

Волновые возмущения в атмосфере, сопровождаящие извержение вулкана Райкоке (Курильские острова) 21–22 июня 2019 г.

© 2020 П. П. Фирстов^{*1}, О. Е. Попов², М. А. Лобачева¹,
Д. И. Будилов¹, Р. Р. Акбашев¹

¹Камчатский филиал Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия

^{*}E-mail: firstov@emsd.ru

Реферат. В сети пунктов инфразвукового мониторинга, расположенных на удалении 336–974 км от влк. Райкоке, зарегистрированы инфразвуковые сигналы (ИС), сопровождавшие наиболее сильные эпизоды его извержения 21–22 июня 2019 г. Выделены ИС двух диапазонов частот: $f = 0.08–0.5$ Гц и $f = 0.004–0.012$ Гц. Первый обусловлен фрагментацией магмы и нестационарными процессами, возникающими во время истечения пепло-газовой смеси из кратера. Второй диапазон ИС связан с формированием эруптивной колонны и возникновением эруптивного облака. В этом случае отдельные эпизоды извержения рассматриваются как непрерывный тепловой источник. На основе кинематических и динамических параметров ИС первого диапазона дана детальная реконструкция хода извержения, с выделением 11 отдельных эпизодов (эксплозий). Волновая картина ИС позволила выделить четыре эпизода (№ 1, 5, 6, 8), для которых характерны эксплозии типа «взрыв», а в остальных случаях происходило высокоскоростное истечение пепло-газовой смеси («продувка») из жерла вулкана. Наиболее длительная «продувка» (№ 9) длилась ~3.5 ч. На основании ИС второго диапазона частот сделана (по методике Ю.А. Гостинцева и Ю.В. Шацких) оценка минимального объема выброшенного в атмосферу пепла – >0.1 км³, что позволяет считать индекс эксплозивной активности этого извержения VEI – 4.

Ключевые слова: вулкан Райкоке, эксплозивное извержение, инфразвук, эруптивное облако, объем изверженного пепла.

Для цитирования: Фирстов П.П., Попов О.Е., Лобачева М.А., Будилов Д.И., Акбашев Р.Р. Волновые возмущения в атмосфере, сопровождавшие извержение вулкана Райкоке (Курильские острова) 21–22 июня 2019 г. *Гео-системы переходных зон*. 2020. Т. 4, № 1. С. 71–81. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.071-081.082-092>

Wave perturbations in the atmosphere accompanying the eruption of the Raykoke volcano (Kuril Islands) 21–22 June, 2019

Pavel P. Firstov^{*1}, Oleg E. Popov², Marina A. Lobacheva¹,
Dmitry I. Budilov¹, Rinat R. Akbashev¹

¹Kamchatka Branch of the Federal Research Center “United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences”, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS, Moscow, Russia

^{*}E-mail: firstov@emsd.ru

Abstract. Infrasound signals (IS), accompanied the most powerful episodes of the Raykoke volcano of the 21–22 June 2019, were registered by the network of observation stations, located at the distances of 335 to 974 km from the volcano. We identified IS of two frequency ranges: $f = 0.08–0.5$ Hz and $f = 0.004–0.012$ Hz. The first one was caused by magma fragmentation and non-stationary processes, appeared during the ash-gas mix outflowing from the crater. The second IS range is associated with an eruptive column forming and an eruptive cloud appearance. In this case the separate eruption episodes are considered as a continuous heat source. On the base of kinematic and dynamic parameters of IS

of the first range, we carried out the detailed reconstruction of the eruption course, there 11 separate episodes (explosions) were distinguished. Wave pattern of IS allowed to defined four episodes (no. 1, 5, 6, 8) as explosions, in other cases a high-speed outflow of ash-gas mix ("blow") occurred from the volcano vent. The most long "blow" (no. 9) lasted for ~3.5 hr. On the base of IS of the second range, we estimated the minimal volume of the ash ejected into the atmosphere (by the methodology of Yu.A. Gostintsev and Yu.A. Shatskih) as $>0.1 \text{ km}^3$, that allows us to assign the index of explosive activity VEI – 4 for this eruption.

Keywords: Raikoke volcano, explosive eruption, infrasound, eruptive cloud, ejected ash volume.

For citation: Firstov P.P., Popov O.E., Lobacheva M.A., Budilov D.I., Akbashev R.R. Wave perturbations in the atmosphere accompanying the eruption of the Raykoke volcano (Kuril Islands) 21–22 June, 2019: translation. *Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 1, p. 82–92. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2020.4.1.071-081.082-092>

Введение

По данным Сахалинской группы реагирования на вулканические извержения (SVERT) (<http://www.imgg.ru/ru/teams/svert>), 21 июня в ~18:05:00* на Средних Курилах началось сильное эксплозивное извержение влк. Райкоке (рис. 1). Описание этого извержения приводится в работах [Гирина и др., 2019; Рашидов и др., 2019; Дегтерев, Чибисова, 2019].

Андезитодацитовый вулкан Райкоке (48.29° N, 153.25° E) представляет собой стратовулкан на одноименном острове диаметром ~2 км, с диаметром вершинного кратера ~700 м и глубиной 200–250 м [Гущенко, 1979]. Он составляет единый вулканический массив северо-западного простирания площадью $15 \times 21 \text{ км}$ (изобата 1200 м) вместе с четвертичным подводным вулканом 3.18, плоская вершина которого расположена примерно в 7 км от вершины влк. Райкоке на глубине ~245 м [Подводный... , 1992]. Для влк. Райкоке характерны внезапные сильные эксплозивные извержения. Последнее такое извержение произошло в 1924 г., когда наблюдалось и подводное извержение [Tanakadate, 1925].

Представления о динамике извержения в основном были получены на основе снимков спутника Японского метеорологического агентства Himawari-8, находящихся в прямом доступе. Основным инструментом на этом спутнике является 16-канальный многоспектральный тепловизор Advanced Himawari Imager, работающий как в видимом, так и в инфракрасном диапазоне. Геостационарная орби-

та спутника позволяет сканировать Азиатско-Тихоокеанский регион с разрешением 500 м и максимальной частотой 0.1 цикл/мин (http://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/vaac_list.html).

Развитие эруптивного облака (ЭО) можно проследить на снимках спутника Himawari-8 на 18-часовом интервале с 20:20, 21.06.2019 г. по 14:20, 22.06.2019 г. (рис. 2). В течение первых двух часов ЭО двигалось в западном направлении на высоте** 10.2 км со скоростью ~28 м/с (~100 км/ч). В следую-



Рис. 1. Момент эксплозивного извержения влк. Райкоке 21 июня 2019 г. в 22:45, снимок сделан с международной космической станции (<https://earthobservatory.nasa.gov/images/145226/raikoke-erupts>).

*Здесь и далее время по UTC, формат – чч:мм:сс.

**Здесь и далее высота над уровнем моря.

шие 18 ч движение облака сохраняло это же направление, двигаясь со средней скоростью ~20 м/с (~72 км/ч) (рис. 2 б, с). В конце этого временного интервала передний фронт ЭО удалился на 1500 км, а его высота достигла ~13 км (рис. 2д).

В дальнейшем ЭО начало закручиваться циклоном, господствовавшим в районе Командорских островов в северной части Тихого океана. Под действием циркуляционных процессов в атмосфере ЭО разгрузилось от пепла, и далее продолжалось распространение уже аэрозольного облака на большие расстояния, до 5000 км (<http://sacs.aeronomie.be/>; [Гирина и др., 2019]). Такое обширное распространение продуктов извержения влк. Райкоке свидетельствует о значительности этого события. Кроме того, в работах [Гирина и др., 2019; Рашидов и др., 2019] высказывается обоснованное предположение, что одновременно могло происходить извержение подводного вулкана 3.18. В более поздней работе [Дегтерев, Чибисова, 2019] на основании детального изучения спутниковых снимков была более детально отслежена динамика эруптивного процесса этого извержения.

Для получения информации о динамике извержения хорошо зарекомендовали себя такие дистанционные методы, как сейсмический и акустический. Так, во время извержения влк. Пик Сарычева на Средних Курильских островах в июне 2009 г. инфразвуковые сигналы, сопровождавшие извержение, были зарегистрированы на расстояниях до 6400 км [Matoza et al., 2010]. К сожалению, сейсмические станции вблизи влк. Райкоке отсутствуют, но ИС, сопровождавшие извержения вулкана, были зарегистрированы на Северных Курилах и Камчатке на расстоянии от 330 до ~1000 км.

Следует отметить, что в последние два десятилетия интерес к акустике вулканических изверже-

ний резко возрос в связи с созданием международной системой мониторинга (IMS) сети режима соблюдения Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. В эту сеть входит более 60 инфразвуковых станций, распределенных по всей поверхности Земли. В многочисленных зарубежных работах показаны возможности использования инфразвукового диапазона для мониторинга эксплозивных извержений вулканов мира [Fee, Matoza, 2013; Pichon et al., 2019; и др.].

В работах [Lamb et al., 2015; Fee et al., 2017] была сделана попытка использовать ИС для определения количества выброшенного материала. Использовались ИС, зарегистрированные в ближней зоне на расстоянии до 15 км. Они представляют собой воздушные импульсные волны, в которые обращаются на определенных расстояниях слабые воздушные ударные волны, сопровождающие непосредственно сам процесс эксплозии и фрагментации магмы. Рассматривались отдельные эксплозии на вулканах Редаут (п-ов Аляска) и Сакурадзима (Япония). Расчеты количества пепла сравнивались с геологическими данными, полученными по изопакитам выпавшего пепла. В нашем случае ИС регистрировались на расстоянии нескольких сотен километров от источника, поэтому был использован подход, основанный на теории генерации ИС от источников с мощным массо-тепловыделением [Гостинцев, Шацких, 1989].

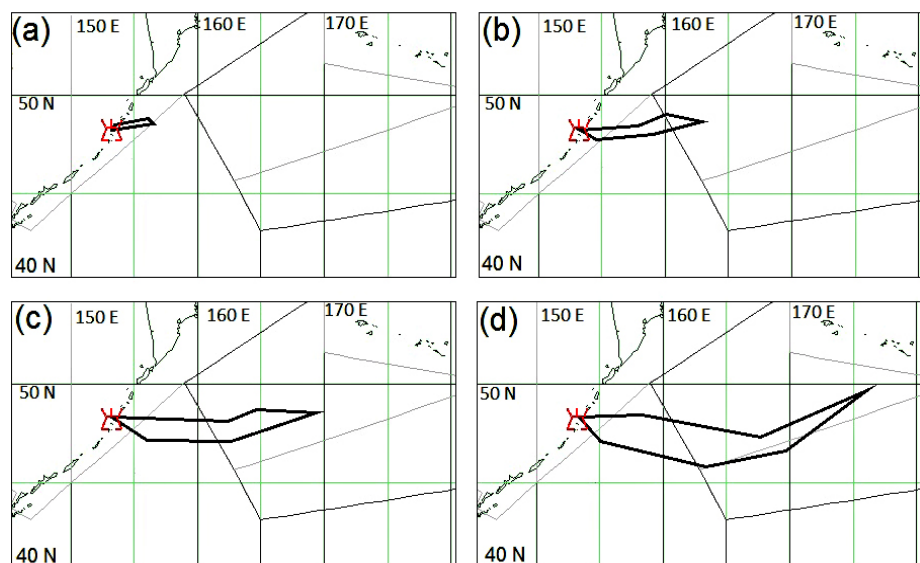


Рис. 2. Динамика развития эруптивного облака во время извержения влк. Райкоке на основе снимков спутника Himawari-8: (а) 21.06.2019, 20:20; (б) 22.06.2019, 02:20; (с) 22.06.2019, 08:20; (д) 22.06.2019, 14:20.

Особенностям генерации и распространения инфразвуковых сигналов и оценке на их основе количества выброшенного в атмосферу при извержении влк. Райкоке пепла посвящена данная работа.

Аппаратура и методика наблюдений

С целью исследования волновых возмущений в атмосфере, сопровождающих вулканические извержения, на п-ове Камчатка действует несколько пунктов Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН), оснащенных каналами регистрации ИС (рис. 3), что позволяет вести мониторинг сильных эксплозивных вулканических извержений [Гордеев и др., 2013].

В качестве датчиков для инфразвуковых каналов в пунктах SKR, PRT и KOZ используется дифференциальный микробарограф ISGM-03M (Россия) с рабочим диапазоном частот 0.002–4.0 Гц. Кроме того, в пункте Начики работает акустическая станция IS44 IMS (рис. 3), на которой установлена антенная решетка из 4 микробарографов М-2000 (Франция) с апертурой ~1.8 км, позволяющая вести регистрацию ИС в диапазоне частот 0.003–5 Гц и определять азимут на источник.

При изучении условий распространения ИС важно знать стратификацию атмосферы для получения вертикального профиля эффективной скорости звука ($C_{эф}$). В районе исследований баллонное зондирование проводится в трех пунктах (рис. 3). На рис. 4 приведена стратификация параметров атмосферы (температура, скорость и направление ветра) по данным баллонного зондирования во временной окрестности извержения в пункте SKR. Из рис. 4 видно, что в течение всего извержения резких изменений стратификации не было и вычисленная на трассе Райкоке–SKR эффективная скорость в тропосферном волноводе была постоянной: $C_{эф} \approx 0.31$ км/с, в то время как в приземном слое она составляла 0.33–0.34 км/с.

Детальное представление о динамике извержения влк. Райкоке 21–22 июня 2019 г. можно получить на основании кинематических и динамических параметров ИС, зарегистрированных сетью инфразвуковых станций на уда-

лении 336–974 км (рис. 3). П.П. Фирстовым [Фирстов, 2003; Firstov, 1994] дана феноменологическая классификация ударно-волновых и акустических эффектов в атмосфере от вулканических извержений, где за основную характеристику классов приняты характерный диапазон частот и физические процессы, в результате которых происходит их генерация.

В результате нестационарных процессов в кратере вулкана возникают воздушные ударные волны, которые в процессе распространения эволюционируют и перерождаются в ИС. Сильные конвективные процессы, связанные с формированием эруптивных облаков, порождают другой класс ИС. Кроме того, мощные эруптивные облака начинают колебаться вблизи точки зависания, как правило, на высоте тропопаузы (10–12 км), возбуждая акусто-гравитационные волны с частотой Брента–Вяйсяля ($N_z > 0.02$ с⁻¹), что наблюдалось при катастрофическом извержении влк. Шивелуч 12 ноября 1964 г. [Фирстов, 1996].

Учитывая масштаб рассматриваемого извержения, можно предположить, что оно

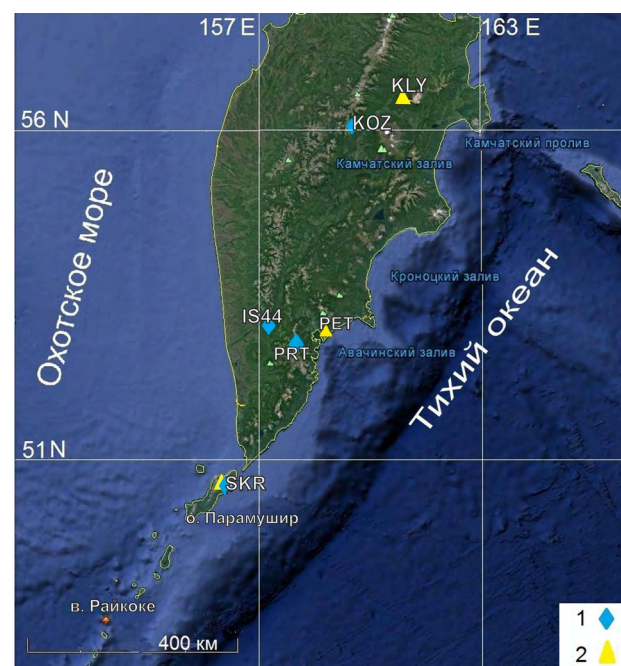


Рис. 3. Расположение влк. Райкоке, пунктов регистрации инфразвуковых колебаний (1) и метеостанций (2), где осуществляется баллонное зондирование, на п-ове Камчатка и Северных Курилах. Пункты регистрации инфразвука: SKR – пос. Северо-Курильск, PRT – Паратунка, IS44 – международная станция в пос. Начики, KOZ – пос. Козыревск. Метеостанции: SKR, PET – г. Петропавловск-Камчатский, KLY – пос. Ключи.

сопровождалось акустическими сигналами всех классов, это подтверждают рис. 5, 6. На записи инфразвуковых колебаний в пункте SKR ($R = 336$ км) (рис. 5b) хорошо видно возрастание низкочастотных инфразвуковых колебаний после пароксизмальной фазы извержения, в то время как в пункте PRT ($R = 629$ км) этого не наблюдается (рис. 5a).

В то же время на спектрограммах плотности мощности в полосе частот ≤ 1 Гц, рассчитанных за период 21–22 июня для инфразвуковых колебаний в пункте SKR, четко выделяются 11 хорошо выраженных и разнесенных во времени ИС (рис. 5c).

Для фона и трех участков записи в пункте SKR длительностью ≥ 25 мин, содержащих ИС, сопровождавшие отдельные длительные эпизоды извержения, рассчитывалась спектральная плотность мощности (СПМ) (рис. 6).

Для расчета СПМ фона была выбрана запись с достаточно интенсивными колебаниями. Спектральный пик для фона приходится на частоту $f = 0.00192$ Гц ($T = 8.7$ мин). Основная доля энергии ИС для I и III участков приходится на более низкие частоты $f = 0.00153$ Гц ($T = 10.9$ мин). Особенно обращает на себя внимание большое значение спектрального пика СПМ $S(\omega) = 164.7$ Па²/Гц на этой частоте для III участка, существенно превышающее фоновые. По-видимому, в связи с формированием шлейфа от эруптивного

облака возникают акусто-гравитационные волны с частотой Брента–Вяйсяля, которые наблюдаются только на ближайшей станции SKR. На всех кривых СПМ выделяются «высокочастотные» спектральные пики в диапазоне частот 0.08–0.5 Гц (рис. 6).

Все детали наиболее сильных эпизодов активности вулкана хорошо прослеживаются на записях ИС, отфильтрованных полосовым фильтром с граничными частотами 0.08–1.0 Гц, который, с одной стороны, выделил сигналы, обусловленные нестационарными процессами, а с другой, обеспечил хорошее соотношение сигнал–шум на всех инфразвуковых станциях (рис. 7). Выделенные 11 отдельных сильных эпизодов эксплозивной активности извержения влк. Райкоке 21–22 июня 2019 г. [Дегтерев, Чибисова, 2019; Гирина и др., 2019; Рашидов и др., 2019] сопровождаются ИС различной интенсивности и длительности.

Особенности волновых форм ИС рассмотрены по записям ближайшей станции SKR (336 км). По форме вступления инфразвуковые сигналы от отдельных эпизодов извержения влк. Райкоке были разбиты на две группы (см. таблицу). ИС № 1, 5, 6, 8 имели четкие вступления, которые обычно возникают во время эксплозий типа «взрыв» (рис. 8). В пользу этого свидетельствует рис. 1, на котором зафиксировано формирование мощного

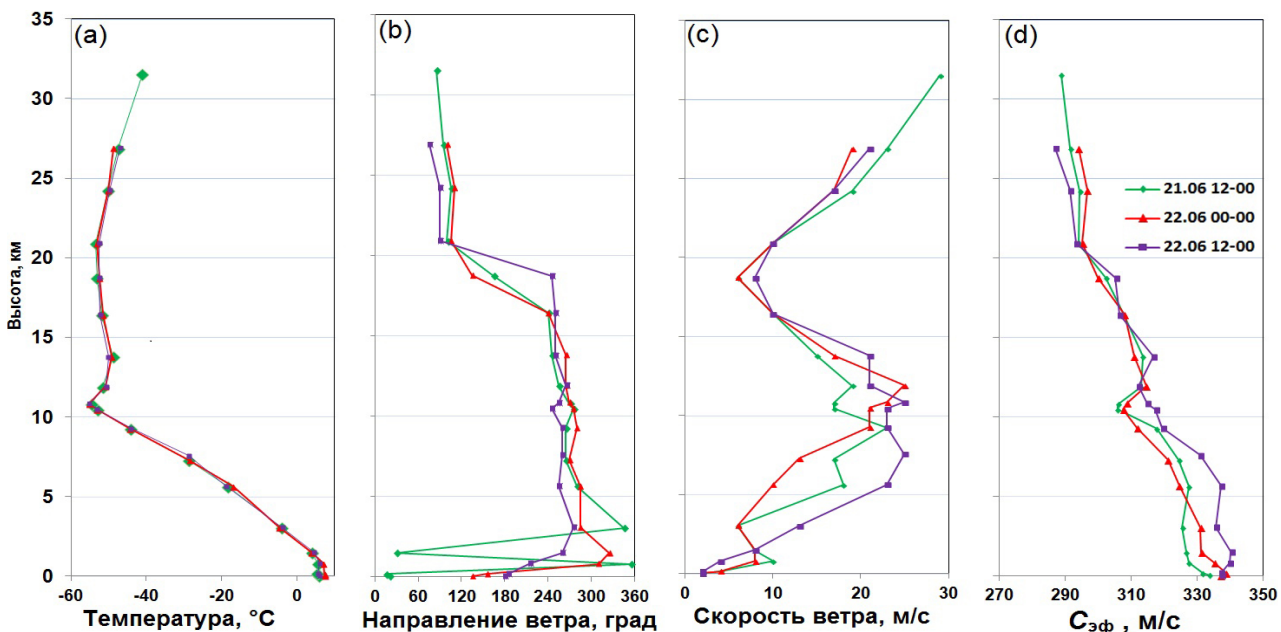


Рис. 4. Стратификация атмосферы 21–22.06.2019 по данным баллонного зондирования метеостанции SKR. Вертикальные разрезы: (a) температура воздуха, (b) направление ветра и (c) его скорость, (d) эффективная скорость звука.

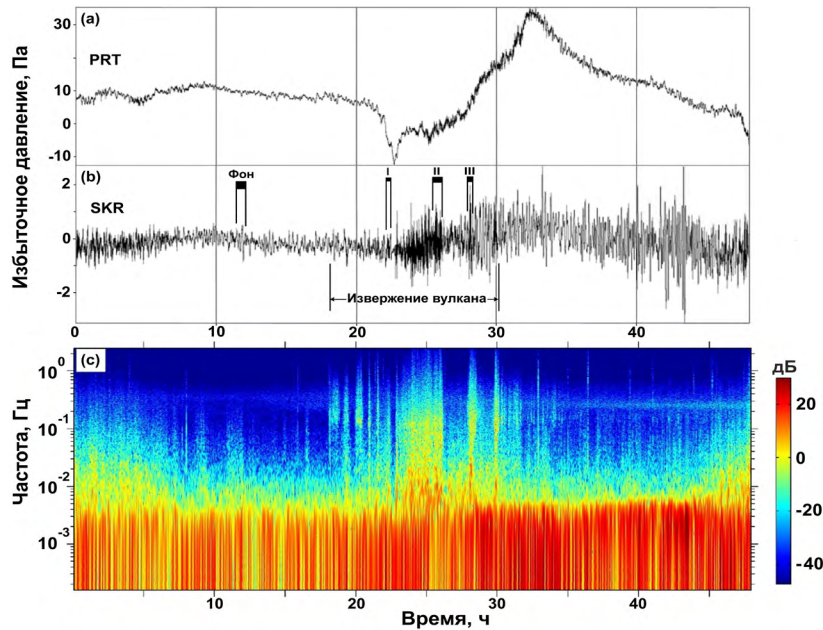


Рис. 5. Запись инфразвуковых колебаний в пунктах PRT (a) и SKR (b) со спектрограммой в полосе частот ≤ 1 Гц (c) 21–22 июня 2019 г., во время извержения влк. Райкоке. Черными прямоугольниками отмечены участки, для которых рассчитывалась спектральная плотность мощности. Начало отсчета времени соответствует 20 июня 2019 г. 23:59:04.

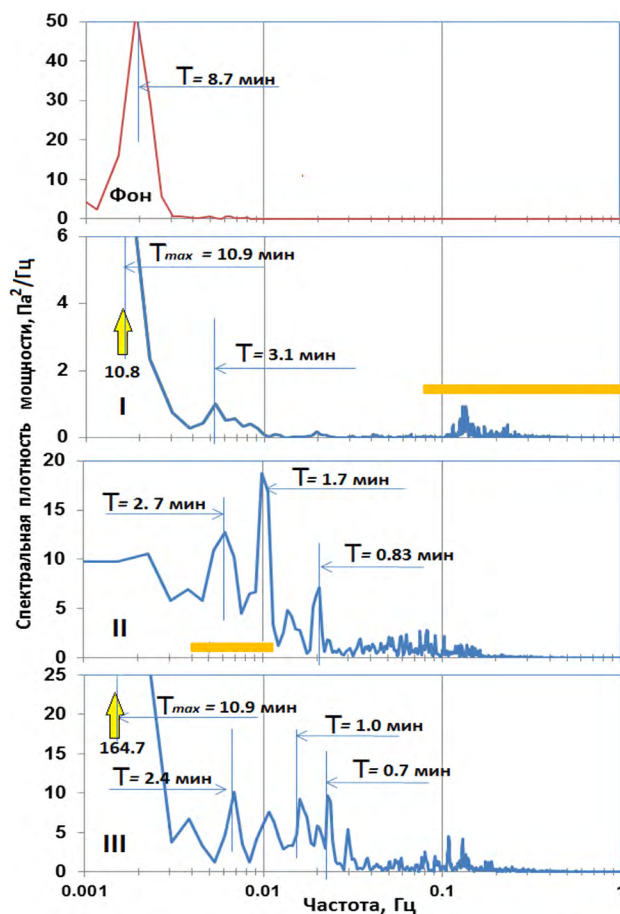


Рис. 6. Спектральная плотность мощности для фона и трех инфразвуковых сигналов от отдельных эпизодов извержения влк. Райкоке. Прямоугольниками отмечены диапазоны частот, в полосе которых детально изучались ИС, генерируемые эксплозиями влк. Райкоке.

эруптивного облака от явно точечного источника, по времени совпадающего с возникновением ИС № 8. На записях этих сигналов выделяются два четких вступления с $t_2 - t_1 \approx 00:03:20$, которые, по-видимому, связаны с приходом волн вдоль земной поверхности и по стратосферному волноводу.

Время хорошо выраженного первого вступления для ИС № 1 составило 18:05:52. Если принять, что в этом случае пришла волна, распространяющаяся с $C_{эф} = 0.34$ км/с согласно рис. 4д, то время первой эксплозии будет 17:49:24. Это время отличается от времени начала извержения, указанного в работах [Дегтерев, Чибисова, 2019; Гирина и др., 2019; Рашидов и др., 2019].

В остальных случаях для ИС было характерно плавное нарастание амплитуды и большая их длительность (τ). ИС № 9 имел $\tau \approx 200$ мин, что свидетельствовало о непрерывном истечении пепло-газовой смеси, сопровождавшемся нестационарными процессами (взрывы, сверхзвуковое истечение), в результате которых генерировались воздушно-ударные волны. За счет эволюции на больших расстояниях они обращались в ИС, которые были зарегистрированы на всех пунктах (рис. 7).

На станции IS44 расстановка 4 микробарографов образует антенную решетку в виде равнобедренного треугольника со стороной ~ 1.8 км и средней точкой, что позволяет по измеренным временным задержкам между сигналами для пар микробарографов вычислять стандартным методом с помощью взаимно-корреляционного анализа азимут на источник, кажущуюся скорость и угол скольжения. Эти параметры были определены для 7 первых ИС от влк. Райкоке (рис. 9) до момента перерыва в работе IS44.

Азимут с IS44 на влк. Райкоке составляет 212.2° . Обращают на себя внимание большие значения азимутов ($215^\circ - 223^\circ$) для первого и второго сигналов, т.е. источник относительно IS44 несколько смещен на запад (рис. 9б).

Таблица. Параметры акустических сигналов, сопровождавших извержение влк. Райкоке, и оценка выброшенного пепла

№ эпи-зода	Дата, время начала отдельных эпизодов извержения		Параметры акустического сигнала и оценка количества пепла						Примечание
	Дата	Время	$\Delta \bar{P}$, Па	T, с	τ , мин	$E_a \times 10^6$, кДж	$Q \times 10^9$, кВт	$V \times 10^6$, м ³	
1	21.06.2019	18:05:52	0.10	6.7	3	–	–	–	«Взрыв», четко выделяются два прихода ИС с задержкой ~03:20
2		18:15:45	0.08	6.7	34	–	–	–	Непрерывное истечение пепло-газовой струи из кратера с плавным нарастанием амплитуды ИС
3		19:04:51	0.10	7.1	20	–	–	–	
4		19:57:52	0.28	7.1	32	–	–	–	
5		20:54:51	0.30	7.1	3	–	–	–	
6		21:30:06	0.35	7.1	3	0.33	1.32	0.52	«Взрыв», четко выделяются два прихода ИС с задержкой ~03:20
7		22:08:56	0.08	8.3	9	0.31	1.27	1.17	Непрерывное истечение пепло-газовой струи из кратера с плавным нарастанием амплитуды ИС
8		22:51:03	0.16	5–9	6	0.48	1.70	0.59	«Взрыв», четко выделяются два прихода ИС с задержкой 3:27. Развитие этого эпизода заснято с международной космической станции (рис. 1)
9 ₁	21.06.2019	22:57:21	0.24	10	53	4.25	7.24	17.71	Длительное (3 ч) мощное истечение пепло-газовой смеси. Просмагивается пульсирующий режим с периодом ~20 мин
9 ₂		23:50:26	0.45	8–10	21	3.79	6.70	6.49	
9 ₃	22.06.2019	00:09:39	0.31	6–12	68	11.51	14.05	44.10	
9 ₄		01:00:16	0.48	7–12	26	4.42	7.43	8.92	
9 ₅		01:25:52	0.52	7–12	24	2.31	4.82	5.34	
9 ₆		01:48:52	0.55	6–12	18	3.67	6.57	5.46	
10		03:52:22	0.57	7–10	29	2.41	4.96	6.65	Непрерывное истечение пепло-газовой струи из кратера с плавным нарастанием амплитуды ИС
11		05:46:28	0.75	9–12	21	3.23	6.03	5.84	Завершающая извержение мощная эксплозия
Итого: $V = 102.79 \cdot 10^6$ м ³									

Примечания. Номера эпизодов извержения соответствуют номерам на рис. 7. Параметры ИС после фильтрации полосовым фильтром 0.08–1.0 Гц: $\Delta \bar{P}$ – среднее избыточное давление, T – преобладающий период, τ – длительность сигнала. Расчетные значения энергии акустического источника и количества выброшенного в атмосферу пепла по ИС после фильтрации полосовым фильтром 0.004–0.012 Гц: E_a – энергия акустического источника, Q – мощность тепловыделения, V – расчетный объем пепла. Прочерк – для этих эпизодов низкочастотные ИС зарегистрированы не были.

Этот факт может говорить в пользу предположения, высказанного в работах [Гирина и др., 2019; Рашидов и др., 2019], что на начальном этапе извержения влк. Райкоке могла произойти и активизация подводного вулкана 3.18.

Расчет количества выброшенного в атмосферу пепла на основе акустического излучения

Во время извержения влк. Райкоке тонкодисперсный пепел выпал в акватории Тихого океана. В этом случае оценка объема выброшенного в атмосферу пепла без учета крупнозернистой пирокластики может быть выполнена только на основании высоты ЭО и интенсивности ИС. Следует заметить, что наибольшая интенсивность извержения приходится на эпизод № 9, когда происходило высокоскоростное истечение пепло-газовой смеси. Продолжительность этого эпизода была ~210 мин, а высота ЭО по спутниковым снимкам – 13 км [Дегтерев, Чибисова, 2019].

В классической работе С.А. Федотова [Федотов, 1982] приводится номограмма для оценки количества пепла на основании высоты ЭО. Согласно номограмме, для наиболее интенсивного эпизода № 9 тепловая мощность составит $3.2 \cdot 10^{12}$ Вт, что соответствует выносу пепла $5 \cdot 10^6$ кг/с. При плотности пепла $\rho_{\text{п}} = 1.3 \cdot 10^3$ кг/м³ и длительности этого эпизода ~3.5 ч объем выброшенного пепла

оценивается в 0.048 км³. Следует отметить, что данная оценка извергнутого материала является минимальной, так как не учитывает крупнозернистую пирокластику.

Рассмотрим возможность оценки объема выброшенного пепла на основании работ [Гостинцев и др., 1983 а, б; Гостинцев, Шацких, 1989], в которых дано теоретическое обоснование зависимости энергии акустического источника $E_{\text{а.и.}}$ от тепловой мощности Q в очаге сильных взрывов и площадных пожаров:

$$E_{\text{а.и.}} = 90 \frac{\pi \rho_0 \alpha}{\chi h C_0} \left(\frac{g \beta}{\pi \rho_0 c_p} \right)^{3/2} Q^{3/2} N^{-3/2},$$

где: $\alpha = dh/dx = 0.15$ – тангенс угла расширения струи; $\rho_0 = 1.23$ кг/м³ и $c_p = 1000$ Дж/(кг·К) – плотность и теплоемкость воздуха соответственно; $\beta = 1/T_a = 3.6 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент термического расширения; T_a – температура окружающего воздуха; $C_0 = 0.3$ км/с – скорость звука в воздухе; $h = 10$ км – эффективная высота, зависящая от стратификации атмосферы; $N = 0.003$ 1/с – частота Брента-Вайсяля; $\chi = 1.9 \cdot 10^{-5}$ м²/с – турбулентный коэффициент температуропроводности.

Энергия акустического источника рассчитывалась по общеизвестной формуле

$$E_{\text{а.и.}} = \frac{2\pi H R}{\rho_0 C_0} \int \Delta P^2 dt,$$

где $H = 10$ км – высота однородного слоя,

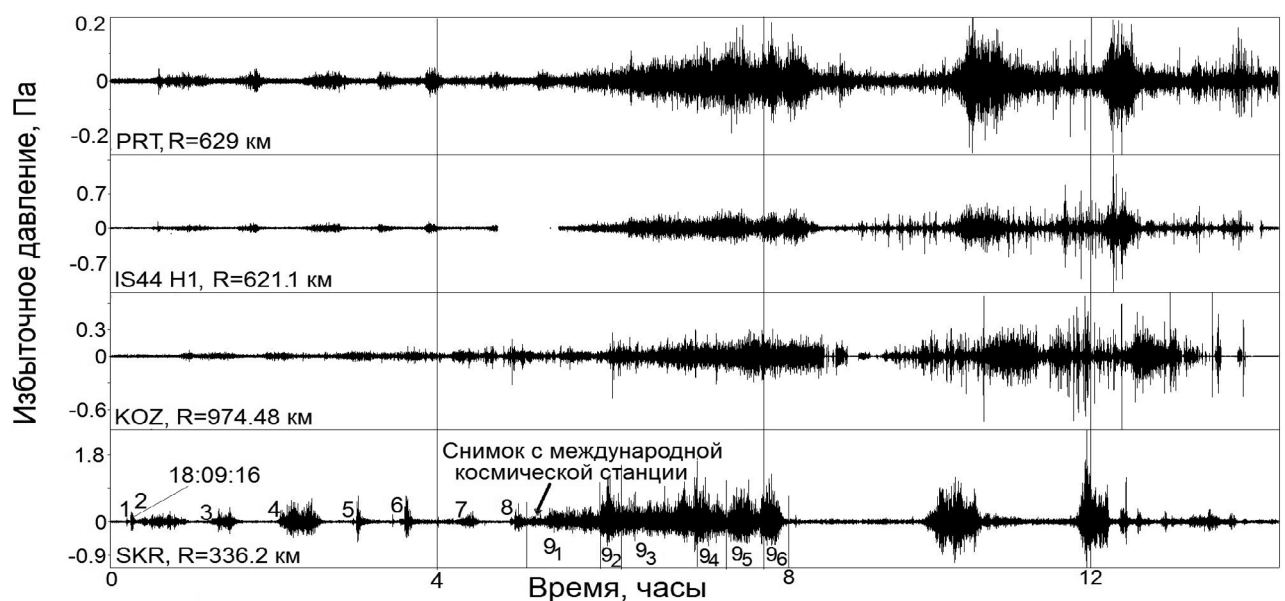


Рис. 7. Запись инфразвуковых сигналов, сопровождавших извержение влк. Райкоке 21–22 июня 2019 г., отфильтрованная в полосе 0.08–1.0 Гц в различных пунктах. Цифрами обозначены отдельные эпизоды извержения, выделенные по записям в пункте SKR. Начало отсчета времени соответствует 21 июня 2019 г. 17:53:54.

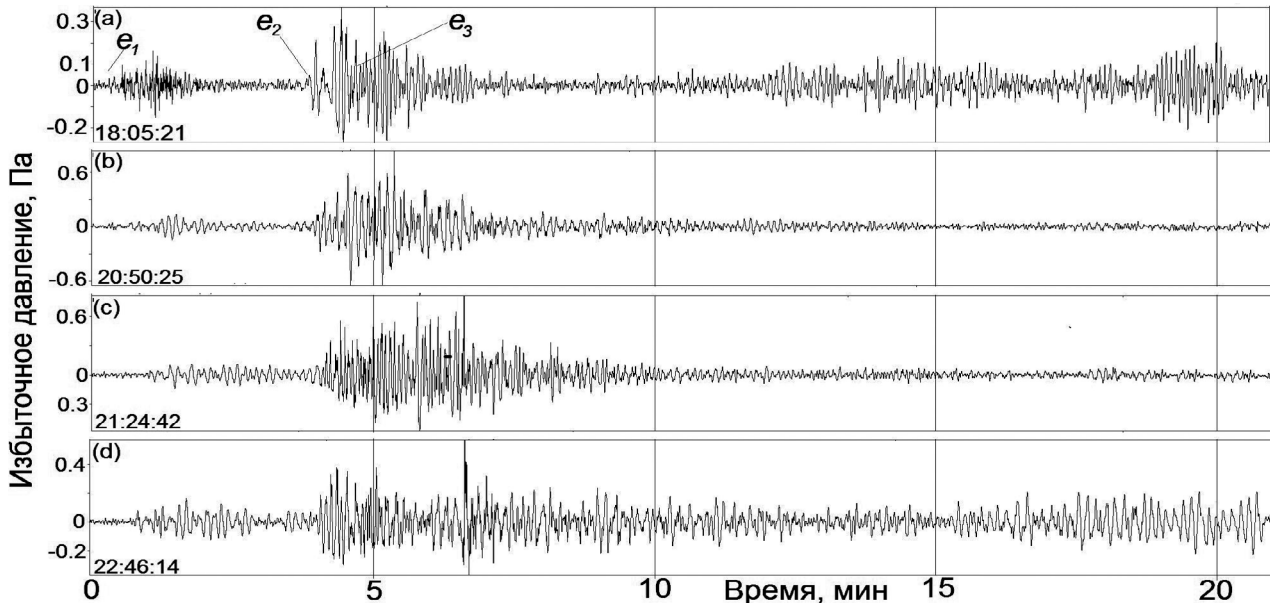


Рис. 8. Волновая картина ИС в пункте SKR от отдельных эксплозий «взрыв» с начальным отсчетом времени: № 1 – 18:05:21 (a); № 5 – 20:50:28 (b); № 6 – 21:24:42 (c); № 8 – 22:46:14 (d).

$R = 336$ км – расстояние между источником и пунктом регистрации, ΔP – избыточное давление.

От тепловой мощности к оценке объема выброшенного пепла можно перейти исходя из допущения, что при эксплозивных извержениях тепловая мощность в эруптивной колонне на автомобильном участке в основном обеспечивается теплом, выносимым в атмосферу горячей мелкой пирокластикой (вулканическим пеплом). В работе [Федотов, 1982] показано, что расход пирокластики $1 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$ соответствует средней тепловой мощности 10^6 Вт, т.е. $\gamma = 10^{-6} \text{ кг} \cdot (\text{с} \cdot \text{Вт})^{-1}$. Время процесса (τ) оценивается по длительности ИС. Зная плотность пепла (принималась $\rho_{\text{п}} = 1.3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), объем выброшенного в атмосферу пепла (V) можно рассчитать по формуле

$$V = (Q \cdot \tau \cdot \gamma) / \rho_{\text{п}}.$$

После фильтрации полосовым фильтром с граничными частотами 0.004–0.012 Гц выделялись длиннопериодные ИС, связанные с формированием эруптивной колонны. Такие ИС начали регистрироваться только с эпизода № 6 (см. таблицу). Общий минимальный объем пепла, выброшенного в атмосферу во время извержения влк. Райкоке, оце-

ненный на основании ИС, составил больше 0.1 км^3 . Основную ошибку в расчет количества пепла, естественно, вносят условия распространения инфразвуковых волн. Исходя из стратификации атмосферы, авторы оценивают погрешность оценки пепла в 30 %.

Для классификации эксплозивных вулканических извержений и их воздействия на атмосферу в работе [Newhall, Self, 1982] был

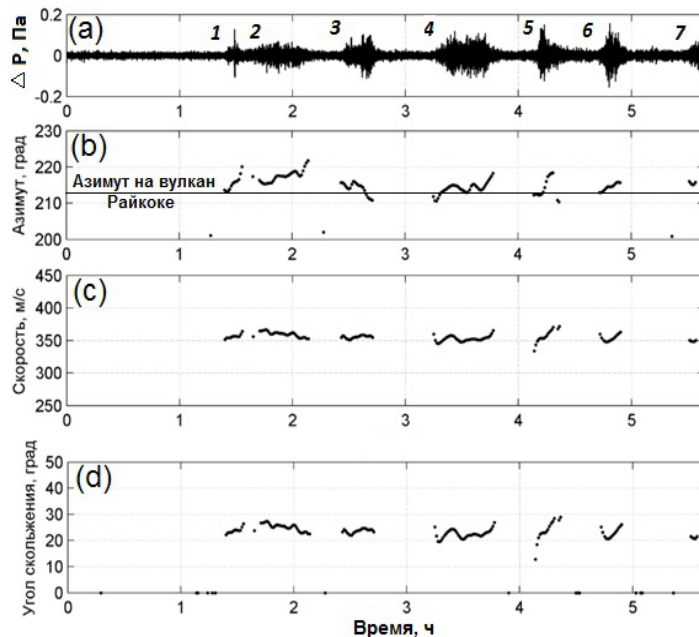


Рис. 9. Фрагмент записи инфразвука за 22 июня 2019 г. (микробарограф Н1 станции IS44), отфильтрованной в полосе 0.08–0.8 Гц (a); азимут на источник прихода ИС (b), кажущаяся скорость (c), угол скольжения (d). Начальный отсчет времени 22 июня 17:00:00.

предложен индекс эксплозивной вулканической активности VEI (volcanic explosivity index). Градация VEI от 0 (для неэксплозивных извержений) до 8 (катастрофические извержения с объемом 10^3 км^3) определяется двумя параметрами: объемом выброшенной тefры и высотой эруптивной колонны. По объему выброшенного пепла $0.1 < V \text{ км}^3 < 1.0$, так же как и по высоте ЭО, извержение влк. Райкоке следует отнести к VEI – 4.

Выводы

На сети пунктов инфразвукового мониторинга на п-ове Камчатка, расположенных на расстоянии от 336 до 974 км от влк. Райкоке, зарегистрированы инфразвуковые сигналы, сопровождавшие наиболее сильные эпизоды его извержения 21–22 июня 2019 г.

В спектральной плотности мощности зарегистрированных ИС выделяются спектральные пики в диапазонах частот $f = 0.08–0.5 \text{ Гц}$ и $f = 0.004–0.012 \text{ Гц}$. Первый связан с процессом фрагментации магмы и нестационарными процессами, возникающими при истечении пепло-газовой смеси из кратера. Второй обусловлен возникновением непрерывного теплового источника, приводящего к формированию струйного конвективного течения и эруптивного облака.

На основе кинематических и динамических параметров инфразвуковых сигналов первого диапазона дана детальная

реконструкция хода рассмотренного события. Извержение началось с отдельного довольно слабого взрыва (эксплозии) 21 июня в ~17:46:00, после чего интенсивность эксплозий стала возрастать. По акустическим данным выделяется 11 отдельных эпизодов, они приведены в таблице.

На основании волновой картины ИС первого диапазона сделан вывод, что для 4 эпизодов (№ 1, 5, 6, 8) характерны эксплозии типа «взрыв», а в остальных случаях процесс происходит по типу «продувки», т.е. высокоскоростного истечения пепло-газовой смеси из жерла вулкана. Наиболее длительная «продувка» (эпизод № 9) длилась ~3.5 ч.

На основании ИС второго диапазона частот, возникновение которых связывается с различными процессами, возникающими в конвективной струе, сделан расчет минимального объема выброшенного в атмосферу пепла по методике, предложенной Ю.А. Гостинцевым и Ю.В. Шацких. Расчетный объем составил несколько больше 0.1 км^3 , что позволяет присвоить данному извержению индекс эксплозивной активности VEI – 4.

Благодарности

Работа выполнялась в рамках государственного задания Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (проект АААА-А19-119031590060-3).

Список литературы

1. Гирина О.А., Лупян Е.А., Уваров И.А., Крамарева Л.С. **2019**. Извержение вулкана Райкоке 21 июня 2019 года. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 16(3): 303–307. doi:10.21046/2070-7401-2019-16-3-303-307
2. Гордеев Е.И., Фирстов П.П., Куличков С.Н., Махмудов Е.Р. **2013**. Инфразвуковые волны от извержений вулканов Камчатки. *Физика атмосферы и океана*, 49(4): 456–468. doi:10.7868/S0002351513030085
3. Гостинцев Ю.А., Шацких Ю.В. **1989**. *Генерация длинноволновых акустических возмущений в атмосфере всплывающими продуктами горения и взрыва*: препринт. Черноголовка: Ин-т хим. физики АН СССР, 33 с.
4. Гостинцев Ю.А., Иванов Е.А., Шацких Ю.В. **1983а**. Инфразвуковые и внутренние гравитационные волны в атмосфере при больших пожарах. *Доклады АН СССР*, 271(2): 327–330.
5. Гостинцев Ю.А., Иванов Е.А., Копылов Н.П., Шацких Ю.В. **1983б**. Волновые возмущения атмосферы при больших пожарах. *Физика горения и взрыва*, 19(4): 62–64.
6. Гущенко И.И. **1979**. *Извержения вулканов мира*: каталог. М.: Наука, 475 с.
7. Дегтерев А.В., Чибисова М.В. **2019**. Извержение вулкана Райкоке в июне 2019 г. (о. Райкоке, центральные Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 3(3): 304–309. doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.304-309

8. *Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги*. Ю.М. Пущаровский (отв. ред.). 1992. М.: Наука, 528 с.
9. Рашидов В.А., Гирина О.А., Озеров А.Ю., Павлов Н.Н. 2019. Извержение вулкана Райкоке (Курильские острова) в июне 2019 г. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 42(2): 5–8. doi:10.31431/1816-5524-2019-2-42-5-8
10. Федотов С.А. 1982. Оценки выноса тепла и пирокластики вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков. *Вулканология и сейсмология*, (4): 4–28.
11. Фирстов П.П. 1996. Реконструкция динамики катастрофического извержения вулкана Шивелуч 11 ноября 1964 г. на основании данных о волновых возмущениях в атмосфере и вулканическом дрожании. *Вулканология и сейсмология*, (4/5): 33–47.
12. Фирстов П.П. 2003. *Вулканические акустические сигналы диапазона 1.0–10 Гц и их связь с эксплозивным процессом*. Петропавловск-Камчатский: КамГПУ, 90 с.
13. Fee D., Matoza R.S. 2013. An overview of volcano infrasound: From hawaiian to plinian, local to global. *J. of Volcanology and Geothermal Research*, 249: 123–139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.09.002>
14. Fee D., Izbekov P., Kimc K., Yokoo A., Lopez T., Prata F., Kazahaya R., Nakamichig H., Iguchig M. 2017. Eruption mass estimation using infrasound waveform inversion and ash and gas measurements: Evaluation at Sakurajima Volcano, Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 480: 42–52. doi.org/10.1016/j.epsl.2017.09.043
15. Firstov P.P. 1994. Wave perturbation in the atmosphere as a method of remote monitoring of volcanic eruptions. In: *Intern. Volcanol. Congress. JAVEI. Theme 7*. Ankara.
16. Lamb O.D., Angelis S.D., Lavallée Y. 2015. Using infrasound to constrain ash plume rise. *J. of Applied Volcanology*, 4(20). <https://doi.org/10.1186/s13617-015-0038-6>
17. Matoza R.S., Le Pichon A., Herry P. 2010. Infrasonic observations of the June 2009 Sarychev Peak eruption, Kuril Islands: Implications for infrasonic monitoring of remote explosive volcanism. *J. of Volcanology and Geothermal Research*, 200(1–2): 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.11.022>
18. Newhall C.G., Self S. 1982. The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *J. of Geophysical Research*, 87(C2): 1231–1238. <https://doi.org/10.1029/jc087ic02p01231>
19. Pichon Le A., Blanc E., Hauchecorne A. (eds) 2019. *Infrasound monitoring for atmospheric studies. Challenges in middle atmosphere dynamics and societal benefits*. 2nd ed. Springer, 1160 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5>
20. Tanakadate H. 1925. The volcanic activity in Japan during 1914–1924. *Bulletin Volcanologique*, 1(3): 3–19. <https://doi.org/10.1007/bf02719558>

Об авторах

ФИРСТОВ Павел Павлович (ORCID 0000-0003-1658-5165), доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, firstov@emsd.ru, БУДИЛОВ Дмитрий Игоревич (ORCID 0000-0003-0150-9039), младший научный сотрудник, budilovdmi@gmail.com, АКБАШЕВ Ринат Рафикович (ORCID 0000-0002-0737-9610), научный сотрудник, arr@emsd.ru – лаборатория акустического и радонового мониторинга (ЛАРМ), ЛОБАЧЕВА Марина Андреевна (ORCID 0000-0001-5782-2054), инженер отдела радиотелеметрических сейсмических станций (РТСС), lobacheva@emsd.ru – Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский; ПОПОВ Олег Евгеньевич (ORCID 0000-0003-2747-3564), старший научный сотрудник Радиоакустической лаборатории (ЛАР) Отдела динамики атмосферы, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, olegp@mail.ru