

УДК 550.348.436+551.596

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ ВО ВРЕМЯ ИЗВЕРЖЕНИЙ ПИРОКЛАСТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ И МОЩНОЙ ЭКСПЛОЗИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АНДЕЗИТОВЫХ ВУЛКАНОВ**

**П.П. Фирстов<sup>1,2</sup>, А.Б. Тристанов<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006, e-mail [firstov@kscnet.ru](mailto:firstov@kscnet.ru)*

<sup>2</sup>*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,*

<sup>3</sup>*Камчатский государственный университет им. В. Беринга, Петропавловск-Камчатский*

### **Общие представления о генерации длинноволновых акустических возмущений в атмосфере эруптивными облаками**

Механизм возбуждения акустических возмущений в стратифицированной среде, обусловленный конвективным подъемом нагретых продуктов от площадных пожаров или мощных взрывов был рассмотрен в 80<sup>х</sup> годах прошлого столетия в работах школы известного отечественного ученого Ю.А. Гостинцева [4-6]. 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 временем подъема продуктов до высоты зависания  $t_N$  в стратифицированной атмосфере. Если  $t_B \gg t_N$  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), автомоделная и стадия зависания вблизи уровня теплового равновесия.

Теоретические и экспериментальные результаты изучения эруптивных облаков, возникающих при вулканических извержениях, полученные в течение прошлого века, обобщены в монографии [13].

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 во внешней среде (атмосфере) будут возбуждать акустические волны (АВ). При этом дальнейшее распространение АВ определяется стратификационными свойствами атмосферы, т.е. распределением давления, плотности и температуры по высоте.

Генерируемая колеблющимся на уровне теплового равновесия и пульсирующим конвективным элементом акустическая волна из-за стратифицированной структуры атмосферы по мере распространения преобразуется в цилиндрическую расходящуюся волну Лэмба с максимальным давлением на уровне земли.

Логично рассматривать площадь горячих отложений, возникающих во время вулканского, плинианского и пелейского типов извержений как постоянно действующий «мягкий» источник тепловыделения, в результате которого возникает конвективная колонна. В соответствии с конвективным механизмом генерации АВ, их интенсивность и энергия для «мягкого» постоянно действующего источника тепловыделения определяется изменением во времени эффективного объема поднимающейся струи продуктов в атмосфере. Наиболее длинноволновые возмущения

в атмосфере возбуждаются на частотах, определяемых временем существования очага [5].

### Инфразвуковые колебания в атмосфере при движении пирокластических потоков

Волновые возмущения, возникающие во время извержений пирокластических потоков (ПП), изучались в 1981-1986 гг. на вулкане Безымянный, расположенном в центральной части Камчатки [8, 11].

Микробарограф, позволяющий регистрировать волновые возмущения в атмосфере в диапазоне частот 0.2 – 10 Гц, был установлен на сейсмической станции «Апахончич» (АПХ) в 16 км от вулкана Безымянный (рис. 1). Инфразвуковые колебания, сопровождающие сход и формирование пирокластических потоков (ПП), были зарегистрированы во время извержений вулкана Безымянный в октябре 1984 г., июне 1985 г. и июне 1986 г.

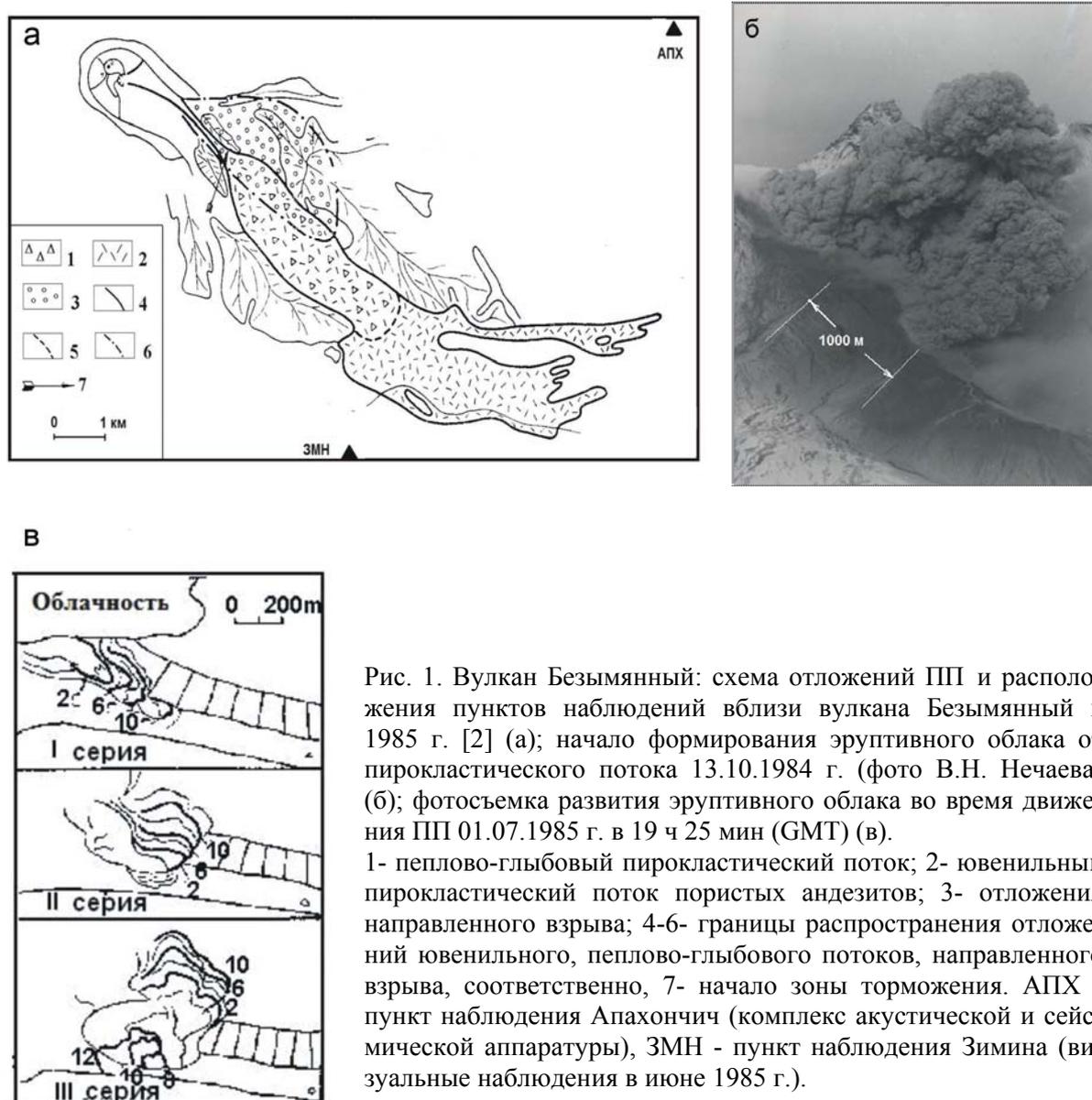


Рис. 1. Вулкан Безымянный: схема отложений ПП и расположения пунктов наблюдений вблизи вулкана Безымянный в 1985 г. [2] (а); начало формирования эруптивного облака от пирокластического потока 13.10.1984 г. (фото В.Н. Нечаева) (б); фотосъемка развития эруптивного облака во время движения ПП 01.07.1985 г. в 19 ч 25 мин (GMT) (в).

1- пеплово-глыбовый пирокластический поток; 2- ювенильный пирокластический поток пористых андезитов; 3- отложения направленного взрыва; 4-6- границы распространения отложений ювенильного, пеплово-глыбового потоков, направленного взрыва, соответственно, 7- начало зоны торможения. АПХ - пункт наблюдения Апахончич (комплекс акустической и сейсмической аппаратуры), ЗМН - пункт наблюдения Зими́на (визуальные наблюдения в июне 1985 г.).

Во время извержения в октябре 1984 г. образовались два ПП: большой, протяженностью ~ 8 км, шириной до 500 м и мощностью в среднем 2.5 м; малый, который возник в результате отложений пирокластических волн. На поверхности

отложений большого ПП просматривались многочисленные русла с хорошо выраженными бортовыми валами, свидетельствующие о формировании отложений в результате движения нескольких потоков. Общая площадь отложений оценена в  $2.7 \text{ км}^2$ , а объем в  $0.012 \text{ км}^3$  [4].

С 29 июня по 2 июля 1985 г. произошло извержение вулкана, сопровождавшееся формированием 16 пирокластических потоков [2]. Площадь отложений пепловоглыбовых ПП, в которых наблюдалось обилие грубообломочного материала, оценена в  $4 \text{ км}^2$ , а объем – около  $0.02 \text{ км}^3$ . Отложения ювенильных ПП пористых андезитов, которые спустились по восточному склону вулкана на расстояние до 12.5 км (рис. 1а), образовали единый покров площадью  $10.5 \text{ км}^2$  объемом  $0.026 \text{ км}^3$  [2].

Особенность слабого извержения в июне 1986 г. заключалась в том, что извержение началось с образования лавового потока 24 июня, после чего через сутки сошло два ПП различного генезиса, площадь отложений которых оценена  $0.25 \text{ км}^2$ , а объём -  $0.00075 \text{ м}^3$  [8].

На рис. 1б приведен снимок начала формирования эруптивного облака во время схода ПП 13.10. 1984 г., на котором видны отдельные конвективные ячейки размером более 500 м. Начало формирования эруптивных облаков, при сходе ПП во время извержения вулкана Безымянный в 1985 г., хорошо просматривалось из пункта ЗМН. Интенсивный процесс формирования эруптивного облака от ПП наблюдался при выходе потока из абразивного желоба в зону торможения (стрелка на рис. 1б), где заканчивался желоб и происходило уменьшение крутизны склона. Динамика возникновения отдельных конвективных ячеек хорошо видна на фотосъемке, выполненной с интервалом в две секунды (рис. 1в).

На рис. 2а приведены записи сейсмического и акустического сигналов, сопровождающих сход и формирование ПП на вулкане Безымянный в октябре 1984 г. на с/с АПХ. Через 35 с после возникновения сейсмического сигнала выделяются вступления акустического сигнала, связанного непосредственно с извержением ПП. Запаздывание АС относительно сейсмического сигнала происходит за счет разности скоростей сейсмических и инфразвуковых волн. Генерация интенсивного инфразвукового сигнала начинается через  $\sim 25$  с после того, как ПП попадает в зону торможения. На рис. 2б приведена спектральная плотность мощности АС, на котором хорошо выделяются отдельные спектральные максимумы, связанные с формированием конвективных ячеек. На всех спектрах выделяются устойчивые спектральные пики с периодом в диапазоне 2 - 4 с.

Оценим тепловую мощность конвективной ячейки в случае генерации волновых возмущений с периодами  $T_1 = 2$  с и  $T_2 = 3$  с. Характерное время турбулентного моля [5]:

$$T \approx 0.1 \cdot \left( \frac{R^4}{\dot{P}_0} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

где:  $P_0 = (W_0 \cdot g \cdot \beta) / (2\pi \cdot \rho_0 \cdot c_p)$  – запас плавучести в струе;  $\beta = 1/T \approx 1/300^\circ\text{К}$  – коэффициент термического расширения;  $W_0$  - мощность источника;  $\rho_0$ ,  $c_p$  – плотность и теплоемкость воздуха. Размер турбулентного моля примем на основании визуальных данных  $R \approx 500$  м, тогда  $W_1 = 15.5 \cdot 10^{12}$  Вт, а  $W_2 = 10^{12}$  Вт. Оценки тепловой мощности, выполненные на основании инфразвуковых колебаний, согласуются с оценками мощности отдельных ПП, сделанными по высоте подъема эруптивной колонны во время извержения в октябре 1984 г.,  $W = (2.5 \div 50) \cdot 10^{11}$  Вт [10], что подтверждает факт генерации акустических сигналов конвективными процессами в эруптивном облаке.

Следует отметить, что кроме инфразвуковых колебаний длительностью несколько десятков секунд, во время извержений 1985 и 1986 гг. регистрировались отдельные импульсные сигналы, связанные, по-видимому, с отдельными взрывами на куполе.

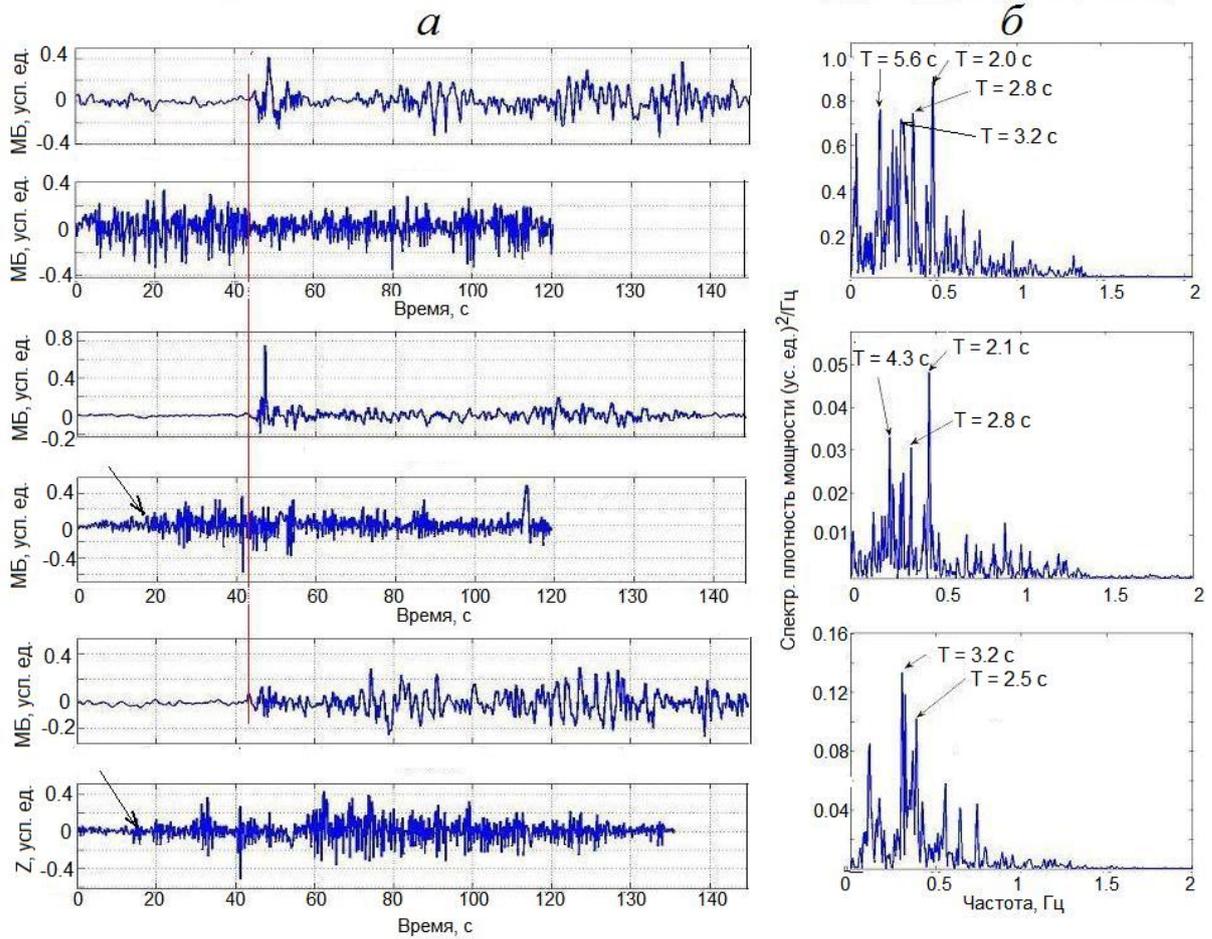
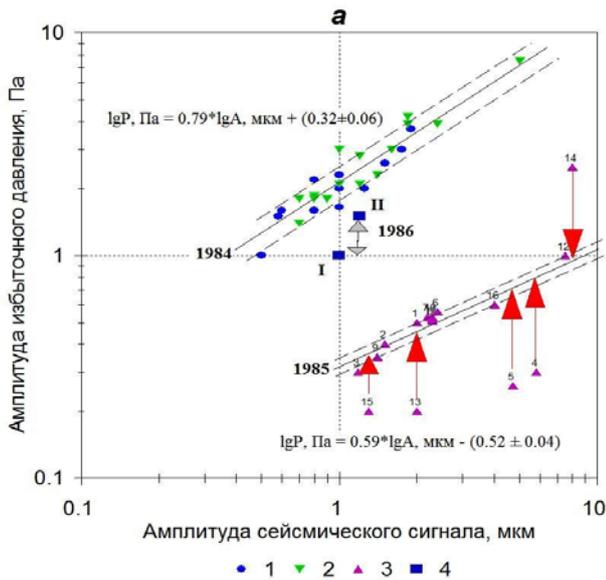


Рис. 2. Фрагменты записей акустических и сейсмических сигналов, сопровождавших извержения пирокластических потоков в октябре 1984 г., зарегистрированные на с/с АПХ (а); спектральная плотность мощности инфразвуковых акустических сигналов (б).

Рассматривалось соотношение между амплитудами акустического и сейсмического сигналов, сопровождавших формирование ПП. Амплитуды обоих сигналов усреднялись в минутных интервалах. Корреляционное поле зависимости  $\lg \Delta P = f(\lg A_c)$  для извержений ПП приведено на рис. 3а. Зависимость  $\lg \Delta P = f(\lg A_c)$  для извержения 1984 г. образует компактную группу с коэффициентом корреляции  $r = 0.93$  и может быть аппроксимирована линейной зависимостью  $\lg \Delta P, \text{ Па} = 0.79 \lg A, \text{ мкм} + 0.32$ . Для извержения 1985 г. облако точек зависимости  $\lg \Delta P = f(\lg A_c)$  лежит значительно ниже. Амплитуда АС в 1985 г. почти на порядок меньше по сравнению с извержением 1984 г., причем часть точек образуют компактную группу (11 точек), которая может быть описана зависимостью  $\lg \Delta P, \text{ Па} = 0.59 \lg A, \text{ мкм} - 0.52$ . Пять точек имеют отклонение от линии тренда более чем, на 0.3 порядка.

Распространение АС контролируется стратификацией атмосферы, которая является движущейся средой. Поэтому по данным аэрозондирования тропосферы на метеостанции Ключи, расположенной в 43 км от вулкана, вычислялся профиль скорости звука  $C_h$  в тропосфере на трассе БЗМ-ПТР в периоды извержений по формуле:  $C_h = 20.1 \sqrt{273 + T_h} \pm v_h \cos(\alpha - \varphi_h)$ , где:  $T_h$ ,  $v_h$ ,  $\alpha_h$  – температура, скорость, азимут ветра на высоте  $h$ ;  $\varphi$  – азимут от источника на пункт приёма.

На рис. 3 б, в показаны профили скорости звука на трассе БЗМ-ПРТ во время рассматриваемых извержений. Для 13-14 октября 1984 г. наблюдается неоднородная стратификация звука с инверсией на высоте 4 км, что приводит к фокусировке звукового луча в пункте приема и завышению амплитуды АС. Для 1985 и 1986 гг. в периоды извержения наблюдается неоднородная стратификация звука с отрицательным градиентом. Причем скоростной разрез для 1986 г. сдвинут относительно 1985 г. в сторону увеличения скорости звука почти на 10 км/с. Различия в стратификациях скорости звука для всех трех извержений приводят к изменениям амплитуд АС относительно постоянных амплитуд сейсмического сигнала в зависимости от стратификации атмосферы.



С целью исследования особенностей излучения АС ПП оценивались мощности акустического и сейсмического источников. Энергия акустического источника определялась по известной формуле:

$$E = \frac{4\pi^2}{\rho_0 C_0} \int_0^{\infty} \Delta P^2(t) dt \quad (2),$$

где:  $\rho_0$ ,  $C_0$  – плотность и скорость звука воздуха,  $\Delta P$  – амплитуда избыточного давления в фазе сжатия. С учетом длительности сигнала вычислялась мощность акустического источника.

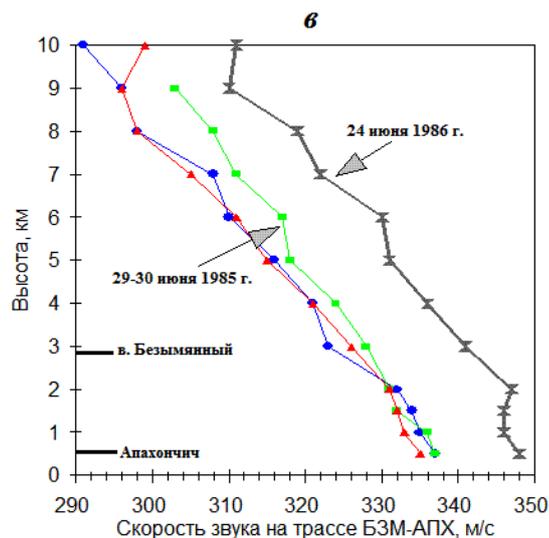
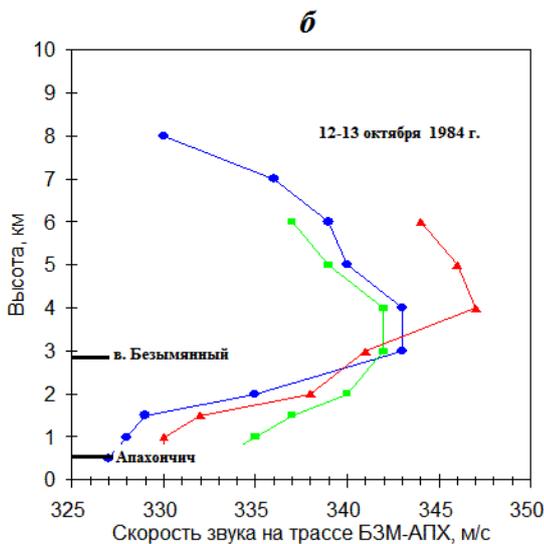


Рис. 3. Корреляционное поле между амплитудой избыточного давления инфразвуковых и амплитудой сейсмических колебаний: 1 – импульсные, зарегистрированные в октябре 1984 г.; 2 – инфразвуковые АС, зарегистрированные в октябре 1984 г.; 3 – в июне 1985 г.; 4 – в июне 1986 г. (а); скоростные разрезы на трассе БЗМ-АПХ (б, в).

Мощность сейсмического источника рассчитывалась по формуле [9]:

$$W_c = 722 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot r \cdot e^{2kr} \left( \frac{A_r^2}{T} \right) \quad (3),$$

где:  $\rho = 2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – плотность пород;  $v = 10^3 \text{ м/с}$  – скорость поверхностных волн;  $k_{\text{ср}}(r) = 5/r \cdot (1 - e^{-0,041 \cdot r})$  – коэффициент, учитывающий поглощения;  $A_z$ ,  $T$  – амплитуда и период в поверхностной волне вертикальной составляющей сейсмического сигнала.

Рассчитанные значения мощности акустического и сейсмического излучений, сопровождавших извержения ПП 29 июня - 2 июля 1985 г., приведены на рис. 4, где также указаны результаты визуальных наблюдений, которые осуществлялись из лагеря, расположенного на отрогах сопки Зимины в 8.5 км от кратера вулкана (рис. 1б).

Сопоставление визуальных наблюдений с сейсмической и акустической информацией позволило детально проследить динамику извержения 1985 г. [11]. Около 7<sup>h</sup> GMT (местное время=GMT+13 ч) 29 июня со стороны вулкана, который не был виден из-за тумана, слышался непрерывный шум высокой интенсивности, а утром 30 июня были обнаружены отложения ПП длиной до 5 км. По инструментальным данным, с 7<sup>h</sup> 20<sup>m</sup> до 7<sup>h</sup> 40<sup>m</sup> 29 июня произошло три извержения ПП. Для сигналов, сопровождавших формирование ПП №1-3,  $W_a \gg W_c$  (рис. 4). Вечером 30 июня (7<sup>h</sup> 15<sup>m</sup> GMT) наблюдалось извержение большого ПП длиной около 10 км, которому на сейсмограммах и барограммах соответствовали сигналы продолжительностью 16 мин, при  $W_a \ll W_c$  (№ 4, рис. 4). С 12<sup>h</sup>20<sup>m</sup> в течение одного часа на регистрограммах обнаружено 7 сигналов, два из которых совпали с наблюдаемыми визуально извержениями ПП.

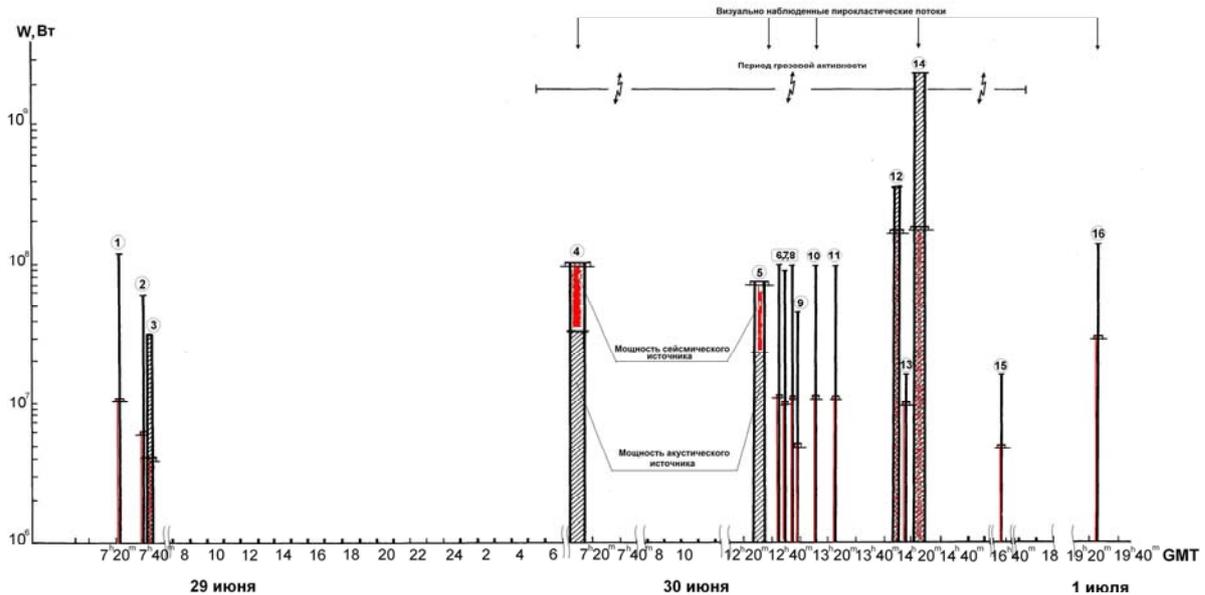


Рис. 4. Мощность акустического и сейсмического излучения, сопровождающих сход и формирования пирокластических потоков, во время извержения вулкана Безымянный в июне-июле 1985 г. Ширина столбца определяется длительностью сигнала.

Форма записи АС № 12 (рис. 4) с вступлением в 14<sup>h</sup> 16<sup>m</sup> заметно отличается от остальных тем, что акустический сигнал начинается с цуга колебаний длительностью ~

25 с и  $\Delta P_{max} = 5$  Па. На сейсмическом канале этому периоду соответствует землетрясение, вероятно связанное с взрывом, с разностью времени прихода акустических и сейсмических волн 35 с. Следует отметить, что в 14<sup>h</sup>15<sup>m</sup> со стороны вулкана слышался интенсивный «звук реактивного самолета», который представлял аэродинамический шум, возникавший в результате мощного истечения пепло-газовой смеси. Спектральная плотность для этого участка имеет четко выраженные спектральные пики с  $f_1 = 0.5$  Гц и  $f_2 = 0.1$  Гц. По-видимому, событие № 12 соответствовало «направленному взрыву», в результате которого были уничтожены два деревянных домика наблюдателей в 3.5 км от купола и сформировались специфические отложения [2].

Сигнал № 14 соответствует извержению ПП, формирование которого наблюдалось из пункта ЗМН. При его движении по склону наблюдалось свечение, что даёт основание оценить его температуру в 600-700°C. Отложения этого ПП перекрыли все предшествующие отложения. По мощности сейсмического источника ПП 12 и 14 равны, в то время как мощность акустического источника для события № 14 максимальна. Последний ПП, которому соответствует сигнал № 16, наблюдался в 19<sup>h</sup> 25<sup>m</sup> 1.VII.

По данным [2], отложения ПП 14 и 4 сильно различаются по морфологии и гранулометрическому составу. Пирокластический поток №4 отнесен к пепло-глыбовому потоку. Такие ПП типичны для извержений вулкана Безымянный, связанных с развитием экстрезивного купола. Внедрение жестких экстрезивных блоков, как правило, сопровождаются разрушением отдельных частей купола взрывами различной силы и ПП, которые образуются при этом, содержат большое количество резургентного материала разной крупности. Событие № 14 отнесено к ювенильному ПП пористых андезитов, отложения которого отличались высокой газонасыщенностью. Как видно на рис. 3а, при небольшом различии амплитуд сейсмического сигнала амплитуда АС ПП № 14 почти на порядок превосходит амплитуду ПП № 4. Исходя из этих соображений и рис. 3а, ПП 5, 13, 15 отнесены к пепло-глыбовым, в отложениях которых большую часть составляет резургентный материал, связанный с разрушением экстрезивного купола.

Таким образом, генезис ПП определяет соотношение интенсивности акустического и сейсмического сигналов, что нашло подтверждение при слабом извержении в июне 1986 г. Во время этого извержения образовалось два ПП разного генезиса, но близких по объему отложений. Действительно, как показали полевые исследования, отложения пепло-глыбового ПП были перекрыты отложениями потока пористых андезитов [8]. Различный генезис этих ПП определил соотношение амплитуд АС (рис. 3а).

Японские исследователи осуществляли изучение волновых возмущений от ПП и раскаленных лавин на вулкане Унзен в 1992 - 1993 гг. [14]. Сеть акустических станций позволяла определять местоположение отдельных источников инфразвуковых колебаний во время формирования и развития эруптивных облаков. В случае скатывания раскаленных лавин, связанных с обрушением купола, источники инфра-звуковых колебаний возникали только на фронте раскаленной лавины (рис. 5), когда ее тело останавливалось, что приводило к формированию эруптивного облака за счет движения по инерции турбулентного пепло-воздушного потока, сформировавшегося над телом лавины. В то же время максимальные амплитуды сейсмического и акустических сигналов регистрировались в моменты выхода ПП в зону торможения (рис. 5).

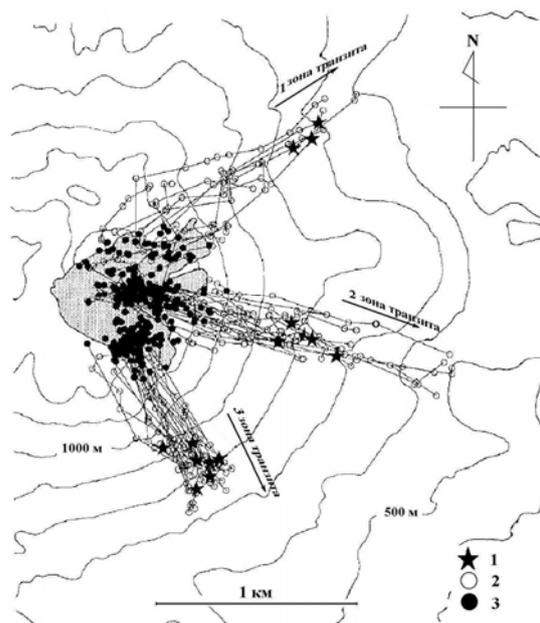


Рис. 5. Распределение источников инфразвуковых сигналов на вулкане Ундзен (Япония) во время извержения 1992 -1993 гг.: 1 - при обрушении экструзивного купола; 2 - при движении пирокластических потоков; 3 - с максимальными амплитудами сейсмического и акустического сигналов [13].

зарегистрированы в пунктах регистрации «Тундровая» (ТНД - 340 км) и «Начики» (НЧК - 361 км), а сейсмический сигнал хорошо записался на с/с «Эссо» на расстоянии 190 км от вулкана [11]. Обе фазы активности хорошо выражены на записях акустических и сейсмического сигналов. Причем акустический эффект от первой фазы извержения на записях в обоих пунктах состоит из трех цугов колебаний (рис. 6). На канале с узкой полосой пропускания в НЧК он представлен тремя цугами с  $\Delta P \leq 0.5$  Па. На широкополосном канале в ТНД первый цуг состоит из длинноволнового возмущения с фазой длительностью  $\sim 60$  с, на которое накладываются более «высокочастотные» колебания. Второй цуг «высокочастотных» колебаний слабо выражен, а третий цуг представляет длинноволновое возмущение с обращением фазы относительно первого цуга на  $180^\circ$ . Следует отметить, что «высокочастотные» колебания ( $f = 0.2 - 1.0$  Гц) генерируются нестационарными процессами (взрыв, сверхзвуковое истечение и т. д.) и развитой турбулентностью эруптивных облаков.

С целью оценки условий распространения АС, рассматривалось изменение метеорологических величин в тропосфере по данным радиозондирования на метеостанции Ключи. На трассе вулкан – акустические станции на высоте 9.5 км выделяется тонкий волновод толщиной не более 500 м, где скорость звука уменьшается от 0.31 до 0.26 км/с и который формирует последующие два цуга волн после прихода прямой волны. Второй цуг представляет отраженную волну от волновода, а так как волновод тонкий, то длинноволновые колебания не отражаются, поэтому второй цуг на длиннопериодном канале выражен только «высокочастотными» колебаниями небольшой амплитуды. Третий цуг связан с распространением вдоль волновода, что подтверждается временем его запаздывания относительно головного цуга волн.

### Волновые возмущения в атмосфере, сопровождавшие извержение вулкана Безымянный 9 мая 2006 г., зарегистрированные в дальней зоне

Режимные видеонаблюдения, организованные КФ ГС РАН, позволили с большой детальностью изучить динамику извержения вулкана Безымянный 9 мая 2006 г. и выделить две фазы [7]:

1. фазу декомпрессии, начавшуюся с образования парового облака высотой до 2.4 км над кратером вулкана в период  $5^{\text{h}}30^{\text{m}} - 7^{\text{h}}35^{\text{m}}$ , после чего высота облака начала увеличиваться с одновременным появлением над кратером пеплового шлейфа, и наконец, отмечена мощная эксплозия 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.

Волновые возмущения, сопровождавшие это извержение, были

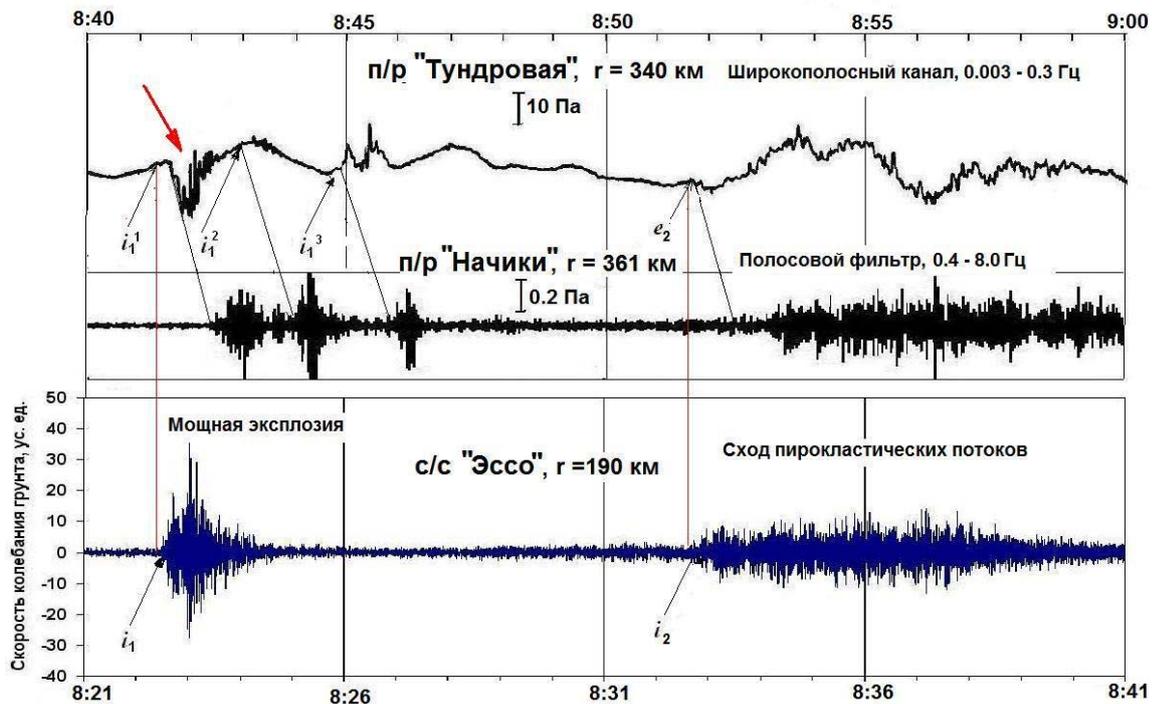


Рис. 6. Волновые возмущения в атмосфере, зарегистрированные микробарографами в поселках Тундровый и Начики, а также сейсмические эффекты, зарегистрированные на сейсмической станции Эссо, во время извержения вулкана Безымянный 9 мая 2006 г. Стрелкой отмечена фаза разряжения длинноволнового акустического возмущения.

Большой интерес с точки зрения физики взрывного процесса представляет формирование длинноволнового акустического возмущения (ДАВ) с фазой разряжения длительностью около минуты, записанного широкополосным каналом на станции ТНД. Следует отметить, что при катастрофических извержениях типа направленного взрыва, возникают ДАВ длительностью до десятков минут [1]. В работе [12] показано, что формирование ДАВ с отрицательной фазой возможно в результате конденсации перегретого пара, которого в газовой составляющей магмы содержится более 90%.

В пользу этого предположения указывают результаты киносъемки распространения верхней границы эруптивных облаков, возникавших во время эксплозий вулкана Карымский. На основании теоретических оценок в работе [4] была установлена зависимость характерного размера поднимающегося термика или струи от времени для источников различных типов и геометрии. Характерным размером можно считать высоту верхней границы или максимальный радиус всплывающих в поле силы тяжести, продуктов процесса тепловыделения (в основном мелких частиц пепла) на автомодельном участке. В табл. 1 приведены зависимости  $H \sim f(t^H)$  для источников различного типа.

Основные данные, полученные на основании киносъемки развития эруптивных туч, 14 эксплозий вулкана Карымский: визуальная характеристика эксплозии; начальная скорость выброса; коэффициент  $\mu$ , который рассчитывался на автомодельном участке после 10-секундного развития облака методом наименьших квадратов, исходя из соотношения  $\lg H = \mu \cdot \lg t + b$ , приведены в табл. 2. Как видно из табл. 2 и рис. 7, из 14 эксплозий для 8 наблюдается развитие высоты эруптивного облака по закону  $H \sim t$  или  $t^{0.75}$  (кольцевой источник). Такой источник предполагает подпитку энергией по периферии эруптивного облака, что возможно или за счет

конденсации водяного пара (что более вероятно), или за счет экзотермических реакций вулканических газов и раскаленных продуктов извержения с кислородом воздуха (процессы окисления или горения).

Таблица 1. Зависимость высоты подъема термика или конвективной струи на автомоделном участке от времени для источников различного типа (импульсный, постоянно действующий) и геометрии (точечный, линейный) по Ю.А. Гостинцеву и др. (4).

Тип источника / Геометрия	Точечный	Кольцевой (линейный)
Импульсный	1. $H \sim t^{1/2}$	2. $H \sim t^{2/3}$
Постоянно действующий	3. $H \sim t^{3/4}$	4. $H \sim t$

Таблица 2. Основные данные об эруптивных тучах вулкана Карымский по данным кино съемки

№	Дата	Время GMT	Визуальная характеристика эксплозии	$v^{\max}$ , м/с	$\mu$	Тип источника
1	2.VI. 1970	22:23	Сильная, пепловая	87	0.67	2
2	9.VI. 1970	00:49	Умеренная, пепло-газовая, переходящая в продувку	72	0.78	3
3	9.VI. 1970	20:40	Умеренная, пепло-газовая, переходящая в продувку	52	1.04	4
4	10.VI. 1970	00:16	Пепло-газовая продувка	34	0.63	2
5	14.VI. 1970	04:30	Слабая пепло-газовая	40	0.42	1
6	25.VI. 1970	23:38	Слабая газо-пепловая, переходящая в продувку	23	0.75	3
7	25.XI. 1970	23:47	Слабая газо-пепловая, переходящая в продувку	19	0.90	4
8	26.XI.1970	02:50	Газо-пепловая продувка	6	1.00	4
9	28.XI.1970	02:03	Газо-пепловая продувка	9	0.74	3
10	28.XII.1976	03:06	Газо-пепловая, переходящая в продувку	24	0.93	4
11	28.XII.1976	03:07	Газо-пепловая, переходящая в продувку	22	0.79	3
12	15. I. 1977	00:04	Газо-пепловая	13	0.96	4
13	17.I. 1977	00:33	Газо-пепловая	12	0.94	4
14	23.I. 1977	06:37	Газо-пепловая	22	0.77	3

Примечание:  $v^{\max}$  – максимальная скорость движения фронта эруптивного облака,  $\mu$  – показатель степени для функции  $H \sim f(t^{\mu})$ ; тип источника согласно табл. 1. Выделен кольцевой тип источника.

### Обсуждение результатов

При достаточно сильных извержениях в атмосфере генерируются инфразвуковые колебания, обусловленные выносом в атмосферу большого количества мелкодисперсного, горячего материала. Формирование пирокластических потоков сопровождается генерацией акустических сигналов диапазона 0.2 - 1.0 Гц, связанных с формированием отдельного турбулентного моля в конвективной колонне.

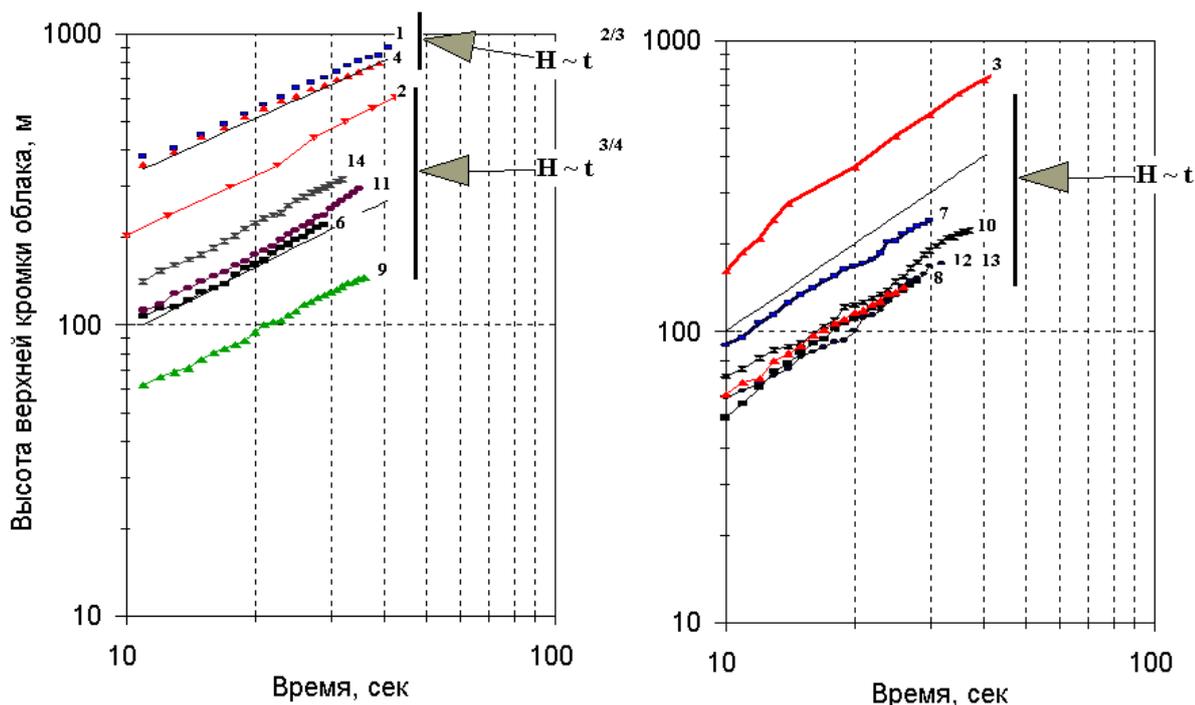


Рис. 7. Зависимость высоты подъема верхней кромки эруптивного облака от времени при эксплозиях вулкана Карымский.

Кинематические и динамические параметры акустических сигналов определяются скоростью тепловыделения извергнутого материала. Соотношение мощностей акустического и сейсмического источников определяется генезисом извергающихся пирокластических потоков.

Для длинноволновых возмущений, регистрируемых во время сильных эксплозивных извержений, характерна глубокая фаза разряжения длительностью несколько минут, по-видимому, формирующаяся в результате конденсации паров воды ювенильного происхождения. Кроме того, этому могут способствовать экзотермические реакции вулканических газов и раскаленных продуктов извержения с кислородом воздуха (процессы окисления или горения).

#### Список литературы

1. 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.
2. Алибидиров М.А., Богоявленская Г.Е., Кирсанов И.Т. и др. Извержение вулкана Безымянный в 1985 г. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 3-17.
3. Гирина О.А. Пирокластические отложения извержения вулкана Безымянный в октябре 1984 г. // Вулканология и сейсмология. 1990. № 3. С. 82-91.
4. Гостинцев Ю.А., Суханов Л.А., Солодовник А.Ф. Предельные законы нестационарных свободно восходящих турбулентных конвективных движений в атмосфере // ДАН СССР. Т. 220. № 2. С. 311-314.

5. Гостинцев Ю.А., Иванов Е.А., Куличков С.Н. и др. О механизме генерации инфразвуковых волн в атмосфере большими пожарами // ДАН СССР. 1985. Т. 283. №3. С. 573-576.
6. Гостинцев Ю.А., Шацких Ю.В. Генерация длинноволновых акустических возмущений в атмосфере всплывающими продуктами горения и взрыва // Препринт. Черноголовка. 1989. 34 с.
7. Дрознин В.А., Дрознин Д.В. Активность вулкана Безымянного 9.05.2006 г. // Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле. 2007. №1. Вып. 9. С. 105-110.
8. Максимов А.П., Фирстов П.П., Гирина О.А., Малышев А.И. Извержение вулкана Безымянный в июне 1986 г. // Вулканология и сейсмология. 1991. № 1. С. 3-20.
9. Токарев П.И. Низкочастотное вулканическое дрожание // Вулканология и сейсмология. 1984. № 6. С. 56-78.
10. Федотов С.А., Иванов Б.В., Двигало В.Н. и др. Деятельность вулканов Камчатки Курильских островов в 1984 г. // Вулканология и сейсмология. 1985. № 5. С. 3-25.
11. Фирстов П.П. Особенности акустических и сейсмических волн, сопровождавших извержение вулкана Безымянный в 1983-1985 гг. // Вулканология и сейсмология 1988. № 2. С. 81-97.
12. Фирстов П.П., Пономарев Е.А. Влияние магматической воды на ударно-волновые эффекты эксплозивных вулканических извержений // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский. 2008. С. 282-290.
13. Sparks R.S.J., Bursik M.I., Carey S.N. et.al. Volcanic plumes. Waley. 1997. 573 p.
14. Yamasato H. Quantitative analysis of pyroclastic flows using infrasonic and seismic data at Unzendake volcano, Japan // J. Phys. Earth. 1997. № 45. P. 397-416.

## **GENERATION OF WAVE DISTURBANCE IN THE ATMOSPHERE DURING THE ERUPTION OF PYROCLASTIC FLOWS AND VIGOROUS EXPLOSIVE ACTIVITY OF ANDESITIC VOLCANOES: A KEY FEATURE OF THE PROCESS**

**P.P. Firstov<sup>1,2</sup>, A.B. Tristanov<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup> Kamchatka Branch of the Geophysical Survey the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, e-mail [firstov@kscnet.ru](mailto:firstov@kscnet.ru)

<sup>2</sup> The Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 683006, Petropavlovsk-Kamchatsky

<sup>3</sup> Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky

The paper provides experimental data on registration of infrasonic vibrations (0.2-1Hz) caused by pyroclastic flows from the 1983-1986 eruptions of Bezymianny volcano. The rate of heat release of the erupted material specifies parameters of infrasonic vibrations, while the genesis of the erupting pyroclastic flows identifies correlation of the seismic and acoustic sources energy. The long-wave perturbations recorded at the time of the strong explosive eruptions have a deep phase of discharge that lasts a few minutes. This phase is probably caused by condensation of water vapor of the juvenile origin.