

УДК 551.596;550.348.436

## ИНФРАЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ ОТ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ

© 2013 г. Е. И. Гордеев\*, \*\*, П. П. Фирстов\*, \*\*, С. Н. Куличков\*\*\*, Е. Р. Махмудов\*\*

\*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9  
E-mail: gordeev@kscnet.ru

\*\*Камчатский филиал Геофизической службы РАН  
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9  
E-mail: firstov@emsd.ru

\*\*\*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова  
РАН 119017 Москва, Пыжевский пер., 3  
E-mail: snk@faran.ru

Поступила в редакцию 09.02.2012 г., после доработки 01.10.2012 г.

На полуострове Камчатка в пункте Начики (НЧК) работает акустическая станция IS44, входящая в международную систему инфразвукового мониторинга (IMS) режима соблюдения Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ), а в поселке Паратунка работает станция Камчатского филиала Геофизической службы РАН. Эти станции позволяют вести мониторинг сильных взрывчатых извержений андезитовых<sup>1</sup> вулканов. Рассмотрены кинематические и динамические параметры акустических сигналов, сопровождавших извержения вулканов Безымянного, который расположен на расстоянии 361 км от пункта НЧК в 2009–2010 гг. и вулкана Кизимен, расположенного на расстоянии 275 км во время извержения 31 декабря 2011 г. Обнаружена низкочастотная фаза разрядки длительностью более 60 с в начальной части записи акустических сигналов, сопровождающих сильные извержения. Показано, что фаза разрядки возникает в результате резкой конденсации перегретого ювенильного<sup>2</sup> пара, поступающего в атмосферу во время таких взрывов<sup>3</sup>. На основании акустических сигналов, зарегистрированных во время рассмотренных выше извержений, сделана оценка количества пепла, выброшенного в атмосферу, которая заключена в пределах  $(3.2–7.3) \times 10^6 \text{ м}^3$ .

**Ключевые слова:** вулкан, взрывчатые извержения, инфразвуковой сигнал, количество пепла.

DOI: 10.7868/S0002351513030085

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы исследованию процессов генерации и распространения инфразвуковых волн от извержений вулканов уделяется большое внимание [2–6]. Инфразвук от вулканов может распространяться на расстояния в несколько тысяч километров. Например, в [3, 4] приведены примеры регистрации инфразвука на станциях, входящих в международную систему IMS на расстояниях до 6400 км от извержения вулкана пик Сарычев на Средних Курильских островах.

Общеизвестно, что распространение пепловых облаков на сотни и тысячи километров на высотах 8–15 км во время вулканических изверже-

ний представляет особую опасность для авиации. Показательно извержение исландского вулкана Эйяфьятлайокуль в июне 2010 г., когда в течение нескольких дней было парализовано воздушное сообщение во многих странах Европы. Инфразвуковые сигналы вблизи этого вулкана приведены в [2]. Вблизи восточного побережья полуострова Камчатка и непосредственно над ним также проходит большое количество авиатрасс, связывающих Североамериканский континент с Японией и странами Юго-Восточной Азии. При сильных извержениях Камчатских вулканов их пепловые шлейфы не раз пересекали международные авиатрассы, создавая опасность для авиалайнеров. Оперативное оповещение авиационных служб Тихоокеанского региона о готовящихся или начавшихся взрывчатых извержениях вулканов Камчатки группой KVERT (Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team) позволяет снизить пеп-

<sup>1</sup> Андезит – горная порода [1].

<sup>2</sup> Ювенильный – первичный эндогенного происхождения [1].

<sup>3</sup> Взрывчатость – явление вулканического взрыва, обычно сопровождающееся выбросами большого количества пирокластического материала и газов [1].

ловую опасность для авиатрасс этого района [7]. Поэтому мониторинг извержений действующих вулканов дистанционными методами имеет большое значение и для обеспечения безопасности полетов авиации.

Одним из дистанционных методов мониторинга пепловой опасности может стать инфразвуковой метод, поскольку сильные извержения сопровождаются волновыми возмущениями в атмосфере, которые регистрируются на больших расстояниях [2–6, 8–12]. Инфразвуковая система мониторинга ДВЗЯИ (IMS) состоит из 60 инфразвуковых станций, распределенных по поверхности земного шара. Три такие станции находятся на территории Российской Федерации, одна из которых IS44 расположена на Камчатке в поселке Начики. Эта станция позволяет вести мониторинг извержений вулканов Камчатки и Курильских островов, что убедительно продемонстрировано в работах [3, 4]. В дополнение к этой станции Камчатским филиалом Геофизической службы РАН организован пункт регистрации волновых возмущений от вулканических извержений в поселке Паратунка (ПРТ).

Кроме того, инфразвуковой метод, по аналогии с сейсмическим методом исследования твердой Земли, может быть использован для дистанционного зондирования атмосферы в области высот 0–150 км. Для этих целей наряду с искусственными источниками (техногенные взрывы) могут быть использованы и естественные высокоэнергетические процессы – сильные извержения.

Подробно состояние проблемы исследования инфразвуковых волн в атмосфере, в том числе и от извержений вулканов, обсуждено в монографии международного коллектива авторов [13].

В данной работе представлены некоторые результаты акустического мониторинга и оценки объемов пепла, выброшенного в атмосферу при наиболее сильных эксплозивных извержениях вулканов Камчатки в период 2006–2010 гг.

#### ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН И ЭФФЕКТОВ В АТМОСФЕРЕ ОТ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

В работах [12, 14–16] проанализированы экспериментальные данные об ударно-волновых и акустических эффектах в атмосфере от вулканических извержений и дана их феноменологическая классификация. В основу классификации положены характерный диапазон частот и физический процесс, в результате которого происходит генерация акустического сигнала (АС) того или иного класса.

**1. Аэродинамический шум** ( $f = 20–1000$  Гц) при вулканических извержениях возникает в результате аэродинамического воздействия на окружающую среду потока дисперсионного материала. Он возникает в периоды истечения из кратера пепло-газовой струи, возникающей в результате отделения газовой фазы и фрагментации (разрушения) магмы в верхней части вулканического выводного канала.

**2. Импульсные акустические сигналы с длительностью импульса 0.1–1 с**, которые генерируются при нестационарных процессах в кратерной зоне во время дегазации и фрагментации поступающей на дневную поверхность магмы. АС этого класса возникают при разрушении отдельных газовых пузырей в кратере при стромболианском<sup>4</sup> типе извержения вулканов с базальтовым составом магм или при взрывных процессах, связанных с фрагментацией “пенных пакетов” при вулканском<sup>5</sup> типе извержения вулканов с более вязкой магмой дацитового или андезидацитового состава. В редких случаях их образование возможно за счет воздушных взрывов при окислении воздухом взрывоспособных ювенильных газов [10]. В ближней зоне АС этого класса представляют слабые воздушные ударные волны [16].

**3. Инфразвук** ( $f = 0.03–1$  Гц) возникает в результате сильных конвективных процессов, происходящих во время возникновения и формирования эруптивных облаков в результате выноса продуктов извержений и их отложений на дневную поверхность, что приводит к формированию восходящей конвективной колонны, турбулентные пульсации в которой и служат источниками инфразвукового сигнала.

**4. Длинноволновые возмущения** ( $f < 0.03$  Гц) связаны с формированием мощной эруптивной колонны во время сильных извержений плининанского<sup>6</sup> типа дацитовых и андезитовых вулканов. Как правило, высота эруптивной колонны при этом достигает тропопаузы за счет выноса в атмосферу большого количества горячего мелкодисперсного вулканического материала и вулканических газов.

<sup>4</sup> Активность стромболианская – извержение основной маловязкой магмы со средним газовым давлением и с открытым сообщением с атмосферой. Газы выбрасывают комок раскаленного материала [17].

<sup>5</sup> Активность вулканская – взрывы очень вязкой лавы, не остающейся жидкой при контакте с атмосферой. Взрывы выбрасывают тучи, переполненные пеплом, бомбами, лапилли и глыбами древней лавы, похожие на кочан цветной капусты [17].

<sup>6</sup> Активность плининанская – сильнейшие эксплозии, выбросы пеплов, туфового материала и пемзы. Во время пароксизмального взрыва образуется колоссальная колонна газа [17].

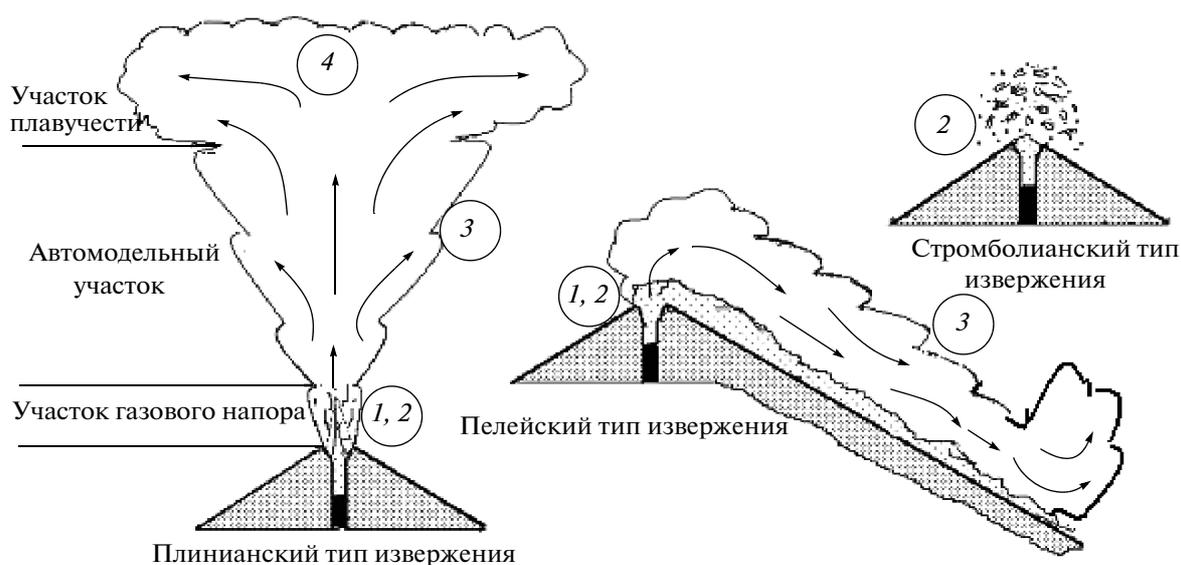


Рис. 1. Основные типы вулканической активности и преобладающие для них классы волновых возмущений в атмосфере, указанные цифрами в кружках.

Первые два класса связаны с процессом отделения летучих фракций от поднимающегося по магматическому каналу силикатного расплава и его фрагментацией (разрушением) с образованием раскаленных обрывков лавы и вулканического пепла. Два следующих класса связаны с образованием в атмосфере эруптивного облака в виде конвективной колонны с хорошо развитой турбулентностью, являющейся источником инфразвуковых и длинноволновых возмущений в атмосфере. Классы волновых возмущений в атмосфере, характерные для разных типов вулканической активности, показаны на рис. 1.

#### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕНЕРАЦИИ ИНФРАЗВУКА ПРИ КОНВЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССАХ В ЭРУПТИВНОЙ КОЛОННЕ

Теоретические и экспериментальные результаты изучения эруптивных облаков<sup>7</sup> от вулканических извержений, полученные в конце прошлого века, обобщены в монографии [19]. Механизм возбуждения акустических возмущений в стратифицированной среде, обусловленный конвективным подъемом нагретых продуктов от площадных пожаров или мощных взрывов, был рассмотрен в 80-х годах прошлого столетия в работах школы известного российского ученого Ю.А. Гостинцева [20, 21]. Интенсивность возмущений атмосферы процессами горения или взрыва определяется динамикой энерго- и тепломассовыделения в источ-

нике, метеорологической обстановкой (стратификацией атмосферы, наличием ветра) и характером турбулентного обмена нагретых продуктов с холодным воздухом.

Конфигурация поднимающегося конвективного элемента зависит от соотношения между временем тепловыделения  $t_B$  и характерным временем подъема продуктов до высоты зависания  $t_N$  в стратифицированной атмосфере. Если  $t_B \geq t_N$ , то имеет место струйное течение; при обратном соотношении в атмосфере образуется облако конечных размеров – термик. Для стационарной струи нагретых продуктов в устойчиво стратифицированной атмосфере, как и для термика, выделяются три характерные области движения: начальная (участок газового напора), автомодельная и стадия зависания вблизи уровня теплового равновесия.

Конвективные элементы обоих типов (термик и струя в поле ветра) по отношению к окружающей атмосфере можно рассматривать как движущиеся и меняющие свой объем образования, которые возбуждают во внешней среде (атмосфере) акустические волны.

При этом их дальнейшее распространение определяется стратификацией атмосферы (распределением ветра и температуры по высоте). Акустическая волна, генерируемая колеблющимся на уровне теплового равновесия и пульсирующим конвективным элементом, при распространении в стратифицированной атмосфере преобразуется в цилиндрическую расходящуюся волну Лэмба с максимальным давлением на уровне земли [22].

<sup>7</sup> Облако эруптивное – масса газов и твердых обломков, выброшенных взрывом из вулкана в виде облака [18].

Распределенные по площади поверхности вулкана горячие отложения, возникающие при плинианском типе извержения, можно рассматривать как постоянно действующий “мягкий” источник тепловыделения, в результате которого возникает конвективная колонка. При конвективном механизме генерации воздушных волн их интенсивность и энергия для “мягкого” постоянно действующего источника тепловыделения определяются изменением во времени эффективного объема поднимающейся в атмосферу струи продуктов. Наиболее длинноволновые возмущения в атмосфере возбуждаются на частотах, определяемых временем существования очага [21].

В работах [20, 21] дано теоретическое обоснование зависимости энергии акустического источника  $E_{а.и.}$  от тепловой мощности  $Q$  в очаге сильных взрывов и площадных пожаров:

$$E_{а.и.} = 90 \frac{\pi \rho_0 \alpha}{\chi h C_0} \left( \frac{g \beta}{\pi \rho_0 c_p} \right)^{1/2} Q^{3/2} N^{3/2}, \quad (1)$$

где  $\alpha = dh/dx = 0.15$  – тангенс угла расширения струи;  $\rho_0, c_p$  – плотность и теплоемкость воздуха, соответственно;  $\beta = 1/T_a$  коэффициент термического расширения;  $T_a$  – температура окружающего воздуха;  $C_0$  – скорость звука в воздухе;  $h$  – эффективная высота, зависящая от стратификации атмосферы;  $N$  – частота Вайсяля–Брента;  $\chi$  – турбулентный коэффициент температуропроводности.

К оценке объема выброшенного пепла можно перейти, исходя из допущения, что при эксплозивных извержениях тепловая мощность в эруптивной колонне в основном обеспечивается теплом, выносимым в атмосферу горячей мелкой пирокластикой (вулканическим пеплом). В работе [23] показано, что расход пирокластик в один килограмм в секунду соответствует средней тепловой мощности  $10^6$  Вт, т.е.  $\gamma = 10^{-6}$  кг (с Вт) $^{-1}$ . Длительность извержения  $\tau$  можно оценить по длительности сейсмического сигнала. Зная плотность пепла (принималась  $\rho_{п.} = 1.4 \times 10^3$  кг/м $^3$ ), объем выброшенного пепла в атмосферу может быть рассчитан по формуле:

$$V = (Q \cdot \tau \cdot \gamma) / \rho_{п.} \quad (2)$$

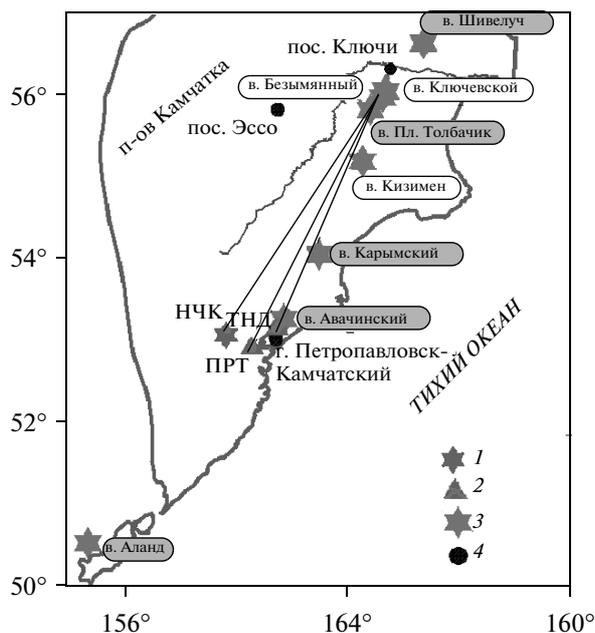
Так как в магме содержится от 0.5 до 6% по весу ювенильной воды, то конденсация в атмосфере перегретого пара должна влиять на динамику подъема эруптивного облака и будет находить отражение в волновых возмущениях в атмосфере [14].

## РАЗВИТИЕ ПУНКТОВ РЕГИСТРАЦИИ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ ОТ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ

Согласно феноменологической классификации, частотный диапазон ударно-волновых и акустических эффектов, возникающих при вулканических извержениях, достаточно широк: от нескольких сотен до тысячных долей Герц, так же как и динамический диапазон – от долей до сотен Паскалей. При эксплозивных извержениях формируются как акустические волны, связанные с нестационарными процессами, так и внутренние гравитационные волны за счет воздействия мощного массо- и тепловыделения на тропосферу. Распространение звукового импульса в атмосфере зависит от ее стратификации. Кроме того, при вершинных извержениях вулканов источник волновых возмущений располагается на высоте более трех километров, что влияет на особенности распространения АС в атмосфере от вулканических извержений.

Теоретические основы дальнего распространения инфразвуковых волн достаточно подробно описаны в [24–28]. Несмотря на довольно хорошую теоретическую базу, натурные наблюдения за распространением инфразвуковых волн от мощных энергетических природных процессов (сильные эксплозивные извержения) по-прежнему представляют большой интерес для изучения распространения инфразвука в атмосфере. Следует отметить, что атмосфера – движущаяся среда, поэтому распространение звуковых волн в реальных условиях сильно зависит от стратификации таких метеорологических величин, как температура, скорость и направление ветра, которые формируют высотный профиль эффективной скорости звука (адиабатическая скорость звука плюс скорость ветра в направлении распространения).

С целью проведения детальных наблюдений за акустическими эффектами от вулканических извержений в Камчатском филиале Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) планируется создать сеть акустических станций. В дальней зоне при расстоянии от действующих вулканов более 100 км планируется организовать стационарные акустические станции (САС), обеспечивающие регистрацию волновых возмущений в атмосфере в диапазоне частот 0.003–10 Гц. Вблизи действующих вулканов на базе радиотелеметрических сейсмических станций планируется установить акустические каналы, позволяющие регистрировать слабые ударные волны от извержений в диапазоне частот 1–10 Гц. Так как наиболее активные вулканы Камчатки (Шивелуч, Ключевской, Безымянный) располагаются в районе Северной



**Рис. 2.** Схема размещения акустических станций и активных вулканов на полуострове Камчатка, 1 – станция IS44 (Начики); 2 – стационарные станции ПРТ (Паратунка) и ТНД (Тундровый); 3 – действующие вулканы; 4 – населенные пункты.

группы вулканов, то телеметрические каналы в первую очередь планируется создать в этом районе (рис. 2).

С октября 2009 г. в поселке Паратунка (ПРТ) введена в строй первая стационарная акустическая станция (САС), позволяющая регистрировать волновые возмущения в атмосфере в диапазоне частот 0.003–10 Гц. Акустическая станция САС создана на базе стационарной цифровой сейсмической станции, которая разработана в Камчатском филиале ГС РАН [29]. Кроме того, как отмечено выше, в течение последних двух лет работает станция – IS44 (НЧК), на которой установлена 4-х точечная группа, с полосой пропускания акустических каналов 0.001–10 Гц. Данные регистрации акустических сигналов с этой станции с октября 2009 г. доступны КФ ГС РАН. Кроме того, работает станция Тундровая (ТНД) с подобной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ).

### СИЛЬНЫЕ ЭКСПЛОЗИВНЫЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ АНДЕЗИТОВЫХ ВУЛКАНОВ В 2006–2010 гг.

Извержение андезитовых вулканов начинается с выжимания жестких блоков вязкой лавы. В пароксизмальной фазе извержений происходит фрагментация лавы в верхней части выводного канала, что приводит к сходу и формированию пирокластических потоков длиной в несколько километров, после которых, как правило, на-

блюдается плинианская деятельность. При таких извержениях источниками импульсных АС являются нестационарные процессы в кратере, а источником инфразвуковых возмущений в атмосфере – турбулентные пульсации в конвективной колонне, которая в случае сильных извержений достигает высоты тропопавузы.

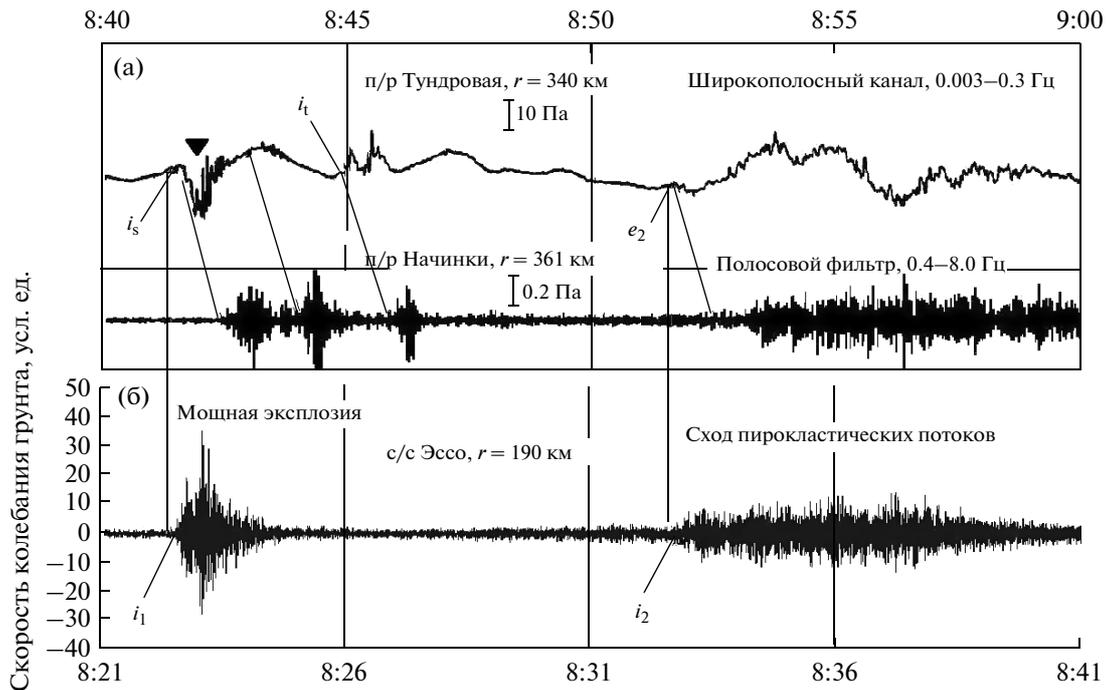
Волновые возмущения в атмосфере, которые сопровождали три наиболее сильных извержения вулкана Безымянного в 2006–2010 гг., были зарегистрированы стационарными микробарографическими станциями.

Извержение 9 мая 2006 г. было детально изучено по данным режимных видеонаблюдений, на основании которых выделены две фазы извержения с периодом относительного покоя между ними несколько минут. Извержение началось фазой декомпрессии с образованием парового облака над кратером вулкана высотой 2.4 км с последующей мощной эксплозией<sup>8</sup> в 8<sup>h</sup>22<sup>m</sup>. Спустя 10 минут началась фаза фрагментации лавового материала, выразившаяся в плинианской деятельности с подъемом эруптивной колонны на высоту 11 км над ур. моря и формированием пирокластического потока [30].

Волновые возмущения, сопровождавшие это извержение, были зарегистрированы в пунктах ТНД (340 км) и НЧК (IS44 – 369 км), а сейсмический сигнал хорошо записался на сейсмической станции “Эссо” на расстоянии 190 км от вулкана [15].

На рис. 3а приведены копии записей волновых возмущений от этого извержения, зарегистрированные микробарографами в двух пунктах с различными амплитудно-частотными характеристиками. В пункте ТНД микробарограф имел широкополосную (0.003–0.3 Гц), а в пункте НЧК узкополосную амплитудно-частотную характеристику (0.4–8.0 Гц). Обе фазы извержения нашли отражение в записях акустического и сейсмического сигналов. На записях волновых возмущений в атмосфере от первой фазы извержения в обоих пунктах четко видны приходы отдельных групп инфразвуковых волн (см. рис. 3а). На широкополосном канале в ТНД первая группа волн, состоящая из длинноволнового возмущения с фазой разряжения длительностью ~60 с, на которое накладываются более “высокочастотные” колебания, связана с распространением звукового луча в стратосферном волноводе. Как видно на рис. 3а, время вступления первого АС – 8<sup>h</sup>41.5<sup>m</sup>. Если, согласно скоростному разрезу, принять скорость звука 0.3 км/с, то время распространения АС до ТНД составит 19.2<sup>m</sup>, а время его воз-

<sup>8</sup> В тексте указано время GMT.



**Рис. 3.** Волновые возмущения в атмосфере, зарегистрированные микробарографами в пунктах Тундровый и Начинки (а), и сейсмические эффекты, зарегистрированные на сейсмической станции Эссо (б), сопровождавшие извержения вулкана Безымянного 9 мая 2006 г. Треугольником отмечено длинноволновое акустическое возмущение, а стрелками вступления приходов инфразвуковых волн, отраженных на различных высотных уровнях в стратосфере ( $i_s$ ) и в термосфере ( $i_t$ ).

никновения будет  $t_0 = 8^{\text{h}}22.3^{\text{m}}$ , что близко к времени возникновения сейсмического сигнала  $8^{\text{h}}22.1^{\text{m}}$  (см. рис. 3б). Первый приход соответствует отражению акустических волн на различных высотных уровнях в стратосфере.

Вторая группа волн, зарегистрированная через 90 с, на этом канале выражена слабо. Через 210 с после стратосферного прихода  $i_s$  приходит  $U$ -волна  $i_t$ , связанная с отражением звука на термосферных высотах. Все три группы волн хорошо прописались и на более высокочастотном канале станции НЧК (см. рис. 3а).

Извержение вулкана Безымянного, произошедшее 6 декабря 2009 г. в  $21^{\text{h}}44^{\text{m}}$ , визуально не наблюдалось, но на спутниковых снимках просматривалась термоаномалия от горячих отложений извержения длиной порядка  $\sim 10$  км, а шлейф пепла, сносимый ветром восточного направления, протягивался на несколько сотен километров.

Волновые возмущения в атмосфере, сопровождавшие извержение вулкана Безымянного 16 декабря 2009 г., были зарегистрированы станциями НЧК и ПРТ, а сейсмический сигнал был записан всеми станциями района Ключевской группы вулканов.

На рис. 4 показана запись акустического сигнала на четырех каналах пункта НЧК (А0–А3) и на двух каналах ПРТ (365 км). На регистрограммах пункта НЧК четко выделяются три инфразвуковых прихода отдельных групп волн, а на двух каналах с различными АЧХ пункта ПРТ выделяются только два прихода. Первые инфразвуковые приходы соответствуют отражению инфразвуковых волн от различных высотных уровней в стратосфере. Третий приход для станции НЧК и второй приход на станции ПРТ, приходящие через 180 с после стратосферного, соответствуют отражению инфразвука от высот термосферы.

Видно, что указанные приходы имеют вид  $U$ -волны, которая образуется из исходной  $N$ -волны, падающей на отражающий слой при изменении фазы коэффициента отражения на  $\pi/2$  [28]. Второй приход в пункт НЧК через 110 с после первого также имеет вид  $U$ -волны, объяснение его происхождения будет дано ниже.

На основании данных станции НЧК рассчитывался азимут прихода фронта отдельных групп инфразвуковых волн. Азимут на источник составлял  $33.6 \pm 1.7$ , в то время как азимут на вершину вулкана Безымянного —  $31^\circ$ . Удовлетворительное совпадение вычисленных азимутов с направлением на вулкан позволяет считать, что простран-

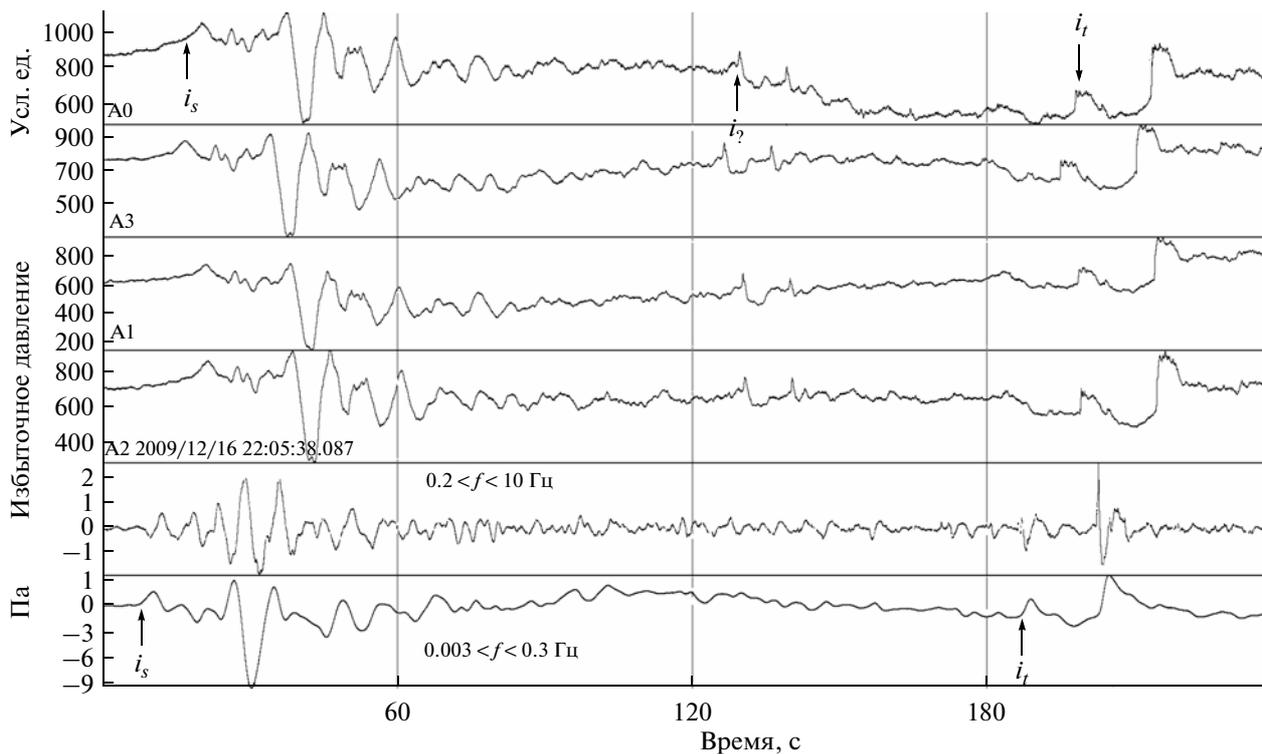


Рис. 4. Запись волновых возмущений, сопровождавших извержение вулкана Безымянного 6 декабря 2009 г., на четырех каналах станции НЧК (А0–А3) и двух каналах пункта ПРТ.

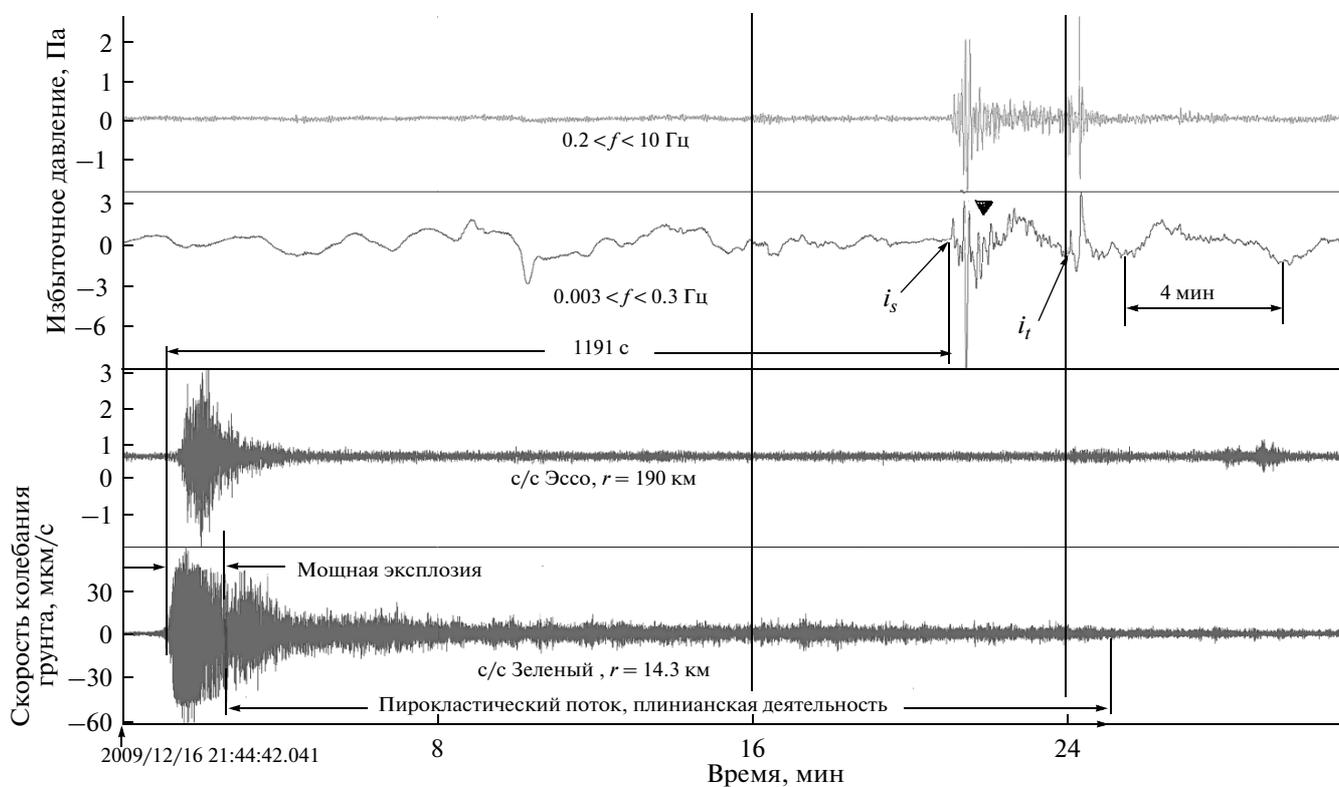


Рис. 5. Волновое возмущение в атмосфере, зарегистрированное в пункте ПРТ каналами с разными АЧХ, сопровождавшее извержение вулкана Безымянного 16 декабря 2009 г. и запись соответствующего сейсмического сигнала в ближней и дальней зонах. Треугольником отмечена фаза разрежения длинноволнового акустического возмущения.

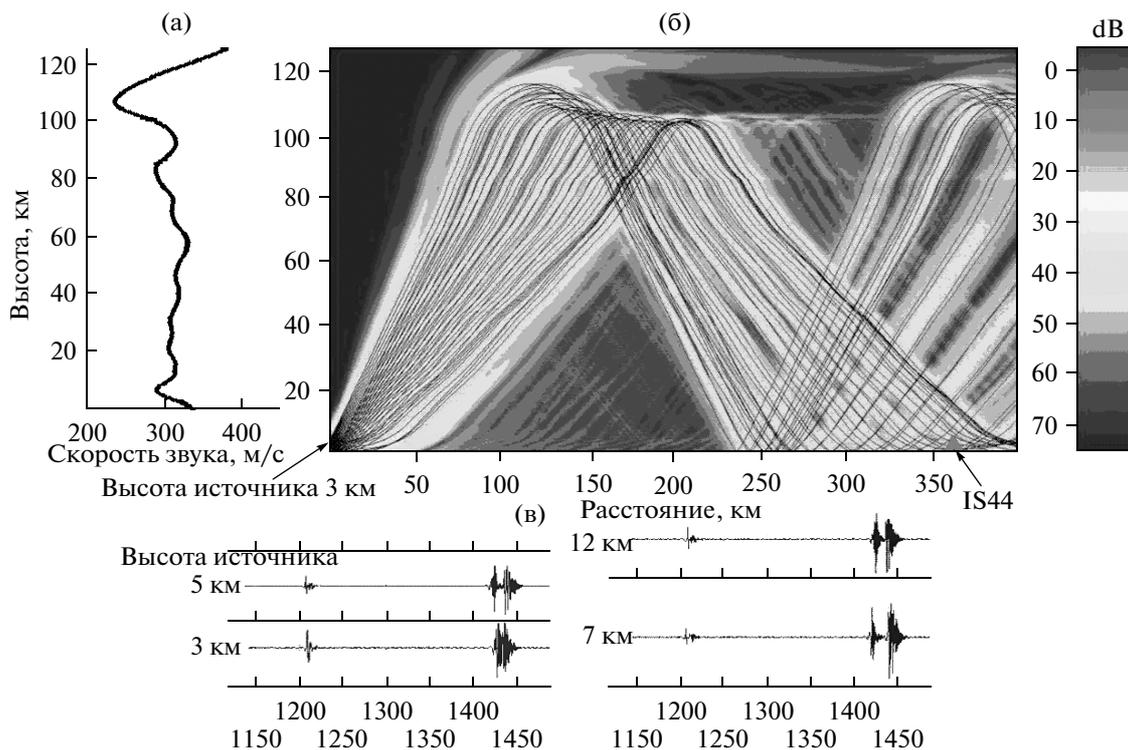


Рис. 6. Эффективная скорость звука (профиль G2S) по данным мировой сети (а), лучевые траектории распространения звука на трассе БЗМ–НЧК (б), расчетные приходы звукового импульса в зависимости от высоты источника (в).

ственно источники отдельных групп волн связаны с процессом извержения вулкана.

Совместные записи волновых возмущений в атмосфере и сейсмических сигналов, сопровождавших извержение вулкана Безымянного 16 декабря 2009 г., показаны на рис. 5. Приведены записи сейсмического сигнала, зарегистрированного как в ближней зоне на сейсмостанции “Зеленый” (ZLN,  $r = 14.3$  км) так и в дальней – на сейсмостанции “Эссо” ( $r = 190$  км).

На записи волновых возмущений широкополосным каналом в пункте ПРТ выделяется фаза разряжения длительностью около двух минут (см. рис. 5), что характерно для сильных извержений этого вулкана [8, 11]. После прихода АС в течение 20 мин регистрируются колебания с периодом  $\sim 5$  мин, что авторы связывают с генерацией акусто-гравитационных волн на частоте Вайсяля–Брента в результате выноса в атмосферу большого объема мелкодисперсного и горячего пепла. Исходя из записи сигналов, при условии возникновения акустического и сейсмического источников одновременно, время пробега звукового луча до пункта ПРТ составило  $20^m05^s$  при скорости 303 м/с.

Были проведены модельные расчеты распространения акустического сигнала на трассе БЗМ–НЧК. Расчет проводился для профиля эф-

фективной скорости звука G2S, любезно представленный Д. Дробом (США), построенного для места расположения источника и времени извержения (рис. 6а).

Вычисление акустического поля и волнового профиля инфразвуковых сигналов осуществлялось методом параболического уравнения [31, 32] для распространения звука в направлении акустической трассы БЗМ–НЧК. На рис. 6б показано пространственное распределение акустического поля, рассчитанного методом параболического уравнения для частоты 0.5 Гц с наложенными на него лучевыми траекториями. Лучевые траектории вычислялись по традиционным соотношениям между расстоянием, временем распространения, высотными профилями температуры, скорости и направления ветра и углами наклона лучей к горизонту, представленным, например, в [24–26]. При расчетах лучевых траекторий угол выхода луча изменялся в пределах от  $-38$  до  $+38$  градусов в случае расположения источника над земной поверхностью. На рис. 6б видно удовлетворительное согласие между пространственным распределением звуковых лучей, построенных в высокочастотном (лучевом) приближении, и распределением интенсивности акустического поля на частоте 0.5 Гц, рассчитанного методом параболического уравнения. На рис. 6в приведены рассчитанные

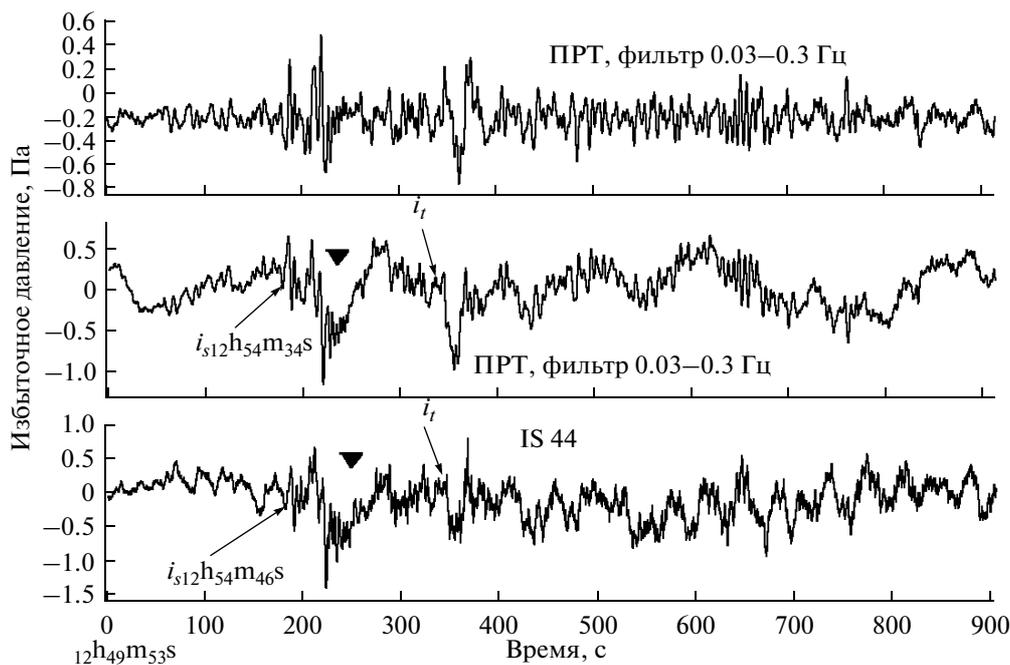


Рис. 7. Запись волновых возмущений, сопровождавших извержение вулкана Безымянного 31 марта 2010 г., в пункте НЧК и двух каналах пункта ПРТ.

волновые профили акустических сигналов в диапазоне частот 0.125–1 Гц в зависимости от высоты источника. Расчетные времена инфразвуковых приходов достаточно удовлетворительно совпадают с натурными наблюдениями. Расчетное время стратосферного прихода 1210 с, а по экспериментальным данным оно составило 1190 с, а разность расчетных времен приходов  $i_t - i_s = 250$  с, против 180 с для эксперимента (см. рис. 6). Естественно, расчетный профиль эффективной скорости звука отражает реальный профиль лишь в первом приближении, на это указывает и наличие второго инфразвукового прихода в пункт НЧК.

При сравнении волновых возмущений, сопровождавших извержения вулкана Безымянного в 2006 и 2009 гг., видно (см. рис. 3 и 5), что амплитуда первой волны в обоих случаях близка  $\sim 12$  Па. Амплитуда сейсмического сигнала на сейсмостанции Эссо в обоих случаях близка ( $2\dot{A}_{\max} \sim 5$  мкм/с), так же как и длительность ( $L \sim 120$  с). В отличие от извержения 2006 г., фаза фрагментации вновь поступившей порции лавы в 2009 г. началась сразу после фазы декомпрессии, и процесс был значительно слабее, чем в 2006 г., так как сейсмический сигнал этой фазы на с/с Эссо не записался, но хорошо виден на станции ZLN, расположенной на удалении 14.3 км от кратера вулкана.

Для обоих случаев характерна фаза разрежения длинноволнового акустического возмущения, которая связана с конденсацией ювенильно-

го водяного пара, выброшенного в атмосферу в результате мощной эксплозии [16]. По амплитуде сигнал от фазы фрагментации и извержения пирокластических потоков в 2006 г. почти в два раза превосходит сигнал для извержения 2009 г., что говорит о большей роли ювенильного материала в извержении 2006 г.

Во время извержения вулкана Безымянного 31 мая 2010 г. высота эруптивного облака оценена в 11 км, пепловый шлейф протянулся на 170 км. На записях волновых возмущений в пунктах ПРТ и НЧК, как и в предшествующих случаях, четко выделяются стратосферный и термосферный приходы с  $i_t - i_s = 170$  с, а также фаза разрежения длительностью около 80 с (рис. 7).

В конце 2010 г. начал извергаться вулкан Кизи-мен. Во время его извержения 31 декабря 2010 г. пепел выпал в г. Петропавловске-Камчатском, расположенном в 230 км от вулкана. На записях АС, сопровождавшего это извержение, также выделяется фаза разрежения длительностью 100 с (рис. 8).

Для всех приведенных выше извержений высота верхней кромки облака пепла составляла  $\sim 11$ –15 км, что больше высоты тропопаузы для района Камчатки. Это свидетельствует о большом количестве пепла, выбрасываемого в атмосферу, а вместе с ним и перегретого ювенильного пара. Благодаря конденсации пара формируется фаза

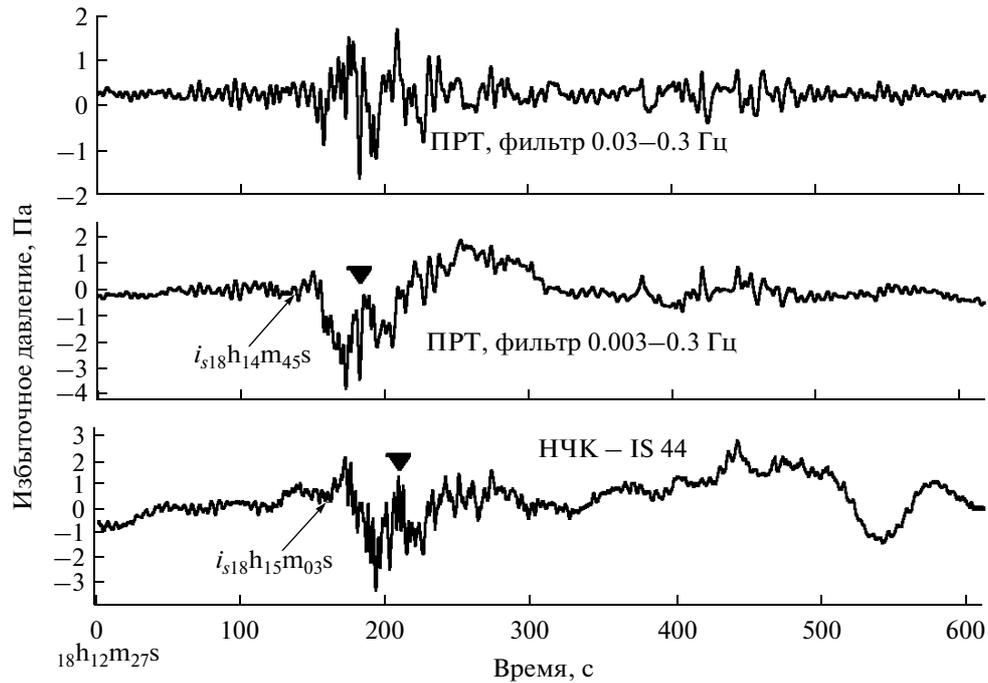


Рис. 8. Запись волновых возмущений, сопровождавших извержение вулкана Кизимен 31 декабря 2010 г., на станции НЧК и двух каналах пункта ПРТ.

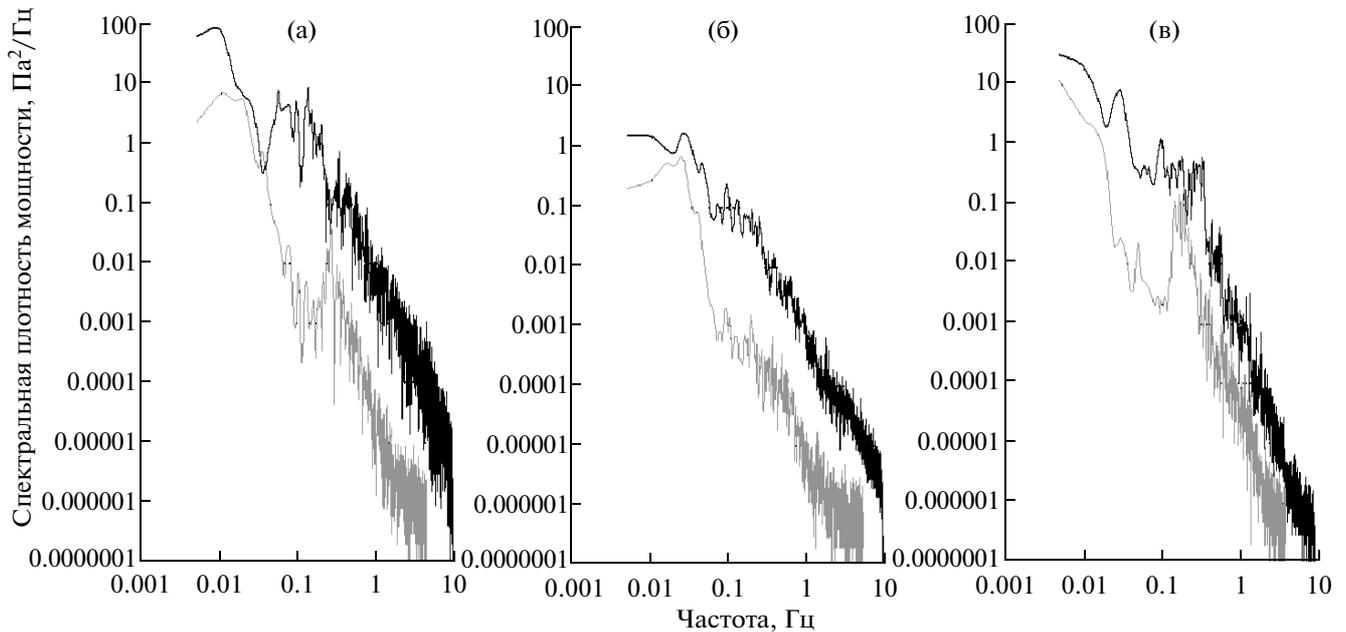


Рис. 9. Спектральная плотность мощности акустических сигналов сопровождавших извержения вулкана Безымянного 16 декабря 2009 г. (а) и 31 мая 2010 г. (б), вулкана Кизимен 31 декабря 2010 г. (в). Серым цветом показана спектральная плотность мощности фона.

разряжения в акустическом сигнале длительностью 60–100 с.

Для оценки количества пепла, выносимого в атмосферу по акустическому излучению, рассчитывалась спектральная плотность мощности за-

регистрированных сигналов и записи фона длительностью 300 с перед АС. Как видно на рис. 9, основная спектральная плотность мощности (СПМ) рассмотренных сигналов заключена в диапазоне частот 0.07–0.3 Гц.

Основные данные об извержениях и параметры акустических сигналов, сопровождавших их

Дата и время начала извержения			Геологический эффект		Параметры акустического сигнала и оценка количества пепла					
№	Вулкан, дата	Время	$V_{\text{ПП}}$ , км <sup>3</sup>	$H_{\text{ЭР}}$ , км	$R$ , км	$\Delta P$ , Па	$\tau$ , с	$E_a \times 10^9$ , Дж	$Q \times 10^{13}$ , Вт	$V \times 10^6$ , м <sup>3</sup>
1	в. Безымянный 09.05. 2006 г.	08 <sup>h</sup> 20 <sup>m</sup>	?	15	340	2.0 0.5	60 350	7.7 <b>1.3</b> 10.0	6.2 1.9	2.6 <b>4.7</b> 7.3
2	в. Безымянный, 16.12. 2009 г.	21 <sup>h</sup> 45 <sup>m</sup>	?	15	369	2.1	86	6.5	4.8	3.2
3	в. Безымянный, 31.05.2010 г.	12 <sup>h</sup> 34 <sup>m</sup>	?	11	369	0.2	600	0.4	5.5	3.4
4	в. Кизимен, 31.12. 2010 г.	17 <sup>h</sup> 56 <sup>m</sup>	?	?	275	1.8	100	5.3	0.9	4.0

Примечание:  $V_{\text{ПП}}$  – объемы пирокластических потоков,  $H_{\text{ЭР}}$  – высота эруптивной тучи,  $R$  – расстояние от пункта регистрации до источника,  $\Delta P$  – среднее избыточное давление,  $\tau$  – продолжительность сигнала,  $E_a$  – энергия акустического источника,  $Q$  – мощность тепловыделения,  $V$  – объем пепла.

По формулам (1), (2) были сделаны оценки объема пепла, выброшенного в атмосферу по акустическому сигналу, для описанных выше сильных эксплозивных извержений, которые составили  $(3.2-7.3) \times 10^6$  м<sup>3</sup> (см. табл.). Оценки выброшенного пепла свидетельствуют о близости этих извержений по энергетике.

Рассмотрим правдоподобность оценок объемов выброшенного пепла, полученных акустическим методом. На основании построенных изопахит по плотной сети точек отбора пепловых проб для извержения вулкана Безымянного 26 декабря 2006 г. был сделан расчет объема пепла –  $5.8 \times 10^6$  м<sup>3</sup> [33]. Причем энергия сейсмического сигнала, сопровождавшего это извержение, близка к энергии извержения 9 мая 2006 г. ( $\sim 3 \times 10^9$  Дж), что дает основание предполагать близкую интенсивность этих извержений и соответственно реальность полученных нами оценок выброшенного в атмосферу пепла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного анализа инфразвуковых сигналов от извержений вулканов на Камчатке, зарегистрированных на акустической станции IS44 международной системы инфразвукового мониторинга ДВЗЯИ и станции КФ ГС РАН в пункте Паратунка можно сделать следующие основные выводы.

– При достаточно сильных эксплозивных извержениях, когда эруптивное облако поднимается выше 7 км, волновые возмущения в атмосфере могут регистрироваться на значительных расстояниях. Акустические сигналы от таких извержений (вулкан Безымянный 9 мая 2006 г., 16 декабря

2006 г., 31 мая 2010 г.; вулкан Кизимен 31 декабря 2010 г.) были зарегистрированы на расстояниях более 300 км.

– Для всех акустических сигналов от перечисленных выше извержений характерна фаза разряжения длительностью 80–100 с, которая, связана с конденсацией перегретого ювенильного пара.

– Акустические сигналы, зарегистрированные во время сильных эксплозивных извержений вулканов Безымянный и Кизимен, позволили оценить количество пепла, выброшенного в атмосферу, которое составляло  $(3.2-7.3) \times 10^6$  м<sup>3</sup>, что согласуется с оценками пепла геологическими методами. Это убедительно демонстрирует эффективность использования инфразвукового метода для мониторинга сильных эксплозивных извержений. В дальнейшем планируется при соответствующей организации получения и обработки данных в режиме on-line использовать акустический метод в комплексе с другими для повышения эффективности оценки пепловой опасности при авиаполетах.

Авторы выражают благодарность Е.Н. Пелиновскому за конструктивные замечания, способствовавшие улучшению работы.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 11-05-00890).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологический словарь. Т. 1. М.: Недра, 1973. 485 с.
2. Yokoo A., Ishihara K. Analysis of pressure waves observed in Sakurajima eruption movies // Earth Planets Space. 2007. № 59. P. 177–181.
3. 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 // J.V.G.R. 2010. V. 200. № 1–2. P. 35–47.
4. *Fee D., Matoza R.S.* An overview of volcano infrasound: From Hawaiian to plinian, local to global // J.V.G.R. 2013. № 1. V. 249. P. 123–139.
  5. *Johnson J.B., Ripepe M.* Volcano infrasound: A review // J.V.G.R. 2011. V. 206. № 3–4. P. 61–69.
  6. *Fee D., Garces M., Steffke A.* Infrasound from Tungurahua volcano 2006–2008: strombolian to plinian eruptive activity // J.V.G.R. 2010. V. 193. № 1–2. P. 67–81.
  7. *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.
  8. *Адушкин В.В., Гостинцев Ю.А., Фирстов П.П.* О природе воздушных волн при сильных эксплозивных извержениях // Вулканология и сейсмология. 1984. № 5. С. 3–11.
  9. *Сорокин А.Г.* Исследование дальнего распространения инфразвука от взрывов и океанских штормов. Автореферат дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Иркутск, 1995. 115 с.
  10. *Сторчеус А.В., Самойленко Б.И.* Исследования вулканических взрывов Толбачинского извержения с помощью киносъемки // Вулканология и сейсмология. 1983. № 5. С. 102–105.
  11. *Фирстов П.П.* Динамика вулканических извержений и ее проявление в ударно-волновых и акустических эффектах в атмосфере. Автореферат дисс. ... докт. физ.-мат. наук. Южно-Сахалинск, 2010. 43 с.
  12. *Фирстов П.П., Филиппов Ю.А.* Система хранения и обработки волновых возмущений в атмосфере от вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 2. С. 36–46.
  13. *Infrasound monitoring for atmospheric studies* // Eds: Pichon A., Blanc E., Nauchecorne A. New York: Springer, 2010. 725 p.
  14. *Фирстов П.П.* Длинноволновые акустические возмущения – источник информации о сильных эксплозивных землетрясениях // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. С. 83–94.
  15. *Фирстов П.П., Тристанов А.Б.* Особенности процесса генерации волновых возмущений в атмосфере во время извержений пирокластических потоков и мощной эксплозивной деятельности андезитовых вулканов // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 145–152.
  16. *Адушкин В.В., Фирстов П.П.* Особенности эксплозивных процессов вулканических извержений и их проявление в волновых возмущениях в атмосфере // Экстремальные природные явления. Геоэкология, гляциология, сейсмология. Актуальные проблемы Т. II. / Отв. ред. В.М. Котляков. М.: ИФЗ, 2011. С. 260–274.
  17. *Владовец В.И.* Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984. 337 с.
  18. *Геологический словарь. Т. 2.* М.: Недра, 1973. 456 с.
  19. *Sparks R.S., Bursik M.I., Carey S.N. et al.* Volcanic plumes. New York: Wiley, 1997. 573 p.
  20. *Гостинцев Ю.А., Иванов Е.А., Куличков С.Н. и др.* О механизме генерации инфразвуковых волн в атмосфере большими пожарами // ДАН. 1985. Т. 283. № 3. С. 573–576.
  21. *Гостинцев Ю.А., Шацкий Ю.В.* Генерация длинноволновых акустических возмущений в атмосфере всплывающими продуктами горения и взрыва: Препринт № 39. Черноголовка. 1989. 33 с.
  22. *Куличков С.Н.* О распространении волны Лэмба в атмосфере вдоль земной поверхности // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1987. Т. 20. № 12. С. 1251–1261.
  23. *Федотов С.А.* Оценка выноса тепла и пирокластичности вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 4–28.
  24. *Бреховских Л.М., Гордин О.А.* Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 412 с.
  25. *Осташев В.Е.* Распространение звука в движущихся средах. М.: Наука, 1992. 208 с.
  26. *Госсард Э., Хук У.* Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 529 с.
  27. *Куличков С.Н.* Дальнее распространение звука в атмосфере (обзор) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1992. Т. 28. № 4. С. 339–360.
  28. *Куличков С.Н.* Дальнее распространение инфразвуковых волн в атмосфере. Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. М., 1999. 40 с.
  29. *Чебров В.И., Воропаев В.Ф., Дрознин Д.В. и др.* Развитие сети цифровых сейсмических станций Камчатки // Геофизический мониторинг Камчатки. Материалы научно-технической конференции 17–18 января 2006 г. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2006. С. 13–18.
  30. *Дрознин В.А., Дрознин Д.В.* Активность вулкана Безымянного 9.05.2006 г. // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. Вып. 9. № 1. С. 105–110.
  31. *Куличков С.Н., Авилов К.В., Буш Г.А. и др.* Об аномально быстрых инфразвуковых приходах на больших расстояниях от наземных взрывов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 1. С. 3–12.
  32. *Куличков С.Н., Авилов К.В., Попов О.Е. и др.* О некоторых результатах моделирования дальнего распространения инфразвука в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 2. С. 232–246.
  33. *Малик Н.А.* Импактный вклад вулканических извержений в формирование химического состава сезонного снежного покрова (Камчатка) // Лед и снег. 2010. № 3. С. 45–52.

## Infrasonic Waves from Volcanic Eruptions on the Kamchatka Peninsula

E. I. Gordeev<sup>a, b</sup>, P. P. Firstov<sup>a, b</sup>, S. N. Kulichkov<sup>c</sup>, and E. R. Makhmudov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bul'v. Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia*  
*e-mail: gordeev@kscnet.ru*

<sup>b</sup> *Kamchatka Branch, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences, bul'v. Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia*  
*e-mail: firstov@emsd.ru*

<sup>c</sup> *Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevskii per. 3, Moscow, 119017 Russia*  
*e-mail: snk@ifaran.ru*

Received February 9, 2012; in final form, October 1, 2012

**Abstract**—The IS44 station operates at the observation point of Nachiki on the Kamchatka peninsula, which is part of the International Monitoring System (IMS), and it helps verify compliance with the Comprehensive Nuclear Test-Ban Treaty (CTBT). The Kamchatka Branch, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences (KB GS RAS), has a station operating in the village of Paratunka. Both of these stations allow one to monitor strong explosive eruptions of andesitic volcanoes.<sup>1</sup> Both kinematic and dynamic parameters of acoustic signals accompanying the eruptions of the Bezymyanni volcano (at a distance of 361 km from Nachiki) in 2009–2010 and the Kizimen volcano (at a distance of 275 km) on December 31, 2011, are considered. A low-frequency rarefaction phase 60 s in length has been revealed in the initial portion of the record of acoustic signals accompanying such strong eruptions. It is shown that the rarefaction phase occurs due to the rapid condensation of superheated juvenile vapor<sup>2</sup> that enters the atmosphere during such explosions.<sup>3</sup> The amount of volcanic ash emitted into the atmosphere has been estimated within (3.2–7.3) 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> on the basis of acoustic signals recorded during the eruptions under consideration.

**Keywords:** volcano, explosive eruptions, infrasonic signal, amount of ash.

<sup>1</sup> Andesite is a volcanic rock [1].

<sup>2</sup> Juvenile vapor is a primary vapor of endogenous origin [1].

<sup>3</sup> Explosion refers a volcanic eruption, usually accompanied by the emissions of a large amount of pyroclastic material and gases [1].