

## ВЛИЯНИЕ МАГМАТИЧЕСКОЙ ВОДЫ НА УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

П.П. Фирстов<sup>1</sup>, Е.А. Пономарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск - Камчатский, 683006, e-mail: firstov@kscnet.ru

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664003

### Введение

По существующим представлениям в магме содержится от одного до пяти весовых процентов воды, поэтому роль перегретого водяного пара при формировании акустических сигналов (АС), возникающих во время эксплозивной деятельности, может быть весьма велика. Для Карымского вулкана во время отдельных выбросов умеренной силы, с подъемом эруптивного облака на высоту до 1500 м над кратером, количество выброшенного пепла оценивается  $10^6 - 5 \cdot 10^6$  кг пепла [5]. Если принять массовое содержание воды в лавах андезитового состава вулкана Карымского 3%, то в этом случае количество магматической воды будет  $3 \cdot 10^4 - 1.5 \cdot 10^5$  кг, объем которой в пересчете на перегретый пар с плотностью  $\sim 0.3$  кг/м<sup>3</sup> составит  $10^5 - 5.0 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup>. Этот пример наглядно иллюстрирует наличие большого количества водяных паров в эруптивных облаках, возникающих во время эксплозивных извержений андезитовых вулканов. Теоретические модели генерации волновых возмущений, развитые в работах Ю.А. Гостинцева [2] для термиков от взрывов и конвективных струй от постоянно действующих источников (площадные пожары), в случае эруптивных облаков от вулканических извержений, по видимому, должны учитывать наличие большого количества водяного пара.

Фрагментация (разрушение) магмы при ее выносе на дневную поверхность сопровождается генерацией воздушных ударных волн (ВУВ), которые, проходя через пепло – паровое облако, способствуют конденсации водяных паров, что приводит к искажению формы ВУВ. В данной работе дана попытка теоретического обоснования возможности влияния водяного пара на формирование ВУВ при эксплозиях вулканического типа для вулканов с андезитовым и андезито-базальтовым составом магм, а также приведены экспериментальные данные, подтверждающие влияние водяного пара на ударно-волновые эффекты эксплозивных вулканических извержений.

### Влияние пара на формирование акустического сигнала

Поведение водяного пара в широком диапазоне температур и давлений, включая изменение фазового состояния, описывается уравнением Ван Дер Ваальса (ВДВ) [4]:

$$(p + an^2) \cdot (1 - bn) = nT \quad (1)$$

где:  $p$  – давление пара;  $n$  – плотность числа частиц;  $T$  – температура в энергетических единицах  $T = kK^o$ ,  $k$  – постоянная Больцмана,  $K^o$  – температура в градусах Кельвина. Если обозначить параметры критической точки вода - пар  $p_K = 225.65$  кг/см<sup>2</sup>,  $T_K = 374.12^\circ$ ,  $n_K$ , то коэффициенты  $b$  и  $a$  примут вид  $b = \frac{1}{3} n_K$ ,  $a = 3 \frac{p_K}{n_K^2} = \frac{9T_K}{8n_K}$ ; отсюда

$p_K = \frac{3}{8} n_K \cdot T_K$ , а уравнение (1) в безразмерном виде может быть записано в виде:

$$q = \frac{8sl}{3-s} - 3s^2, \quad (2)$$

где:  $q = p/p_k$ ,  $s = n/n_k$ ,  $l = T/T_k$ .

На рис. 1а приведены диаграмма состояния воды и пара в безразмерных координатах  $q - s$ , в виде семейства изотерм для интервалов безразмерной температуры  $l = 0.8 - 1.1$ . При  $s = 3$  безразмерное давление  $q$  обращается в бесконечность, т.к. в этой точке достигается максимально возможная плотность воды. Как видно на рис. 1а, кривые  $q = f(s)$  имеют два локальных экстремума – максимум и минимум, которые в критической точке **К** с координатами  $q = s = l = 1$  совпадают, превращаясь в перегиб. Кривая, проходящая через экстремумы и отделяющая сухой пар от влажного при  $s < 1$ , и влажный пар от жидкой воды при  $s > 1$ , носит название спинодаль, уравнение которой можно получить из уравнения (2) и условий экстремума  $\partial q/\partial s = 0$ .

$$l_c = 0.25s \cdot (3-s)^2. \quad (3)$$

Подставив (3) в (2) и исключив, тем самым, безразмерную температуру, можно найти зависимость  $q$  от  $s$  на спинодали.

$$q_c = s^2 \cdot (3 - 2s). \quad (4)$$

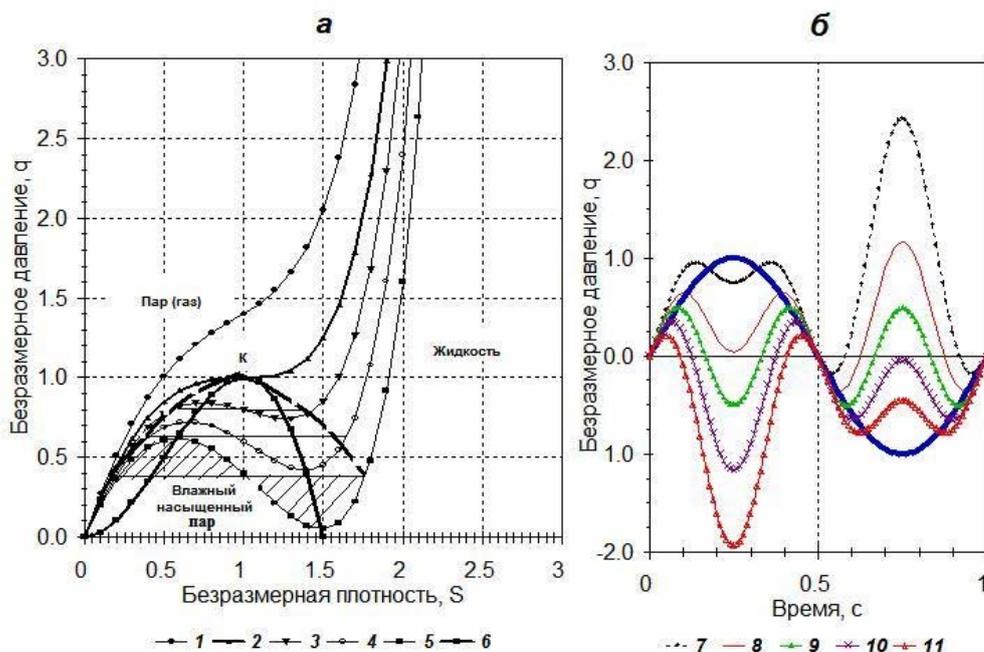
Если кривая состояния пара  $q = q(s, l)$  пересекает спинодаль и попадает внутрь области, где  $\partial q/\partial s < 0$ , то возникает парадоксальная ситуация, когда уменьшение давления ведет к увеличению плотности. Ясно, что такая ситуация неустойчива и реально существовать не может. Поэтому в пределах спинодальной области  $\partial q/\partial s$  считается равной нулю, а  $q(s) = const$ .

Зафиксируем на спинодали точку с давлением  $q_0$  и плотностью  $s_0$ , и рассмотрим ситуацию, когда в этой точке параметры пульсируют вокруг равновесного состояния с амплитудами  $s_1$  и  $q_1$ , тогда  $q = q_0 + q_1$  и  $s = s_0 + s_1$ . Подставив эти значения в уравнение (4) и используя уравнение для невозмущенного состояния  $q_0 = s_0^2(3-2s_0)$ , найдем для  $q_1$ :

$$q_1 = s_1 \cdot a_1 \left( 1 + b_1 \cdot \frac{s_1}{a_1} - \frac{2s_1^2}{a_1} \right) \quad (5)$$

где:  $a_1 = 6s_0 \cdot (1-s_0)$ ,  $b_1 = 3(1 - 2s_0)$ .

Предположим, что безразмерная плотность в области спинодали изменяется по синусоидальному закону  $s_1 = A \sin x$ , с постоянными  $A = 1$ ;  $x = \omega t = 6.28 \cdot t$ . На рис. 1б приведены графики  $q = f(t)$  на спинодали, вычисленные по формуле (5) для значений  $s_0$  от 0.3 до 0.7. На рис. 1б видна нелинейность, заложенная в формуле 5, которая приводит к утроению частоты при  $s_0 = 0.5$ , и появлению глубокого минимума в точке экстремума положительной фазы сжатия для давления при  $s_0 > 0.5$ . Физической причиной этого процесса является конденсация пара и повышение его влажности. При этом безразмерная температура изменяется вблизи спинодали очень мало, а на спинодали в точке с фиксированной плотностью – вообще постоянна.



**Рис. 1.** *а* – диаграмма состояния воды и пара в безразмерных координатах  $q - s$ . 1- 5 - изотермы, рассчитанные по приведенному уравнению Ван-дер-Ваальса и спинодаль: 1 –  $l = 1.1$ , 2 –  $l = 1.0$ , 3 –  $l = 0.95$ , 4 –  $l = 0.9$ , 5 –  $l = 0.85$ , 6 – спинодаль. *б* – безразмерное давление на спинодали при изменении плотности по синусоидальному закону для различных значений  $s_0$ : 7 –  $s_0 = 0.3$ ; 8 –  $s_0 = 0.4$ ; 9 –  $s_0 = 0.5$ ; 10 –  $s_0 = 0.6$ ; 11 –  $s_0 = 0.7$ .

### Экспериментальные наблюдения

**Эксплозии вулкана Карымский.** При вулканических извержениях во время эксплозий возникают воздушные волны, регистрируемые как импульсные акустические сигналы (АС) инфразвукового диапазона 1-10 Гц. Часть АС вблизи источника относятся к классу слабых воздушных ударных волн. Различия в кинематических и динамических параметрах АС позволили выделить пять типов, обусловленных различной физикой эксплозивного процесса [7, 8]. Причем если в случае ВУВ, возникающих во время взрывов взрывчатых веществ, амплитуда избыточного давления фазы сжатия всегда

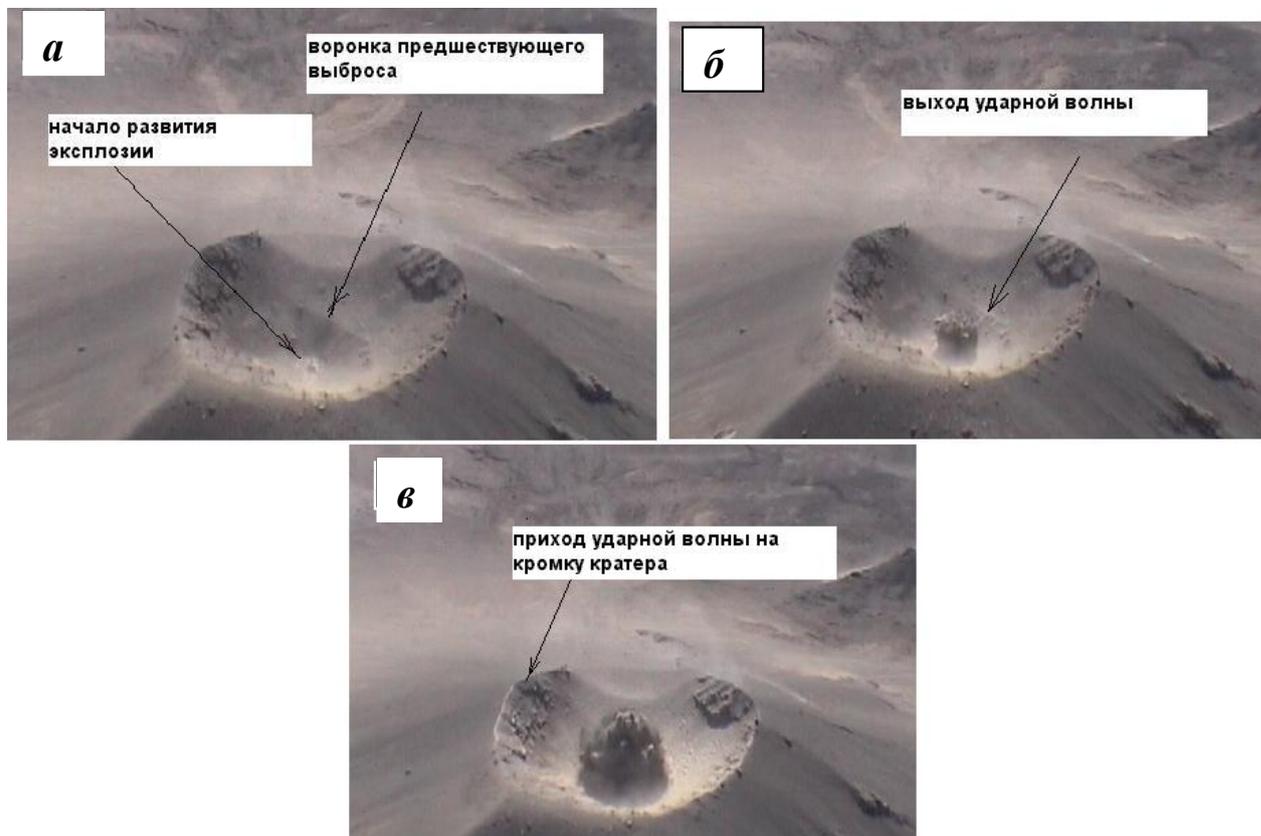
больше амплитуды фазы разрежения  $\Delta P_+ > \Delta P_-$  и импульсы ВУВ ( $I_+ = \int_0^{\phi} \Delta P(t) dt$  [Па·с])

сбалансированы, т.е.  $I_+ = I_-$ , то для ВУВ «вулканического» происхождения в некоторых случаях  $\Delta P_+ < \Delta P_-$  и  $I_+ < I_-$ .

Для вулканов с андезитовым составом магм при вулканском типе активности характерны эксплозии, начинающиеся с «взрыва» и переходящие в «продувку» длительностью до нескольких минут [7]. Во время «продувок» наблюдается пульсирующее истечение из кратера пепло-газовой смеси. Возможные механизмы продувок рассмотрены в ряде работ [10]. На записях микрофлуктуаций атмосферного давления и эксплозивных землетрясений, как правило, в таких случаях выделяются «головная» и «хвостовая» части. «Головная» часть возникает во время разрушения пробки в верхней части магматического канала, а «хвостовая» во время пульсирующего истечения пепло-газовой смеси [6]. В иностранной литературе пульсирующее истечение газо-пепловой струи из кратера получило название «чаггинг» (chagging) за счет подобия звукового эффекта с «чагами» паровоза, возникающими при выбросе паро-пепловой смеси из его трубы [11-13].

Большой удачей следует признать съемку развития начала эксплозии вулкана Карымский 9 сентября 2003 г., которую произвел А.В. Сокоренко. Как видно на рис.2, на котором приведены кадры развития эксплозии, наблюдается двухактность процесса.

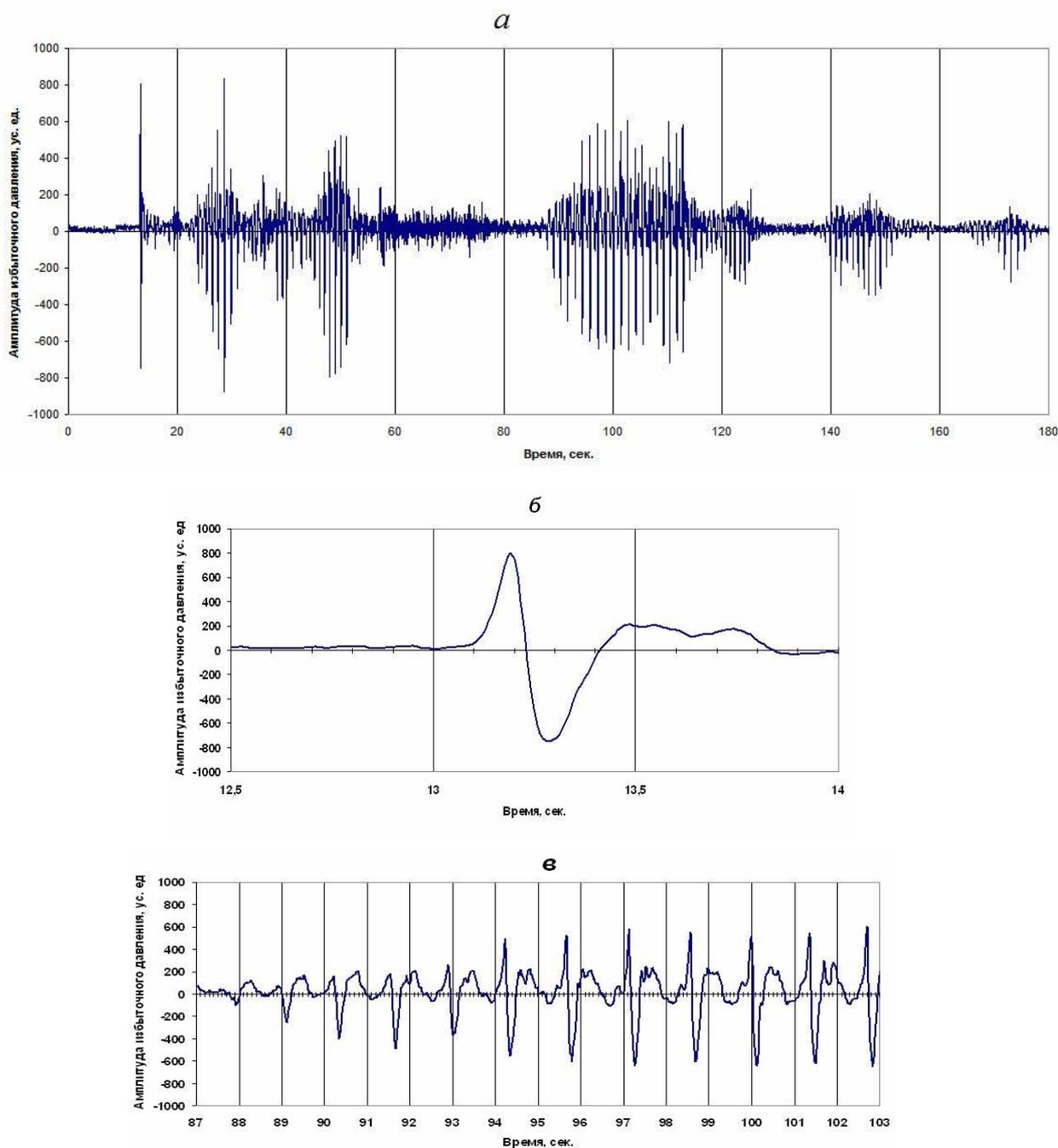
Вначале происходит прорыв газа, что обеспечивает декомпрессию верхнего слоя андезитовой магмы и ведет к ее фрагментации (Рис. 2а). Фрагментация магмы происходит по принципу заглубленного взрыва взрывчатого вещества с низкой плотностью энергии. Это ведет к выходу на дно кратера ударной волны, которая хорошо отслеживается на фотоснимках (рис. 2б). При пульсирующем режиме истечения пепло-газовой смеси этот процесс повторяется, но ударная волна уже проходит через пепло-газовое облако, созданное предшествующими эксплозиями.



**Рис. 2.** Киносъемка начала развития эксплозии, выполненная А.В. Сокоренко 9 сентября 2003 г.: **а** – начало процесса, прорыв газов - 0 с.; **б** – выход ударной волны на дно кратера - 0,08 с.; **в** – приход ударной волны на кромку кратера - 0,26 с.

На рис. 3а приведен образец записи сейсмического сигнала, сопровождавшего эксплозию вулкана Карымского в 15 ч 12 мин, 21 августа, 1997 г. Цифровая запись сигнала получена в результате работ Русско - Американской экспедиции в 1987 г.

Эксплозия начинается с взрыва, произошедшего на 13<sup>ой</sup> секунде после условного нуля. По форме записи акустический сигнал (АС), зарегистрированный от этой эксплозии, напоминает ВУВ от взрыва взрывчатых веществ с характерным для нее соотношением параметров  $\Delta P_+ > \Delta P_-$  и  $I_+ \approx I_-$ . (рис. 2б). Для последующих АС, сопровождавших пульсирующий режим, в основном, наблюдается  $\Delta P_+ < \Delta P_-$ .



**Рис. 3.** Запись микробарографом акустических сигналов, сопровождающих эксплозию вулкана Карымский 21 августа 1997 года в 15 часов 12 минут (*а*), акустический импульс начала эксплозии (*б*) и серия акустических импульсов, возникшая при пульсирующем истечении пепло-газовой смеси (*в*).

Следует отметить, что во временном интервале 50-80 сек. регистрируются сравнительно высокочастотные акустические колебания. Как показал многолетние наблюдения за эксплозивной активностью этого вулкана [7], такие колебания возникают за счет «просачивания» аэродинамического шума, который возникает в результате истечения паро-пепловой струи, которая формирует над кратером паро-пепловое облако. На рис. 2в приведен фрагмент записи АС микробарографом на интервале 87 – 103 с после начала истечения паро-пепловой струи. Четко выделяются отдельные импульсы, связанные с последовательной фрагментацией магматического материала с квазипериодичностью ~ 1.3 с. Для 12 акустических импульсов, приведенных на рис. 2в, хорошо видна

несбалансированность импульсов сжатия и разряжения с отношением  $\Delta P_+ / \Delta P_- = 0.18 - 0.7$ . Причем у первых импульсов фаза сжатия выражена очень слабо.

На качественном уровне экспериментальные данные подтверждают выкладки, приведенные выше. Вне всякого сомнения, в действительности процесс намного сложнее, т.к. кроме пара, частицы пепла также вносят вклад в формирование ВУВ.

**Извержение вулкана Безымянный 9 мая 2006 г.** Режимные видеонаблюдения, организованные Камчатским филиалом Геофизической службы РАН (<http://emsd/iks/ru>), позволили с большой детальностью изучить динамику извержения вулкана Безымянного 9 мая 2006 г., чему способствовали почти идеальные условия видимости. По данным видеонаблюдений выделяются две фазы [3]:

1. Фаза декомпрессии длительностью около 5 часов. Эта фаза началась с образования парового шлейфа высотой 2.4 км над кратером вулкана, который наблюдался с 5 ч. 30 мин до 7 ч. 35 мин\*. После чего высота парового облака начала увеличиваться с одновременным появлением над кратером пеплового шлейфа начавшейся мощной эксплозии.
2. Фаза схода и формирования пирокластических потоков (8 ч. 33 мин – 8 ч. 38 мин.), сопровождавшаяся образованием эруптивной колонны, поднявшейся на высоту более 11 км над уровнем моря.

Для изучения динамики извержения, были сопоставлены сейсмические и волновые эффекты в атмосфере, сопровождавшие извержение. На рис. 4а приведена запись микробарографом в г. Петропавловск - Камчатский ( $\Delta = 345$  км) волновых возмущений, где четко выделяются вступления трех акустических сигналов, два из которых по времени возникновения совпадают с сейсмическими сигналами, сопровождавшими две фазы извержения (рис.4б, сейсмическая станция Эссо,  $\Delta = 116$  км). С целью изучения условий распространения АС рассматривалась стратификация метеорологических величин в тропосфере по данным радиозондирования атмосферы 8 мая в 22<sup>h</sup>30<sup>m</sup> на метеостанции Ключи, расположенной на расстоянии 43 км от вулкана (<http://raob.fsl.noaa.gov/Welcome.cgi>). На рис. 5 приведены стратификация температуры, скорости и направления ветра, полученные по данным радиозондирования. Скорость звука  $C_h$  на трассе БЗМ-ПТР рассчитывалась по известной формуле:

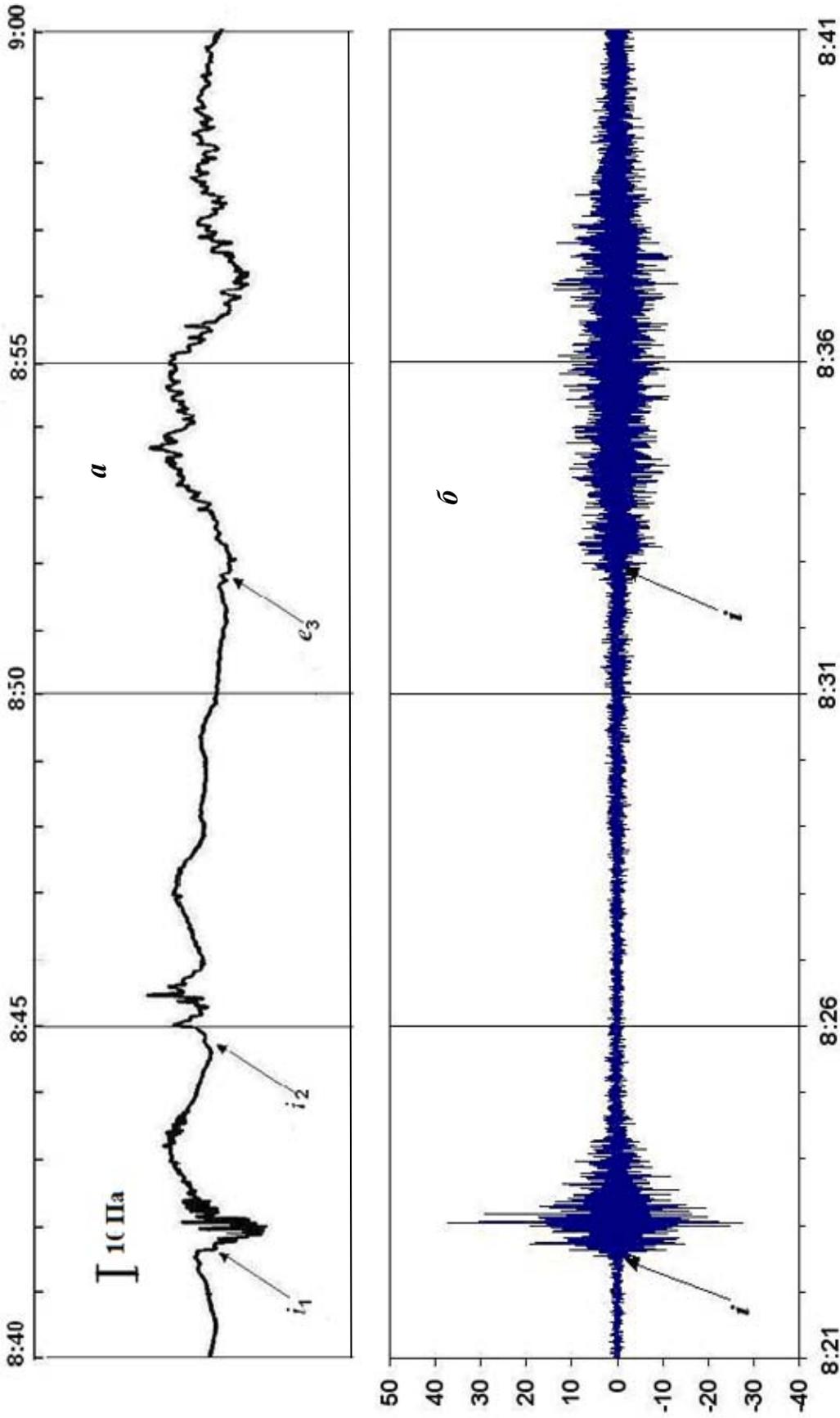
$$C_h = 20.1 \cdot \sqrt{273 + T_h} \pm v_h \cdot \cos(\varphi - \alpha_h),$$

где  $T_h$ ,  $v_h$ ,  $\alpha_h$  – температура, скорость, азимут ветра на высоте  $h$ ,  $\varphi$  - азимут от источника на пункт приема.

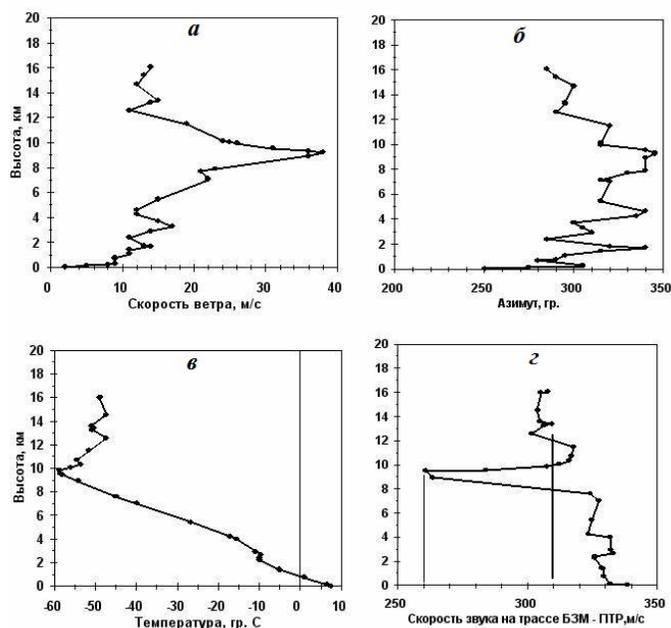
Как видно на рис. 4а, время прихода вступления первого АС 8<sup>h</sup> 41.5<sup>m</sup>. Если принять скорость звука 0.3 км/с согласно скоростному разрезу (рис. 5з), то время распространения АС составит 19.2<sup>m</sup>, а время его возникновения  $t_0 = 8^h 22.3^m$ , что близко к времени возникновения сейсмического сигнала 8<sup>h</sup> 22.1<sup>m</sup> (рис. 4б). Второй АС обусловлен тонким волноводом со скоростью 0.26 км/с, который сформировался на высоте ~ 9 км (рис. 5з). В этом волноводе происходит канализация АС и обращение его фазы на 180°, что согласуется с временем распространения, равным 22.1<sup>m</sup>.

---

\* Здесь и далее при описании извержения вулкана Безымянный 9 мая 2006 г. используется Гринвичское время (UT).



**Рис. 4.** Волновые возмущения в атмосфере, зарегистрированные микробарографом в г. Петропавловске-Камчатском (*a*), и сейсмические эффекты, зарегистрированные на сейсмической станции Эссо (*б*), во время извержения вулкана Безымянный 9 мая 2006 г. По вертикальной шкале внизу – скорость колебания грунта, ус. ед.

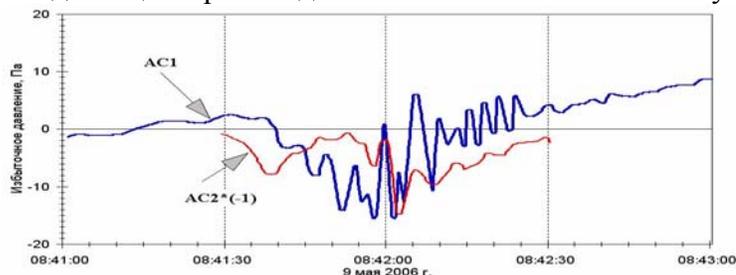


**Рис. 5.** Состояние атмосферы по данным радиозондирования, выполненного на станции Ключи 8 мая в 22<sup>h</sup>30<sup>m</sup> : *a* – скорость ветра; *б* – направление ветра, азимут; *в* – температура; *г* – скорость звука на трассе БЗМ-ПТР.

На рис. 6, где приведены совмещенные АС1 и АС2, хорошо видно, что эксплозия длительностью около минуты состояла из серии взрывов, которые вначале происходили с интервалом 10 с, который в конце уменьшился до 5 с, и одновременно с началом взрывного процесса происходит формирование волны разряжения, которая хорошо выражена на АС1. Не исключено, что под воздействием ударных волн началась конденсация парового облака, которое возникло перед эксплозией, что привело к формированию разряжения. Этому также могли способствовать реакции окисления вулканических газов и раскаленных продуктов извержения атмосферным кислородом.

### Заключение

1. Рассмотрение приведенного уравнения Ван-Дер-Ваальса на качественном уровне свидетельствует в пользу того, что при прохождении воздушных ударных волн через пароводяную смесь, за счет конденсации происходит нелинейное искажение синусоидального сигнала.



**Рис. 6.** Акустический сигнал 1 и совмещенный с ним АС<sub>2</sub> умноженный на (-1).

2. Несбалансированность импульсов сжатия и разряжения для воздушно ударных волн при эксплозиях вулканов с андезитовым и андезито-дацитовым составом магм, по-видимому, связана с конденсацией водяных паров, хотя этому могут способствовать и другие причины.

3. При формировании фазы разряжения длительностью от десятков секунд до нескольких минут при пароксизмальных извержениях андезитовых вулканов, несомненно, большую роль играет конденсация паров ювенильной воды.

#### 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. Гостинцев Ю.А., Шацких Ю.В. Генерация длинноволновых акустических возмущений в атмосфере всплывающими продуктами горения и взрыва // Препринт. Черниголовка. 1989. 34 с.
3. Дрозни В.А., Дрознин Д.В. Активность вулкана Безымянного 9.05.2006 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. №1. Вып. 9. С.105-110.
4. Зоммерфельд А. Термодинамика и статистическая физика. М.: ИЛ, 1955. 492 с.
5. Иванов Б.В. Извержение Карымского вулкана в 1962-1965 гг. и вулканы Карымской группы. М.: Наука, 1970. 131 с.
6. Токарев П.И., Фирстов П.П. Сейсмологические исследования вулкана Карымского // Бюлл. Вулканол. станций. М.: Наука, 1967. С. 11-22.
7. Фирстов П.П. Вулканические акустические сигналы диапазона 0,5-10 Гц в атмосфере и их связь с эксплозивным процессом. Петропавловск- Камчатский. 2003. 90 с.
8. Фирстов П.П. Длинноволновые акустические возмущения – как источник информации о сильных эксплозивных извержениях // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский. 2007. С. 83-94.
9. Фирстов П.П., Адушкин В.В., Сторчевус А.С. Ударные воздушные волны, зарегистрированные во время Большого трещинного Толбачинского извержения в сентябре 1975 г. // ДАН СССР. 1978. т. 239. № 5. С. 1078-1081.
10. Фирстов П.П., Озеров А.Ю., Маневич А.Г. Акустические и сейсмические эффекты, сопровождающие пепло - газовые эксплозии вулкана Карымского // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский. 2004. С. 26-32.
11. Jonson J.B. Generation and propagation infrasonic airwaves from volcanic explosions // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2003. V. 121. P. 1-14.
12. Jonson J.B., Lees J.M. Plugs and chags – seismic and acoustic observations of degassing explosions at Karymsky, Russia and Sangay, Ecuador // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2000. 101. P. 67-82.
13. Ruiz M.C., Lees J.M., Johnson J.B. Source constraints of Tungurahua volcano explosion events // Bull. Volcanol. 2006. V. 68. P. 480-490.

#### INFLUENCE OF MAGMATIC WATER ON AIR-SHOCK WAVE EFFECTS FROM EXPLOSIVE VOLCANIC ERUPTIONS

P.P. Firstov<sup>1</sup>, Ye.A. Ponomarev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006,  
e-mail: firstov@kscnet.ru

<sup>2</sup> Institute of solar-terrestrial physics SB RAS

According to van der Waals equation, condensation that forms during the passage of air shock waves through the mixture of steam and water causes nonlinear distortion of a sine-shaped wave signal. It is likely to be one of the reasons of unbalanced impulses of compression and pressure for air shock waves at explosions of volcanoes with andesite and andesite-dacite magma content. Condensation of juvenile water contributes much to the duration of pressure phase starting from tens seconds up to several minutes at paroxysmal eruptions of andesite volcanoes.