

**КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНОСТИ АВАЧИНСКОГО ВУЛКАНА
В 2013–НАЧАЛЕ 2020 гг.: НАЗЕМНЫЕ, ВИДЕО И СЕЙСМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ**© 2020 Н.А. Малик¹, М.Ю. Некрасова²

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006;
e-mail: maliknataliya@mail.ru*

²*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»,
Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006*

Приведены результаты режимных наблюдений на высокотемпературных фумарольных полях (Восточном и Западном) вулкана Авачинский в 2013–2020 гг., включающих визуальное обследование, измерение температуры, отбор газа, дополненных данными видеонаблюдений. С целью выявления связи между фумарольной активностью и глубинными процессами был проведен анализ сейсмичности района вулкана за указанный период. Было выделено два периода повышенной сейсмической активности. Первый, в ноябре 2014 г. – январе 2015 г., по времени связан с изменениями характера истечения газа, морфологии и температуры Западной фумаролы, отмеченными при полевых наблюдениях, отразившимися на соотношении расходов газа двух высокотемпературных фумарольных полей. Второй, в октябре – декабре 2019 г., сопровождался в темное время суток свечением, временами — яркими вспышками, в районе Западной фумаролы, а в результате наземного обследования в 2020 г. были выявлены дальнейшие изменение ее морфологии.

Ключевые слова: вулкан Авачинский, фумарола, вулканический газ, температура, мониторинг, сейсмичность.

ВВЕДЕНИЕ

Авачинский вулкан расположен в Авачинской группе вулканов, приуроченной к системе северо-западных разломов, ограничивающих с северо-востока Малкинско-Петропавловскую зону поперечных дислокаций, разделяющую полуостров на южную и северную части, различные по истории их развития и глубинной тектонике (Гонтовая и др., 2011). По результатам гравиметрических, сейсмических и электромагнитных исследований создана комплексная геолого-геофизическая модель земной коры под Авачинским вулканом. Она включает коровый магматический очаг на глубине ~15–25 км, перекрывающую его интрузию и периферический очаг на глубине ~0–2 км (1.5–3 км (Гонтовая и др., 2011)), а также зону в юго-западном секторе, насыщенную жидкими флюидами, в Авачинском грабене (Мороз, Гонтовая, 2003). Новая модель земной коры построенная на основании обработки данных 5000 локальных землетрясений (скорости P- и S-волн и их отношение),

зарегистрированных Камчатским филиалом федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) за 2009–2018 гг., в целом подтвердила результаты предшествующих геофизических исследований: под вулканом Авачинский наблюдается выраженная скоростная аномалия, имеющая форму кувшина: сферический объем диаметром 3–4 км с центром на глубине 2.5 км, соединенный с поверхностью неом (Bushenkova et al., 2019). Выявленная аномалия ассоциируется с магматическим очагом и питающим каналом.

Авачинский вулкан (2751 м) — наиболее близкорасположенный (25–30 км) к крупнейшим населенным пунктам Камчатского края — городам Петропавловск-Камчатский и Елизово и один из активных вулканов Камчатки (рис. 1). С 1937 г. известно 14 его извержений (Мелекесцев и др., 1994). В период между извержениями наблюдается умеренная фумарольная активность. Лава последнего эффузивно-эксплозивного извержения 1991 г. заполнила кратер вулкана, образовав



Рис. 1. Вершина вулкана Авачинский с высокотемпературными фумарольными полями. Пунктирной линией показана трещина 2001 г. Диаметр вершины около 400 м. Вид с юга. Фото В.В. Яшука, 31.08.2018. Фумаролы: 1 — низкотемпературные; 2 — высокотемпературные. ПК — г. Петропавловск-Камчатский, Е — г. Елизово.

Fig. 1. The summit of Avachinsky volcano with high temperature fumarolic fields. The dotted line schematically shows the crack of 2001. The diameter of the summit is about 400 m. View from the south. Photo by V.V. Yaschuk, 31.08.2018. Fumaroles: 1 — low temperature, 2 — high temperature. Cities: ПК — Petropavlovsk-Kamchatsky, Е — Yelizovo.

«пробку». В октябре 2001 г. в результате слабой эксплозивной активизации лавовую «пробку» и прилегающие склоны конуса рассекла трещина северо-западного простирания. В ее центральной части несколько слившихся между собой воронок взрыва образовали эксплозивный ров шириной до 20 м (Мелекесцев и др., 2002). К концам трещины приурочены высокотемпературные выходы газа: Западная фумарола и Восточное поле (рис. 1).

Как показано в обобщающей работе (Мелекесцев и др., 1994), последнее извержение Авачинского вулкана в 1991 г. началось без предваряющей сейсмической активности, а перед извержениями 1938 и 1945 гг. отмечалось усиление фумарольной деятельности, появление новых фумарол, образование провала на дне кратера (в 1937 г.), парогазовые выбросы. Таким образом, наблюдения за изменениями состояния фумарольных полей вулкана и состава газа являются важным методом мониторинга и прогноза вулканической активности. Такие наблюдения проводятся во многих странах, особенно где активные вулканы расположены рядом с населенными пунктами (Diliberto et al., 2011; Tedesco et al., 1991; Tedesco, Scarsi, 1999). Несмотря на высокую активность вулкана в историческое время и его близкое расположе-

ние к наиболее густонаселенным территориям полуострова исследованиям фумарол Авачинского вулкана в начале XXI в. уделялось мало внимания, о чем свидетельствует отсутствие научных статей на данную тему после работ (Серафимова и др., 2002; Taran et al., 1997). Дистанционные наблюдения (например, Дроздин, Дубровская, 2006) дают общую информацию о состоянии вулкана, фиксируют только сильные изменения, при этом остается необходимость их детализации, уточнения при наземных исследованиях. Регулярные наземные исследования на фумаролах Авачинского вулкана проводятся нами с 2013 г. и включают визуальное обследование, измерения температур, отбор проб газа, газового конденсата и возгонов. Основное внимание уделяется высокотемпературным фумарольным полям: Западному и Восточному (рис. 1) (Малик и др., 2017). В представленной работе предпринята попытка сопоставления результатов этих работ с данными сейсмического и видеомониторинга. Такие комплексные исследования могут дать уникальное представление о физических процессах, контролирующих наземную вулканическую деятельность, и стать потенциальным методом прогноза вулканической активности.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕЖИМНЫХ
НАБЛЮДЕНИЙ НА КРАТЕРЕ

Методы измерения температуры, отбора и анализа газа описаны в работе (Малик и др., 2017). Состав непоглощенных газов определялся методом газовой хроматографии в лаборатории постмагматических процессов Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН (2013–2017 гг.) и лаборатории гидросейсмологии КФ ФИЦ ЕГС РАН (в 2017–2019 гг.). Поглощенные в щелочи газы анализировали методами мокрой химии в Аналитическом центре ИВиС ДВО РАН. Изотопный состав воды газового конденсата определялся в лабораториях Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Геологического института РАН, Москва; ИВиС ДВО РАН (лабо-

ратория тепломассопереноса). Отбираемые в процессе режимных работ возгоны и сублиматы изучаются сотрудниками лаборатории вулканогенного рудообразования ИВиС ДВО РАН, один из значимых результатов — открытие нового минерала йодида талия (Okrugin et al., 2017).

Восточное фумарольное поле размером около 30×55 м вытянуто вдоль трещины в юго-восточной части лавовой пробки (рис. 1) и состоит из многочисленных газовых выходов с максимальной температурой 665°C (Малик и др., 2017). Измерения температуры и отбор газа проводились 2–4 раза в год из выбранной для мониторинга (режимной) фумаролы на северном краю поля. В течение 2013–2020 гг. ее температура варьировала в пределах 465–630°C с тенденцией к понижению (рис. 2). Изотопный состав воды газового конденсата существенно менялся

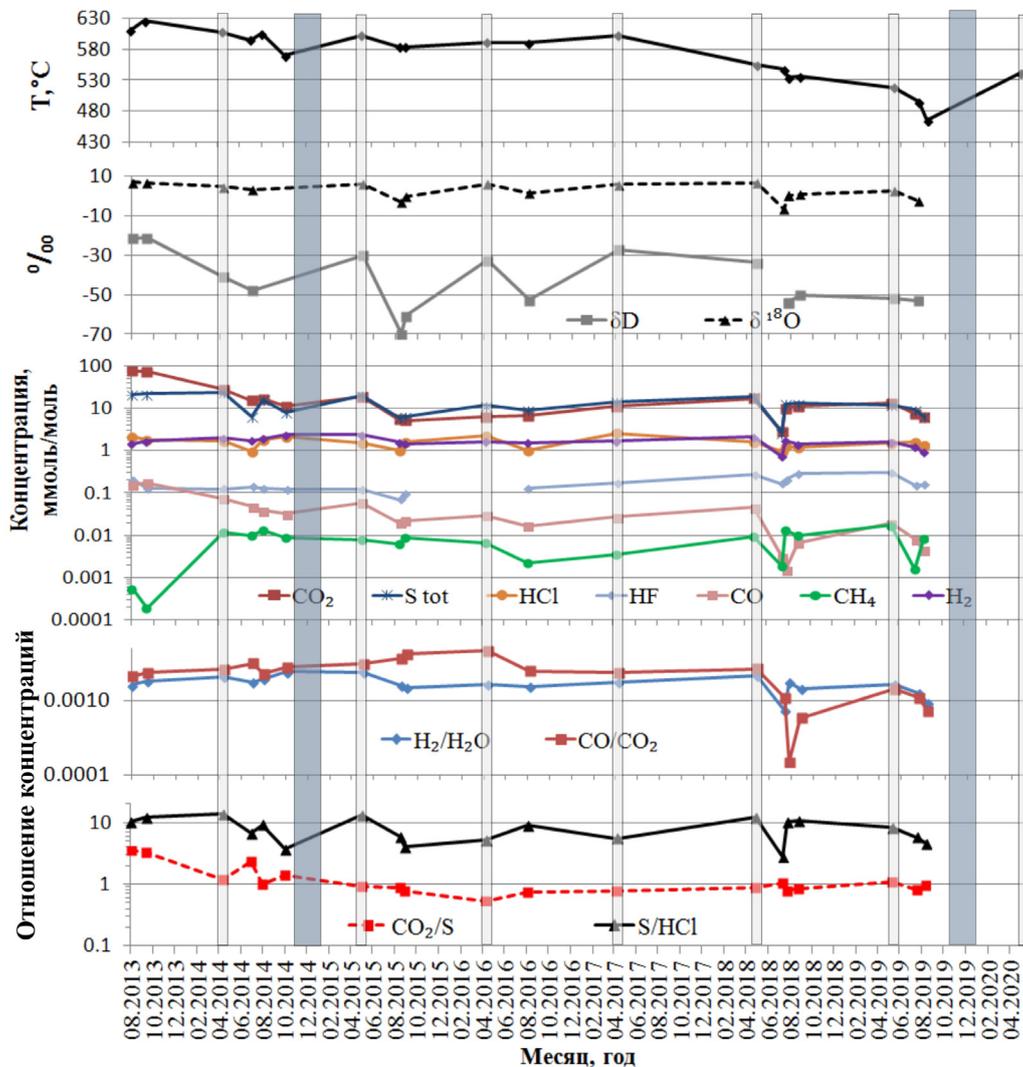


Рис. 2. Временные изменения температуры, изотопного состава воды, основных компонентов газа и их отношений режимной фумаролы Восточного поля вулкана Авачинский. Узкими полосами отмечены наблюдения в холодный сезон года (апрель–май), широкими — сейсмические активизации вулкана.

Fig. 2. Time-dependent variations of temperature, water isotopic composition, main gas components and their ratios of high temperature fumarole of the Avachinsky volcano, Eastern Field. Observations in the cold season of the year (April–May) are marked by narrow stripes, and increases of the volcano seismic activity are marked by wide stripes.

в зависимости от сезона отбора проб вдоль линии смешения от чисто магматического до 50% содержания метеорной фракции (рис. 3). Наибольшая примесь метеорной воды отмечена в пробах, отобранных в июле-сентябре. В эти же периоды отмечены минимумы температуры фумаролы и содержания таких газов как HCl, SO₂, H₂S, CO. Такие сезонные изменения, вероятно, связаны с поступлением талых и дождевых вод в теплое время года. Умеренные изменения в составе газа режимной фумаролы коррелируются с изменениями ее температуры: можно отметить прямую зависимость для CO, газов серы, и обратную для воды.

Западное фумарольное поле представляет собой выходы газа из трещины на западном склоне конуса, образовавшейся в 2001 г. (рис. 1). В 10–20 м вниз от кромки кратера находится наиболее высокотемпературный участок (**Западная фумарола**), где до 2015 г. газовая эмиссия происходила в виде интенсивной струи из трещины, просматривавшейся до 10 м вглубь, сопровождаемая сильным аэродинамическим шумом (рис. 4, 5а). В апреле 2015 г. было отмечено усиление шума, издаваемого струей, некоторое повышение температуры¹, а также признаки обвалов стенок трещины (рис. 4). 16 сентября 2015 г. при хорошей видимости на фумароле было подтверждено, что в результате обвалов, оползаний стенок трещина расширилась, а выход высокотемпературной струи был завален, газ выходил не единой мощной струей, а через отдельные отверстия в обвалившейся породе (рис. 5б), измеренная температура достигала 700°C, аэродинамический шум исчез (между 2 и 16 сентября 2015 г.). В мае 2016 г. температура Западной фумаролы впервые была измерена термопарой и составила 777°C (Малик и др., 2017). Во время последующих обследований в 2016–2017 гг. она постепенно возрастала до 839°C и оставалась примерно на этом уровне в последующие годы (рис. 4), учитывая погрешности оборудования и сложности измерения в этой фумароле. В местах выхода газа наблюдалось слабое свечение. Наблюдения в 2018–2019 гг. показали дальнейшее выполаживание трещины и превращение ее в овраг-ложбину, прогрев и появление выходов газа на ее склонах, а также прогрев грунта к югу от нее, что выражалось в распространении возгонов по склону конуса от трещины до древнего лавового потока (рис. 5в).

¹ До 2016 г. температура фумаролы измерялась пирометром, показания которого зависят от расстояния до объекта измерения, интенсивности парообразования, поэтому увеличение максимальной измеренной температуры в 2013–2014 гг. может говорить, скорее всего, об улучшении качества измерений (рис. 4).

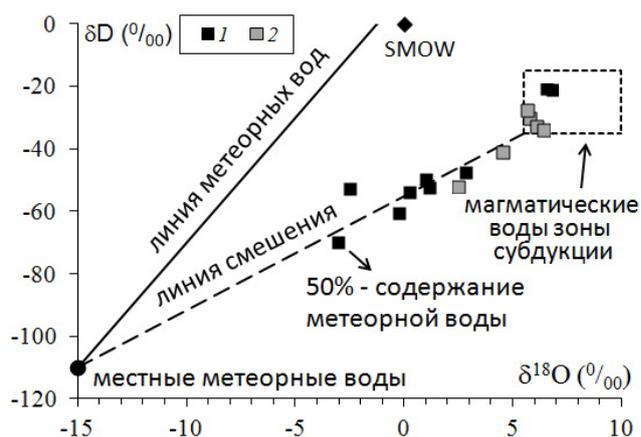


Рис. 3. Изотопный состав воды фумарольных газов вулкана Авачинский: 1 — пробы, отобранные в июле-сентябре; 2 — в апреле-мае 2013–2019 гг. SMOW — Standard Mean Ocean Water, магматические воды зоны субдукции (Таран и др., 1989).

Fig. 3. Water isotopic composition in fumarolic gases of Avachinsky volcano: 1 — samples collected in July–September; 2 — in April–May, 2013–2019. SMOW — Standard Mean Ocean Water, magmatic waters of subduction zone (Taran et al., 1989).

Описанные изменения в состоянии Западной фумаролы в 2014–2015 гг. отразились на соотношении расходов газа двух высокотемпературных фумарольных полей Авачинского вулкана, определяемых визуально по высоте подъема газовых струй (Федотов, 1982) и площади облака пара по фотографиям (Hochstein, Bromley, 2001). Если до 2015 г. расход Западного поля был равен или несколько превышал расход газа Восточного, то с 2015 г. ситуация изменилась в обратную сторону (рис. 6а–г).

Проведенное нами 15 декабря 2019 г. в связи с начавшейся активизацией вулкана Авачинский обследование кратера не выявило значимых изменений². Нижняя часть Западной фумаролы, была в том же состоянии (температура, ширина трещины), что и летом 2019 г. К югу от нее, где в последние годы отмечался прогрев, появились несколько небольших фумарол. Верхняя часть трещины, примыкающая к кромке кратера, была закрыта облаком фумарольного пара. Предполагаемое визуальными наблюдателями усиление фумарольной активности в декабре 2019 г., согласно многочисленным сообщениям в СМИ³, сложно было подтвердить имеющейся аппара-

² http://www.kscnet.ru/ivs/volcanoes/inform_messages/2019/Avachinsky/

³ <https://www.instagram.com/p/B52M6ZWn6oM/>; https://kamchatka.aif.ru/incidents/volcano/na_kamchatke_gotovyatsya_k_vozmozhnomu_izvrzheniyu_avachinskogo_vulkana; <https://www.instagram.com/tv/B519naxHSb6/?igshid=1k497ni5s31dx>; <https://www.instagram.com/tv/B512DhbHHds/?igshid=xkq3b71bqt0o>

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

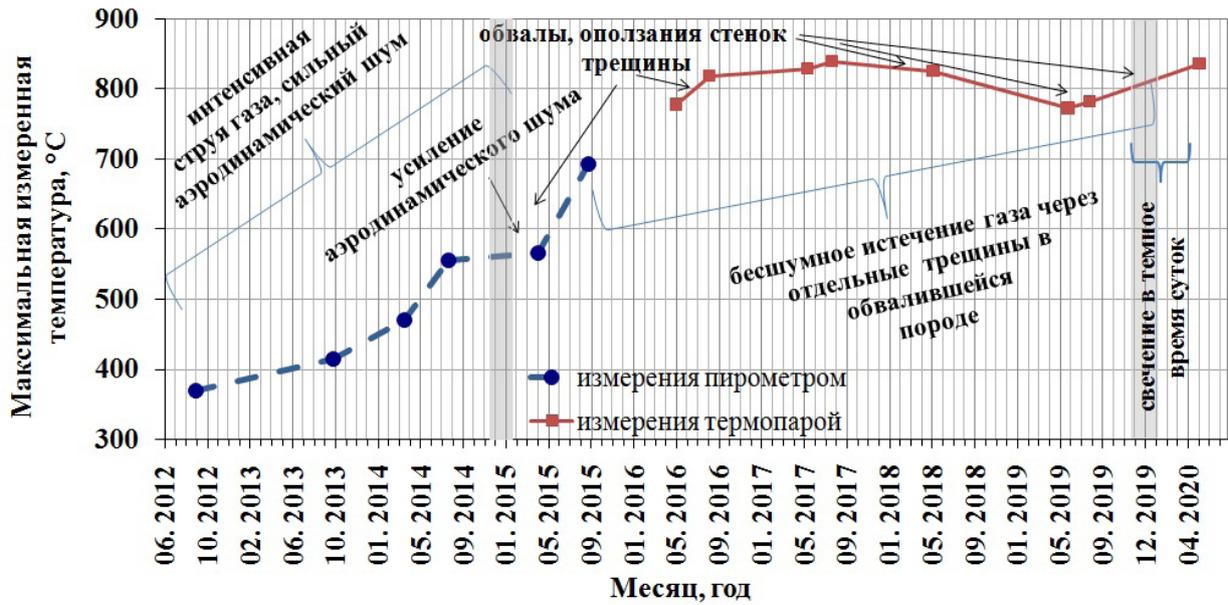


Рис. 4. Изменение характеристик Западной фумаролы. Серыми полосами обозначены сейсмические активизации вулкана.

Fig. 4. Changes of the characteristics of the Western Fumarole. Grey stripes mark increases of the volcano seismic activity.

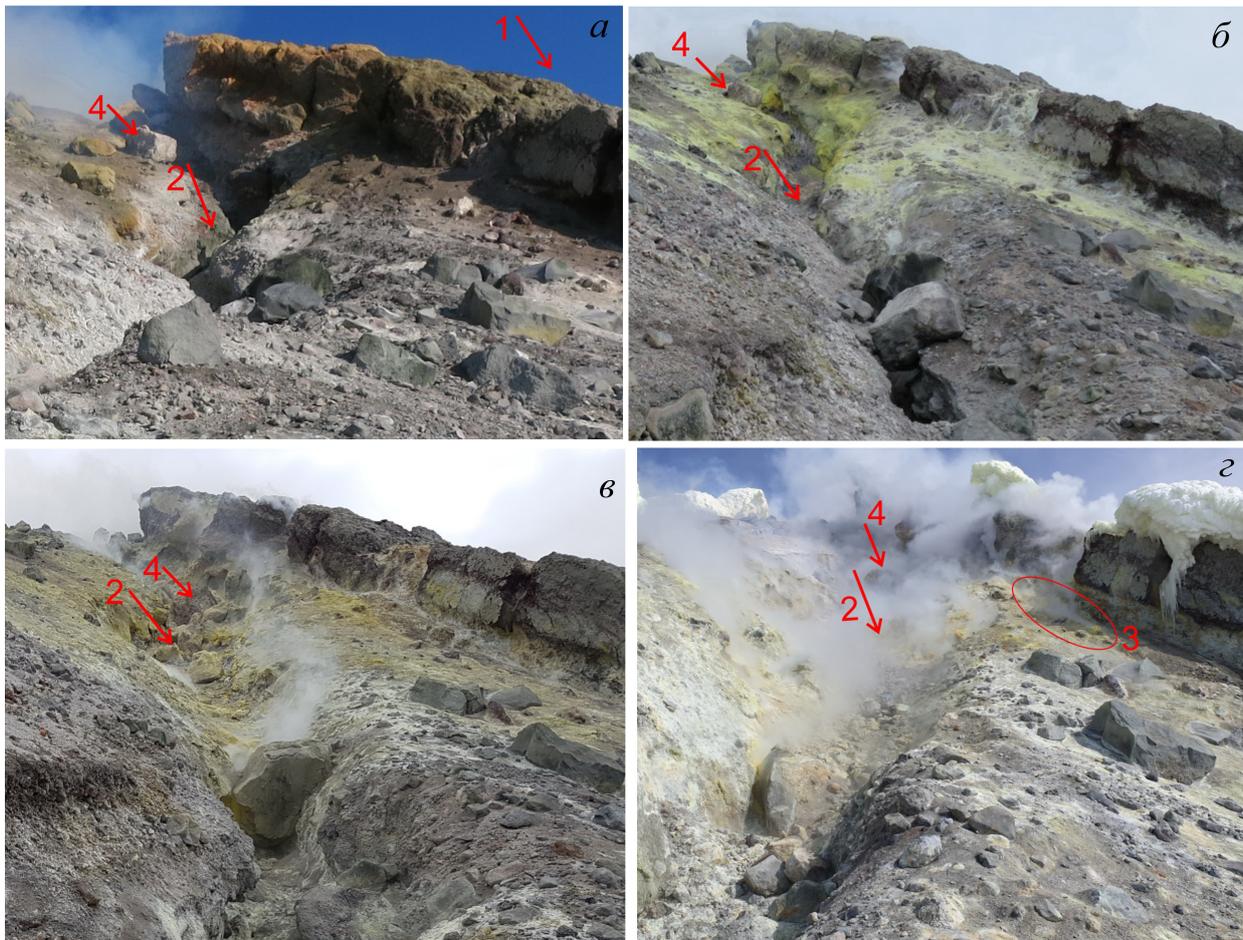


Рис. 5. Состояние Западной фумаролы 17.08.2014 (а); 22.08.2016 (б); 27.07.2019 (в); 1.06.2020 (г): 1 — древний лавовый поток, 2 — место выхода высокотемпературного газа, 3 — новая фумарольная площадка, 4 — положение одного из реперных валунов.

Fig. 5. State of the Western Fumarole 17.08.2014 (a), 22.08.2016 (б), 27.07.2019 (в), 1.06.2020 (г): 1 — ancient lava flow, 2 — high temperature gas release site, 3 — new fumarole site, 4 — position of one of the reference boulders.

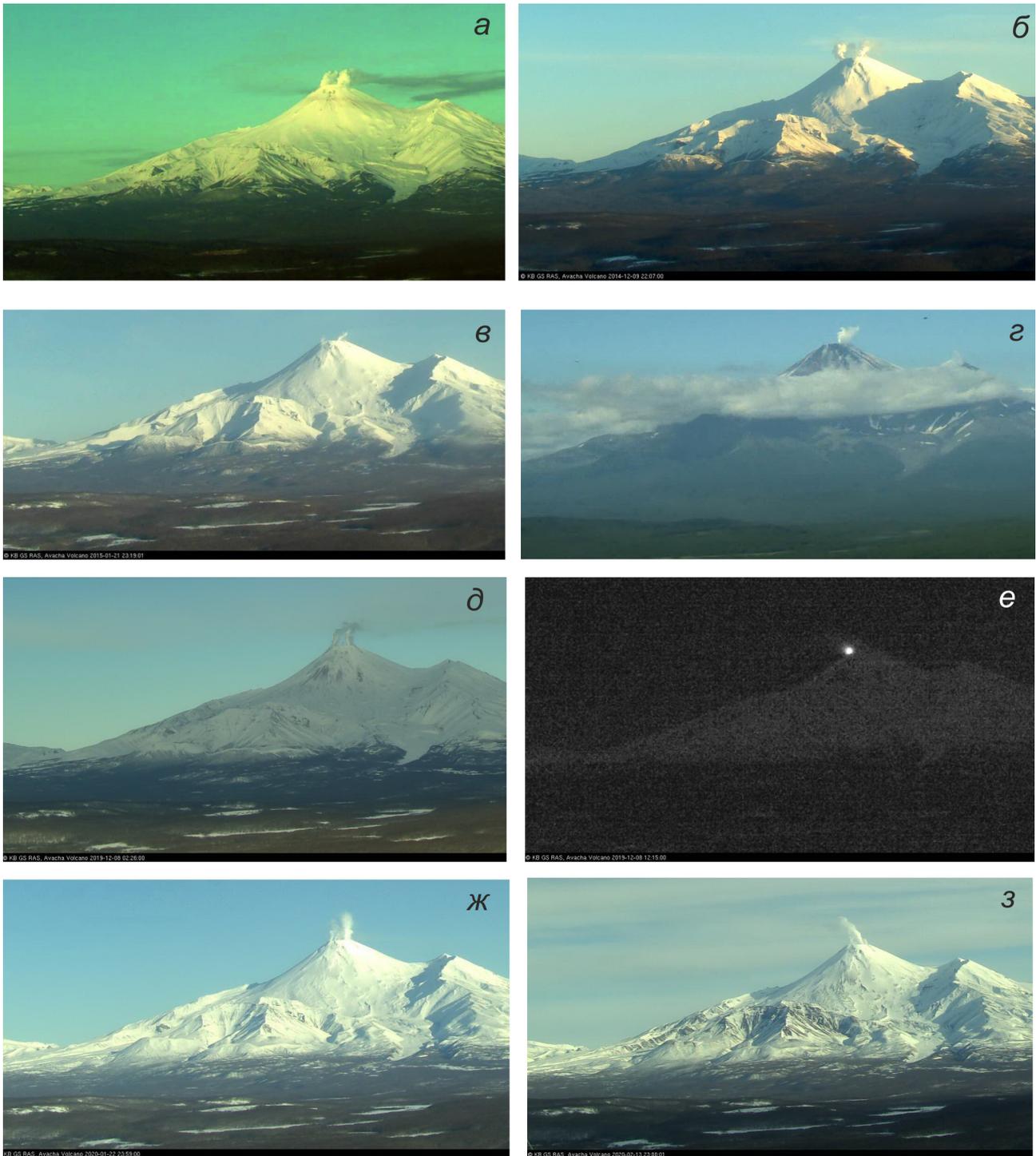


Рис. 6. Изображения Авачинского вулкана, полученные с помощью камеры видеонаблюдения, расположенной на Мишенной сопке: 21 ноября (а) и 10 декабря 2014 г. (б), 22 января 2015 г. (в) и 23 августа 2018 г. (г), 8 и 9 декабря 2019 г. (д, е), 23 января (ж) и 14 февраля 2020 г. (з).

Fig. 6. CCTV images of Avachinsky volcano from the Mishennaya hill: on November 21 (a) and December 10 2014 (б), January 22. 2015 (в) and August 23. 2018 (г), December 8 and 9, 2019 (д, е), January 23 (ж) and February 14. 2020 (з).

турой. Формирование видимого фумарольного облака в результате конденсации сильно зависит от метеофакторов. Можно только предположить усиление активности Западной фумаролы в декабре 2019 г. по увеличению высоты и площади облака пара над ней относительно аналогичного

облака над Восточным полем. Обследования в мае-июне 2020 г. выявили признаки обвалов в верхней части и дальнейшее оползание, выполаживание южного борта трещины (рис. 5з). В результате этого процесса между сползшим массивом породы и прилегающим бортом

древнего лавового потока в ослабленной зоне образовалась фумарольная площадка с температурами от 92°C в нижней до 695°C в верхней части, которая находится рядом и на одном уровне с наиболее высокотемпературным участком трещины (рис. 5з), температура которого 1 июня 2020 г. составила 835°C. Также на прилегающем борту древнего лавового потока появились выходы газа инкрустированные серой. Все описанные изменения являются продолжением процессов, результаты которых мы отмечаем с 2015 г.

ДАННЫЕ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЙ

КФ ФИЦ ЕГС РАН проводит видеонаблюдения за вулканом Авачинский в режиме реального времени двумя видеокамерами⁴, расположенными: на Мишенной сопке в г. Петропавловске-Камчатком на расстоянии 27 км от вершины вулкана и на перевале между вулканами Авачинский и Корякский на расстоянии 6 км от кратера в составе ПНВ_А (комплексного пункта наблюдения за вулканами) AVH «Авача» (рис. 7а). Изображения поступают на приемный центр «Петропавловск» с дискретизацией 1 кадр/минуту и архивируются на сервере КФ ФИЦ ЕГС РАН.

Авторами были просмотрены изображения, полученные видеокамерой, расположенной на Мишенной сопке, с 2014 г. по февраль 2020 г. До декабря 2014 г., судя по высоте фумарольных струй, расход пара Западной фумаролы был близок к расходу фумарол Восточного поля или немного превышал его (рис. 6а, 6б). С января 2015 г. высота парогазовой струи Западной фумаролы уменьшилась по сравнению с высотой струи над Восточным фумарольным полем (рис. 6в, 6г). Этот результат может служить подтверждением описанных изменений в состоянии Западной фумаролы. Проведенный анализ видеосъемки позволил установить, что основные изменения произошли в период с 11 декабря 2014 г. по 21 января 2015 г. (Малик, Некрасова, 2018).

С 27 октября 2019 г. в темное время суток наблюдалось свечение в районе Западной фумаролы⁵. В ночь с 8 на 9 декабря 2019 г. в том же месте отмечались яркие вспышки (рис. 6е). На дневных снимках в декабре 2019 г. было отмечено, что интенсивность выноса газа Запад-

ным и Восточным полями опять сравнялась (рис. 6д), можно предположить, что фумарольная активность Западной фумаролы повысилась. В январе–феврале 2020 г. соотношение высот фумарол вернулось к состоянию, соответствующему 2015–2018 гг. (рис. 6ж, 6з).

РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В районе Авачинского вулкана установлена сеть из четырех радиотелеметрических сейсмических станций КФ ФИЦ ЕГС РАН (рис. 7а), которая позволяет проводить сейсмический мониторинг вулкана (Чебров и др., 2013). Ближайшая сейсмическая станция SMA расположена на расстоянии 1.8 км от кратера вулкана.

С целью сопоставления фумарольной активности вулкана с сейсмической, был проведен пространственно-временной анализ сейсмичности района вулкана Авачинский в радиусе 5 км от центра кратера и глубиной до 10 км (рис. 7, 8). С 01.01.2013 г. по 31.12.2019 г. локализовано 1292 землетрясения с $2 \leq K_s \leq 6.3$ ⁶. Гипоцентры большей части событий находились на глубинах от -2.5 до 2 км в центральной части постройки вулкана (рис. 7, 8).

Рассматривались следующие параметры сейсмического режима: энергетический класс для землетрясений с $K_s > 2$ ($K = \lg E$, Дж); их кумулятивное количество; глубина гипоцентров; кумулятивная кривая выделившейся энергии (рис. 8). В период с ноября 2014 г. по январь 2015 г. отмечается слабая сейсмическая активизация в постройке вулкана и ее основании ($H \sim -2-2$ км), которая обусловлена количеством землетрясений выше среднего за период и их относительно высоким $K_s = 4-6$ (рис. 9). В этот период отмечается рост, как числа землетрясений, так и их энергии (рис. 8, 9). Этот всплеск сейсмичности близок по времени к изменению режима работы Западной фумаролы вулкана Авачинский (Малик, Некрасова, 2018).

С конца октября 2019 г., одновременно с началом регистрации свечения на западной кромке кратера, наблюдается увеличение числа сейсмических событий в районе вулкана. За время этой сейсмической активизации, продолжившейся до конца года, локализовано около 200 землетрясений с $2 \leq K_s \leq 6.3$ с гипоцентрами на глубинах от -2.6 км до 9.4 км (рис. 10). Это усиление сейсмической активности превосходило предыдущее (2014–2015 гг.) по числу событий за примерно такой же период в 1.5 раза, а по приросту кумулятивной энергии в 2.5 раза.

⁶ Данные оперативного каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН.

⁴ <http://glob.emsd.ru/volcano-surveillance/>

⁵ Данные лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности КФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>). Менее заметное свечение на снимках камеры периодически наблюдалось и ранее с 2017 г. (устное сообщение С.Л. Сенюкова).

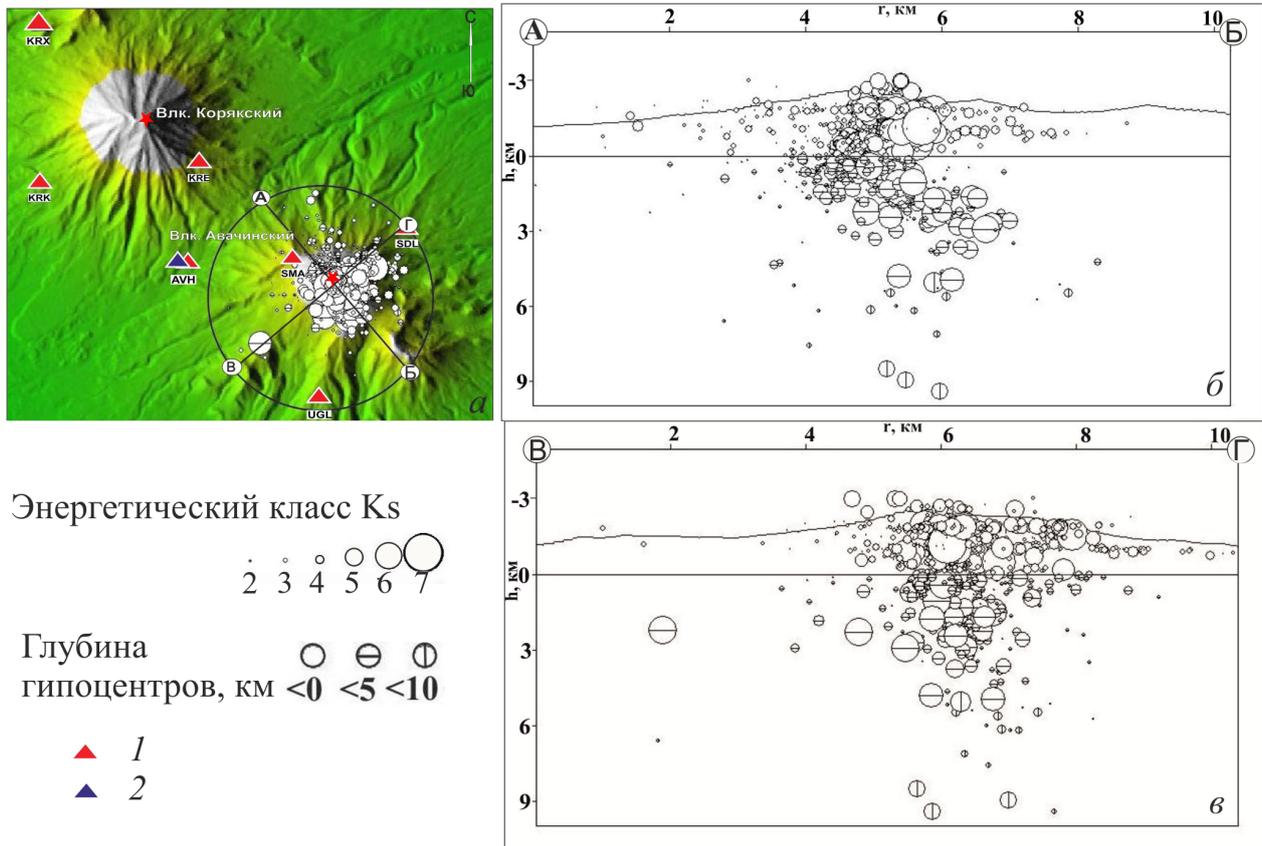


Рис. 7. Сейсмичность вулкана Авачинский с 01.01.2013 по 31.12.2019. Карта эпицентров землетрясений (а) и проекции гипоцентров на вертикальные сечения вдоль линий АВ и ВГ (б, в): 1 — радиотелеметрические сейсмические станции КФ ФИЦ ЕГС РАН; 2 — комплексный пункт наблюдения за вулканами ПНВ_А. Окружностью выделен район исследования сейсмичности вулкана.

Fig. 7. Avachinsky volcano seismicity from 01.01.2013 to 31.12.2019. Earthquake epicenters map (а) and their hypocenters along lines АВ and ВГ (б, в): 1 — KB GS RAS radiotelemetric seismic stations; 2 — complex station of volcano observation PNV_A. The circle is the area of the volcano seismicity study.

В этот период зафиксировано самое сильное за 2013–2019 гг. сейсмическое событие с $K_s=6.3$, произошедшее 9 декабря 2019 г. на глубине -1.2 км, через сутки после того как были отмечены яркие вспышки в районе Западной фумаролы. Также появилось заметное количество землетрясений с $2 \leq K_s \leq 5$ с гипоцентрами глубже 2 км (до 9.4 км), однако большая часть событий (85%) все же наблюдалась в постройке вулкана ($-2.6-0$ км).

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализов проб газа режимной фумаролы Восточного поля были детально изучены на предмет параметров, изменение которых свидетельствовало бы о поступлении горячего магматического флюида, например, в результате интрузий магмы в периоды отмеченных сейсмических активизаций. В пробах, отобранных до и после повышения сейсмичности в 2014–2015 гг., а также в последней серии проб, отобранных 29 августа 2019 г., не наблюдаются аномальные изменения (рост) магматических

составляющих: газов серы (S_2), CO_2 , CO , H_2 , и отношений: CO_2/S_2 , S_2/HCl , CO/CO_2 , H_2/H_2O (рис. 2). Также не наблюдался рост равновесной температуры, рассчитанной по геотермометрам (Tedesco et al., 1991):

$$\log[SO_2][H_2]^2/[H_2S][H_2O]^2 = 3.66 - 10744/T;$$

$$\log[CO][H_2O]/[CO_2][H_2] = 2.49 - 2248/T,$$

где T — абсолютная температура.

Это говорит о том, что либо сейсмические активизации не связаны с поступлением нового магматического вещества, либо сопровождающие их изменения в составе летучих кратковременны. Таким образом, наблюдается стабильность физико-химических параметров фумарол Восточного поля, несмотря на повышение сейсмичности в постройке вулкана как в 2014–2015 гг., так и за два месяца до сейсмической активизации в 2019 г. Отмеченные повышения сейсмичности нашли отражение только в состоянии Западной фумаролы, где с 2014–2015 г. отмечается оползание, выполаживание бортов трещины и связанные с этим процессы. Вероятно, появление заметного свечения в районе

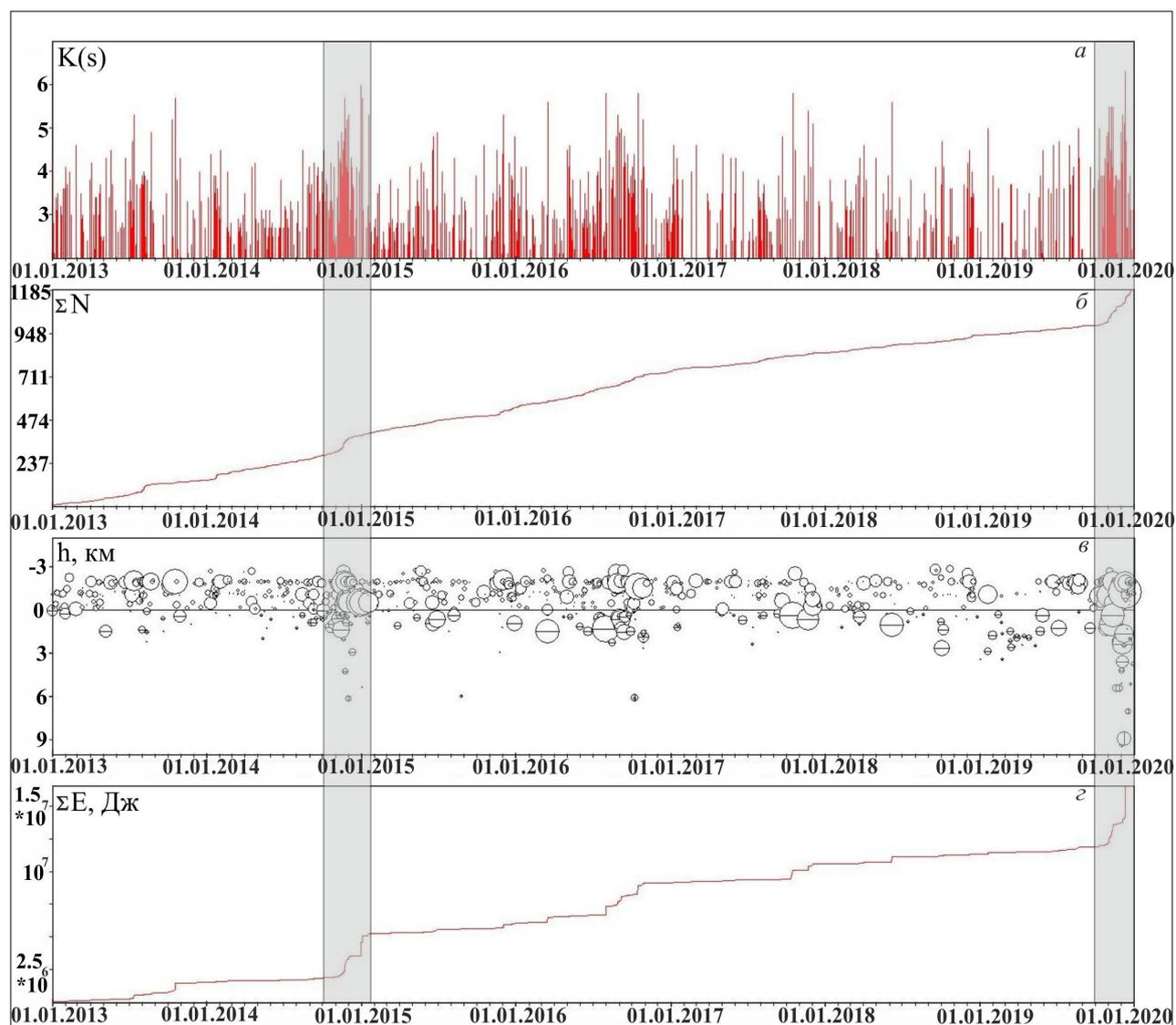


Рис. 8. Распределение во времени параметров землетрясений: *a* — энергетический класс по S-волне; *б* — кумулятивное количество землетрясений с $K_s > 2$; *в* — глубина гипоцентров, км; *г* — кумулятивная энергия, Дж. Полосами показаны сейсмические активизации. Местоположение эпицентров землетрясений и условные обозначения см. на рис. 7.

Fig. 8. Time distribution of the earthquake parameters: *a* — energy class by S-wave; *б* — cumulative number of earthquakes with $K_s > 2$; *в* — depth of hypocenters, km; *г* — cumulative energy, J. The stripes mark increases of seismic activity. Location of earthquakes and legend are shown in Fig. 7.

Западной фумаролы связано с изменением ее морфологии: превращением из глубокой трещины в ложбину, появлением новой высоко-температурной площадки.

Подобные сейсмические активизации на вулкане Авачинский отмечались и ранее: в 1996, 2001, 2005 гг. (Сенюков и др., 2006), и только повышение активности в 2001 г. привело к слабому газо-пепловому выбросу. Однако землетрясения, связанные с ними, отмечались только в постройке вулкана (–2.6–0 км). Активизация в 2019 г. характеризуется появлением заметного числа более глубоких событий.

В результате мультипараметрических исследований на вулкане Вулькано (Италия), про-

водимых с помощью станций непрерывного мониторинга, также отмечались неоднократные одновременные изменения сейсмичности, температуры и других параметров фумарол и термальных площадок, не приводившие к извержениям (Cannata et al., 2012; Diliberto, 2011). Эти аномалии объясняются повышенным выделением флюидов из магматического тела, увеличение циркуляции которых способствует росту числа вулкано-сейсмических событий за счет ряда процессов. Учитывая схожесть в общих чертах геофизических моделей питающих систем вулканов Вулькано (Cannata et al., 2012) и Авачинского (Гонтовая и др., 2010; Bushenkova et al., 2019), можно предположить такую же

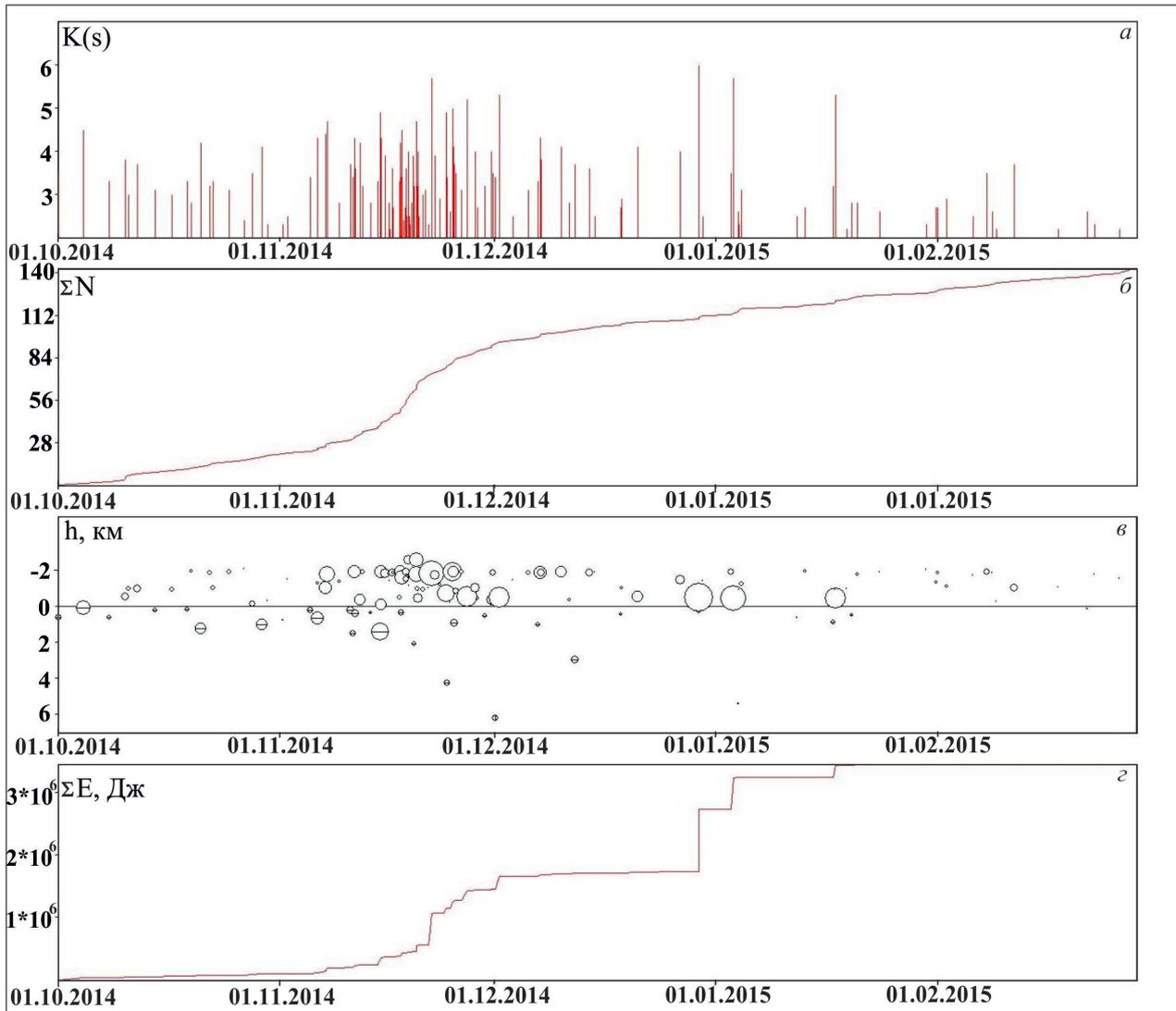


Рис. 9. Распределение во времени параметров землетрясений за период с 01.10.2014 по 01.03.2015: *a–г* — см. рис. 8. Местоположение эпицентров землетрясений и условные обозначения см. на рис. 7.

Fig. 9. Time distribution of earthquake parameters from 01.10.2014 to 01.03.2015: *a–г* — as in Fig. 8. Location of earthquakes and legend are shown in Fig. 7.

интерпретацию процессов активизации и для Авачинского вулкана. Остается вопрос о стабильности физико-химических параметров его Восточного поля. Для Вулкано в качестве возможной причины сейсмических, термальных и геохимических аномалий указывается также изменение проницаемости среды, связанное с гидротермальным изменением пород, которое приводит к интенсификации фумарольной деятельности на одних площадках и ослаблению на других (Harris et al., 2012), что, вероятно, и наблюдается на Авачинском вулкане.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Составы высокотемпературных газов Восточного поля, включая изотопные составы воды, вулкана Авачинский соответствуют средним

составам вулканических газов островных дуг. Температура, состав и расход летучих свидетельствуют о близости дегазирующего магматического тела. Регулярные наблюдения показали сезонные изменения содержания метеорной воды в газе и, в меньшей степени, температуры и состава газа, предположительно связанных с поступлением талых и дождевых вод в теплый сезон года. В целом же с 2017 г. наблюдается снижение температуры фумарол Восточного поля. Режимная фумарола Восточного поля показала стабильность физико-химических параметров до и после небольшого повышения сейсмической активности в 2014–2015 гг. и за два месяца до активизации в конце 2019 г.

За период наблюдений с 2013 по 2020 гг. наиболее заметные изменения произошли на Западной фумароле, которые удалось соотнести

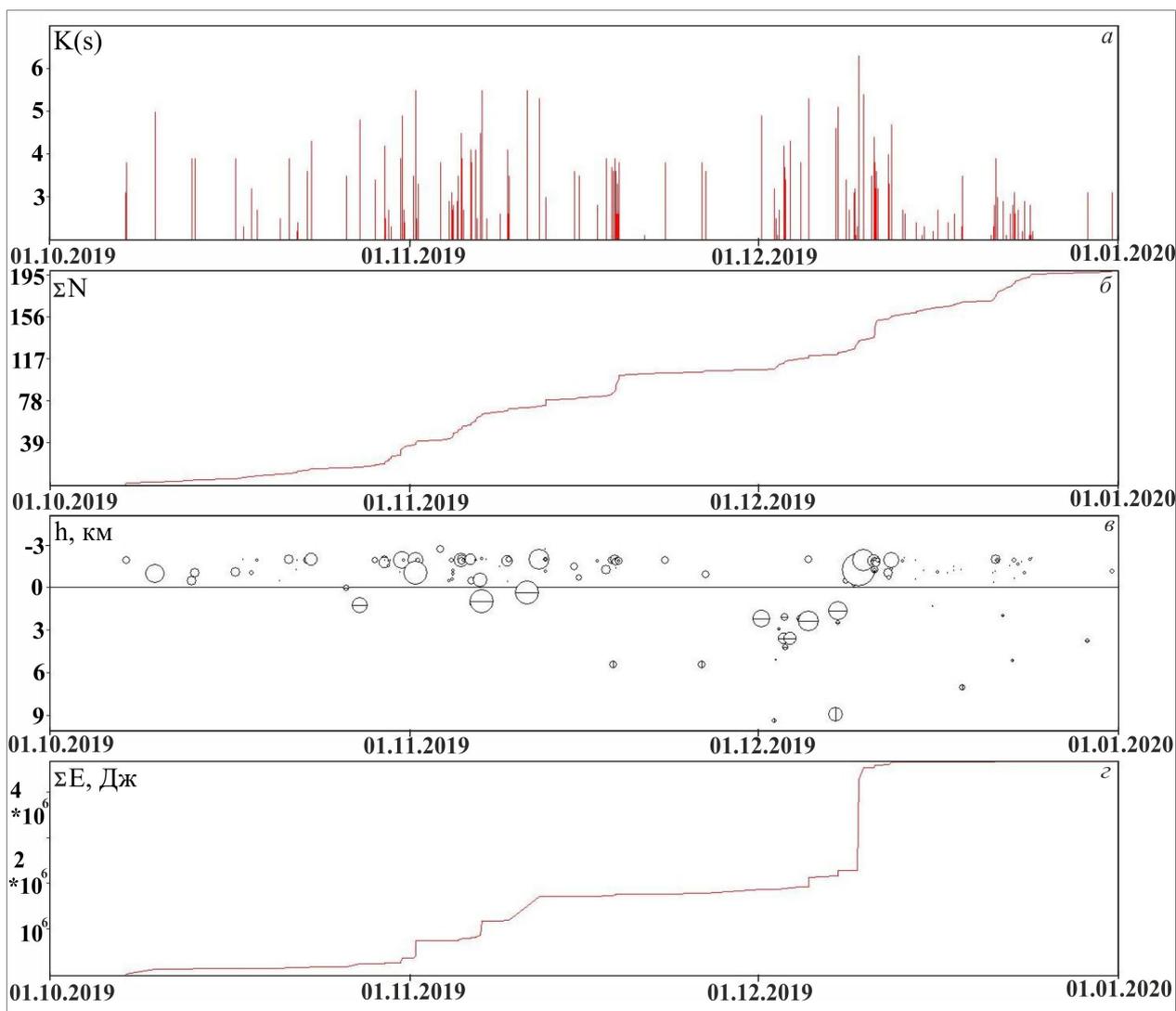


Рис. 10. Распределение во времени параметров землетрясений за период с 01.10.2019 по 31.12.2019: *a–г* — см. рис. 8. Местоположение эпицентров землетрясений и условные обозначения см. на рис. 7.

Fig. 10. Time distribution of the earthquake parameters from 01.10.2019 to 31.12.2019: *a–г* — as in Fig. 8. Location of earthquakes and legend are shown in Fig. 7.

с сейсмической активностью вулкана. С 2014 на 2015 гг. глубокий выход газовой струи был завален породой обвалившихся стенок, после чего расход газа сократился, а его температура возросла до 839°C . Данные видеонаблюдений подтвердили изменения в соотношении расходов двух высокотемпературных фумарольных полей и позволили установить, что основные изменения Западной фумаролы происходили во временном интервале 11 декабря 2014 г. – 21 января 2015 г. В это же время было отмечено небольшое повышение сейсмической активности в постройке вулкана, на глубинах -2 – 1 км. В конце 2019 г. одновременно с сейсмической активизацией вулкана начало отчетливо наблюдаться свечение в районе Западной фумаролы, а с 8 на 9 декабря – яркие вспышки. Обследование вулкана показало дальнейшее выполаживание, прогрев южного

склона трещины и появление на нем высокотемпературной фумарольной площадки.

Описанные процессы можно объяснить как усиление циркуляции флюидов, выделяющихся из близкорасположенного магматического тела, по аналогии с похожими наблюдениями на вулкане Вулькано (Cannata et al., 2012). Это вполне согласуется с моделью питающей системы вулкана Авачинский, приведенной в работе (Bushenkova et al., 2019), однако не объясняет относительную стабильность параметров фумарол Восточного поля. Возможное объяснение – изменение проницаемости пород и охлаждение одних частей кратера, и усиление потока газа в других, что приводит к трещинообразованию, повышенной сейсмичности в постройке вулкана.

Полученные результаты являются основой для дальнейшего мониторинга вулкана.

Проведенные работы, направленные на выявление связи вариаций внешних, наблюдаемых проявлений вулканической активности, и глубинных процессов, отражаемых сейсмичностью, являются начальным этапом исследований. Их развитию могли бы способствовать более расширенные, в плане количества объектов и анализируемых компонентов, исследования фумарол для создания геохимической модели вулкана, а также непрерывный мониторинг параметров фумарол. Подобный многопараметрический подход известен в мировой практике (Tedesco et al., 1999), однако наиболее результативные исследования в настоящее время проводятся с использованием установленных на вулкане приборов, обеспечивающих непрерывное измерение параметров фумарол: температуры, состава газа, расхода SO_2 и диффузного потока CO_2 (Battaglia et al., 2019; Diliberto, 2011; Cannata et al., 2012).

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. П.П. Фирстову, к.г.-м.н. С.Л. Сеньюкову, к.г.-м.н. В.М. Округину за помощь и поддержку работ; В.В. Яшуку, В.В. Яковенко, К.М. Магуськину, И.Ю. Свириду за помощь в работах на вулкане Авачинский; Л.Н. Гарцевой, В.В. Дунин-Барковской, А.А. Кузьминой, М.А. Назаровой, С.В. Сергеевой, И.Д. Боярской, чл.-корр. Е.О. Дубининой, д.г.-м.н. Б.Г. Покровскому, П.О. Воронину за выполнение химических анализов. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-55-50005 ЯФ_a.

Список литературы [References]

- Гонтовая Л.И., Ризниченко О.Ю., Нуждина И.Н., Федорченко И.А. Авачинская группа вулканов: глубинное строение и особенности сейсмичности // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога «Современный вулканизм и связанные с ним процессы», 29–30 марта 2010 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 50–58 [Gontovaya L.I., Riznichenko O.Yu., Nuzhdina I.N., Fedorchenko I.A. Avachinskaya gruppa vulkanov: glubinnoe stroenie i osobennosti sejsmichnosti // Materialy konferencii, posvyashchyonnoj Dnyu vulkanologa «Sovremennij vulkanizm i svyazannye s nim processy», 29–30 marta 2010 g. – Petropavlovsk-Kamchatskij: IVis DVO RAN, 2011. P. 50–58 (in Russian)].
- Дрознин В.А., Дубровская И.К. Фумарольная активность вулкана Авачинский в 2004–2005 гг. (дистанционные измерения) // Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный). Материалы первого международного симпозиума. 25–30 марта 2006 г. // Отв. редактор чл.-корр. РАН Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006. С. 120–126 [Droznin V.A., Dubrovskaya I.K. Avachinsky volcano fumarolic activity in 2004–2005 (remote sensing measurements) // Explosive volcanism phenomena (for the 50th anniversary of the catastrophic eruption of Bezymianny volcano). Proceedings of the First International Symposium. March 25–30, 2006 // Editor-in-chief E.I. Gordeev. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2006. P. 120–126].
- Малик Н.А., Зеленский М.Е., Округин В.М. Температура и состав газа фумарол вулкана Авачинский (Камчатка) в 2013–2016 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 1. Вып. 33. С. 21–33 [Malik N.A., Zelenski M.E., Okrugin V.M. Temperature and gas composition of the Avachinsky volcano fumaroles (Kamchatka) in 2013–2016 // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2017. № 1(33). P. 21–33 (in Russian)].
- Малик Н.А., Некрасова М.Ю. Динамика активности фумарол вулкана Авачинский в 2013–2017 гг. по данным режимных и видео наблюдений и ее связь с локальной сейсмичностью // Материалы XXI региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 29–30 марта 2018 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. С. 64–67 [Malik N.A., Nekrasova M.Yu. Dinamika aktivnosti fumarol vulkana Avachinskij v 2013–2017 gg. po dannym rezhimnyh i video nablyudenij i ee svyaz' s lokal'noj sejsmichnost'yu // Materialy XXI regional'noj nauchnoj konferencii «Vulkanizm i svyazannye s nim processy», posvyashchyonnoj Dnyu vulkanologa, 29–30 marta 2018 g. – Petropavlovsk-Kamchatskij: IVis DVO RAN, 2018. P. 64–67 (in Russian)].
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Двигаало В.Н., Базанова Л.И. Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке (попытка современной интерпретации и классификации для долгосрочного прогноза типа и параметров будущих извержений). Ч. II (1926–1991 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 3–23 [Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Dvigalo V.N., Basanova L.I. Historical eruptions of Avacha volcano, Kamchatka. Attempt of modern interpretation and classification for long-term prediction of the types and parameters of future eruptions. Pt. 2 (1926–1991) // Volcanology and Seismology. 1994. V. 16. № 2. P. 93–114].
- Мелекесцев И.В., Селиверстов Н.И., Сеньюков С.Л. Информационное сообщение об активизации в октябре 2001 г. вулкана Авачинский на Камчатке и проведенных исследованиях // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 79–80 [Melekestsev I.V., Seliverstov N.I., Senyukov S.L. Renewed activity of Avacha volcano, Kamchatka in October 2001 and relevant studies: a progress report // Volcanology and Seismology. 2002. № 2. P. 79–80 (in Russian)].
- Мороз И.Ф., Гонтовая Л.И. Глубинное строение района Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2003. № 4. С. 3–10 [Moroz Yu.F., Gontovaya L.I. Deep Structure of the Avacha-Koryakskii Volcanic Cluster Area in Kamchatka // Volcanology and Seismology. 2003. № 4. P. 3–10 (in Russian)].
- Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю. Сейсмичность Авачинского вулкана в 1994–2005 гг. // Геофизический мониторинг Камчатки. Материалы научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 17–18 января 2006 г. Петропавловск-Камчат-

- ский: ГС РАН, 2006. С. 101–105 [*Senyukov S.L., Nuzhdina I.N., Droznina S.Ya., Kozhevnikova T.Yu.* Seismichnost' Avachinskogo vulkana v 1994–2005 gg. // Geofizicheskij monitoring Kamchatki. Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Petropavlovsk-Kamchatskij, 17-18 yanvara 2006 g. Petropavlovsk-Kamchatskij: GS RAN, 2006. P. 101–105 (in Russian)].
- Серафимова Е.К., Овсянников А.А., Муравьев Я.Д.* Вулканические эксгаляции вулкана Авачинский в постэруптивном процессе после извержения в 1991 г. // Вулканология и сейсмология. 2002. № 4. С. 22–30 [*Serafimova E.K., Ovsyannikov A.A., Muravjev Ya.D.* Volcanic Exhalations of Avacha Volcano Following the 1991 Eruption // *Volcanology and Seismology*. 2002. № 4. P. 22–30 (in Russian)].
- Таран Ю.А., Покровский Б.Г., Дубик Ю.М.* Изотопный состав и происхождение воды в андезитовых магмах // ДАН. 1989. Т. 304. № 2. С. 440–443 [*Taran Ju.A., Pokrovskii B.G., Dubik Yu.M.* Isotope composition and the origin of water in andesitic magmas // *Doklady Earth Sciences*. 1989. V. 304. № 2. P. 440–443 (in Russian)].
- Федотов С.А.* Оценка выноса тепла и пирокластики вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 3–28 [*Fedotov S.A.* Evaluation of heat and pyroclastics discharge by volcanic eruptions and fumaroles based on the height of their plums and clouds // *Volcanology and Seismology*. 1982. № 4. P. 3–28 (in Russian)].
- Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др.* Система детальнейших сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40. <http://dx.doi.org/10.7868/S0203030613010021> [*Chebrov V.N., Droznin D.V., Kugaenko Ya.A. et al.* The system of detailed seismological observations in Kamchatka in 2011 // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2013. V. 7. № 1. P. 16–36. <https://doi.org/10.1134/S0742046313010028>].
- Battaglia J., Hidalgo S., Bernard B. et al.* Autopsy of an eruptive phase of Tungurahua volcano (Ecuador) through coupling of seismo-acoustic and SO₂ recordings with ash characteristics // *Earth and Planetary Science Letters*. 2019. V. 511. P. 223–232.
- Bushenkova N., Koulakov I., Senyukov S. et al.* Tomographic images of magma chambers beneath the Avacha and Koryaksky volcanoes in Kamchatka // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2019. V. 124. P. 9694–9713. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.01.042>.
- Cannata A., Diliberto I.S., Alparone S. et al.* Multiparametric approach in investigating hydrothermal systems: The case of study of Vulcano (Aeolian Islands, Italy) // *Pure and Applied Geophysics*. 2012. V. 169(1). P. 167–182.: <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0297-z>.
- Diliberto I.S.* Long-term variations of fumarole temperatures on Vulcano Island (Italy) // *Annals of geophysics*. 2011. V. 54. № 2. P. 175–185. <https://doi.org/10.4401/ag-5183>
- Harris A., Alparone S., Bonforte A. et al.* Vent temperature trends at the Vulcano Fossa fumarole field: the role of permeability // *Bulletin of Volcanology*. 2012. V. 74. P. 1293–1311.
- Hochstein M.P., Bromley C.J.* Steam cloud characteristics and heat output of fumaroles // *Geothermics*. 2001. V. 30. P. 547–559.
- Okrugin V., Favero M., Liu A. et al.* Smoking gun for thallium geochemistry in volcanic arcs: nataljamalikitite, TlI, a new thallium mineral from an active fumarole at Avacha Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia // *American Mineralogist*. 2017. V. 102. P. 1736–1746. <https://doi.org/10.2138/am-2017-6057>.
- Taran Ya.A., Cornor C.B., Shapar V.N. et al.* Fumarolic activity of Avachinsky and Koryaksky volcanoes, Kamchatka, from 1993 to 1994 // *Bull Bulletin of Volcanology*. 1997. V. 58. № 8. P. 441–448.
- Tedesco D., Scarsi P.* Chemical (He, H₂, CH₄, Ne, Ar, N₂) and isotopic (He, Ne, Ar, C) variations at the Solfatara crater (southern Italy): mixing of different sources in relation to seismic activity // *Earth and Planetary Science Letters*. 1999. V. 171. 465–480.
- Tedesco D., Toutain J.P., Allard P., Losno R.* Chemical variations in fumarolic gases at Vulcano Island (Southern Italy): seasonal and volcanic effects // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1991. № 45. P. 325–334.

МАЛИК, НЕКРАСОВА

**THE MULTIPLE SURVEY OF AVACHINSKY VOLCANO ACTIVITY
IN 2013 – EARLY 2020: GROUND, VIDEO AND SEISMIC OBSERVATION**

N.A. Malik¹, M.Yu. Nekrasova²

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006*

²*Kamchatka Branch of Geophysical Survey RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006*

The results of monitoring at high-temperature fumarolic fields (Eastern and Western) of Avachinsky volcano in 2013–2020 are presented. Those were visual observations, temperature measurement and gas sampling, supplemented with video surveillance data. In order to identify the relationship between fumarolic activity and deep processes, the analysis of the volcano area seismicity for the specified period was carried out. Two periods of increased seismic activity have been identified. The first period, November 2014 – January 2015, is associated with changes in the character of gas emission, morphology and temperature of Western Fumarole observed in the field, reflected in the ratio of gas fluxes of the two high-temperature fumarolic fields. The second seismic increase, in October – December 2019, was accompanied in the dark by glowing, sometimes by bright flashes in the area of Western Fumarole, and as a result of ground survey in 2020 further changes in its morphology were revealed.

Keywords: Avachinsky volcano, fumarole, volcanic gas, temperature, monitoring, seismicity.

Поступила в редакцию 15.12.2019 г.