех станций, расположенных на разном удалении от текущей по ущелью реки. Сигналы (верхний ряд), спектрограммы (средний ряд) и спектры (нижний ряд) – скорость смещения (вертикальная), окно длительностью 4 минуты, применен высокочастотный фильтр с граничной частотой 1 Гц.

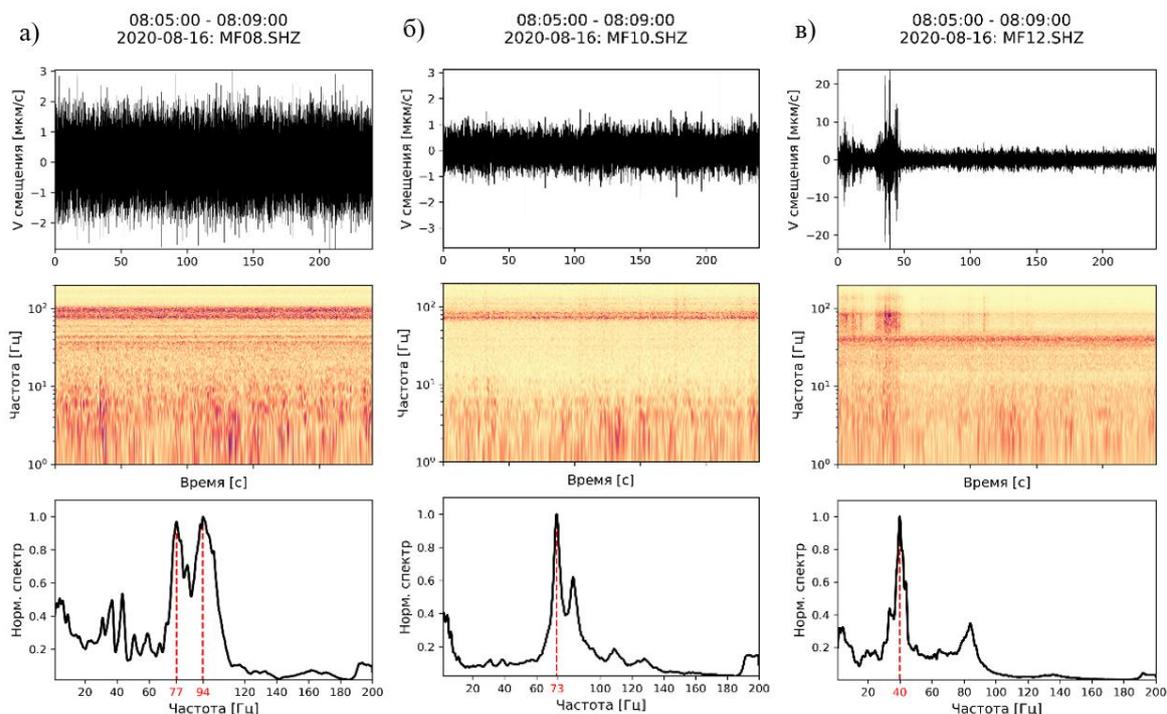


Рис. 6. Особенности сейсмических сигналов, связанные с метеорологическим фактором, на примере трех станций, расположенных на оси (MF08, MF10) и склоне (MF12) ущелья. Сигналы (сверху), спектрограммы (в середине) и спектры (снизу) – скорость смещения (вертикальная), окно длительностью 4 минуты, применен высокочастотный фильтр с граничной частотой 1 Гц

Метеорологический фактор

На Мутновском вулкане узкополосные сигналы с доминирующими частотами в диапазоне от 40 до 100 Гц являются постоянными на станциях MF08–MF12 (см. рис. 2). В анализируемых спектрограммах эти полосы прослеживаются на протяжении всех 40 часов записи. Предположительно, это может быть связано с резонансом склонов ущелья под влиянием ветра, на что указывает наибольшая восприимчивость к этой помехе станций, расположенных в долине, а также таким высокочастотным диапазоном данного сигнала. Для более наглядного представления описываемого эффекта анализировались сигналы на трех наиболее зашумленных станциях (рис. 6). Альтернативным объяснением может быть сигнал генерируемый Мутновской ГеоЭС – однако данная гипотеза не объясняет, почему на некоторых станциях ниже по ущелью (MF03, MF06, MF16, см. рис. 1 и 2), находящихся ближе к ГеоЭС, мы не наблюдаем данной высокочастотной помехи.

Информация об основных частотно-временных характеристиках соответствующих сигналов различной природы за 40 часов наблюдений приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики микросейсмических сигналов в районе Мутновского фумарольного поля

<i>Интерпретация характера сигнала</i>	<i>Амплитуда, мкм/с</i>	<i>Длительность</i>	<i>Диапазон, Гц</i>
VT землетрясение	~50	<10 с	<35
Гибридное землетрясение	~40	<15 с	<30
LP землетрясение	~20	<15 с	<20
Газо-гидротермальная активность	~10	40 ч	8–10
<u>Гидрологический фактор</u>	~100	40 ч	<30
<u>Метеорологический фактор</u>	~20	40 ч	40, ~70

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами был выполнен частотно-временной анализ с помощью систематической визуальной инспекции сейсмограмм, спектрограмм и спектров сигнала в небольших временных окнах (30 с – 10 мин). По его результатам предложена интерпретация источников микросейсмической активности по данным временной сети из 16 станций с короткопериодными сейсмоприемниками за промежуток в 40 часов. В качестве направлений дальнейших исследований с точки зрения обработки сигналов перспективными выглядят два направления: (1) анализ когерентности сигналов, записанных временной сетью; (2) поляризационный анализ трехкомпонентных записей различных станций. Таким образом, можно считать, что данная работа является лишь началом систематического анализа комплексного волнового поля, записанного в районе Мутновского фумарольного поля, выполненным пока лишь с использованием только одной компоненты станций по отдельности. Следующим логичным шагом станет изучение характеристик волнового поля в пространстве, а также попытка локализации отдельных источников сигналов (1), приведенных в табл. 1. И, наконец, изучение структуры записанных колебаний в трех плоскостях (2) поможет понять механизм соответствующего источника.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания в рамках научного проекта FSUS-2022-0019.

ЛИТЕРАТУРА

- Бортникова С.Б., Шарапов В.Н., Бессонова Е.П.** Гидрогеохимический состав источников фумарольного поля Донного Мутновского вулкана (Южная Камчатка) и проблемы их связи с надкритическими магматическими флюидами // Доклады академии наук. – 2007. – № 413 (4). – С. 530–534.
- Кугаенко Ю.А., Нуждина И.Н., Салтыков В.А.** Особенности спектральных компонент вулканических землетрясений на примере вулканов Кизимен, Корякский, Мутновский и Горелый // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2011. – № 2 (18). – С. 102–113.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В.** Динамика активности вулканов Мутновский и Горелый в голоцене и вулканическая опасность для прилегающих районов (по данным тефрохронологических исследований) // Вулканология и сейсмология. – 1987. – № 3. – С. 3–18.
- Токарев П.И.** Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы (1949–1963 гг.). – М.: Наука, 1966. – 120 с.
- Abramenkov S.** Systematic analysis of long-period earthquakes: Gorely volcano, Kamchatka. PhD Thesis – Université Paris Cité, 2021, <https://theses.hal.science/tel-03788405>.
- Chouet B.A., Matoza R.S.** A multi-decadal view of seismic methods for detecting precursors of magma movement and eruption // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2013. – Vol. 252 (B7). – P. 108–175, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.11.013.
- Eichelberger J., Kiryukhin A., Simon A.** The magma-hydrothermal system at Mutnovsky Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia // Scientific Drilling. – 2009. – Vol. 7. – P. 54–59, doi: 10.2204/iodp.sd.7.09.2009.
- Gavrilenko M., Ozerov A., Kyle P.R., Carr M.J., Nikulin A., Vidito C., Danyushevsky L.** Abrupt transition from fractional crystallization to magma mixing at Gorely volcano (Kamchatka) after caldera collapse // Bulletin of Volcanology. – 2016. – Vol. 78 (7). – Article 47, doi: 10.1007/s00445-016-1038-z.
- Giudicepietro F., Chiodini G., Caliro S., De Cesare W., Esposito A. M., Galluzzo D., Lo Bascio D., Macedonio G., Orazi M., Ricciolino P. Vandemeulebrouck J.** Insight into Campi Flegrei caldera unrest through seismic tremor measurements at Pisciarelli fumarolic field // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2019. – Vol. 20 (11). – P. 5544–5555, doi: 10.1029/2019GC008610.
- Lahr J.C., Chouet B.A., Stephens C.D., Power J.A., Page R.A.** Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of the 1989–1990 eruptions at Redoubt volcano, Alaska. // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 1994. – Vol. 62 (1–4). – P. 137–151, doi: 10.1016/0377-0273(94)90031-0.
- Minakami T.** Study of eruptions and earthquakes originating from volcanoes (Part 1 of 3) // International Geology Review. – 1961. – Vol. 3 (8). – P. 712–719, doi: 10.1080/00206816109473633.
- Minakami T.** Seismology of volcanoes in Japan // Developments in Solid Earth Geophysics. – 1974. – Vol. 6. – P. 1–27, doi: 10.1016/B978-0-444-41141-9.50007-3.
- McNutt S.R.** Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: A review of the state-of-the-art and case histories // Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996. – P. 99–146, doi: 10.1007/978-3-642-80087-0_3.
- Zelenski M., Bortnikova S.** Sublimate speciation at Mutnovsky volcano, Kamchatka // European Journal of Mineralogy. – 2005. – Vol. 17 (1). – P. 107–118, doi: 10.1127/0935-1221/2005/0017-107.

Zelenski M.E., Taran Y.A., Dubinina E.O., Shapar' V.N., Polyntseva E.A. Sources of volatiles for a subduction zone volcano: Mutnovsky volcano, Kamchatka // *Geochemistry International*. – 2012. – Vol. 50 (6). – P. 502–521, doi: 10.1134/S001670291204009X.

REFERENCES

Abramenkov S. Systematic analysis of long-period earthquakes: Gorely volcano, Kamchatka. PhD Thesis – Université Paris Cité, 2021, <https://theses.hal.science/tel-03788405>.

Bortnikova S.B., Sharapov V.N., Bessonova E.P. Hydrogeochemical composition of springs at the Donnoe Fumarole field, Mutnovsky volcano (Southern Kamchatka) and problems of their relation with supercritical magmatic fluids // *Doklady Academy of Sciences*. – 2007. – Vol. 413 (3). – P. 410–414.

Chouet B.A., Matoza R.S. A multi-decadal view of seismic methods for detecting precursors of magma movement and eruption // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2013. – Vol. 252 (B7). – P. 108–175, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.11.013.

Eichelberger J., Kiryukhin A., Simon A. The magma-hydrothermal system at Mutnovsky Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia // *Scientific Drilling*. – 2009. – Vol. 7. – P. 54–59, doi: 10.2204/iodp.sd.7.09.2009.

Gavrilenko M., Ozerov A., Kyle P.R., Carr M.J., Nikulin A., Vidito C., Danyushevsky L. Abrupt transition from fractional crystallization to magma mixing at Gorely volcano (Kamchatka) after caldera collapse // *Bulletin of Volcanology*. – 2016. – Vol. 78 (7). – Article 47, doi: 10.1007/s00445-016-1038-z.

Giudicepietro F., Chiodini G., Caliro S., De Cesare W., Esposito A. M., Galluzzo D., Lo Bascio D., Macedonio G., Orazi M., Ricciolino P. Vandemeulebrouck J. Insight into Campi Flegrei caldera unrest through seismic tremor measurements at Pisciarelli fumarolic field // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2019. – Vol. 20 (11). – P. 5544–5555, doi: 10.1029/2019GC008610.

Kugaenko Yu.A., Nuzhdina I.N., Saltykov V.A. Peculiarities of spectral components of volcanic earthquakes on the example of Kizimen, Koryaksky, Mutnovsky and Gorely volcanoes // *Vestnik KARUNTs, Earth Sciences*. – 2011. – Vol. 2 (18). – P. 102–113.

Lahr J.C., Chouet B.A., Stephens C.D., Power J.A., Page R.A. Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of the 1989–1990 eruptions at Redoubt volcano, Alaska. // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 1994. – Vol. 62 (1–4). – P. 137–151, doi: 10.1016/0377-0273(94)90031-0.

Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Ponomareva V.V. Dynamics of activity of Mutnovsky and Gorely volcanoes in the Holocene and volcanic hazard for adjacent areas (according to tephrochronological studies) // *Journal of Volcanology and Seismology*. – 1987. – Vol. 3. – P. 3–18.

Minakami T. Study of eruptions and earthquakes originating from volcanoes (Part 1 of 3) // *International Geology Review*. – 1961. – Vol. 3 (8). – P. 712–719, doi: 10.1080/00206816109473633.

Minakami T. Seismology of volcanoes in Japan // *Developments in Solid Earth Geophysics*. – 1974. – Vol. 6. – P. 1–27, doi: 10.1016/B978-0-444-41141-9.50007-3.

McNutt S.R. Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: A review of the state-of-the-art and case histories // *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996. – P. 99–146, doi: 10.1007/978-3-642-80087-0_3.

Tokarev P.I. Eruptions and seismic regime of volcanoes of Klyuchevskaya group [in Russian]. – Nauka, Moscow, 1966. – 118 p.

Zelenski M., Bortnikova S. Sublimate speciation at Mutnovsky volcano, Kamchatka // *European Journal of Mineralogy*. – 2005. – Vol. 17 (1). – P. 107–118, doi: 10.1127/0935-1221/2005/0017-107.

Zelenski M.E., Taran Y.A., Dubinina E.O., Shapar' V.N., Polyntseva E.A. Sources of volatiles for a subduction zone volcano: Mutnovsky volcano, Kamchatka // *Geochemistry International*. – 2012. – Vol. 50 (6). – P. 502–521, doi: 10.1134/S001670291204009X.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

РЗАБЕКОВА Айгерим – студентка 1-курса магистратуры геолого-геофизического факультета НГУ по специальности геофизика. Основные интересы: комплексная обработка и интерпретация геофизических данных, геотермальная энергия.

АБРАМЕНКОВ Сергей Сергеевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории обработки и анализа сейсмических данных научно-образовательного центра “Газпромнефть-НГУ”. Основные интересы: обработка сейсмических данных, физические механизмы сейсмичности анализ когерентности волнового поля.

ЯКОВЛЕВ Андрей Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: алгоритмы сейсмической томографии, сейсмология вулканов, геодинамика зон коллизии и субдукции, планирование и установка временных сетей сейсмических станций.

КУЛАКОВ Иван Юрьевич – доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: численные методы решения прямых и обратных задач геофизики, методы сейсмической томографии, методы сейсмической томографии.

*Статья поступила в редакцию 12 декабря 2022 г.,
принята к публикации 26 декабря 2022 г.*