

УДК 550.34+551.21

СЕЙСМИЧЕСКОЕ ДРОЖАНИЕ ВУЛКАНА ГОРЕЛЫЙ (2007-2014 гг.)

Яблочкина К.А.

Камчатский филиал геофизической службы РАН

Научный руководитель: к.г.-м.н. Иванов В.В.

Особенности сейсмического дрожания вулкана Горелый в период его чисто газовой активизации с 2007 по 2014 гг. изучены по данным сети из четырех радиотелеметрических сейсмических станций с короткопериодной аппаратурой. Во время наивысшей активности во второй половине 2010 г. тепловая мощность газовых струй достигала 2000 МВт, что соответствует расходу ~600 кг/с водяного пара с температурой 800⁰С (около 50 тыс. т в сутки). Активизация сопровождалась вулканическим дрожанием (ВД) в течение 6.7 лет с мощностью сейсмического источника до 80 кВт. Отношение мощности ВД к тепловой мощности газовых струй оказалось очень низким (порядка тысячных долей процента), что было характерно и для предыдущих активизаций вулкана. Это на 1-2 порядка ниже, чем во время стромболианских извержений вулканов Ключевской или Алаид. То есть источник ВД Горелого имеет очень низкую эффективность и дрожание, вероятно, не связано с мощными гидродинамическими процессами при разрушении его андезибазальтовой магмы у поверхности земли, а порождается потоками вулканических газов при их продвижении к поверхности (барботажа газов сквозь воды озера в активном кратере, их турбулентность и т.п.). Дрожание выделялось на фоне микросейсм в диапазоне частот от 0.35 до 20 Гц, с максимумом спектральной плотности в полосе от 0.5 до 1 Гц. С ослаблением активности ВД трансформировалось в слабые поверхностные вулканические землетрясения.

Ключевые слова: вулканическое дрожание, вулкан Горелый, тепловая мощность, расход пара

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмологический метод является дистанционным методом изучения вулканического процесса, мониторинга и прогноза вулканических извержений [26]. Сейсмическое дрожание на вулканах (в советской и российской литературе обычно называемое *вулканическим дрожанием, ВД*) представляет собой непрерывные колебания, близкие к гармоническим [20]. Они отличаются от импульсных сейсмических сигналов (вулканических землетрясений) значительно бóльшей длительностью, которая может составлять от нескольких минут до нескольких дней, недель и даже лет. Выделить вступления волн на записях ВД невозможно, что роднит его с

т.н. «эксплозивными вулканическими землетрясениями» (событиями IV типа по классификации П.И. Токарева) и «сериями низкочастотных вулканических землетрясений» [5, 20, 27]. Поэтому определять местоположение источников ВД методами классической сейсмологии не удастся; для этого необходимо развертывание больших сейсмических групп в ближней зоне [3, 25]. ВД связывают с процессами дегазации магм, что обычно происходит со взрывами, движением газов и др. явлениями; оно иногда наблюдается и на геотермальных системах. По характеру записей дрожание подразделяется на два основных типа: а) в котором периоды и амплитуды колебаний достаточно однородны («гармоническое») и б) с большим диапазоном изменения периодов и амплитуд («спазматическое» дрожание) [24]. Изучение источников ВД и слежение за его параметрами полезно для целей мониторинга и прогноза извержений вулканов [21, 26]. До сих пор природа источников ВД и связь его параметров с физическими параметрами извержений или магматических систем изучены недостаточно.

Сейсмологические наблюдения на вулкане Горелый ведутся с августа 1980 г. вначале с помощью одной, а с 2008 г. с помощью трех сейсмостанций [14]. В предыдущие годы группой авторов [3] изучались спектральные особенности ВД, направление на его источник, характеристики сейсмического режима вулкана во время извержения. Сейсмический режим во время последней активизации вулкана Горелый (2007-2013 гг.) описывается в работах [1, 19]. Увеличение уровня ВД в июне 2010 г. авторы связывают с образованием новой фумаролы. Ими впервые отмечены эпизоды резкого кратковременного усиления ВД. Летом 2013 г. новосибирские исследователи из Института нефтегазовой геологии и геофизики установили на вулкане Горелый 21 сейсмическую станцию. В работах [15, 16] приведены первые результаты сейсмической томографии недр вулкана Горелый за период с августа 2013 г. по август 2014 г., согласно которым отношение скоростей продольных и поперечных волн для этого вулкана

оказалось неожиданно низким – всего 1.5. Такие низкие отношения скоростей характерны для мест с высокой фумарольной активностью. Последняя активизация вулкана Горелый имела место в 2007-2013 гг., происходила в его активном кратере в форме подводной разгрузки вулканических газов в виде грифонов в кратерном озере, а также мощной, в основном, парогазовой активности из образовавшегося в июне 2010 г. жерла.

Целью работы является первое предварительное изучение ВД вулкана Горелый и соотношение его с данными вулканической активности последней активизации с 2007 по 2014 гг. Задачами исследования были оценка эффективности сейсмического источника ВД, спектральный анализ микросейсм и ВД на станциях сети в районе вулкана, выявление характерных особенностей огибающей сигнала. Для этого оценивалась тепловая мощность струй вулкана во время его активизации.

СТРОЕНИЕ ВУЛКАНА И ХАРАКТЕР ЕГО АКТИВНОСТИ

В строении вулкана участвуют две постройки – древняя и современная. Древняя постройка имеет щитообразную форму. В центре ее расположена кальдера размером 13×12 км. Современная постройка представляет собой линейный вулканический хребет длиной 3 км, вытянутый в субширотном, западно-северо-западном направлении вдоль рифтовой зоны вулкана. Она состоит из трех главных, длительно действовавших конусов (Горелый-1-3) и более чем трех десятков конусов одноактных побочных прорывов. Современная активность имеет место в среднем конусе (Горелый-2) в одном из кратеров (рис. 1). Состав пород современной постройки базальтовый, андезибазальтовый [13, 18].

По данным [2], после окончания извержения в активном кратере вулкана обычно образуется кислое термальное озеро, уровень которого повышается со временем. При следующем извержении, озеро исчезает. При значительном увеличении темпа поступления в него горячих вулканических газов на поверхности озера возникают грифоны (подводные изверже-

ния). Термальное озеро в 2011-2013 гг. появлялось в результате таяния снежного покрова в кратере, но спустя короткое время вновь исчезало за счет испарения, связанного с высоким тепловым потоком, поступающим из зоны магматического питания [6-8, 17].



Рис. 1. Плановый аэрофотоснимок среднего конуса вулкана Горелый (Горелый-2). Левый кратер – провал – активный, на его дне расположено кислое термальное озеро. Диаметр активного кратера около 500 м, а глубина ~90 м. Пунктиром обозначено место нового жерла, образовавшегося в 2010 г. Фото А.Ю. Озерова. 16 августа 2003 г.

На РТСС установлены стандартные трехкомпонентные комплекты короткопериодной сейсмологической аппаратуры с собственным периодом сейсмометров $T_s=1.2$ с, а также высокочастотным вертикальным каналом ($T_s=0.2$ с), регистрируют скорость смещения почвы в диапазоне 0.8-20 Гц [4]. В Мутновско-Гореловском районе надежная регистрация осуществляется для землетрясений с энергетическими классами $K_s \geq 4.5$ [14].

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Сейсмический режим во время последней активизации вулкана Горелый изучался по данным четырех радиотелеметрических сейсмостанций (РТСС) GRL, MTV, ASA и RUS, расположенных на расстояниях 2.5, 13, 21 и 35 км от активного кратера вулкана, соответственно (рис. 2).

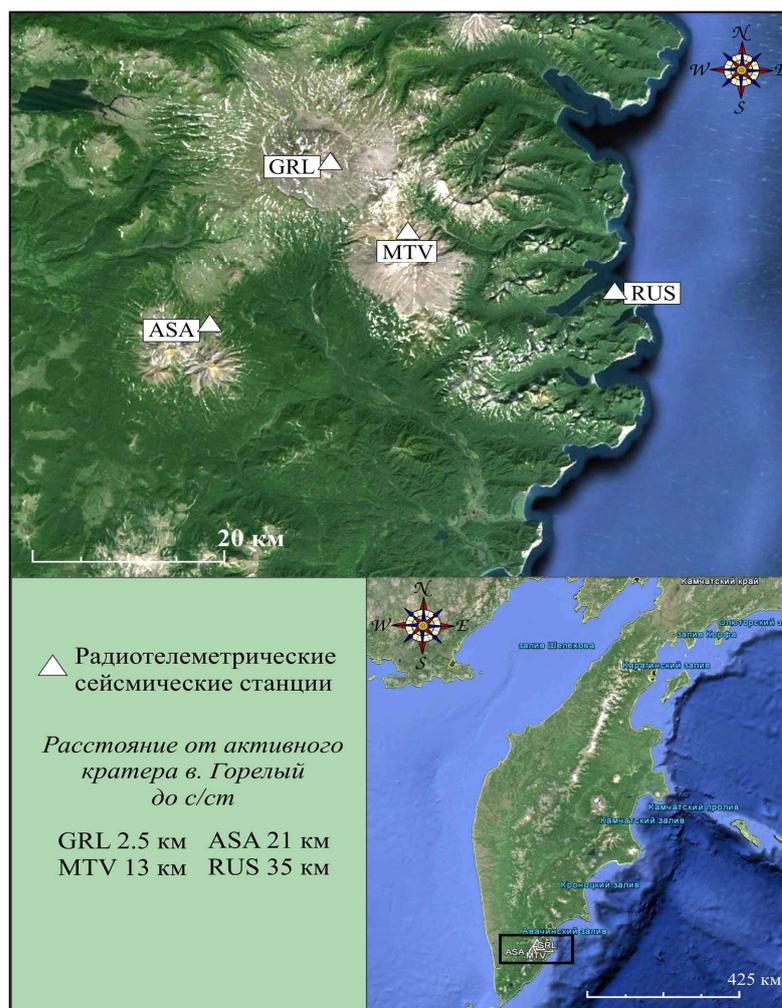


Рис. 2. Сеть радиотелеметрических сейсмостанций в районе влк. Горелый с ноября 2008 г.

В процессе работы использовались данные лаборатории исследования сейсмической и вулканической активности КФ ГС РАН (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>, <http://ts.emsd.ru/all.php>). Анализ цифровых сейсмограмм производился в программе DIMAS [10].

Обнаружение ВД на фоне микросейсм. Поскольку ВД имеет большую длительность, в его записи всегда присутствуют, как микросейсмы океаниче-

ского происхождения, так и ветровые помехи. С целью выделения ВД на записях сейсмостанции GRL проводилось сравнение спектральной плотности мощности (СПМ) сейсмического сигнала на этой станции с СПМ на PTCC GRL, MTV, ASA и RUS в период отсутствия ВД. Сравнение показало, что СПМ на записях PTCC GRL, MTV, ASA в рабочем диапазоне частот (0.2-3 Гц) различаются незначительно ~ 4 дБ (рис. 3).

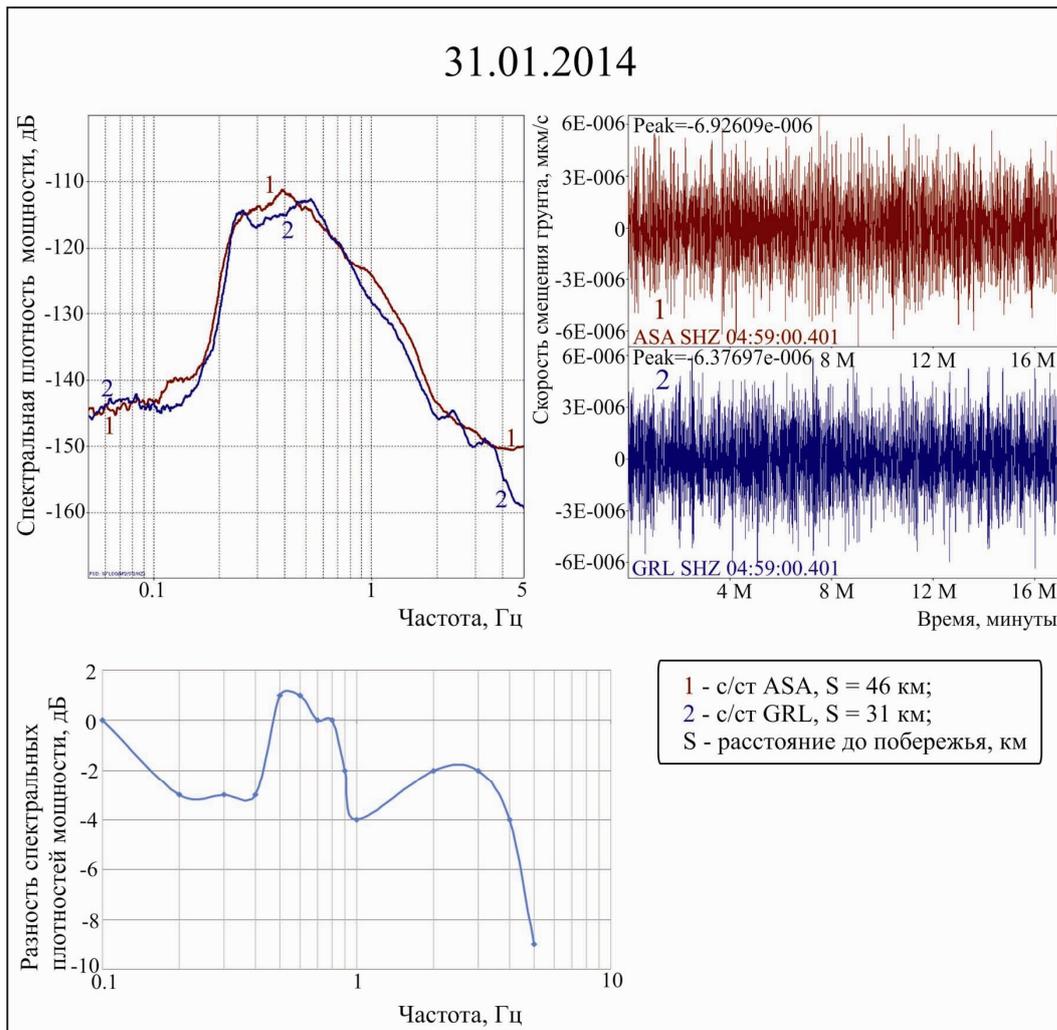


Рис. 3. Примеры записи микросейсмического шума на станциях GRL и ASA во время «микросейсмической бури», их спектральные плотности мощности и разность плотностей. 31.01.2014 (Вертикальные каналы).

Вероятно, это объясняется близкими условиями расположения сейсмостанций относительно береговой зоны, а также близкими их абсолютными высотами и сходными ветровыми режимами. Сейсмостанции MTV и ASA записывали не только микросейсмические сигналы, но и ВД от Горелого, при этом

амплитуда сигнала ВД там была в 4-6 раз ниже, чем на станции GRL. За неимением лучшего, в качестве оценки текущего уровня микросейсм на станции GRL использовать соответствующие величины для станций MTV и ASA. Это приводило к следующему простейшему критерию обнаружения сигнала ВД на фоне шумов: если уровень сигнала на сейсмостанции GRL значимо превосходил уровень сигналов на сейсмостанциях MTV и ASA, то полагалось, что на вулкане Горелый имело место ВД.

ДИНАМИКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ И ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ВУЛКАНА ГОРЕЛЫЙ В 2007-2014 ГГ.

На рисунке 4 приведена динамика сейсмической и вулканической активности вулкана Горелый за 2007-2014 гг. (рис. 4 а, б). На основании сопоставления сейсмической и вулканической активностей выделяются три фазы (рис. 4):

Первая фаза (апрель 2007 – июнь 2010 г.) охватывает период с момента обнаружения ВД в апреле 2007 г. и до появления жерла в середине июня 2010 г., во время которой над вулканом по наблюдениям из г. Петропавловск-Камчатский изредка были видны невысокие (до 0.5 км) паровые облака.

Вторая фаза (июнь 2010 – декабрь 2013 г.) наступила после образования нового жерла, сопровождавшегося резким повышением уровня ВД. По визуальным наблюдениям в этот период начали появляться термальные аномалии на спутниковых снимках, а вулканические облака стали подниматься до 2 км над вулканом. Фаза завершилась снижением активности по визуальным наблюдениям и прекращением дрожания.

Третья фаза с декабря 2013 г. по настоящее время (ноябрь 2014 г.) характеризуется отсутствием ВД. Дрожание трансформировалось в местные землетрясения IV типа и серии низкочастотных событий.

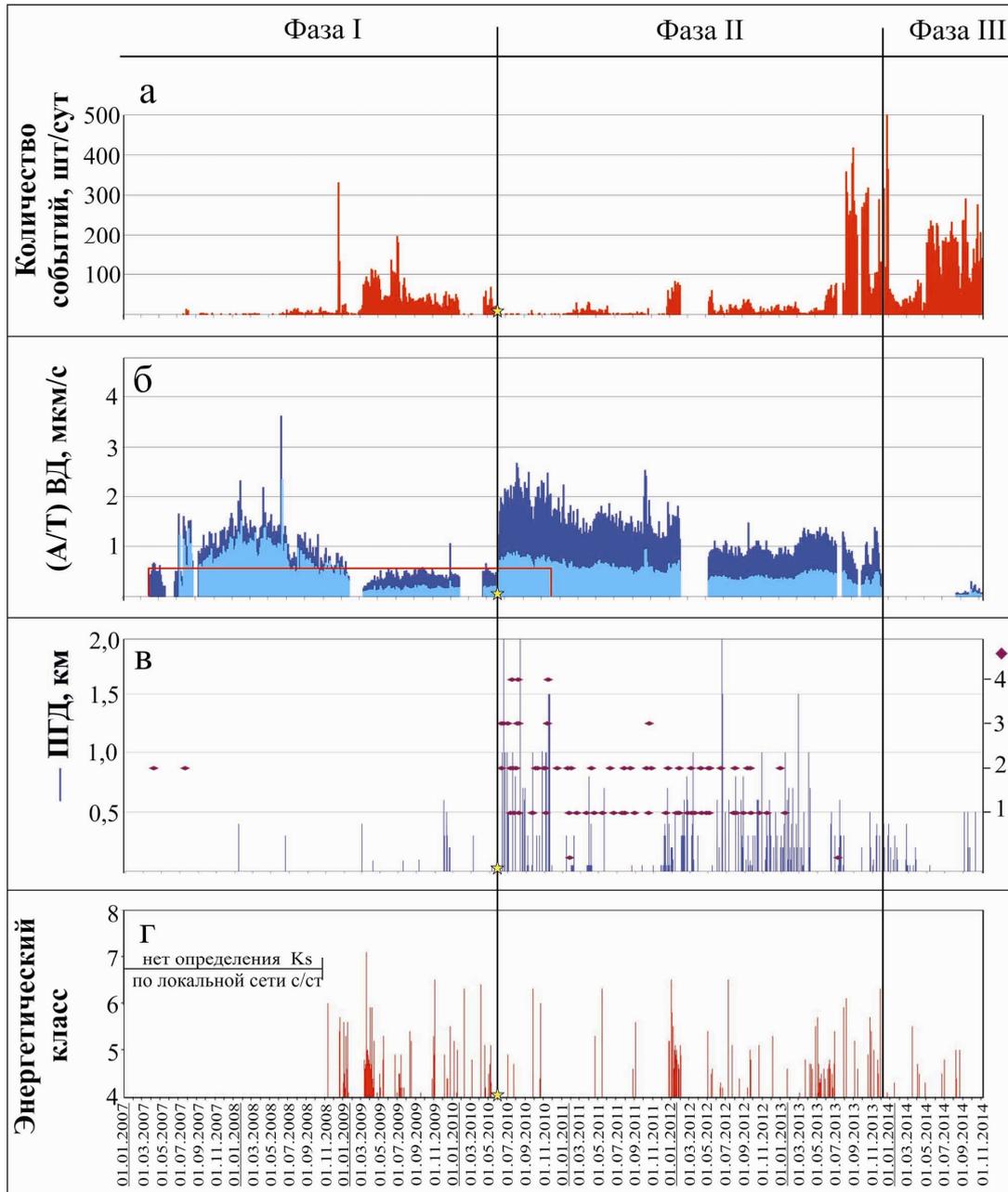


Рис. 4. Сейсмический режим и активность вулкана Горелый по визуальным и спутниковым данным в 2007-2014 гг.: а) ежесуточные количества местных вулканических событий I-IV типов; б) отношения амплитуды к периоду вулканического дрожания (ВД) по данным с/ст. GRL: светлым – средние, темным – максимальные за сутки; в) визуальные и спутниковые наблюдения: вертикальные линии – высоты парогозовых облаков, ромбы - термальные аномалии; г) энергетический класс местных землетрясений, определенных по сети станций; звездочка – момент образования нового жерла; квадратная скобка – период, когда наблюдались «ступени» ВД.

ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДРОЖАНИЯ ВУЛКАНА ГОРЕЛЫЙ

Отметим некоторые характерные особенности дрожания.

1) Возникновение вулканического дрожания не было следствием слияния часто следующих событий IV типа. Оно впервые было выделено в апреле 2007 г. сразу как продолжительный непрерывный спазматический сигнал.

2) Эффективную полосу частот, занимаемую ВД по уровню 20 дБ можно оценить в 0.35-3.5 Гц. Максимум спектральной плотности мощности сигнала ВД располагается в диапазоне 0.6-0.9 Гц (рис. 5). Мощность сигнала ВД на станции GRL значимо превосходила таковую на станции ASA в диапазоне от 0.3 до 12 Гц (по уровню 10 дБ).

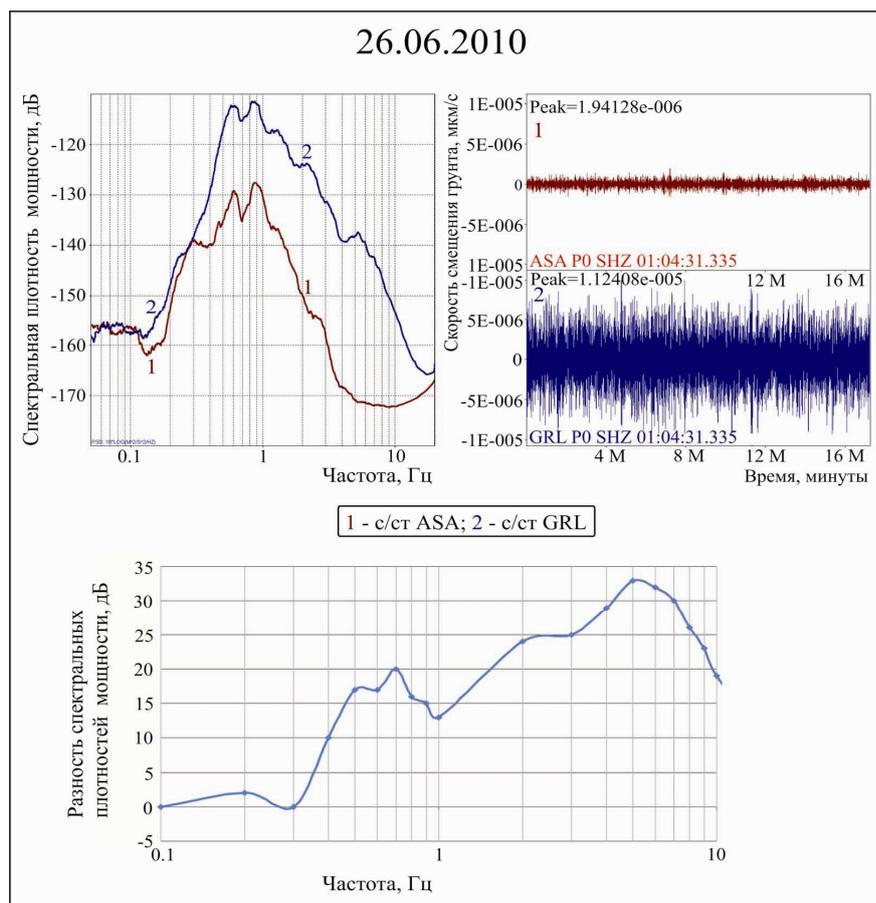


Рис. 5. Примеры сейсмограмм ВД на станциях GRL и ASA, их спектральные плотности мощности и разность плотностей. 26.06.2010 (Вертикальные каналы).

3) Часто увеличение уровня ВД происходило резкими «ступенями» длительностью от нескольких часов до первых суток, некоторые из них были многофазными. После завершения «ступени» происходило некоторое повышение уровня ВД (рис. 6). В 2007-2010 гг. можно было насчитать несколько десятков таких явно выраженных «ступеней».

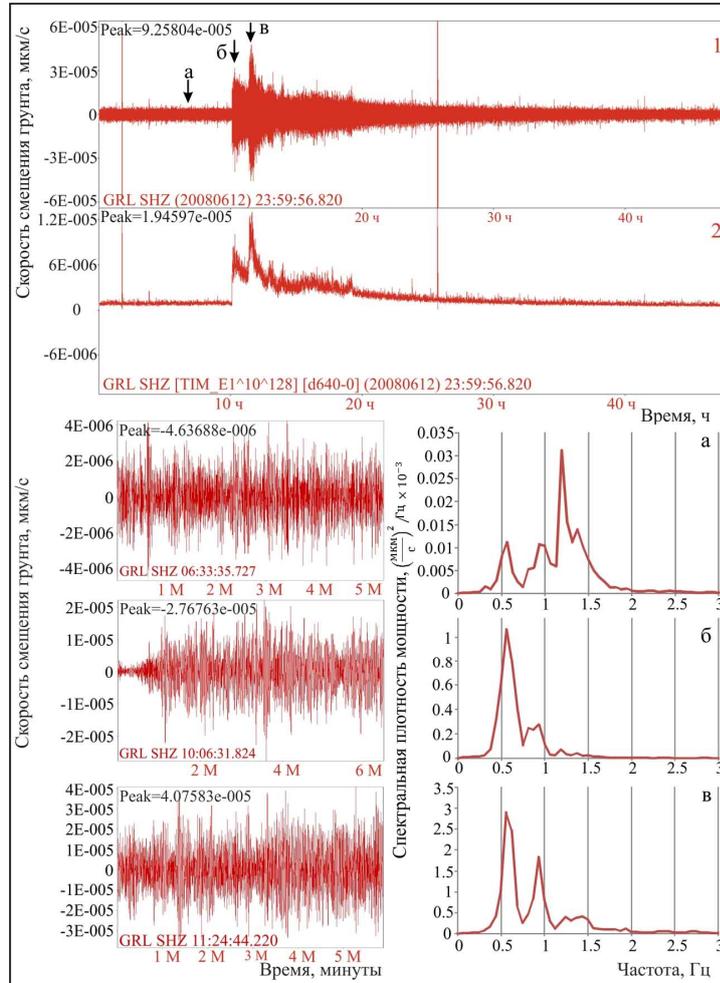


Рис. 6. Сейсмограмма вулканического дрожания (1) и его огибающая (2) 13-14 июня 2008 г. на с/ст. GRL, Вертикальный канал; а, б, в – участки ВД и их спектральные плотности мощности. Постоянная времени сглаживания 10 с.

4) С усилением уровня ВД оно становилось более регулярным, гармоническим.

5) С уменьшением вулканической активности в 2013 г. и ослаблением ВД оно становилось спазматическим: на фоне непрерывного сигнала появлялись регулярные всплески длительностью первые десятки секунд.

При дальнейшем уменьшении активности дрожание трансформировалось в серии низкочастотных землетрясений и затем в поток отдельных событий IV типа (рис. 7).

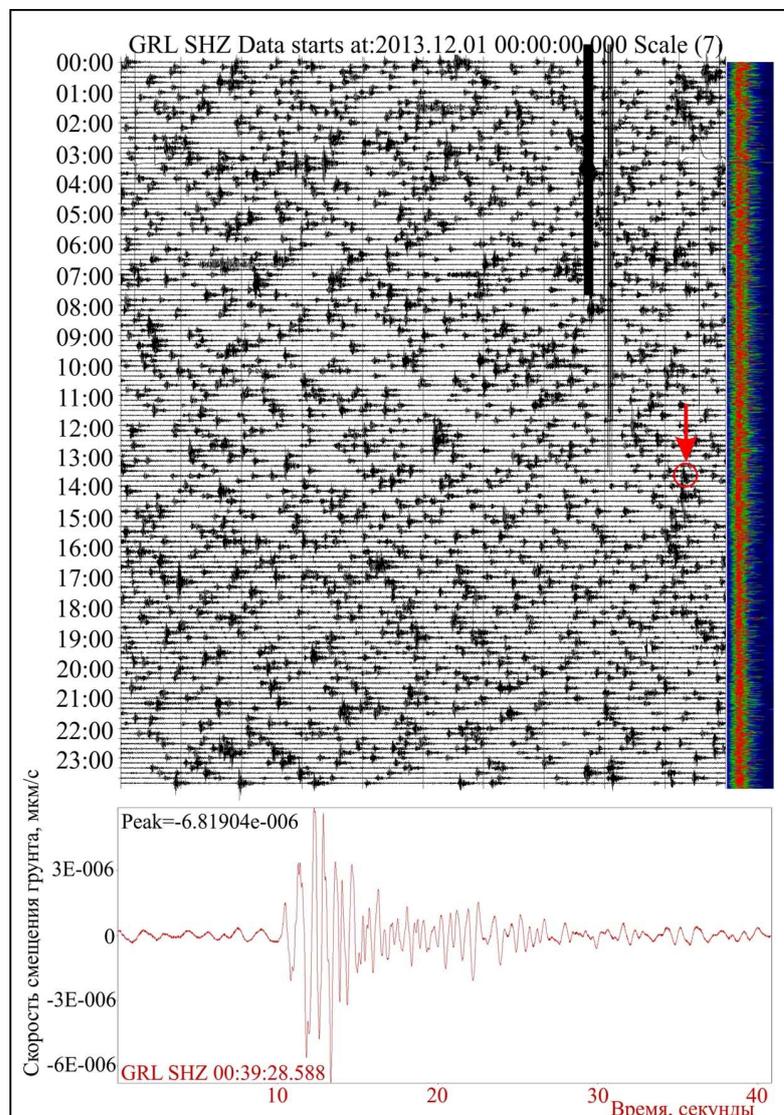


Рис. 7. Поток событий IV типа (сверху) и волновая форма события (снизу), отмеченного стрелочкой, на сжатой суточной сейсмограмме с/ст. GRL за 1 декабря 2013 г. Вертикальный канал. Время UTC.

ТЕПЛОВАЯ МОЩНОСТЬ ВУЛКАНИЧЕСКИХ СТРУЙ, РАСХОД ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПАРА И МОЩНОСТЬ ДРОЖАНИЯ ВО ВРЕМЯ АКТИВИЗАЦИИ ВУЛКАНА ГОРЕЛЫЙ

Первые суждения о природе вулканического дрожания дают энергетические оценки, а именно доля сейсмической мощности дрожания от тепловой мощности вулканических струй [12]. Предполагается, что тепловая мощность струй дает оценку расхода вулканических продуктов

[23]. Для оценки тепловой мощности эруптивных струй вулкана Горелого нами использовалась формула по высотам их подъема, предложенная С.А. Федотовым [23]:

$$Q, \text{ МВт} = 136 (\Delta h_0)^2 u^{1,5},$$

где Δh_0 – высота подъема оси шлейфа над дном активного кратера вулкана Горелый в км, u – скорость ветра, соответствующего верху шлейфа в м/с.

Методика определения высот подъема вулканических облаков и скорости ветра по данным серийной съемки для вулкана Горелый описана в работе [11]. Серийная съемка велась с одной точки из г. Петропавловска-Камчатского, поэтому угол распространения шлейфа по отношению к направлению взгляда наблюдателя был неизвестен. В том случае, если он заметно отличался от перпендикулярного, то косинус угла между указанными направлениями брался равным 0.7. При расчетах расходов вулканических газов полагалось, что они в основном состоят из водяного пара при атмосферном давлении 0.1 МПа и температуре 800°C, который имеет теплосодержание, равное 3.3 МДж/кг [12]. Температуры взяты из работы [9]. Мощность вулканического дрожания $W_{др}$ оценивалась по номограмме Токарева [22]. С целью лучшей сопоставимости с данными по Ключевскому вулкану брались отношения амплитуд к периодам ВД на станции MTV, которая расположена примерно на том же расстоянии от источника ВД ($\Delta=13$ км), что и сейсмостанции «Подкова» и «Апахончич» в районе Ключевского, которые ранее использовались для оценок мощности ВД [12].

На рисунке 8 дан пример вулканического шлейфа над вулканом Горелый до образования нового жерла (рис. 8).

Сведения о тепловой мощности, темпах выноса вулканических газов и мощности вулканического дрожания для вулкана Горелый во время его активизации сведены в таблицу. Из таблицы следует, что вулкан Горелый

до образования нового жерла выносил порядка 180 МВт тепла, что соответствует расходу порядка 50 кг/с водного флюида (около 4 тыс. т в сутки).

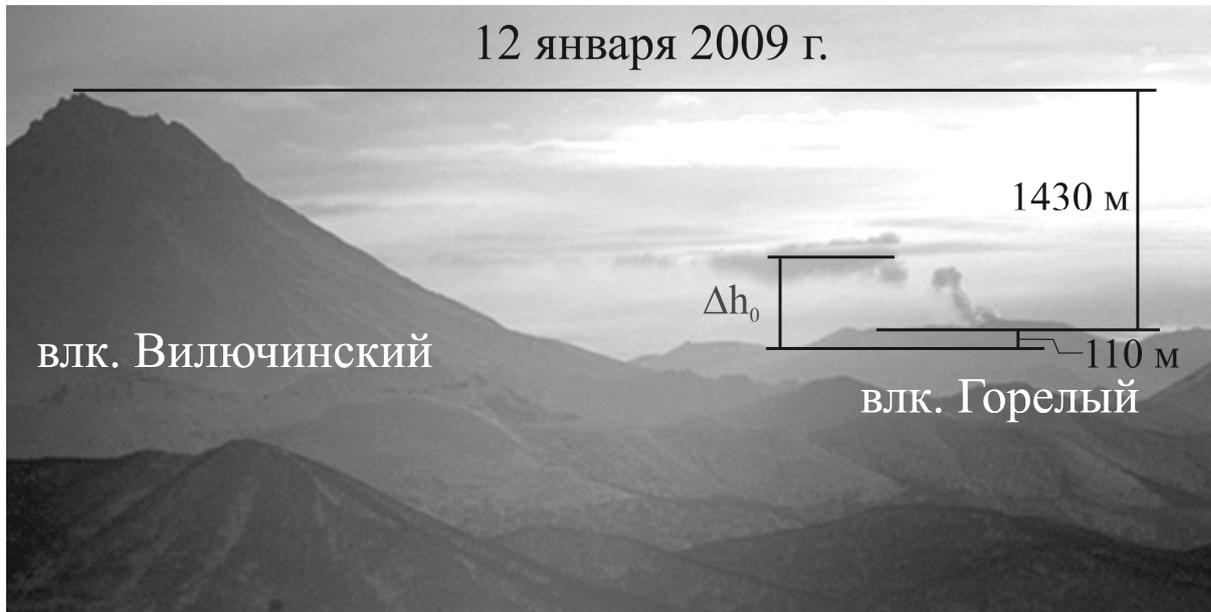


Рис. 8. Шлейф над вулканом Горелый 12.01.2009. Постройка Горелого выглядит в виде невысокого пологого хребта. Вертикальный масштаб, равный 1430 м относится к вулкану Горелый и вычислен на основании расчета углового расстояния между вершинами вулканов Горелый и Вилучинский с учетом известного расстояния до вулкана Горелый. Полагается, что дно активного кратера располагалось примерно на 110 м ниже уровня характерной плоской кромки вулкана Горелый. Фото В.В. Иванова, сделаны из г. Петропавловск-Камчатский ($\Delta=75$ км).

С момента образования нового жерла (середина июня 2010 г.) активность увеличилась примерно на порядок и составила около 2000 МВт тепла, а расход составил ~ 600 кг/с (около 50 тыс. т в сутки). Во время спада активности нового жерла тепловая мощность снова снизилась до величин, характерных, как перед образованием этого жерла ~ 200 МВт при расходе 60 кг/с (около 5 тыс. т в сутки). Сейсмическая мощность дрожания достигала 80 кВт (таблица 1).

Из таблицы видно, что как до образования нового жерла, так и во время его работы отношение мощности ВД к тепловой мощности струи было очень мало и составляло порядка первых тысячных процента. Такие

же величины отношений были характерны и для предыдущих газовых извержений вулкана Горелый в 1980-1981 и 1985-1986 гг. [12].

Таблица 1. Тепловая мощность (Q), расход вулканического пара (Z), мощность вулканического дрожания ($W_{др}$) и отношение $W_{др}/Q$ во время активизации вулкана Горелый в 2009-2013 гг.

| ДАТА | 12.01.2009 | 22.06.2010 | 19.07.2013 |
|------------------|------------|------------|------------|
| Δh_0 , м | 530 | 980 | 350 |
| u , м/с | 2.8 | 6 | 5.7 |
| Q , МВт | 180 | 2000 | 200 |
| Z , кг/с | 50 | 600 | 60 |
| $W_{др}$, кВт | 5 | 80 | 5 |
| $W_{др}/Q$, % | 0,003 | 0,004 | 0,003 |

Заметим, что эти величины на два порядка ниже, чем таковые во время стромболианских (стромболианско-вулканических) вершинных извержений вулкана Ключевской и на один порядок меньше, чем во время парагазовых фаз при извержениях этого вулкана [12].

ВЫВОДЫ

1. Активизация вулкана в 2007-2013 гг. на всем ее протяжении сопровождалась сейсмическим дрожанием, уровень которого качественно отражал интенсивность поступления вулканических газов.

2. На записях короткопериодной аппаратуры дрожание Горелого обнаруживалось на фоне микросейсм в частотной области от 0.2 до 20 Гц. Максимум спектра мощности располагался в диапазоне 0.5-1 Гц, а эффективная полоса частот – 0.35-3.5 Гц (по уровню 20 дБ).

3. Увеличение уровня ВД часто происходило в виде ступеней длительностью от первых часов до первых суток с резким началом и плавным спадом. Можно предположить, что это было связано с существованием объемных газовых ловушек, в которых происходило накопление и затем внезапное освобождение вулканических газов (устное сообщение Д.В. Мельникова).

4. Относительная доля сейсмической мощности ВД к тепловой мощности струй была очень низкой (порядка тысячных долей процента), что характерно и для предыдущих извержений этого вулкана [12]. Это позволяет полагать, что дрожание вулкана Горелый возбуждается малоэффективным акустическим источником. В качестве таких источников могут рассматриваться «барботаж» фумарольных газов через водную толщу кратерного озера, вибрации, связанные с турбулентностью потоков во время мощных газовых истечений из нового жерла и т.п.

5. Во время активизации вулкана Горелый в июне 2010 г. тепловая мощность его паровых шлейфов достигала $2 \cdot 10^3$ МВт, что соответствовало расходу 600 кг/с (около $5 \cdot 10^4$ тонн в сутки) пара. К июлю 2013 г. тепловая мощность струи газов из нового жерла снизилась до 200 МВт, а к концу 2013 г. до 40-50 МВт. За 3.5 года деятельности нового жерла количество выброшенного в атмосферу пара оценивается в $3 \cdot 10^7$ тонн. Если предположить, что тепло газовых эмиссий обусловлено охлаждением магмы в питающей системе вулкана (при теплосодержании 1.3 МДж/кг), то в недрах вулкана Горелый в этот период должно было охладиться $\sim 6 \cdot 10^7$ тонн магмы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность Д.В. Дрознину за предоставление программ обработки цифровых сейсмограмм, Д.В. Мельникову и О.Б. Селянгину за консультации и полезные обсуждения, А.А. Овсянникову за материалы из полевых дневников и А.В. Сокоренко за фотоматериалы. Особая благодарность научному руководителю В.В. Иванову за четкое руководство и поддержку данной работы, сотрудникам ЛИСВА КФ ГС РАН за каталоги землетрясений и таблицы оперативного сейсмического режима, и П.П. Фирстову за научное редактирование статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берсенева Н.Ю., Соболевская О.В. Сейсмичность вулкана Горелый, Камчатка, в 2007-2013 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Четвертая научно-техническая конференция, 30 сентября – 4 октября 2013 г. – Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН. 2013. С. 21-25.
2. Гавриленко Г.М., Мельников Д.В., Овсянников А.А. Современное состояние термального озера в активном кратере вулкана Горелый (Камчатка) // Материалы Всероссийской научной конференции «100-летие Камчатской экспедиции Русского географического общества 1908-1910 гг.», 21-28 сентября 2008 г. – Петропавловск-Камчатский. 2009. С. 86-95.
3. Гаврилов В.А., Гордеев Е.И., Иванов В.В. и др. Вулканическое дрожание и землетрясения вулкана Горелый в период извержения 1980-1981 гг. // Вулканология и сейсмология. №6. 1984. С. 3-17.
4. Гаврилов В.А., Чебров В.Н., Малкин А.П., Яцук В.В. Петропавловская радиотелеметрическая сеть сбора сейсмометрической информации: опыт эксплуатации и перспективы развития // Сейсмичность, сейсмический прогноз и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. 1981. С. 62-63.
5. Гарбузова В.Т., Соболевская О.В. Обновлённая классификация вулканических землетрясений Камчатки П.И.Токарева // Материалы второй региональной научно-технической конференции 11-17 октября 2009 г. «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». – Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН. 2010. С. 25-29.
6. Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В. и др. Активность вулканов Камчатки в 2011 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы региональной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога (к 50-летию ИВиС ДВО РАН), 29-30 марта 2012 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2012. С. 28-33.
7. Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В. и др. Активность вулканов Камчатки в 2013 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы региональной конференции, посвященной Дню вулканолога, 27-28 марта 2014 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2014. С. 38-45.
8. Гирина О.А., Маневич А.Г., Нурдаев А.А., Демянчук Ю.В. Активность действующих вулканов Камчатки в 2012 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы региональной конференции, посвященной Дню вулканолога, 28-29 марта 2013 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2013. С. 42-49.
9. Дроздин В.А., Дубровская И.К., Чирков С.А. Термограммы газового извержения вулкана Горелый 2010-2011 гг. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Тезисы региональной конференции 29-30 марта 2012 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2012. С. 63.
10. Дроздин Д. В., Дроздина С. Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. – Петропавловск-Камчатский. 2008. С. 117-121.
11. Иванов В.В. Извержение вулкана Корякский (Камчатка) в конце 2008-начале 2009 г.: оценки выноса тепла и водного флюида, концептуальная модель подъема магмы и прогноз развития извержения // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога, 30-31 марта 2009 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2010. С. 24-38.

12. *Иванов В.В.* О сопоставлении тепловой мощности эруптивных струй и вулканического дрожания для извержений разных типов // Вулканология и сейсмология. №5. 1988. С. 53-63.
13. *Кирсанов И.Т., Мелекесцев И.В.* Вулкан Горелый // Действующие вулканы Камчатки: в 2-х т./Отв. ред. Федотов С.А., Масуренков Ю.П. М.: Наука. Т. 2. 1991. С. 294-313.
14. *Кугаенко Ю.А., Нуждина И.Н.* Сейсмичность вулкана Мутновский по данным станции "Мутновка": первые результаты, ноябрь 2008-февраль 2009 гг. // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27-29 марта 2009 г. – Петропавловск-Камчатский. 2010. С.157-167.
15. *Кулаков И.Ю.* Вулкан надутый газом // Наука из первых рук. 2014б. №5(59). С. 11-13. ISSN: 1810-3960.
16. *Кулаков И.Ю.* Сейсмический пульс вулкана. Экспедиция на вулкан Горелый // Наука из первых рук. 2014а. №1(55). С. 85-101. ISSN: 1810-3960.
17. *Овсянников А.А., Чирков С.А.* Состояние вулкана Горелый в июне 2010 г. // Вестник КРАУНЦ. Наука о Земле. 2010. Вып. 15. № 1. С. 10.
18. *Селянгин О.Б., Пономарева В.В.* Строение и развитие Гореловского вулканического центра, Южная Камчатка // Вулканология и сейсмология. №2. 1999. С. 3-23.
19. *Соболевская О.В.* Сейсмичность вулкана Горелый в 1984–2009 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй региональной научно-технической конференции, 11-17 октября 2009 г. – Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН. 2010. С. 382-386.
20. *Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука. 1981. 164 с.
21. *Токарев П.И.* Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука. 1966. 118 с.
22. *Токарев П.И.* Определение энергии вулканических землетрясений // Вулканология и сейсмология. № 2. 1987. С. 64-79.
23. *Федотов С.А.* Оценка выноса тепла и пирокластики вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков // Вулканология и сейсмология. №4. 1982. С. 3-28.
24. *Finch R.H.* Volcanic tremor (Part I) // Bull. Seismol. Soc. America. April 1949. V. 39. PP. 73-78.
25. *McNutt S. R.* Volcanic Tremor // Encyclopedia of Earth System Science. Academic Press, San Diego, California. 1992. PP. 417-425.
26. *McNutt S. R.* Seismic Monitoring // Encyclopedia of volcanoes. Academic Press. Ed. Sigurdsson H. 1999. PP. 1095-1119.
27. *Zobin V.M.* Introduction to volcanic seismology. Elsevier. Amsterdam. 2011. 474p. ISBN: 9780444563750.

SEISMIC TREMOR OF GORELY VOLCANO (2007-2014)

К.А. Yablochkina,*Kamchatkan Branch of Geophysical Survey of RAS;**Supervisor of studies V.V. Ivanov,*

The characteristics of the seismic tremor of Gorely volcano were studied during its gas activity from 2007 to 2014 by network of the four radiotelemetry seismic stations with short-period seismometer. During high activity in the second half of 2010 thermal power of the gas jets reached 2000 MW that corresponds to the consumption of water steam ~600 kg/s with a temperature 800°C. Activity of Gorely volcano was accompanied by volcanic tremor (VT) for 6.7 years with the seismic power to 80 kW. The relation of power of volcanic tremor to thermal power gas jets was very low (about thousandths of a percent) which was typical for previous activities of the volcano. This is 1-2 orders lower than during Strombolian eruptions of Kluchevskoy or Alaid volcanoes. That is the source of volcanic tremor has a low efficiency and it is probably is not related to the strong hydrodynamic processes in the destruction of its andesite-basalt magma near the earth's surface, and was generated by a flow of volcanic gases when they move to the surface (gas bubbling through the water into the lake in active crater, their turbulence, and the like). The tremor was marked out on the background of microseism allocated in the frequency range from 0.35 Hz to 20 Hz with a peak spectral density in the band from 0.5 Hz to 1 Hz. VT was transformed into the weak surface volcanic earthquakes with the weakening of activity.

Keywords: volcanic tremor, Gorely volcano, thermal power, steam consumption