



УДК 551.21

Т. А. Котенко, Л. В. Котенко

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский, 683 006, бульвар Пуйпа  
9; e-mail: kotenko@sakhalin.ru*

## Вулкан Эбеко в 2012–2013 гг.

Приводятся данные о состоянии вулкана Эбеко в 2012–2013 гг.: фумарольная активность, состав газов, гидротермальные взрывы на Юго-Восточном фумарольном поле. Обсуждаются причины гидротермальных взрывов. Дается оценка активности вулкана.

### Введение

Действующий вулкан Эбеко высотой 1156 м находится в северной части хребта Вернадского о-ва Парамушир (Курильские о-ва). Вулкан имеет сложное строение по типу «Сомма-Везувий»: три чётко оформленных, соприкасающихся между собой кратера — Южный, Средний и Северный диаметрами 240–320 м и глубинами 40–72 м вытянуты в меридиональном направлении. Помимо них в привершинной части конуса расположены более 10 боковых кратеров. В Северный кратер вложен кратер 1967 г. — Активная Воронка [5]. Выходы восходящего потока гидротерм локализируются в кратерах и на склонах вулкана, главным образом, восточной ориентации. На поверхности этот гидротермальный поток проявляется в виде парогазовых струй, кипящих котлов, прогретых площадок, обширных полей гидротермальных изменений и периодически существующих кислых кратерных озёр. В исторический период для вулкана Эбеко характерны эксплозивные фреатические и условно фреатомагматические извержения [5]. Последние извержения происходили в 2009, 2010 гг.; в 2011 г. наблюдалась серия гидротермальных взрывов в Среднем кратере [2, 3].

П. И. Токарев ввел определение понятия вулканического цикла [11], который включает две фазы — покоя и активности. Фаза активности состоит из фазы подготовки извержения (серии извержений), самого извержения (серии извержений) и фазы релаксации после него. В последние столетия в активности вулкана Эбеко наблюдалась следующая ритмичность (табл. 1): продолжительность вулканического цикла составляла 20–36 лет. Фаза подготовки (изменение состава фумарольных газов, усиление фумарольной активности, учащение гидротермальных взрывов и др.) длилась от 4 до 5 лет. Общая продолжительность фазы активности вместе с промежутками относительного покоя между извержениями составляла 8–10 лет.

### Результаты работ и их обсуждение

**Фумарольная активность вулкана в 2012–2013 гг.** В 2012–2013 гг. наблюдалось общее уменьшение выноса флюида, возвращение компонент-

ного состава газов к межэруптивному. Расчёт изменения количества основных компонентов, поступающих на поверхность в составе вулканического газа, приведён в табл. 2. Как следует из табл. 2, в 2012 г. показатели установились на уровне, характерном для спокойного состояния вулкана. Относительная активность разных термальных полей показана на рис. 1. Основную долю в поступлении флюида на поверхность вносит эруптивное жерло в Активной Воронке. Июльское фумарольное поле, образовавшееся в 2005 г., вклад которого в общий поток флюида в стадии его максимальной активности до начала извержения 2009 г. составлял около 6600 т/сутки [1], постепенно затухает, а состав его газов стал аналогичен газам Северо-Восточного поля. Расчёт поступления флюида сделан непосредственно по результатам замеров дебита и температуры фумарольных струй, а также по высоте струй по номограмме Федотова [12] и среднему составу газов. Для отбора фумарольных газов применялся стандартный метод отбора в вакуумированные барботёры из кварцевого стекла с 4М КОН. Аналитические исследования выполнялись в АЦ ИВиС (аналитики В. И. Гусева, Л. Н. Гарцева). Абсорбированные компоненты ( $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $HCl$ ,  $CO_2$ ) определялись стандартными методами: потенциометрическим, иодометрическим, титриметрическим. Неабсорбированные газы ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $Ar$ ,  $He$ ) — методами газовой хроматографии.

Для характеристики состава газов приведены диаграммы относительного содержания  $CO_2 - (H_2S + SO_2) - HCl$  (рис. 2а) и  $N_2 - Ar - He$  (рис. 2б). На рис. 2а в области I точки кратерных фумарол сосредоточены вблизи вершины  $CO_2$ , здесь же группируются высоко-обводнённые фумаролы Северо-Восточного поля и Восточного цирка. В область II ложатся данные составов фумарол Юго-Восточного поля, область III образована данными о составе газов в период подготовки извержения 2009 г. Все точки 2012 г. легли в область I, кроме двух анализов Южного кратера, сохранивших более высокое содержание галоидных и серных газов.

Данные относительных концентраций редких газов (рис. 2б) формируют две самостоятельные об-

**Таблица 1.** Ритмичность вулканических циклов влк. Эбеко. Датировки циклов 1 и 2 по [6, 8, 9], 3 — данные авторов.

| Вулканический цикл/длительность | Фаза                           | Начало                   | Окончание          | Длительность фазы активности |
|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------|------------------------------|
| 1/ 36 лет                       | покой                          | осень 1935               | 1961               |                              |
|                                 | подготовка                     | 1961                     | 08 февраля 1967 г. |                              |
|                                 | 1 извержение                   | 08 февраля 1967 г.       | апр. 1967          |                              |
|                                 | 2 извержение                   | фев.1969                 |                    |                              |
|                                 | 3 извержение                   | 1971                     |                    |                              |
|                                 | релаксация                     | ?                        | ?                  | 10 лет                       |
| 2/ 20 лет                       | покой                          | 1971                     | 1983               |                              |
|                                 | подготовка                     | 1983                     | 14 октября 1987 г. |                              |
|                                 | 1 извержение                   | 14 октября 1987 г.       | январь 1988        |                              |
|                                 | 2 извержение                   | 02 февраля 1989 г.       | январь 1991        |                              |
|                                 | 3 извержение                   | 04 апреля 1991 г.        |                    |                              |
|                                 | релаксация                     | ?                        | ?                  | 8 лет                        |
| 3/ 20 лет                       | покой                          | апр.1991                 | нояб. 2003         |                              |
|                                 | подготовка                     | нояб. 2003               | 29 января 2009 г.  |                              |
|                                 | 1 извержение                   | 29 января 2009 г.        | 18 июня 2009 г.    |                              |
|                                 | 2 извержение                   | 28 апреля 2010 г.<br>(?) |                    |                              |
|                                 | 3 извержение                   | 02 июля 2010 г.          |                    |                              |
|                                 | 4 извержение (гидротермальное) | 16 июля 2011 г. (?)      |                    |                              |
| релаксация                      |                                |                          | нояб. 2011         | 8 лет                        |

**Таблица 2.** Поступление основных компонентов в составе фумарольных газов влк. Эбеко (т/сут).

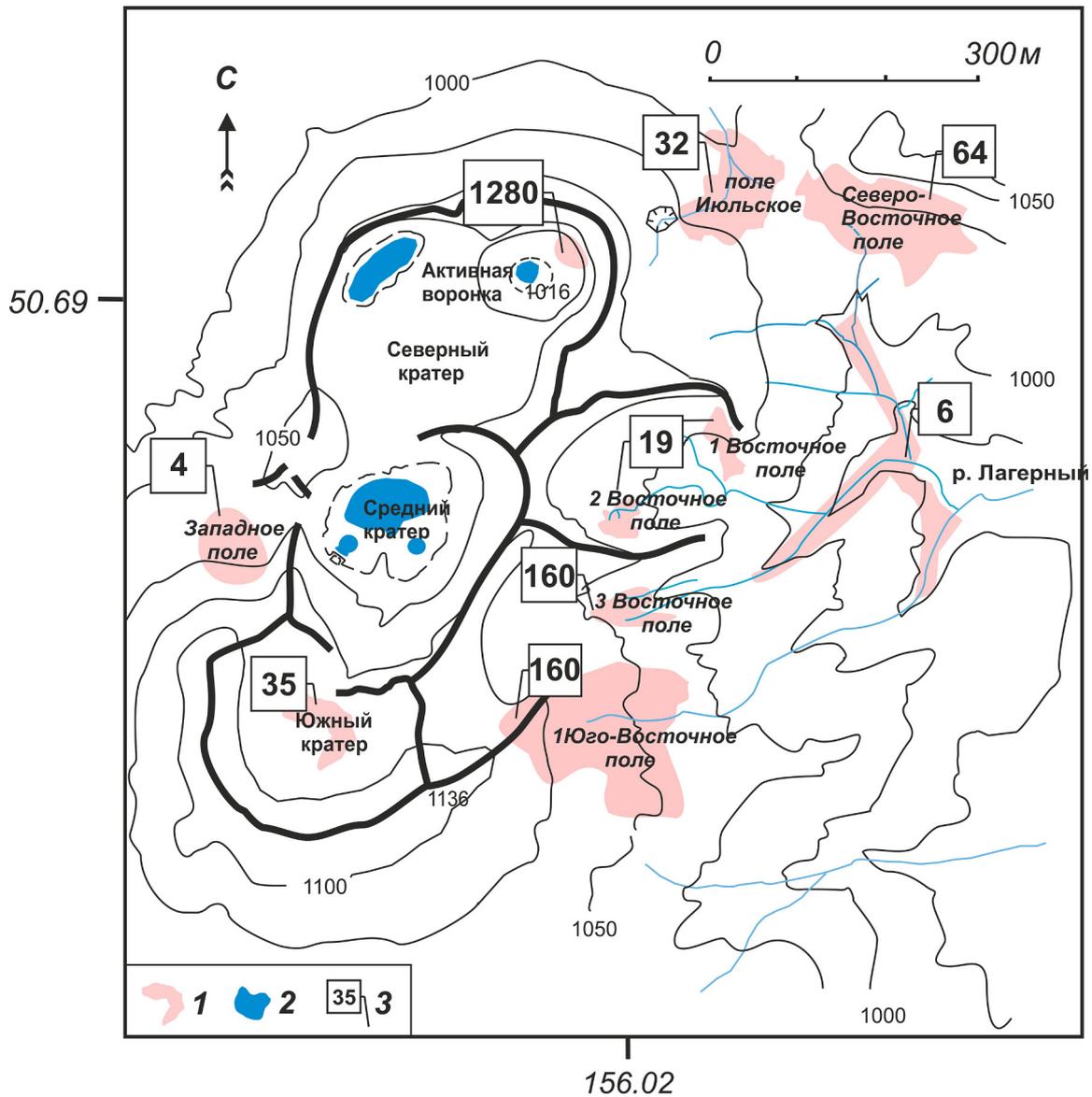
| Компонент        | 1983 г. по [7] | 2003 г. | 2005 г. | апрель 2009 г. | 2012 г. |
|------------------|----------------|---------|---------|----------------|---------|
| H <sub>2</sub> O | 1804,5         | 862     | 7593    | 6767           | 1864    |
| CO <sub>2</sub>  | 79             | 36,1    | 448     | 219            | 185     |
| SO <sub>2</sub>  | 9,5            | 4,1     | 896     | 58,2           | 14      |
| HCl              | 4              | 1,9     | 418     | 19,4           | 5       |
| H <sub>2</sub> S | 3,08           | 1,9     | 37      | 13             | 5       |

ласти: в области I группируются наиболее крайние значения, характерные обычно для газов склонов, а также всех газов в периоды подготовки и реализации фреатических извержений. В области II группируются газы наиболее обводнённых фумарол, которые имеют значительную примесь воздуха или грунтовых вод, насыщенных воздухом. К осени 2012 г. все опробованные газы переместились в область II.

**Гидротермальные взрывы на Юго-Восточном поле в 2012 г.** Юго-Восточное фумарольное поле занимает одноименный склон вулкана ниже вершины (рис. 1). Его общая площадь 6,5 тыс. м<sup>2</sup>. Крутизна

склона составляет 30° для верхней части и 20° для нижней. Термальная активность проявлена долгоживущими высокодебитными фумаролами, представляющими собой крупные серные постройки, многочисленными мелкими струями, рассеянным парением грунтов и кипящими котлами. Скорость истечения парогазовой смеси из жерла крупных фумарол составляет обычно 10–36 м/с, температура струй 115–130°С, но во время активизации вулкана температура может достигать 450–460°С [2].

Фумарола Рогатая действовала в пределах поля более 30 лет. В период между 17 июня 2012 г. и 31 июля 2012 г. в результате гидротермального взрыва серная постройка фумаролы была расплавлена, на её месте образовалась воронка диаметром 13 м и глубиной около 3 м, заполненная кипящим минерализованным раствором (рис. 3). Полностью расплавленные куски серы, имеющие размеры до 10 см в диаметре, падали в нескольких метрах от эруптивного центра и образовали прочный покров (кольцо) спекшейся серы. Другая часть в виде серных потоков спустилась по двум руслам сухих ручьёв, образовав рукава длиной 114 м и 158 м. В момент взрыва температура газов превысила температуру кипения серы, равную 444°С, на что указывает структура части элементов серного покрова, представляющих собой вспененные лепешки. Вторая



**Рис. 1.** Схема вулкана Эбеко: 1 — площади термальных полей, 2 — озера, 3 — вынос флюида (т/сутки). Топографическая основа за 1989 г. В. Н. Двигало

взрывная воронка диаметром 8 м, глубиной около 2 м образовалась на месте фумаролы, находившейся на 30 м ниже по склону. Сохранились боковые стенки серной постройки, серный поток вытек через разрушенную нижнюю часть воронки. Суммарный объём серных построек составлял до взрыва около  $230 \text{ м}^3$ , таким образом, при плотности  $2,07 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  было расплавлено  $\sim 480 \text{ т}$  серы.

Содержание в термальном растворе воронки макрокомпонентов представлено в табл. 3. Аналитические исследования выполнены в АЦ ИВиС потенциометрическим, объёмным, колориметрическим и атомно-абсорбционным методами (аналитики Е. И. Карташова, О. В. Шульга, А. А. Кузьмина). Наблюдаются крайне высокие по сравнению со средними показателями для других котлов этого поля значения общей минерализации — более 116 г/л

при первом отборе, с высокими содержаниями  $\text{Cl}^-$  и  $\text{H}^+$ . Состав раствора хлоридно-водородный. Произошёл выброс на поверхность высокоминерализованного рассола из неглубоко расположенного гидротермального резервуара. Интересен факт, что после гидротермального взрыва состав газов фумарол Юго-Восточного поля до середины сентября этого года был значительно обеднен  $\text{HCl}$ , что для этих фумарол не характерно (рис. 2а).

В июне 2012 г. (до взрыва) температура газов всех фумарол этого поля составляла  $110\text{--}131^\circ \text{C}$ , такой диапазон по данным многолетних наблюдений является фоновым. Скорость истечения парогазовой смеси также была в пределах фона —  $15\text{--}30 \text{ м/с}$ . Такая обстановка сохранялась и после взрыва.

Отсутствие геохимических и сейсмических признаков общей активизации вулкана перед взрывом

**Таблица 3.** Химический состав термальной воды в воронке взрыва (фумарола Рогатая) (1) и в других кипящих котлах Юго-Восточного поля (2).

| Место отбора                          | 1                  |         | 2                   |          |                    |         |
|---------------------------------------|--------------------|---------|---------------------|----------|--------------------|---------|
| Дата отбора                           | 26 августа 2012 г. |         | 13 сентября 2012 г. |          | 26 августа 2012 г. |         |
| pH                                    | –0,51              |         | –0,28               |          | 1,08               |         |
|                                       | мг/л               | мг-эк % | мг/л                | мг-эк. % | мг/л               | мг-эк % |
| Cl <sup>-</sup>                       | 106 359,0          | 96,4    | 71 792,3            | 95,8     | 99,3               | 1,6     |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>         | 5379,8             | 3,6     | 4226,6              | 4,2      | 8261,2             | 98,4    |
| F <sup>-</sup>                        | 0                  | 0       | 0                   | 0        | 0                  | 0       |
| Сумма                                 | 111 738,8          | 100     | 76 019,0            | 100      | 8360,4             | 100     |
| Na <sup>+</sup>                       | 42,7               | 0,1     | 27,8                | 0,1      | 9,0                | 0,3     |
| K <sup>+</sup>                        | 42,8               | 0       | 21,2                | 0        | 11,1               | 0,2     |
| Ca <sup>2+</sup>                      | 448,9              | 0,8     | 192,4               | 0,5      | 240,5              | 9,8     |
| Mg <sup>2+</sup>                      | 72,9               | 0,2     | 24,3                | 0,1      | 82,6               | 5,5     |
| Fe <sup>2+</sup>                      | 0                  | 0       | 39,1                | 0,1      | 5,6                | 0,2     |
| Fe <sup>3+</sup>                      | 307,2              | 0,6     | 114,5               | 0,3      | 208,0              | 9,1     |
| Al <sup>3+</sup>                      | 168,8              | 0,7     | 232,2               | 1,3      | 39,8               | 3,6     |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>          | 1,8                | 0       | 0                   | 0        | 0                  | 0       |
| H <sup>+</sup>                        | 2791,4             | 97,6    | 1887,5              | 97,6     | 88,0               | 71,2    |
| Сумма                                 | 3876,4             | 100     | 2539,0              | 100      | 684,7              | 100     |
| H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>        | 1152,8             |         | 0                   |          | 0                  |         |
| H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> раст. | 0                  |         | 0                   |          | 514,5              |         |
| H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> колл. | 0                  |         | 0                   |          | 573,5              |         |
| Минерализация                         | 116 768,0          |         | 78 558,0            |          | 10 133,1           |         |

навели на мысль проанализировать другие факторы, которые могли послужить спусковым механизмом для взрыва.

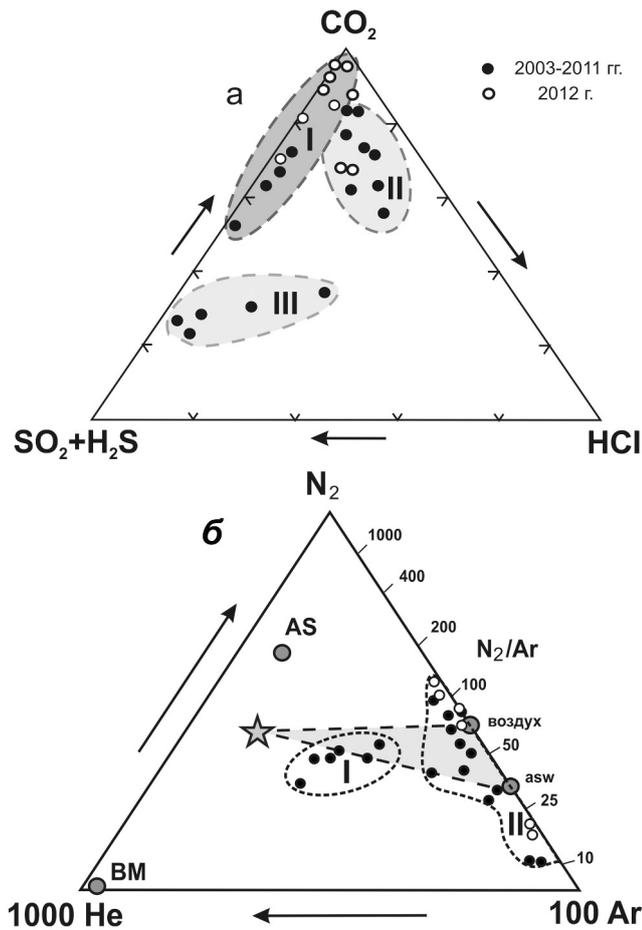
**Спусковые механизмы гидротермального взрыва.** Общепринятый смысл триггерного воздействия в геофизике заключается в следующем: слабые внешние воздействия на среду должны изменить объемно-напряженное состояние локальных участков системы, находящихся в неравновесных условиях в данный момент.

Рассмотрим триггерные факторы, которые, по нашему мнению, стали спусковым механизмом для гидротермального взрыва. Каждый из них должен был способствовать разрушению тонкой сцементированной покрышки, сформированной над гидротермальным резервуаром в результате отложения из растворов гидротермальных минералов. Необходимым условием для извержения этого типа является наличие на небольшой глубине воды с температурой близкой к точке кипения. Любая местная декомпрессия вызовет кипение и изменение удельного объема при переходе из жидкого состояния в пар. Состояние осложняется накоплением слабо-растворимых газов CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>. Водонепроницаемую покрышку резервуара можно рассматривать как нагруженное хрупкое твердое тело. Нагружен-

ные твердые тела различной природы обладают заметной неоднородностью деформирования и микроразрушения (вплоть до скачкообразных проявлений) даже при действии постоянных нагрузок. Слабые вибрационные (импульсные) воздействия играют роль иницирующего механизма и могут лавинообразно ускорить процесс разрушения горной породы [4].

Что касается нахождения вблизи поверхности резервуара перегретых вод, то его наличие с кровлей на глубине 8–10 м и конфигурация до глубины около 40 м установлены в результате геофизических работ в 2011 г. [10]. Зондирование было проведено методом электротомографии на постоянном токе комплексом многоэлектродной электроразведки «Скала-48».

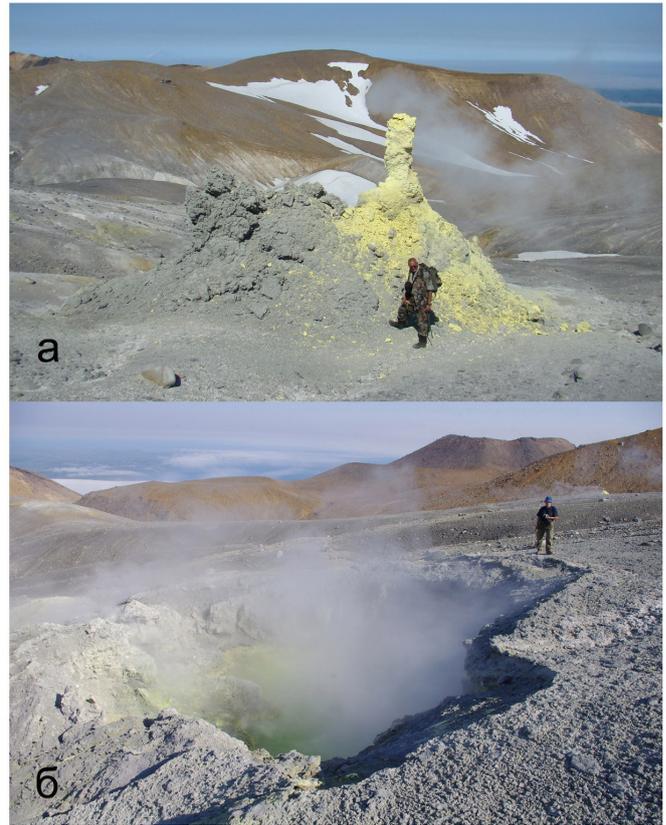
В литературе, посвященной гидротермальным взрывам на термальных полях вулканов, приводятся многочисленные описания подобных событий с анализом факторов, послуживших спусковым механизмом [14]. Наиболее значимыми являются: значительное снижение уровня грунтовых вод, сменившееся обрушением холодных метеорных либо озёрных или морских вод, резкое падение атмосферного давления, как фактор снятия внешней нагрузки, сейсмическая активность. В рассматрива-



**Рис. 2.** Диаграммы состава фумарольных газов вулкана Эбеко: *а* – относительного содержания  $\text{CO}_2$  –  $(\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2)$  –  $\text{HCl}$ , *б* –  $\text{N}_2$  –  $\text{Ar}$  –  $\text{He}$ . *BM* – базальтовая мантия, *AS* – субдуцированный андезит, звездочка – состав первичного газа по [13], *asw* – насыщенная воздухом грунтовая вода.

емом случае все три фактора имели место. Первым фактором, вызвавшим рост давления внутри гидротермального резервуара, стало понижение уровня грунтовых вод: за июнь 2011 г. выпало всего 2,7 мм осадков при среднем многолетнем значении 121 мм, за 1 декаду июля – 5,1 мм.

16 июля начался сильный дождь, который продолжался трое суток (67; 55,1 и 32,8 мм осадков за сутки соответственно, общая сумма за трое суток составила 154,9 мм). Интенсивность в первые сутки была максимальной – 3,94 мм/час. Обрушение холодных метеорных вод на разогретую кровлю гидротермального резервуара, вероятнее всего, вызвало её усиленное дробление. Одновременно с этим, начиная с 0 часов UTC, наблюдалось снятие части внешней нагрузки за счёт смены значительного роста атмосферного давления его резким падением и первое землетрясение из серии сейсмических



**Рис. 3.** Фумарола Рогатая: *а* – в мае 2012 г., *б* – в сентябре 2012 г.

событий 20 июля (рис. 4). За эти сутки произошло 6 землетрясений с эпицентральной расстоянием 100–120 км, четыре из них с магнитудой 4,6–6,2 ощущались вблизи вулкана силой до 5 баллов (данные сейсмостанции «Северо-Курильск», расположенной в 6 км от вулкана). Землетрясения зафиксированы в 1:19, 3:40, 6:10, 6:27, 6:33, 9:12 UTC. Был проведен анализ сейсмограмм за период с 16 июня по 31 июля: событий, которые можно было бы идентифицировать, как взрыв, не выявлено. Поэтому мы склоняемся к выводу, что взрыв произошёл 20 июля одновременно с одним из землетрясений и был замаскирован в результате наложения сейсмических волн. Триггерный эффект сейсмических колебаний мог проявиться как в усилении уже начавшегося дробления кровли резервуара за счёт сдвиговых процессов, так и в виде гидравлического удара, спровоцированного обрушением верхней части серной постройки. Высота постройки достигала 6 м, верхняя часть (около 1 м) представляла собой трубу с внешним диаметром 25–30 см, а внутренним – около 8 см. Получаем аналог дроссельного режима истечения жидкости. А именно: если при движении жидкости по узкому каналу из резервуара быстро перекрыть выходной канал, то по инерции жидкость некоторое время будет перемещаться в прежнем направлении, создавая у границы перекрытия зону повышенного давления. Величина давления может

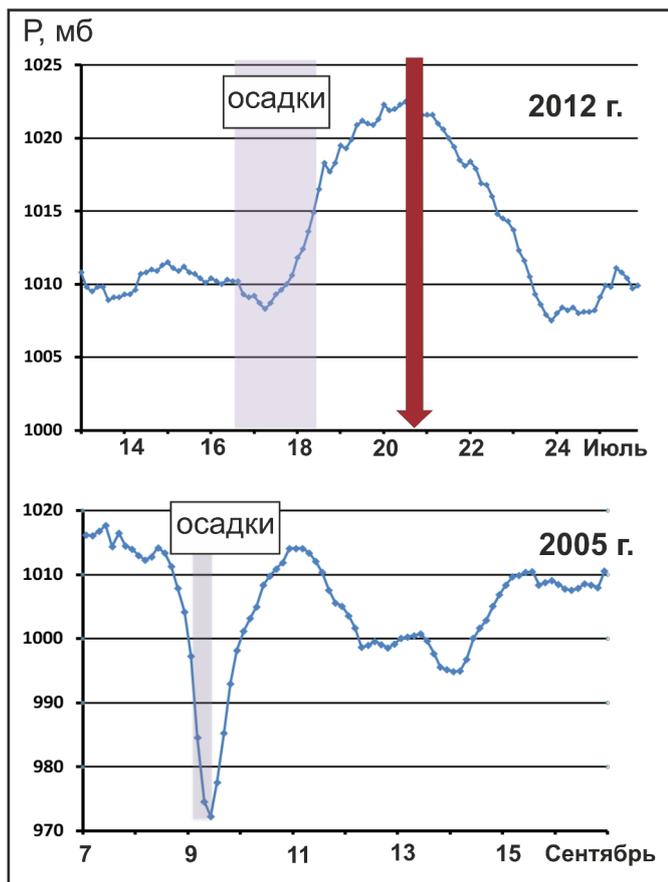


Рис. 4. Изменение метеорологических параметров в периоды, предшествующие взрыву fumarолы Рогатая. Стрелкой обозначена серия землетрясений 20 июля 2011 г.

во много раз превосходить исходное, а сам процесс резкого повышения давления является гидравлическим ударом.

Анализ метеоданных (осадки, ход давления) за весь июнь-июль показал, что в период 11–13 июля метеоусловия уже создавали предпосылки для взрыва, но интенсивность явлений, видимо, была недостаточна для его реализации.

Более слабые взрывные события для fumarолы Рогатая уже фиксировались в 2005 г., когда в период между 7 и 29 сентября произошло обрушение части серной постройки и выброс расплавленной серы в юго-западном направлении на расстояние до 70 м [1]. Анализ метеоданных позволяет утверждать, что спусковые механизмы взрывов идентичны: длительная засуха, выпадение холодных вод на кровлю в период интенсивных осадков до 5,71 мм/час, резкое снятие внешней нагрузки в результате падения атмосферного давления. Дополнительным существенным фактором в 2012 г. стала серия сейсмических толчков.

Таким образом, на Юго-Восточном fumarольном поле произошли гидротермальные взрывы, вызванные не общей активизацией вулкана, а воздействием комплекса триггерных факторов.

## Заключение

Опираясь на наблюдения за интенсивностью парогазовой разгрузки и составом вулканических газов, авторы делают вывод о завершении очередного вулканического цикла вулкана Эбеко. В 2012–2013 гг. тепловая мощность и вынос вещества вернулись на уровень, характерный для фазы покоя. Фоновая термальность была прервана гидротермальными взрывами, вызванным комплексом триггерных факторов. Если опираться на ритмичность извержений вулкана Эбеко в последние 100 лет, то следующее извержение можно ожидать около 2029 г., а начало фазы подготовки — около 2024 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке ДВО РАН (12-III-A-08-174).

## Список литературы

1. Котенко Т. А., Котенко Л. В., Шапарь В. Н. Активизация вулкана Эбеко в 2005–2006 гг. (остров Парамушир, Северные Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2007. №5. С. 3–13.
2. Котенко Т. А., Котенко Л. В., Сандимирова Е. И. и др. Извержение вулкана Эбеко в январе-июне 2009 г. (о-в Парамушир, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». 2010. Вып. 15. № 1. С. 56–68.
3. Котенко Т. А., Котенко Л. В., Сандимирова Е. И. и др. Эруптивная активность вулкана Эбеко в 2010–11 гг. (о-в Парамушир) // Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». 2012. Вып. 19. № 1. С. 160–167.
4. Куксенко В. С. и др. Триггерный эффект слабых вибраций в горных телах // Физика твёрдого тела. 2003. Том. 45. вып. 13. С. 2182–2186.
5. Мелекесцев И. В. и др. Вулкан Эбеко (Курильские острова): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Часть I // Вулканология и сейсмология. 1993. №3. С. 69–81.
6. Меняйлов И. А., Никитина Л. П., Будников В. А. Активность вулкана Эбеко в 1987–1991 гг.; характер извержений, особенности их продуктов, опасность для г. Северо-Курильск // Вулканология и сейсмология. 1992. № 5–6. С. 21–33.
7. Меняйлов И. А., Никитина Л. П., Шапарь В. Н. Особенности химического и изотопного состава fumarольных газов в межэруптивный период деятельности вулкана Эбеко // Вулканология и сейсмология. 1988. № 4. С. 21–36.
8. Меняйлов И. А., Овсянников А. А., Широков В. А. Извержение вулкана Эбеко в октябре-декабре 1987 г. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 3. С. 105–108.
9. Опыт комплексного исследования района современного и новейшего вулканизма (на примере хр. Вернадского, о. Парамушир) // Тр. СахКНИИ. Вып. 16. Южно-Сахалинск, 1966. 208 с.
10. Панин Г. Л., Котенко Т. А., Бортникова С. П. Мало-глубинное геофизическое зондирование fumarольных полей вулкана Эбеко // Материалы региональной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 29–30 марта 2012 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 138–143.

11. Токарев П. И. Количественная характеристика и повторяемость вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1986. № 6. С. 110–118.
12. Федотов С. А. Оценки выноса тепла и пирокластики вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 3–28.
13. Shinihara H., Giggenbach W., Kazahya K., Hedenquist J. Geochemistry of volcanic gases and hot springs of Satsuma-Iwojima, Japan; Following Matsuo // *Geochemical Journal*, 1993, Vol. 27, P. 271–285.
14. Wohletz K., Heiken G. *Volcanology and Geothermal Energy*. Univ. California Press, 1992. 432 p.