

**ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ, СОПРОВОЖДАВШИЕ  
ИЗВЕРЖЕНИЕ ВУЛКАНА КАМБАЛЬНЫЙ (КАМЧАТКА) В 2017 г.**© 2018 П.П. Фирстов<sup>1</sup>, М.А. Лобачева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»,  
Петропавловск-Камчатский, 683006;

e-mail: firstov@emsd.ru

<sup>2</sup>Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, 683032

С 24 марта по 10 апреля 2017 г. происходило извержение вулкана Камбальный, который активизировался после почти полувекового покоя. В работе проанализированы волновые возмущения в атмосфере в виде цугов квазисинусоидальных колебаний с частотой 8 Гц («акустическое дрожание» (АД)), возникавшие в отдельные периоды извержения. Также рассмотрены три наиболее сильных сейсмических сигнала, зарегистрированных на начальном этапе извержения одновременно с АД, которое регистрировалось инфразвуковой станцией IS44, расположенной в 208 км к северо-западу от вулкана. Ближайшая сейсмическая станция «Паужетка» в 19 км от вулкана позволяла следить за сейсмической подготовкой извержения, которая была короткая по времени (2 суток) и слабая по энергетике ( $K_{\max} = 8.6$ ). Отсутствие четко выраженных импульсных инфразвуковых сигналов, возникающих, как правило, при нестационарных процессах при эксплозивных извержениях, указывает на особый характер образования и истечения пепло-газовой смеси. Столь необычные проявления акустического излучения и сейсмической подготовки подтверждает предположение о том, что данное извержение следует отнести к гидротермальным.

*Ключевые слова:* вулкан, акустическое дрожание, сейсмические данные, гидротермальное извержение.

**ВВЕДЕНИЕ**

На полуострове Камчатка два коллектива исследователей осуществляют мониторинг вулканических извержений с помощью комплексов дистанционных методов.

1. В Камчатском филиале Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) реализуется «общий» мониторинг, который проводится в режиме близком к реальному времени с 2000 г. (Сенюков, 2014). Мониторинг реализуется на основании следующих методов: 1) сейсмологический, регистрация землетрясений достаточно плотной сетью сейсмических станций; 2) спутниковый, наблюдения за динамикой термальных аномалий; 3) видео наблюдений с помощью камер, установленных вблизи активных вулканов и визуальных наблюдений. В настоящее время, ежедневно проводимая

КФ ФИЦ ЕГС РАН работа, по сбору, обработке и представлению информации об активности вулканов (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>), позволяет своевременно и обоснованно оценивать их состояние и делать выводы о возможном развитии вулканической активности (Сенюков, 2016).

2. С целью оперативного оповещения, в первую очередь, авиационных служб Тихоокеанского региона о готовящихся или начавшихся эксплозивных извержениях вулканов Камчатки, в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН работает группа KVERT (Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team). В заключениях, выдаваемых этой группой заинтересованным организациям, дается оценка пепловой опасности для авиатрасс, проходящих вблизи западного побережья полуострова Камчатка (Гирина, Гордеев, 2007; Гордеев, Гирина, 2014). Основной информацией для этой группы исследователей

являются спутниковые снимки, которые анализируются с помощью информационной системы (ИС) VolSatView (Ефремов и др., 2012).

Волновые возмущения в атмосфере, возникающие во время эксплозивных извержений вулканов, также несут информацию о динамике таких событий (Фирстов, 2009, 2010). В рамках Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) работает международная сеть из 59 инфразвуковых станций, распределенных по поверхности земного шара (Green, Bowers, 2010). Три такие станции находятся на территории Российской Федерации, одна из которых — IS44 расположена на Камчатке в поселке Начики (рис. 1а). Эта станция позволяет эффективно вести инфразвуковой мониторинг извержений вулканов Камчатки и Курильских островов, что продемонстрировано в работах (Гордеев и др. 2013, Matoza et al., 2010). В дополнение к этой станции, КФ ФИЦ ЕГС РАН организован пункт регистрации волновых возмущений от вулканических извержений в поселке Паратунка PRTA (рис. 1а).

В данной статье приводятся результаты исследований сейсмических и инфразвуковых сигналов, сопровождавших извержение вулкана Камбальный в апреле–марте 2017 г., которые демонстрируют возможность использования инфразвукового метода для мониторинга эксплозивных вулканических извержений.

#### КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГО-ТЕКТОНИЧЕСКОМ ПОЛОЖЕНИИ ВУЛКАНА КАМБАЛЬНЫЙ И ЕГО ИЗВЕРЖЕНИИ В 2017 г.

Действующий стратовулкан Камбальный (51.25° с.ш., 156.77° в.д.) высотой 2156 м н.у.м. является самым южным вулканом Южно-Камчатской вулканической зоны (рис. 1а). Он расположен на юге Камбального хребта, который представляет собой линейно-гнездовой ряд вулканов, контролируемых разломами меридионального и северо-западного направлений. Вулкан Камбальный, сложенный вулканогенными породами нижнеплейстоценового-голоценового возраста, располагается на краю обвального цирка размером 5×3.5 км (Ponomareva et al., 2006).

На вершине вулкана находится кратер размером 750×550 м глубиной до 150 м, открытый на юго-запад. В юго-восточной части вершины к кратеру примыкает воронка взрыва глубиной 10–50 м и размером 200×100 м (Рычагов и др., 2017). На склонах вулкана располагается 5 шлаковых конусов голоценового возраста. По данным радиоуглеродного метода определения возраста, последнее сильное извержение вулкана проис-

ходило ~ 500 лет назад (Ponomareva et al., 2006). До 2017 г. сведений об исторических извержениях вулкана не было, но иногда в вершинном кратере отмечались слабые выделения газов.

На Камбальном хребте в его осевой зоне на высотах 700–1000 м наблюдается гидротермальная деятельность, которая представлена тремя группами крупных термальных полей, каждое из которых включает водные и грязеводные котлы, термальные источники, парогазовые струи, прогретые грунты (Рычагов и др., 2017). Продолжение термальной зоны прослеживается в северо-западной части хребта на его склоне, у подножия которого располагается Паужетское месторождение парогидротерм (рис. 1б).

Для Камбального хребта характерны две системы разломов, принадлежащих к рангу региональных: субмеридионально — субширотного; северо-восточного и северо-западного простирания. Обе системы разломов активны в настоящее время (Литасов и др., 1974).

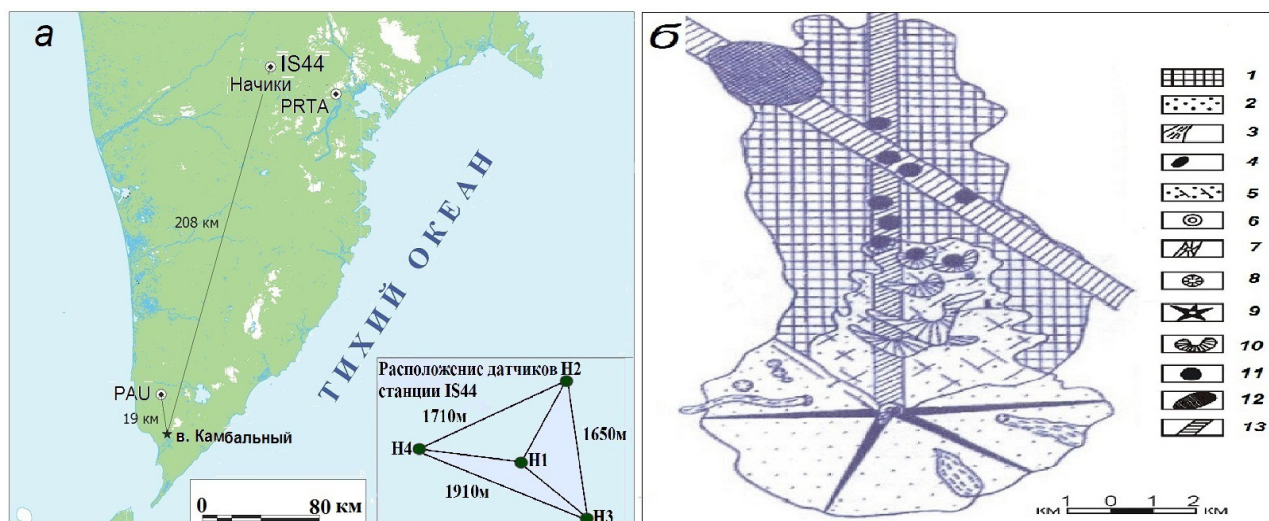
По данным (Сенюков и др., 2017) в период 2009 г. по март 2017 г. отмечались редкие одиночные землетрясения с энергетическим классом  $K_s = 6-8$  ( $K = \lg E$ , Дж). Задвое суток перед извержением вулкана Камбальный 22.03.2017 г. в 12:00<sup>1</sup> начался рой локальных землетрясений продолжавшийся до 27 марта 2017 г. Землетрясение с максимальным энергетическим классом  $K_s = 8.6$  произошло непосредственно перед извержением вулкана 24 марта в 00<sup>h</sup>03<sup>m</sup> на глубине  $h = 5.9$  км.

В 12:21 24 марта 2017 г. было зарегистрировано сильное эксплозивное землетрясение. По сейсмологическим данным на основании многолетних наблюдений на сейсмограммах уверенно выделяются эксплозивные землетрясения (ЭЗ) в пунктах, расположенных не далее 10 км от эруптивного центра. Так как ближайшая сейсмическая станция «Паужетка» (PAU) располагается в 19 км от кратера вулкана, естественно, по сейсмическим данным детальную информацию об извержении вулкана получить было сложно (Сенюков и др., 2017).

Мониторинг эруптивной активности вулкана по спутниковым снимкам в течение всего периода извержения выполнялся группой KVERT с использованием ИС VolSatView (Гирина и др., 2017). Краткое описание динамики извержения вулкана, приведенное ниже в работе, составлено по данным группы KVERT (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert>).

Начало извержения по сейсмическим данным отнесено к достаточно сильному ЭЗ, зарегистрированному 24 марта в 12:21 (Сенюков и др., 2017), а по спутниковым снимкам время начала извержения вулкана отнесено к более позднему времени 24 марта в 21:10 (Гирина и др., 2017).

<sup>1</sup> Здесь и далее время UTC.



**Рис. 1.** Схема расположения на полуострове Камчатка вулкана Камбальный, пунктов наблюдений за волновыми наблюдениями в атмосфере и с/с PAU (а). Схема строения вулкана Камбального и его положение в структуре Камбального хребта по (Структура ..., 1993) (б): 1 — породы, слагающие Камбальный хребт; 2 — лавопирокластические отложения вулкана Камбального Южного; 3 — потоки базальтов; 4 — экструзии андезито-базальтов; 5 — шлако-лавадайковый комплекс вулкана Камбального Северного; 6 — вершинный кратер; 7 — воронка взрыва; 8 — шлаковые паразитические конусы; 9 — конус вулкана Камбального Южного; 10 — полуцирки — центры извержений вулкана Камбального Северного; 11 — термальные поля; 12 — Паужетское геотермальное месторождение; 13 — зоны разломов. IS44, PRTA — акустические станции. PAU — сейсмическая станция «Паужетка». На врезке на рис. 1а показана конфигурация группы микробарографов на акустической станции IS44.

По данным очевидцев пепло-газовая эмиссия из кратера вулкана Камбальный в марте –апреле 2017 г. происходила со слабым газовым напором и без взрывных процессов (Гирина и др., 2017). Несмотря на сильную загруженность пеплом, верхняя кромка эруптивного облака поднялась, по нашему мнению, на высоту ~2 км над кратером вулкана, что свидетельствует о сравнительно низкой температуре пепло-газовой смеси (рис. 2).

В работе (Рычагов и др., 2017), на основании комплексного исследования состава пеплов, описываемого извержения, установлено, что он является резургентным, так как в его составе присутствуют частицы гидротермально измененных андезитов. Это послужило основой для предположения, высказанного в работе (Рычагов и др., 2017), что сейсмическая подготовка и эксплозивное извержение вулкана Камбальный в 2017 г. обусловлены активизацией газо-гидротермальных процессов в породах фундамента Камбального хребта.

## АППАРАТУРА И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Акустические сигналы, сопровождавшие извержение, изучались по данным инфразвуковой станции IS44, расположенной относительно вулкана на расстоянии 208 км к северу (рис. 1а). Акустическая антенная решетка станции IS44 с апертурой ~1.8 км на базе четырех микробарографов MB2000 производства Франции (рис. 1а, врезка), позволяет определять азимут

на источник инфразвуковых колебаний. Следует отметить, что каждый микробарограф станции IS44 оснащен пространственно акустическими фильтрами, что значительно повышает соотношение сигнал/шум в диапазоне инфразвуковых частот 0.03–10 Гц (Infrasound ..., 2009). Частота оцифровки для станции IS44 составляет 20 Гц.

Данные с этой станции автоматически обрабатываются с помощью, разработанной в КФ ФИЦ ЕГС РАН информационной системы (ИС) KamIn, обеспечивающей сбор, хранение и обработку инфразвуковых сигналов в атмосфере, которая позволяет осуществлять селекцию акустических инфразвуковых сигналов, возникающих во время извержений вулканов Камчатки и Северных Курил (Махмудов и др., 2016).

На распространение звукового луча в атмосфере сильно влияет изменение температуры, скорости и направления ветра с высотой. Поэтому на больших расстояниях от источника измеренные уровни звукового давления могут существенно отличаться как в большую, так и в меньшую сторону от значений, ожидаемых вследствие геометрического расхождения. Это объясняется тем, что звуковой луч, в зависимости от вертикального профиля эффективной скорости звука ( $C_{эф}$ ), преломляется или по направлению к земной поверхности, или от нее. В случае градиента  $C_{эф}$  больше нуля (температурная инверсия или рост скорости ветра с высотой) образуется зона акустической тени, в которую прямая волна не попадает (Справочник ..., 1980).



**Рис. 2.** Извержение вулкана Камбальный 25 марта 2017 г. Фото сотрудницы ФГУ «Кроноцкий государственный заповедник» Л. Варавской (<http://trinixy.ru/142939-izverzhenie-vulkana-kambalnyy-na-kamchatke.html>).

По данным высотного баллонного зондирования на обсерватории «Петропавловск-Камчатский» Камчатского управления по гидрометеорологии и мониторингу за окружающей средой (<http://www.esrl.noaa.gov/raobs/intl/intl2000.wmo>) определялся высотный профиль  $C_{эф}$  на трассе вулкан Камбальный (КМБ) — инфразвуковая станция IS44 по формуле:

$$C_h = 20.1 \cdot \sqrt{273 + T_h} + v_h \cdot \cos(\varphi - \alpha_h),$$

где  $T_h$ ,  $v_h$ ,  $\alpha_h$ , — соответственно температура воздуха, скорость и азимут ветра на высоте  $h$ ,  $\varphi$  — азимут от источника на пункт приёма ( $\alpha_h$ ,  $\varphi$  — в радианах).

На станции PAU работают несколько комплектов сейсмической аппаратуры. Землетрясения, связанные с извержением вулкана Камбальный, обрабатывались по данным сейсмометра CMG-6TD фирмы GURALP. Широкополосный высокочувствительный трехкомпонентный цифровой сейсмометр фирмы CMG-6TD позволяет регистрировать скорость смещения грунта в частотном диапазоне от 0.03 до 100 Гц, с чувствительностью  $2 \cdot 1200$  В/м/с и частотой оцифровки 100 Гц.

Обработка акустических и сейсмических данных осуществлялась с помощью интерактивной программы DIMAS (Дрознин, Дрознина, 2010).

### АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, СОПРОВОЖДАВШИХ ИЗВЕРЖЕНИЕ

Комплексный анализ сейсмического и акустического излучений позволил уточнить время начала и выявить некоторые особенности извержения вулкана Камбальный в марте-апреле 2017 г. С целью селекции слабых сигналов, на инфразвуковой станции, расположенной на значительном удалении от извергающего вулкана, рассмотрим особенности наиболее сильного сигнала.

В автоматическом режиме с помощью ИС KamIn (<http://www.emsd.ru/larm/bdinfra>) в период 03.03–09.04.2017 г. был выделен только один инфразвуковой сигнал с азимутом на вулкан Камбальный. В конце извержения 07.04.2017 г., возникшая в результате нестационарного процесса, воздушная волна с амплитудой избыточного давления  $\Delta P_{max} = 0.02$  Па была зарегистрирована на IS44 в 22:51:55 (рис. 3). При этом вступления цугов инфразвуковых колебаний на микробарографы Н4 и Н1 пункта IS44 (рис. 1а, врезка) наблюдались почти одновременно, а разность вступлений между микробарографами Н3 и Н2 составляла ~5 с (рис. 3).

На с/с PAU после фильтрации фильтром высоких частот (ФВЧ) с  $f_{гр} = 1$  Гц выделялось

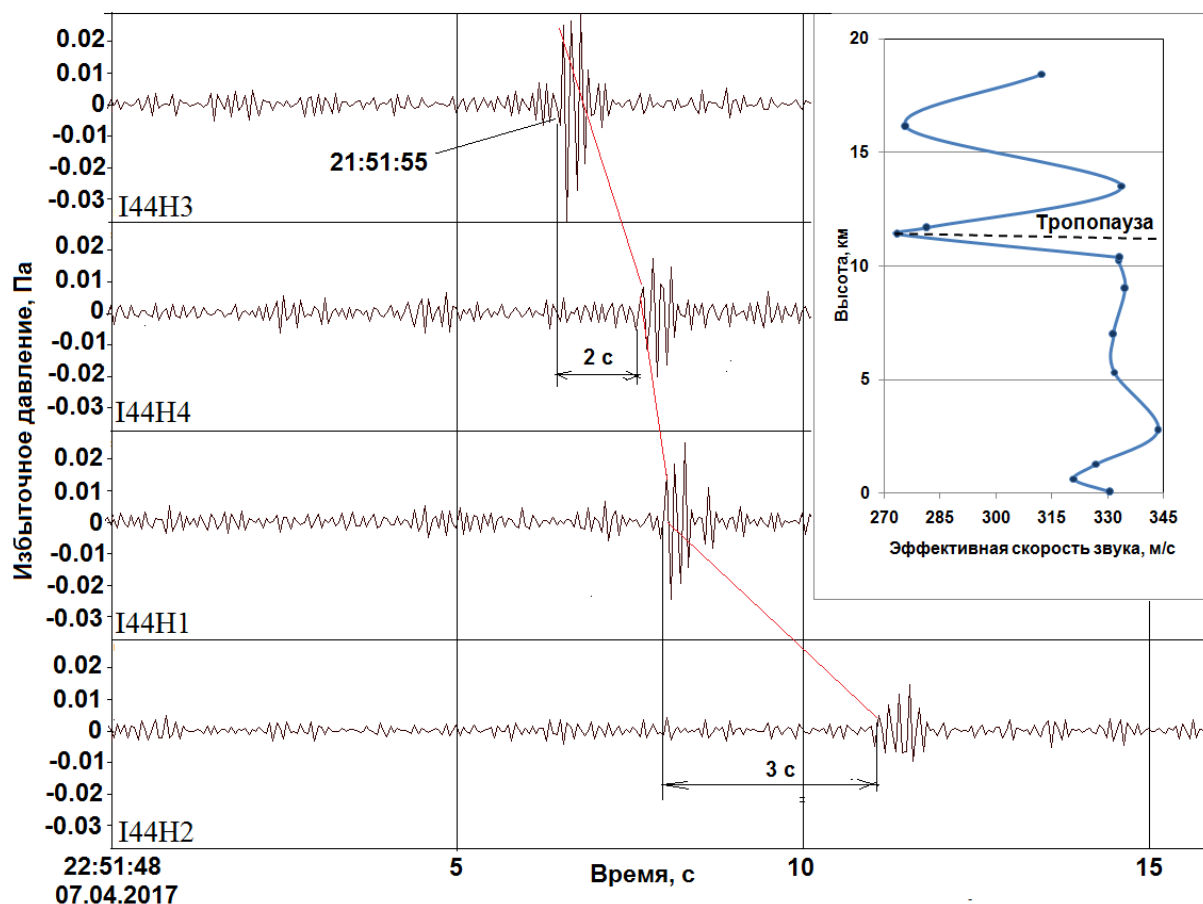


Рис. 3. Запись инфразвуковых волн от нестационарного процесса на вулкане Камбальный 07.04.2017 г. На врезке показана эффективная скорость звука на трассе КМБ-IS44, рассчитанная по данным зондирования за 07.04.2017 г. в 9:00.

землетрясение, опережавшее на ~13 мин. акустический сигнал, зарегистрированный на IS44 (рис. 4а). На вертикальном разрезе  $C_{эф}$  для трассы КМБ-IS44, построенном по данным баллонного зондирования, в этот период на высоте тропопазы 11 км существовал волновод с  $C_{эф} = 0.27$  км/с (рис. 3, врезка). При такой скорости разность прихода между акустической и сейсмической волнами для трассы длиной 208 км будет ~ 13 мин.

Спектральная плотность мощности (СПМ), вычисленная для 50-секундного интервала записи, включающего землетрясение, относительно фона заключена в пределах полосы частот 1–10 Гц (рис. 4б), что характерно для эксплозивных землетрясений (Фирстов и др., 2012). Данные факты указывают на то, что рассмотренные сигналы возникли в результате одного источника, которым была эксплозия на заключительном этапе извержения.

При обработке данных станции IS44 в ручном режиме за 24.03.2017 г., были обнаружены три цуга квазисинусоидальных колебаний с преобладающей частотой ~8.0 Гц и длительностью от 30 до 90 с, по времени возникновения соответствующие наиболее сильным сейсмическим событиям в этот день (рис. 5). Подобные цуги

инфразвуковых колебаний, наблюдавшиеся ранее при истечении пепло-газовой смеси при извержениях вулканов Камчатки, аналогично вулканическому дрожанию были названы «акустическим дрожанием» (АД) (Фирстов, 2010). Параметры землетрясений и соответствующих цугов АД приведены в табл. 1.

Если возникновение АД во время ЭЗ в 12:21 является закономерностью, то его возникновение во время двух землетрясений в 00:03 и 08:34 24.03.2017 г., которые предвещали извержение, является весьма неординарным событием.

Фазовой корреляции для отдельных колебаний на четырех каналах антенной решетки станции IS44 в цугах не наблюдалось, однако временные задержки между их огибающими указывали на азимут вулкана Камбальный (рис. 5). Отсутствие фазовой корреляции между отдельными колебаниями в цугах АД, на взгляд авторов, объясняется сравнительно высокой частотой инфразвуковых волн. Это может приводить к потере фазовой корреляции для отдельных колебаний за счет рефракции и интерференции. Кроме того, сравнительно небольшая частота оцифровки сигнала (20 Гц) может приводить к искажению сигналов с

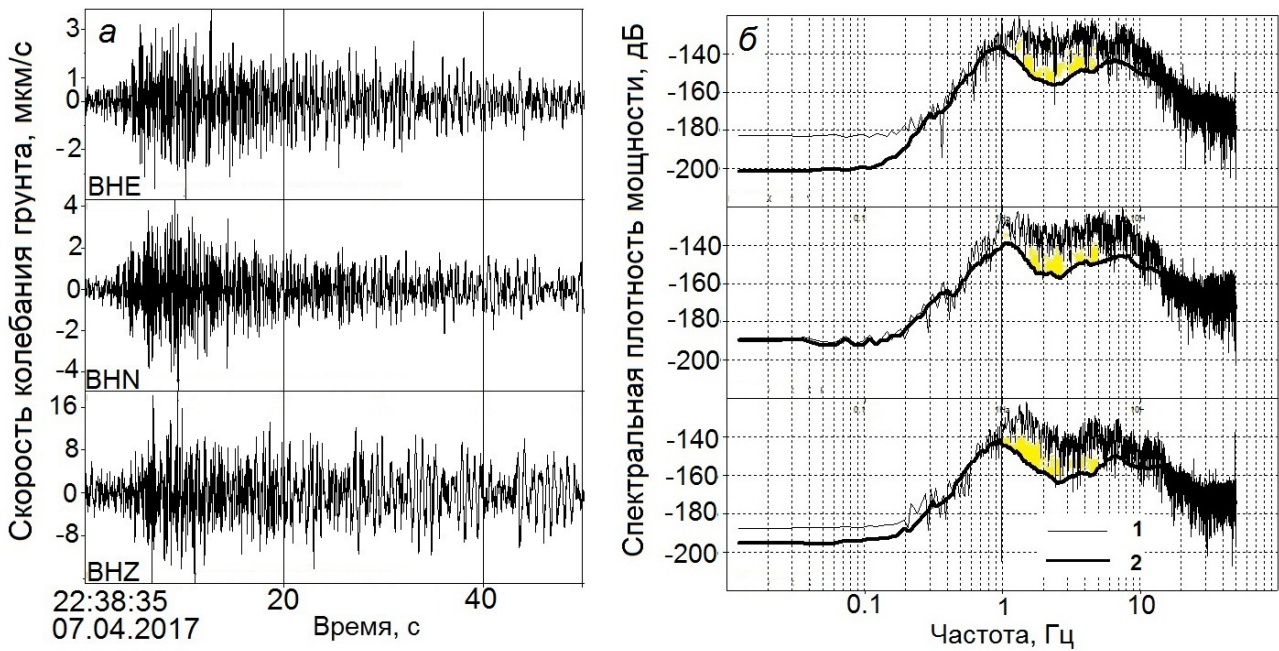


Рис. 4. Фрагмент записи трех составляющих землетрясения, сопровождавшегося воздушной волной 07.04.2017 г. (а), спектральная плотность мощности 50 секундного фрагмента, включающего землетрясение (б): 1 — расчетная кривая СПМ для сейсмической записи представленной на рис. 4а; 2 — расчетная кривая СПМ для фона той же длительности.

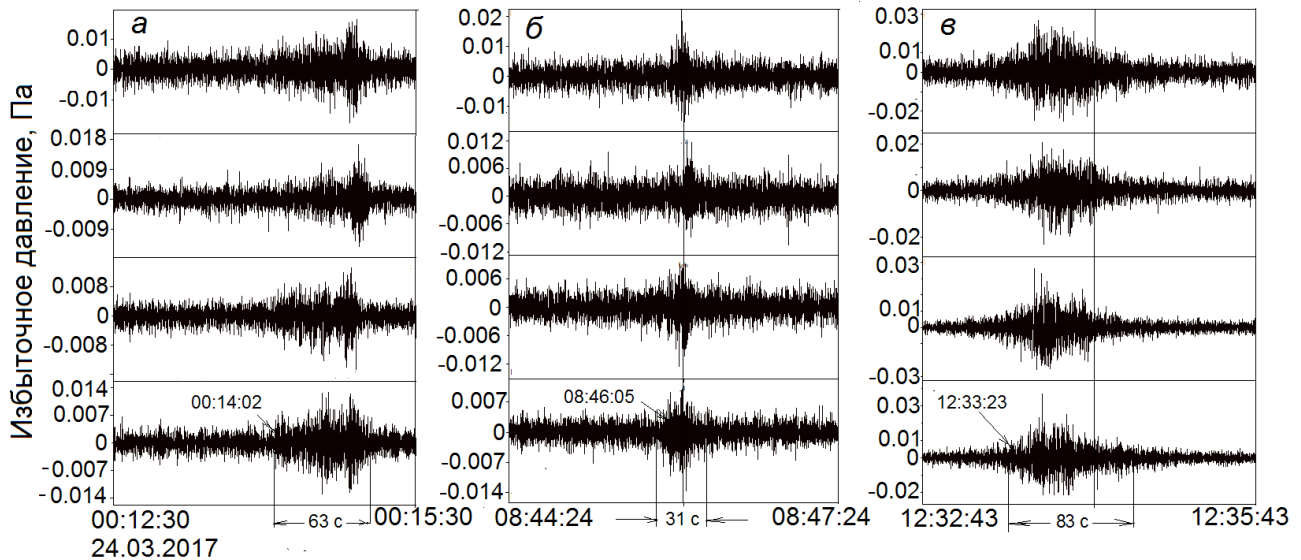


Рис. 5. Записи АД на станции IS44, возникших во временной окрестности наиболее сильных землетрясений, предварявших извержение (а, б), и сильной эксплозии на вулкане Камбальный (в).

Таблица 1. Параметры сейсмических сигналов и акустического дрожания, зарегистрированных на начальной стадии извержения вулкана Камбальный 24.03.2017 г.

	Сейсмический сигнал					Акустический сигнал			
	$t_0$ , чч:мм:сс	$\varphi$	$\lambda$	K	h	чч:мм:сс	$\Delta P_{cp}$	$l$	$C_{эф}$
1	00:03:06.7	51.28	156.94	8.6	5.9	00:14:02	0.004	63	316
2	08:34:48.1	51.28	156.94	7.9	6.2	08:46:05	0.003	31	308
3	12:21:38	Эксплоз. зем-ние		$A_{max} = 410$ мкм/с		12:33:23	0.015	83	296

Примечание:  $t_0$  — время в очаге;  $\varphi$  — широта, гр. E;  $\lambda$  — долгота, гр. N; K — энергетический класс; h — глубина очага в км;  $\Delta P_{cp}$  — избыточное давление в Па;  $l$  — длительность сигнала;  $C_{эф}$  — эффективная скорость звука, м/с.

частотой близкой и выше 10 Гц и так же к нарушению фазовой корреляции.

Скорость распространения инфразвуковых волн  $\sim 0.3$  км/с, рассчитанная по разности времен прихода сейсмического и акустического сигналов, близка к  $C_{эф}$  на трассе КМБ–IS44 на эту дату, что дает основание говорить о едином источнике сейсмического и акустического излучений.

Особенность землетрясений в 00:03 и 08:34 заключалась в следующем:

- одна и та же разность времени прихода поперечных и продольных волн  $t_{s-p} = 2.7$  с; близкие координаты и глубины очагов (табл. 1);

- идентичность волновых форм (рис. 6а). Все это свидетельствует о близости очаговых зон данных землетрясений и подобии механизмов очагов.

Кроме того, координаты эпицентров землетрясений близки к вершине вулкана Камбальный, то есть можно говорить, что они произошли непосредственно под вулканом.

СПМ для самого сильного ( $K = 8.6$ ) из всех землетрясений 24.03.2017 г., предвалявших извержение вулкана Камбальный, заключена в диапазоне частот 0.1–30 Гц (рис. 6а). На основании формы спектра были выделены три области, отмеченные на рис. 6в, границы которых взяты в качестве граничных частот для фильтров, с помощью которых осуществлялась фильтрация записей землетрясений (рис. 7).

На отфильтрованной полосовым фильтром (ПФ) с граничными частотами  $f_{гр1} = 1$  Гц и  $f_{гр2} = 8.0$  Гц волновой форме для обоих землетрясений, хорошо выделяется вступление S волны (рис. 7а, 7б, третья панель). Фильтрация ПФ с граничными частотами  $f_{гр1} = 0.2$  Гц и  $f_{гр2} = 1$  Гц дала представление о поверхностных волнах с периодом  $T \approx 1.0$  с (рис. 7а, 7б, нижние панели). Поляризация участков волновых форм с эллипсоидным движением частиц в вертикальной плоскости указывают, что это волна Рэлея. Формирование на сравнительно небольшом эпицентральной расстоянии

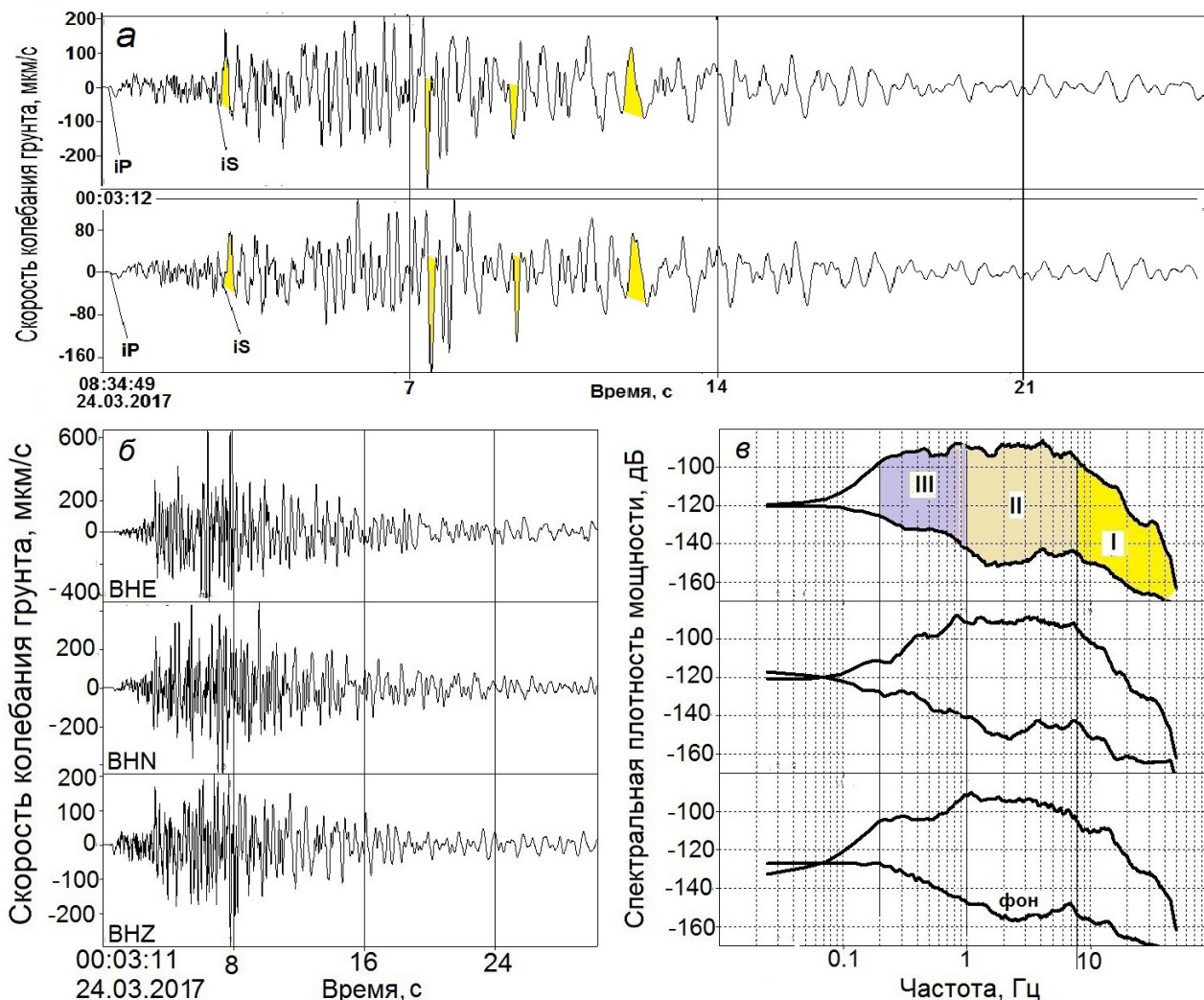


Рис. 6. Волновые формы составляющей ВНЗ двух самых сильных землетрясений, предвалявших извержение вулкана Камбальный (а), волновые формы трех составляющих землетрясения с  $K=8.6$  (б) и рассчитанная для них спектральная плотность мощности (в).

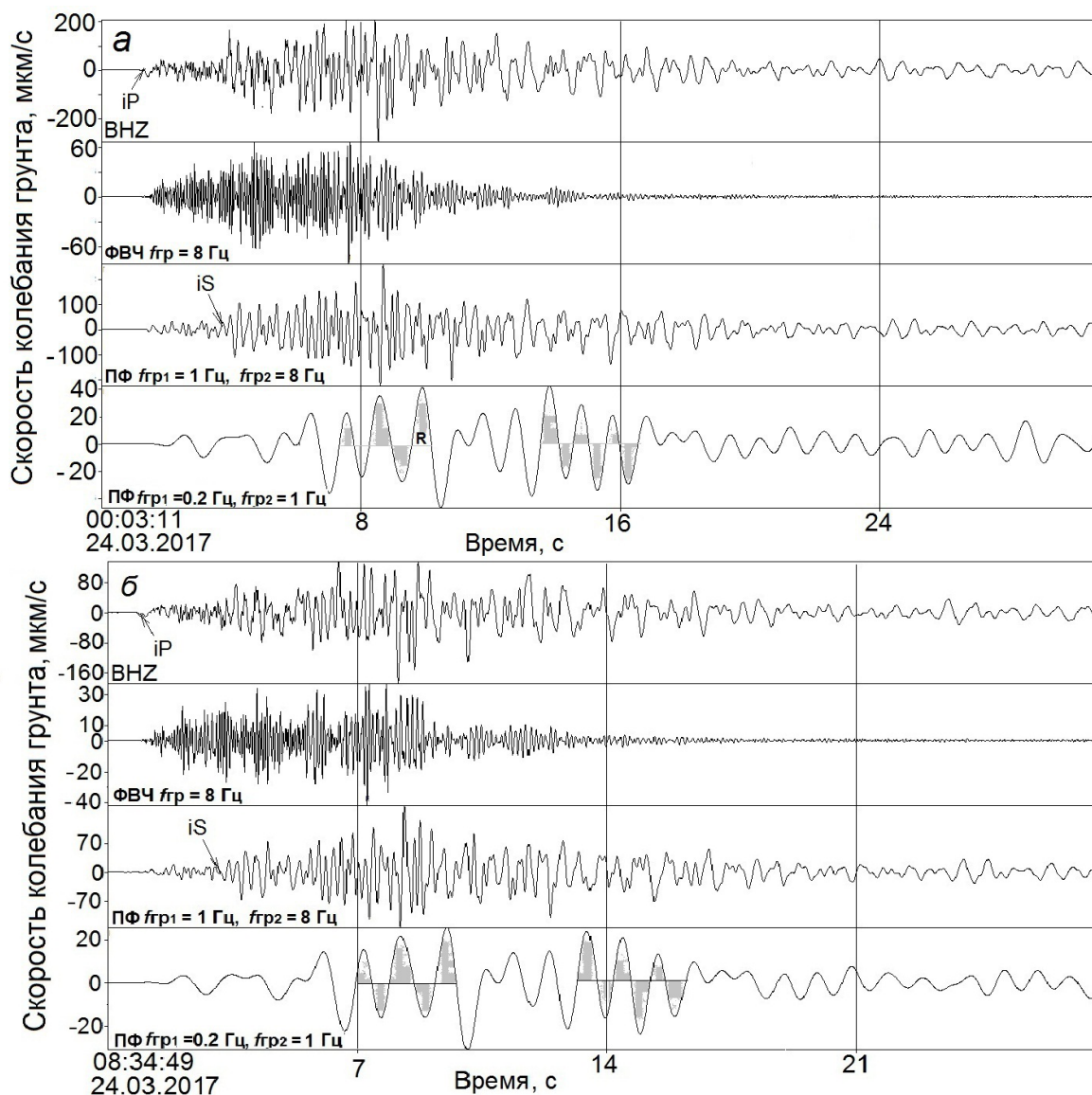


Рис. 7. Отфильтрованные фильтрами с различными граничными частотами волновые формы землетрясений: а — 00:03:11; б — 08:34:49 24.03.2017 г.

волны Рэлея (~20 км), говорит о необычности механизма очага землетрясения или на меньшую глубину очага, чем она была определена по редкой сети сейсмических станций.

Рассмотрим волновую картину самого сильного ЭЗ, произошедшего в начальную фазу извержения 24.03.2017 г. в 12:21:38 и зарегистрированного акселерометром на с/с PAU (Сенюков и др. 2017). При общей длительности записи ЭЗ ~150 с, в течение первой минуты на всех трех составляющих регистрировалось медленное нарастание амплитуды колебаний скорости грунта от 4 мкм/с до 60 мкм/с с преобладающей частотой 7 Гц. В следующую минуту выделяются три цуга колебаний с  $A_{max}^1 = 300$ ,  $A_{max}^2 = 210$ ,  $A_{max}^3 = 80$  мкм/с (рис. 8а). Относительно фона для кривых СПМ этого землетрясения характерен

широкий спектр частот от 0.1 до 30 Гц. Достаточно уверенно выделяется спектральный максимум на частоте ~0.1 Гц (рис. 8б), что является весьма необычным для ЭЗ.

Опираясь на форму кривой СПМ, была осуществлена фильтрация четырьмя фильтрами, три из которых использовались ранее (рис. 6в). Отфильтрованные кривые показали сложную структуру этого сейсмического события. На волновой форме, полученной путем фильтрации ПФ с  $f_{гр1} = 1$  Гц и  $f_{гр2} = 8.0$ , можно выделить вступление двух волн, которые были отнесены к объемным волнам с  $t_{s-p} = 2.4$  с.

Через 23 с после вступления «высокочастотной» составляющей регистрируются «низкочастотные» колебания с  $T \approx 10$  с, затухающие через 20 с после окончания «высокочастотной» составляющей (рис. 8в, пятая панель). Следует отметить, что длиннопериодные сигналы (very

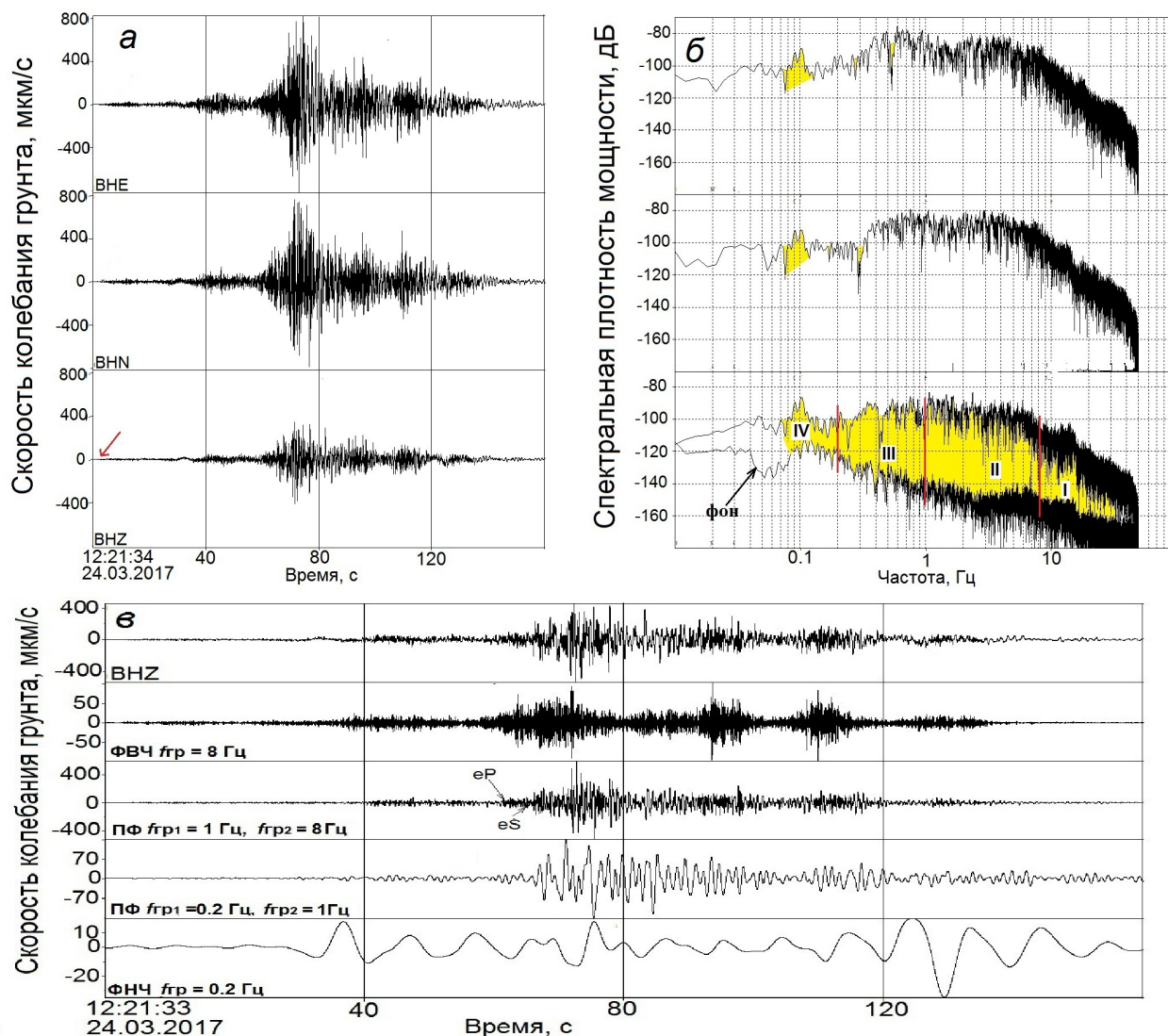


Рис. 8. Запись трех компонент эксплозивного землетрясения на с/с PAU (а), их спектральная плотность мощности (б), различные фильтрации для VHZ компоненты (в).

long period) с периодом  $> 20$  с наблюдались и во время сильных эксплозивных извержений вулкана Безымянный, которые свидетельствовали о процессах, захватывающие большие глубины (West, 2013).

Землетрясение 24.03.2017 г. в 12:21:38, по-видимому, следует считать гибридным, отражавшим два процесса — механическое разрушение среды и последующие внедрение высокотемпературного флюида в высокотемпературную зону. На следующем этапе происходила фрагментация резургентного материала и вынос пепло-газовой смеси в атмосферу. Подобные землетрясения регистрировались во время сейсмической активизации вулкана Корякский в 1994 г. (Гордеев, Сениуков, 1998).

Основываясь на времени запаздывания огибающих отдельных цугов АД, на записях инфразвуковых колебаний станции IS44 в ручном режиме выбирались участки, направление на источник для которых совпадало с азимутом

на вулкан Камбальный (табл. 2). Длительность выделенных участков АД варьировала в пределах от 3 до  $3 \cdot 10^4$  с, причем, как правило, в цугах АД фазовая корреляция для отдельных колебаний не наблюдалась. Это свидетельствует о том, что фрагментация магматического материала происходила со стабильной скоростью, и не сопровождалось воздушными ударными волнами. Непрерывное истечение различных струй в атмосферу сопровождается шумом аэродинамического происхождения, который обусловлен взаимодействием потока струи с окружающей средой. Во время истечения как пароводяных струй из скважин, так и пепло-газовой смеси из кратера вулкана генерируется аэродинамический шум с квадрупольным источником (Фирстов, 2005; Matoza et al., 2013).

Наиболее интенсивное и продолжительное АД с азимутом на вулкан Камбальный было зарегистрировано 25.03.2017 г., когда согласно сообщениям KVERT (табл. 2), наблюдалась мак-

**Таблица 2.** Активность вулкана Камбальный в 2017 г. по данным KVERT (Гирина и др., 2017) и параметры акустических сигналов, зарегистрированных на станции IS44.

Активность вулкана Камбальный		Акустический сигнал			Примечание
Дата, 2017 г.	Описание	Время, чч:мм:сс	Длительность, с	$\Delta P_{cp}$ , Па	
24.03	Начало извержения. Пепловая колонна, наклоненная на 45° к горизонту, поднималась до 6 км н.у.м., образуя шлейф протяженностью десятки километров в сторону океана	00:14:20*	63	0.004	00:03 землетрясение с $K=8.6$ ; 05:13 слабый сейсмич. сигнал 08:35 землетрясение с $K=7.9$ ; 12:21 сильное ЭЗ
		05:25:06*	31	0.005	
		08:46:00*	10	0.003	
		12:33:37*	83	0.015	
25.03	Максимальная интенсивность выноса пепла	02:10:08	2004	0.008	
		02:57:12	28110	0.003	
		11:07:57	4487	0.01	
		15:02:29	733	0.006	
		19:11:45	267	0.005	
21:39:45	5906	0.009			
26.03	Пепловая колонна стоит вертикально над вершинным кратером вулкана, шлейф протягивается на юго – восток	01:56:44	559	0.01	
		03:18:56	268	0.006	
		04:43:39	695	0.008	
		11:32:00	2981	0.16	
		13:00:04	1851	0.007	
		14:00:00	1044	0.01	
15:30:55	188	0.009			
27.03	Умеренно нагруженный пеплом шлейф перемещался на запад и юго-запад	06:29:00	476	0.04i	
		15:45:34	70	0.012	
		22:27:08	7	0.008	
29.03.		04:10:24	150	0.015	
		06:43:43	261	0.006	
30.03	Пепловый шлейф протягивается на юго-восток				
31.03, 01.04	Вулкан относительно спокоен				
2.04, 18:46	Возобновление активности мощным выбросом пепла до 7 км н.у.м., пепловый шлейф протягивается на восток	18:46:03	60	0.012	
2–5.04	Мощная парогазовая активность вулкана с выносом различного количества пепла				
4.04	Небольшой пепловый шлейф				
7.04	Вулкан закрыт облаками	22:51:53*	3	0.01	Отдельный импульс
9.04	Произошел выброс пепла (эксплозия) до 7 км н.у.м., шлейф перемещался на северо-восток	02:48:44	50	0.05	
10.04	Пепловый шлейф протяженностью до 170 км				

Примечание: \*акустические сигналы, для которых на записях с/с РАУ обнаружены соответствующие сейсмические сигналы.

симальная интенсивность выноса пепла. С 02:00 до 11:35 25.03.2017 г. регистрируется медленное нарастание амплитуды АД (рис. 9а). При этом для наиболее сильного уровня наблюдалась фазовая корреляция для отдельных квазипериодов АД, существенно осложненного высокочастотными помехами на каждом из каналов антенной решетки (рис. 10).

Для наиболее интенсивного АД с 03:45 до 10:00 25.03.2017 г. строилась огибающая кривая как скользящее среднеквадратичное отклонение

в секундных интервалах с последующей децимацией по 20 точкам и затем осредненная скользящим средним в пятиминутных интервалах (рис. 9б). На СПМ для огибающей кривой уверенно выделяются 4 спектральных пика с кратными частотами  $f_0 = 0.88$  ( $T_1 = 68.2$  мин.),  $f_2 = 1.75$ ,  $f_3 = 2.64$ ,  $f_4 = 3.52$  1/час. Пульсирующее истечение газо-пепловой смеси достаточно часто наблюдается во время извержений как андезитовых, так и базальтовых вулканов (Сторчеус и др. 2006; Ozerov et al., 2007).

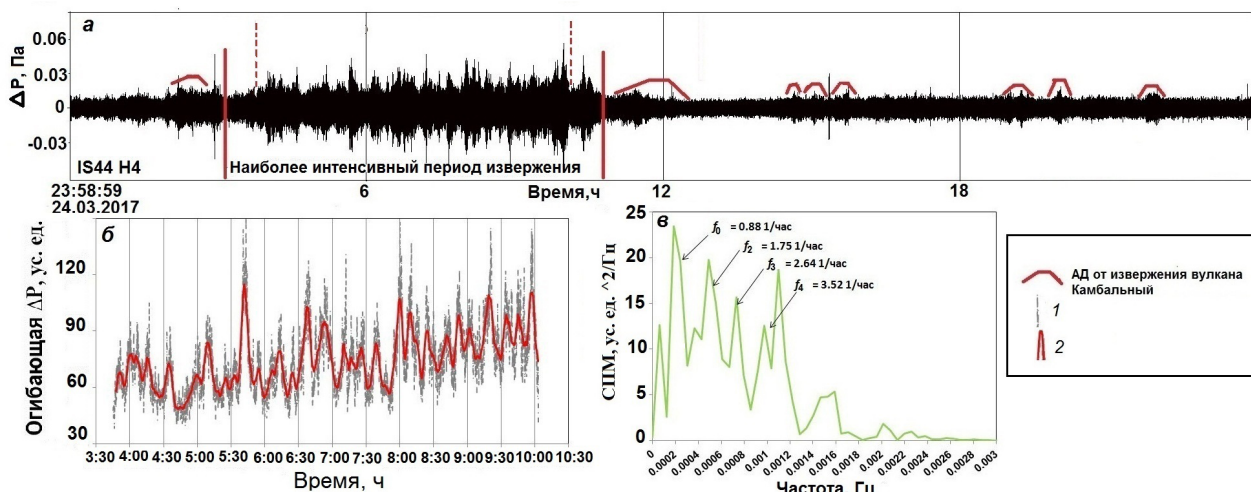


Рис. 9. Суточная запись за 25.03.2017 г. волновых возмущений на IS44 (а); огибающая для участка записи акустического дрожания, связанного с наиболее интенсивным периодом извержения (б), спектральная плотность мощности для огибающей АД (в). Пунктиром отмечен участок, для которого приведена огибающая кривая на рис. 9а. 1 — среднеквадратичное отклонение для секундных интервалов; 2 — осредненная скользящим средним в 5-минутном интервале огибающая АД.

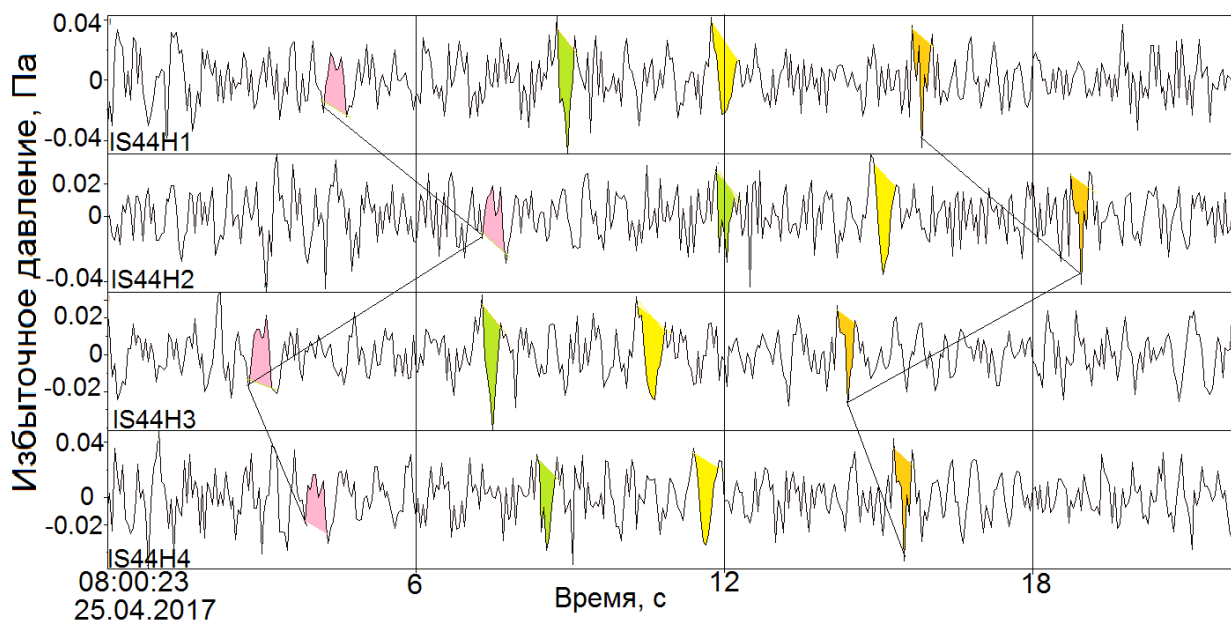


Рис. 10. Фрагмент записи интенсивного АД, сопровождавшего извержение вулкана Камбальский 25.03.2017 г., с фазовой корреляцией отдельных наиболее сильных квазипериодов.

Во время интенсивного истечения пепло-газовой смеси возникает автоколебательный процесс, обеспечивающий пульсирующий режим фрагментации и выноса магматического материала (Сторчеус и др., 2006).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первый цуг АД, зарегистрированный на станции IS44, с азимутом на вулкан Камбальский дает основание отнести начало извержения к 00:14 24 марта 2017 г. (рис. 5а). При этом на с/с РАУ было зарегистрировано вулcano-тектоническое землетрясение с  $K = 8.6$ , соответствующее времени возникновения цуга АД, эпицентр

которого располагался почти под вулканом на глубине 6 км (рис. 6).

Следующие два цуга АД зарегистрированы в 5:25 и 8:46 24 марта 2017 г. Первое сопровождалось слабым землетрясением, а второе вулcano-тектоническим землетрясением с  $K = 7.9$ . Одновременное возникновение вулcano-тектонических землетрясений и АД является весьма необычным явлением и в практике вулканологических исследований авторам неизвестно. Одним из возможных предположений, объясняющим этот факт, является то, что одновременно с процессом разрушения материала вблизи выводного канала, на что указывают эпицентры землетрясений, происходило истечение пепло-газовой смеси,

возникающей в результате вскипания перегретого флюида и выноса фрагментированного материала в атмосферу.

В 12:21 на с/с РАУ зарегистрировано весьма необычное землетрясение, которое следует отнести к гибридным (рис. 8). К временной окрестности этого землетрясения приурочен самый интенсивный цуг АД по сравнению с предшествующими с  $\Delta P_{cp} = 0.015$  Па.

Интервалу времени с наиболее интенсивным выносом пеплового материала 25.03.2017 г. с 03:45 до 10:00 25.03.2017 г. соответствует непрерывное АД с нарастающей амплитудой. Спектральный анализ огибающей сигнала позволяет говорить о возникновении автоколебательного процесса с основным периодом  $T_0 = 68$  мин. Менее продолжительные цуги АД с меньшей интенсивностью регистрировались до 9.04.2017 г. (табл. 2).

Волновые возмущения в атмосфере, регистрируемые инфразвуковыми станциями, — дополнительный параметр мониторинга взрывной активности вулканов. Особенности волновых возмущений, сопровождавших извержение вулкана Камбальный, указывают на «спокойный» процесс образования эмиссии пепло-газовой смеси из кратера вулкан, без нестационарных процессов, приводящих к возникновению ударных волн.

Характер извержения вулкана Камбальный в марте-апреле 2017 г., его короткая и слабая сейсмическая подготовка, возникновение двух газовых эмиссий без взрывных процессов в кратере вулкана одновременно с вулcano-тектоническими землетрясениями указывают об особом развитии начала эруптивного извержения на вулкане Камбальный в 2017 г. и на его необычный характер.

С целью лучшего понимания геодинамических процессов предшествующих извержению вулкана рассмотрим особенности сейсмичности района Паужетского месторождения геотермальных вод, пространственно сопряженного с вулканом Камбальный (рис. 1б). Сейсмичность этого района в 1969-1977 гг. рассматривалась в работе (Левина и др., 1980). С 1969 г. по июнь 1973 г. по данным с/с РАУ район был асейсмичным. В последующие годы (1973-1977 гг.) на фоне слабой сейсмичности стали выделяться роевые последовательности с  $K_{max} < 10.7$ , имеющие устойчивую сезонную периодичность с весенним (март-апрель) и летним (июль-август) максимумами. На основании расстановки дополнительных сейсмических станций, позволивших уточнить координаты землетрясений, установлено, что эпицентральная область землетрясений приурочена к системе тектонических нарушений меридионального простирания, примыкающей к северной части хребта

Камбальный. Это послужило основанием рассматривать возможную связь гидротермальных процессов района Паужетского месторождения парогидротерм с возникшей локальной сейсмичностью, что согласуется с данными работы (Структура ..., 1993), в которой показано, что в недрах Камбального хребта существуют крупные гидротермальные системы, имеющие глубинное тепловое питание.

К сожалению, из-за редкой сети сейсмических станций ошибка определения гипоцентров землетрясений предшествующего извержению в 2017 г. составляет ~11 км в плане и ~6 км по глубине. Поэтому точная привязка сейсмичности, к тектонике района невозможна. Но, короткая по времени (2 суток) и слабая по энергетике ( $K_{max} = 8.6$ ) сейсмическая подготовка указывает на возможность гидротермального извержения, которое связано с проникновением перегретых подземных вод по тектоническим трещинам в окрестность магматического очага.

После извержения на кратере вулкана Камбальный появилась новая структура — провал-воронка с поперечным сечением ~115×100 м и субвертикальными стенками, которая могла служить каналом для транспортировки из глубины постройки газа и пепла во время извержения (Рычагов и др., 2017). При выносе значительного количества вулканического материала из жерла с таким размером должен был возникать квадрупольный источник инфразвуковых волн с частотой 5–10 Гц. При распространении инфразвуковых волн от квадрупольного источника на расстояние более 200 км, за счет рефракции и интерференции, по-видимому, происходит потеря фазовой корреляции для отдельных колебаний.

Как установлено в работе (Рычагов и др., 2017), пепел извержения вулкана Камбальный в 2017 г. состоит, в основном, из пылеватых частиц размером  $< 0.063$  мм. Химический состав пепла отвечает низкощелочному андезиту, в минеральном составе которого преобладают: плагиоклазы среднего состава, кислое стекло с микролитами пироксенов и плагиоклазов. По составу пепел близок к породам, слагающим вулканический хребет Камбальный, и является резургентным. Этот факт, с большой вероятностью, дал основание С.Н. Рычагову с соавторами (2017) предполагать, что извержение вулкана Камбальный в марте-апреле 2017 г. по характеру является гидротермальным извержением.

Исходя из характера проявлений сейсмического и акустического излучений, авторы настоящей работы также приходят к выводу, что извержение вулкана Камбальный в марте-апреле 2017 г. с большой вероятностью является гидротермальным. Такие извержения

на вулканах Камчатки достаточно редки. За последние 50 лет извержение вулкана Камбальный является вторым извержением гидротермального типа после извержения вулкана Корякский в 2009 г. (Максимов и др., 2011).

В заключении авторы выражают благодарность С.Н. Рычагову за конструктивные замечания, способствующие улучшению работы.

#### Список литературы

- Гирина О.А., Гордеев Е.И.* Проект KVERT — снижение вулканической опасности для авиации при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки и Северных Курил // Вестник ДВО РАН. 2007. № 2. С. 100–109.
- Гирина О.А., Мельникова Д.В., Маневич А.Г., Нуждаев А.А.* Извержение вулкана Камбальный в 2017 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 14. № 2. С. 263–267.
- Гордеев Е.И., Гирина О.А.* Вулканы и их опасность для авиации // Вестник Российской академии наук. 2014. Т. 84. № 2. С. 134–142. DOI: 10.7868/S0869587314020121.
- Гордеев Е.И., Гирина О.А., Луян Е.А. и др.* Информационная система VolSatView для решения задач мониторинга вулканической активности Камчатки и Курил // Вулканология и сейсмология. 2016. № 6. С. 62–77. DOI: 10.7868/S0203030616060043.
- Гордеев Е.И., Фирстов П.П., Куличков С.Н., Махмудов Е.Р.* Инфразвуковые волны от извержений вулканов Камчатки // Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 4. С. 456–468.
- Гордеев Е.И., Сеников С.Л.* Сейсмическая активизация Корякского вулкана: гибридные землетрясения и их применение для прогноза вулканической активности // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4–5. С. 112–126.
- Дроздин Д.В., Дроздина С.Я.* Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34.
- Ефремов В.Ю., Гирина О.А., Крамарева Л.С. и др.* Создание информационного сервиса «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 155–170.
- Левина В.И., Фирстов П.П., Зобин В.М.* Сейсмичность Паужетского геотермального района на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1980. № 2. С. 81–98.
- Литасов Н.Е., Огородов Н.В., Кожемяка Н.Н. и др.* Паужетская вулcano-тектоническая структура // Вулканы и геотермы Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 1974. С. 47–72.
- Максимов А.П., Аникин Л.П., Вергасова Л.П. и др.* Пеплы извержения Корякского вулкана (Камчатка) в 2009 г.: особенности состава и генезис // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Вып. 18. С. 73–85.
- Махмудов Е.Р., Фирстов П.П., Будилов Д.И.* Информационная система для мониторинга волновых возмущений в атмосфере на полуострове Камчатка «КАМИН» // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 2. С. 5–16.
- Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И., Сергеева А.В., Нуждаев И.А.* Состав пепла вулкана Камбальный (извержение 2017 г.) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 4. Вып. 36. С. 13–27.
- Сторчеус А.В., Фирстов П.П., Озеров А.Ю.* Возможный механизм генерации акустических и сейсмических волн при пульсирующем истечении газо-пепловой смеси на вулкане Карымском // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 3–16.
- Справочник по технической акустике. Л.: Судостроение, 1980. 435 с.
- Структура гидротермальной системы / Отв. редакторы В.И. Белоусов, И.С. Ломоносов. М.: Наука, 1993. 239 с.
- Фирстов П.П.* Ударно-волновые и акустические эффекты при вулканических извержениях (обзор) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2009. № 2. Вып. 13. С. 31–45.
- Фирстов П.П.* Динамика вулканических извержений и её проявление в ударно-волновых и акустических эффектах в атмосфере. Автореф. дисс. док. физ.-мат. наук. Южно-Сахалинск. 2010. 43 с.
- Фирстов П.П., Махмудов Е.Р., Макаров Е.О., Фи Д.* Комплексные геофизические наблюдения на вулкане Карымский (Камчатка) в августе 2012 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 110–120.
- Green D.N., Bowers D.* Estimating the detection capability of the international monitoring System infrasound network // JGR. 2010. V. 115. № 2. P. 3–18. D18116, doi:10.1029/2010JD014017
- Infrasound monitoring for atmospheric studies / Editors: A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne. Springer, 2009. 727 p.
- Matoza R.S., Fee D., Neilsen T.B. et al.* Aeroacoustics of volcanic jets: Acoustic power estimation and jet velocity dependence // Journal of Geophysical Research. Solid Earth. 2013. V. 118. P. 6269–6284. doi:10.1002/2013JB010303.
- Matoza R.S., Le Pichon A., Herry P. et al.* Infrasonic observations of the June 2009 Sarychev Peak eruption, Kuril Islands: Implications for infrasonic monitoring of remote explosive volcanism // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2010. V. 200. № 1–2. P. 35–47.

- Ozerov A.Yu., Firstov, P.P., Gavrilov V.A.* The Kamchatka Region; Geophysical. Periodicities in the Dynamics of Eruptions of Klyuchevskoi Volcano // Kamchatka Monograph Series. Volcanism and Subduction / Eds: J. Eichelberger, E. Gordeev, M. Kasahara et al. 2007. V. 172. P. 283–291.
- Ponomareva V.V., Melekestsev I.V., Dirksen O.V.* Sector collapses and large landslides on Late Pleistocene–Holocene volcanoes in Kamchatka, Russia // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2006. V. 158 № 1–2. P. 117–138. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2006.04.016.
- West M.E.* Recent eruptions at Bezymianny volcano — A seismological comparison // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. № 3. P. 42–57.

## ATMOSPHERIC WAVE DISTURBANCES DURING THE 2017 KAMBALNIY VOLCANO ERUPTION (KAMCHATKA)

**P.P. Firstov<sup>1</sup>, M.A. Lobachova<sup>1, 2</sup>**

<sup>1</sup>*Kamchatka branch of the Geophysical Service RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006*

<sup>2</sup>*Kamchatka Bering State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683032*

On March 24, 2017 Kambalnyi Volcano started to erupt after a 500-year-long period of rest. The eruption continued till April 10, 2017. The paper provides the analysis of atmospheric wave disturbances as wavetrains of quasi-sinusoidal oscillations with a frequency of 8 Hz ("acoustic tremor" or AT), which occurred at certain moments during the eruption. Besides, the paper describes 3 strongest seismic signals registered at the initial stages of the eruptions simultaneously with AT, which was registered using an infrasound station IS44 installed 208 km NW far from the volcano. The nearest "Pauzhetka" seismic station installed 19 km far from the volcano allowed monitoring the seismic build-up, which was short (2 days) and weak ( $K_{\max} = 8.6$ ). Lack of definite discrete infrasound signals, which are usually caused by non-stationary process during explosive eruptions, gives evidence for peculiar pattern of formation and effusion of ash-and-gas emissions. Such uncommon acoustic radiations and seismic build-up prove the presumption that this eruption should be classified as a hydrothermal event.

*Keywords: volcano, acoustic tremor, seismic data, hydrothermal eruption.*