

УДК 550.348.436+551.596

П. П. Фирстов, Е. Р. Махмудов, В. Н. Чебров

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН,  
Петропавловск-Камчатский, 683 006;  
e-mail: firstov@emsd.ru*

## Некоторые результаты акустического мониторинга эксплозивных извержений вулканов Камчатки

Приводятся результаты акустического мониторинга четырёх эксплозивных извержений вулканов Камчатки в 2009–2010 гг. На основании акустических сигналов, зарегистрированных во время сильных эксплозивных извержениях вулканов Безымянный и Кизимен, сделаны оценки количества пепла, выброшенного в атмосферу ( $n \cdot 10^6 \text{ м}^3$ )

### Введение

Распространение пепловых облаков во время вулканических извержений на высотах 8–15 км н. у. м. на сотни и порой тысячи километров обуславливает высокую опасность пепловых извержений для местных и международных авиатрасс. В этом плане показательно извержение исландского вулкана Эйяфьятлайокудль в июне 2010 г., когда в течение нескольких дней было парализовано воздушное сообщение во многих странах Европы. Поэтому очень важным представляется организация мониторинга действующих вулканов дистанционными методами.

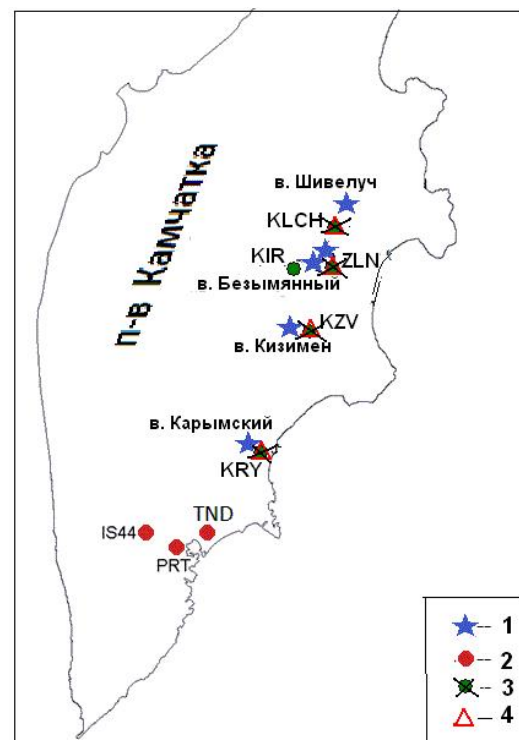
Одним из дистанционных методов мониторинга пепловой опасности может стать акустический, так как сильные эксплозивные извержения сопровождаются волновыми возмущениями в атмосфере, которые регистрируются на больших расстояниях [1, 9]. Технически это стало возможным в связи созданием Международной системы мониторинга в рамках Договора о Всеобъемлющем Запрещении Ядерных Испытаний (ДВЗЯИ), включающей 60 инфразвуковых станций. Три станции находятся на территории Российской Федерации, а одна (IS44) непосредственно на Камчатке в посёлке Начики (НЧК).

Кроме того, Камчатский филиал Геофизической службы РАН имеет стационарную акустическую станцию в пос. Паратунка (ПРТ). В данной работе рассмотрены возможности мониторинга динамики эксплозивных извержений на основе акустического метода, который в комплексе с другими методами мог бы повысить эффективность оценок пепловой опасности для авиации.

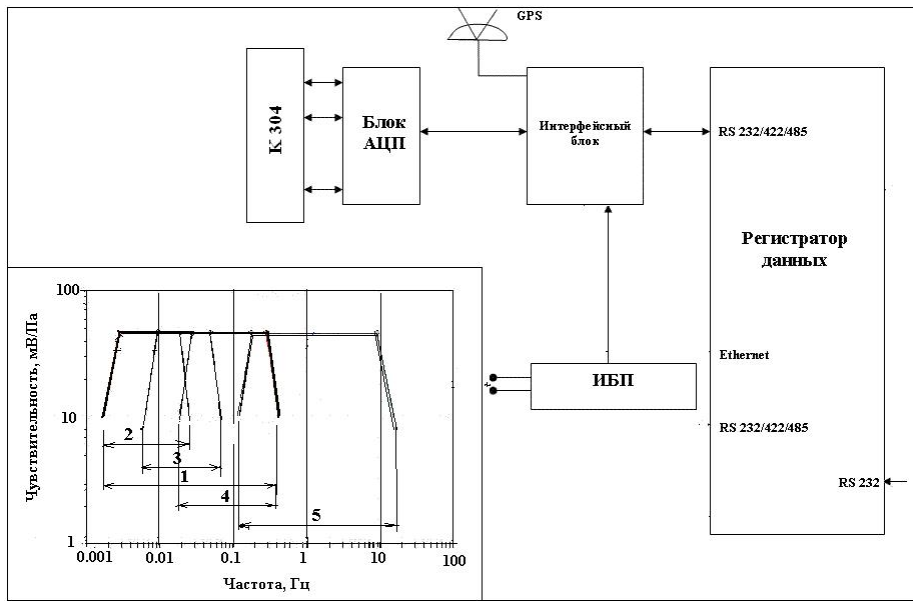
### Аппаратура и методика наблюдений

Акустический мониторинг в дальней зоне осуществляется на станциях, расположенных в посёлках: Паратунка, Тундровый, Начики (ПРТ, ТНД, IS44-НЧК). Схема расположения станций и наиболее активных вулканов на полуострове Камчатка приведена на рис. 1.

Стационарная акустическая станция (САС), созданная на базе стационарной цифровой сейсмической станции [11] путём замены сейсмометров акустическими датчиками, позволяет регистрировать волновые возмущения в атмосфере в диапазоне частот 0,003–10,0 Гц (рис. 2). В качестве датчика использован конденсаторный микробарограф К304, полоса пропускания которого разделена на пять одновременно действующих частотных каналов (см. врезка рис. 2). Для автоматизации процесса ежесу-



**Рис. 1.** Расположение сейсмических и акустических станций на Камчатке. 1 — наиболее активные вулканы; 2 — действующие акустические станции; 3 — радиотелеметрические сейсмические станции (РТСС); 4 — планируемые акустические каналы на базе РТСС.



**Рис. 2.** Блок схема стационарной акустической станции. На врезке показаны амплитудно-частотные характеристики микробарографа К304.

точного получения данных был создан пакет прикладных программ, с использованием языка программирования Python 2,6 и библиотеки графического интерфейса Qt.

**Общие представления о генерации инфразвука конвективными процессами в эруптивной колонне**

Извержение андезитовых вулканов, как правило, начинается с выжимания жёстких блоков вязкой лавы. В пароксизмальную фазу извержений происходит фрагментация (разрушение) лавы в верхней части выводного канала, приводящей к извержению пирокластических потоков (ПП) длиной в несколько километров, после которых, как правило, наблюдается плиннианская деятельность. При таких извержениях источниками импульсных акустических сигналов (АС) являются нестационарные процессы в кратере, а источником инфразвуковых возмущений в атмосфере — турбулентные пульсации в конвективной колонне, которая в случае сильных извержений достигает высоты тропопаузы [7, 8, 9].

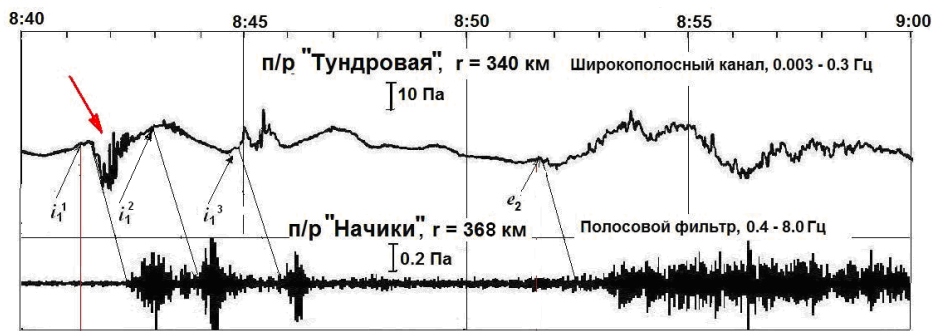
Механизм возбуждения акустических возмущений в стратифицированной среде, обусловленный конвективным подъёмом нагретых продуктов от площадных пожаров и мощных взрывов, был рассмотрен в 80х годах прошлого столетия в работах [2, 3, 4]. Интенсивность возмущений атмосферы процессами горения или взрыва определяется динамикой энерго- и тепломассовыделения в источнике, 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 вре-

менем подъёма продуктов до высоты зависания  $t_N$  в стратифицированной атмосфере. Если  $t_B \gg t_N$  имеет место струйное течение, при обратном соотношении в атмосфере образуется облако конечных размеров — термик. При этом в стратифицированной атмосфере выделяются три характерные области движения: начальная (участок газового напора), автомодельная и область 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 объём образования, которые возбуждают во внешней среде (атмосфере) акустические волны.

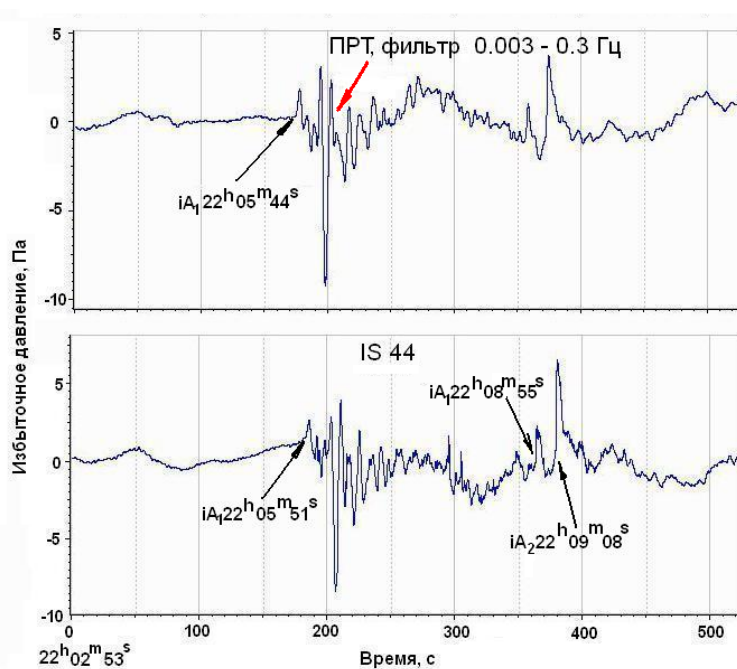
В работах [3, 4] также дано теоретическое обоснование зависимости энергии акустического источника ( $E_{а.и.}$ ) от скорости тепловыделения ( $Q$ ) в очаге сильных взрывов и площадных пожаров:

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

где:  $\alpha = dh/dx = 0,15$  — тангенс угла расширения струи;  $\rho_0, c_p$  — плотность и теплоёмкость 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;  $N$  — коэффициент Вейселя-Брента;  $\chi$  — турбулентный коэффициент температуропроводности. Если принять, что при эксплозивных извержениях эруптивная колонна существует за счёт тепла, выносимого в атмосферу мелкой пирокластикой (вулканическим пеплом), то можно оценить расход пепла, а зная время той или иной стадии извержения по характерным изменениям в АС можно оценить объём пепла выброшенного в атмосферу.



(а)



(б)

Рис. 3. Записи волновых возмущений, сопровождавших извержение вулкана Безымянного 9 мая 2006 г. (а) и 16 декабря 2009 г. (б).

### Исходные данные

Извержение влк. Безымянный 9 мая 2006 г. Режимные видеонаблюдения позволили с большой детальностью изучить динамику извержения вулкана Безымянный 9 мая 2006 г. и выделить две фазы [5]:

1) фазу декомпрессии, начавшуюся с образования парового облака над кратером вулкана в период  $5^{\text{h}} 30^{\text{m}} - 7^{\text{h}} 35^{\text{m}}$ , после чего высота облака начала увеличиваться, закончившись мощной эксплозией в  $8^{\text{h}} 23^{\text{m}}$ ;

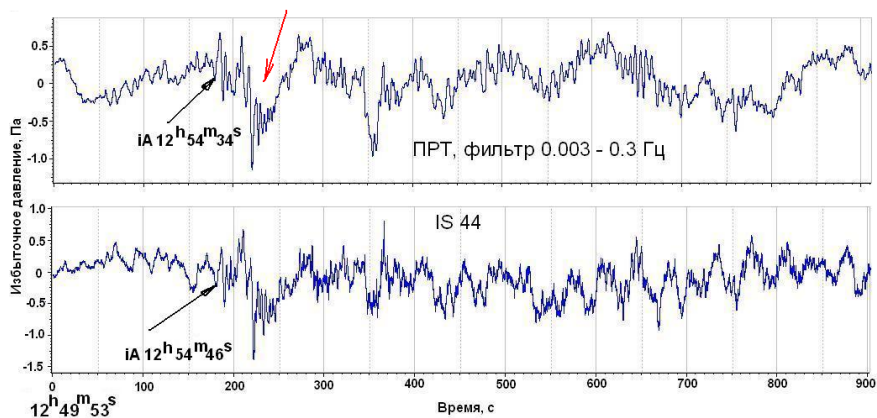
2) фазу схода и формирования пирокластического потока ( $8^{\text{h}} 32^{\text{m}} - 8^{\text{h}} 38^{\text{m}}$ ), во время которой образовалась эруптивная колонна высотой более 11 км над уровнем моря.

Как видно на рис. 3а, обе фазы нашли отражение в акустическом и излучении. На записи АС первой стадии извержения чётко выделяется фаза разряжения ( $\sim 60$  с).

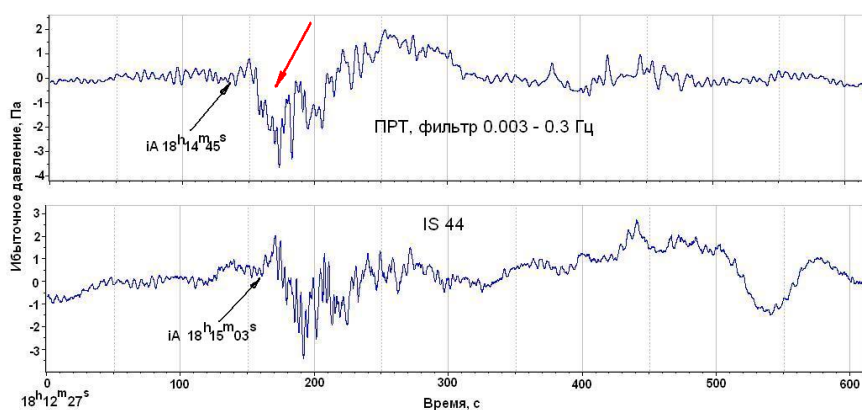
Извержение влк. Безымянный 16 декабря 2009 г. в  $21^{\text{h}} 44^{\text{m}}$  визуально не наблюдалось, но на спутниковых снимках просматривалась термоаномалия, от горячих отложений извержения длиной  $\sim 10$  км. Шлейф пепла, сносимый ветром восточного направления, протягивался на несколько сотен километров. На рис. 3б показана запись акустического сигнала на ПРТ (366 км) и на станции IS44 (369 км). На обеих станциях чётко выделяются несколько вступлений отдельных групп волн. Также выделяется фаза разряжения длительностью  $\sim 120$  с.

Извержение влк. Безымянный 31 мая 2010 г. Высота эруптивного облака оценена в 11 км, пепловый шлейф протянулся на 170 км. На записях волновых возмущений в атмосфере чётко выделяется фаза разряжения длительностью около 80 секунд.

Извержение влк. Кизимен. Во время извержения вулкана Кизимен, 31 декабря 2010 г. пепел выпал



(a)



(б)

**Рис. 4.** Записи волновых возмущений, сопровождавших извержение вулкана Безымянного 31 мая 2010 г. (а) и вулкана Кизимен 31 декабря 2010 г. (б).

**Таблица 1.** Расчет объема выброшенного пепла в результате извержений вулканов Безымянного и Кизимен на основании акустических сигналов

Извержение	$R$ , км	$\Delta P$ , Па	$\tau$ , с	$E_a \cdot 10^{-9}$ , Дж	$Q \cdot 10^{-13}$ , Вт	$V \cdot 10^{-6}$ , м <sup>3</sup>
1 влк. Безымянный, 9 мая 2006 г.	340	2,0 0,5	60 350	7,7 1,3 10,0	6,2 1,9	2,6 4,7 7,3
2 влк. Безымянный, 16 декабря 2009 г.	369	2,1	86	6,5	4,8	3,2
3 влк. Безымянный, 31 мая 2010 г.	369	0,2	600	0,4	5,5	3,4
4 влк. Кизимен, 31 декабря 2010 г.	275	1,8	100	5,3	0,9	4,0

$R$  – расстояние от источника до пункта приема;  $\Delta P$  – средняя амплитуда избыточного давления;  $\tau$  – продолжительность АС;  $E_a$  – энергия акустического источника;  $Q$  – мощность тепловыделения;  $V$  – объем выброшенного в атмосферу пепла.

в г. Петропавловске-Камчатском, расположенном в 230 км от вулкана. На записях волновых возмущений этого извержения также выделяется фаза разряжения, длительностью  $\sim 100$  с.

### Обсуждение результатов

Для сильных эксплозивных извержений, при благоприятных метеорологических условиях, волновые возмущения в атмосфере могут регистрироваться на значительных расстояниях. Зарегистрированы АС, сопровождавшие извержения вулкана Безымянный: 9 мая 2006 г., 16 декабря 2009 г., 31 мая 2010 г.; вулкана Кизимен 31 декабря 2010 г. Для

всех АС характерна фаза разряжения длительностью от 80 до 100 секунд, которая связывается к конденсацией перегретого ювенильного пара [10]. Акустические сигналы, зарегистрированные во время сильных эксплозивных извержениях вулканов Безымянный и Кизимен, позволили оценить количество пепла выброшенного в атмосферу по методике [3, 4] (табл. 1)

Рассмотрим правдоподобность оценок объемов выброшенного пепла, полученных акустическим методом, сравнив их с оценкой пепла, сделанной на основании плотной сети точек отбора пепловых проб для извержения вулкана Безымянного 26 де-

кабря 2006 г. Объём пепла для этого извержения оценён в  $5,8 \cdot 10^6 \text{ м}^3$  [7]. Энергия сейсмического сигнала, сопровождавшего это извержение, имеет тот же порядок, что и для извержения 9 мая 2006 г. —  $n \cdot 10^9$  Дж, что даёт основание предполагать близкую интенсивность обоих извержений и, соответственно, реальность наших оценок.

#### Список литературы

1. Адушкин В. В., Гостинцев Ю. А., Фирстов П. П. О природе воздушных волн при сильных взрывных извержениях // Вулканология и сейсмология. 1984. № 5. С. 3–11.
2. Гостинцев Ю. А., Суханов Л. А., Солодовник А. Ф. Предельные законы нестационарных свободновосходящих турбулентных конвективных движений в атмосфере // ДАН СССР. 1980. Том. 252. № 2. С. 311–315.
3. Гостинцев Ю. А., Иванов Е. А., Куличков С. Н. и др. О механизме генерации инфразвуковых волн в атмосфере большими пожарами // ДАН СССР. 1985. Том. 283. № 3. С. 573–576.
4. Гостинцев Ю. А., Шацкий Ю. В. Генерация длинноволновых акустических возмущений в атмосфере всплывающими продуктами горения и взрыва // Препринт. Черногловка. 1989. 33 с.
5. Дроздин В. А., Дроздин Д. В. Активность вулкана Безымянного 9 мая 2006 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1. Вып. 9. С. 105–110.
6. Фирстов П. П. Особенности акустических и сейсмических волн, сопровождавших извержение вулкана Безымянный в 1983–1985 гг. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 81–97.
7. Фирстов П. П. Вулканические акустические сигналы диапазона 1,0–10 Гц и их связь с взрывным процессом. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2008. 90 с.
8. Фирстов П. П. Динамика вулканических извержений и её проявление в ударно-волновых и акустических эффектах в атмосфере. Автореф. дис. докт. филол.-мат. наук. Южно-Сахалинск. 2010. 43 с.
9. Фирстов П. П., Пономарёв Е. А. Влияние магматической воды на ударно-волновые эффекты взрывных вулканических извержений // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 282 – 290.
10. Чебров В. И., Воропаев В. Ф., Дроздин Д. В. и др. Развитие сети цифровых сейсмических станций Камчатки // Геофизический мониторинг Камчатки. Материалы научно-технической конференции 17–18 января 2006 г. Петропавловск Камчатский. 2006. С. 13–18.