

ФОРМИРОВАНИЕ ВОРОНКИ В РАЙОНЕ СКВАЖИНЫ 022 МУТНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАРОГИДРОТЕРМ В 2023–2024 гг. (КАМЧАТКА)

© 2025 А.А. Нуждаев¹, Р.А. Кузнецов¹, И.Е. Большаков^{1, 2}, А.Н. Матвеев¹, В.О. Давыдова^{1, 2}

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006;
e-mail: nuzhdaev@gmail.com

²Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 119234

Поступила в редакцию 28.10.2024; после доработки 07.11.2025; принята в печать 25.12.2025

В конце ноября – начале декабря 2023 г. в районе скважины 022 на Мутновском месторождении парогидротерм образовалась крупная воронка размером приблизительно 190×125 м. В конце августа на этом месте были проведены полевые работы, в рамках которых производилась ортофотосъемка в видимом и инфракрасном диапазонах, замеры температурного поля на разных глубинах в донной части воронки, описание и отбор отложений, перемещенных из воронки. Проведенные работы, вместе с комплексным изучением мультиспектральных спутниковых снимков позволили установить сроки и механизм образования данной воронки. Основным геологическим событием, приведшим к образованию данной воронки, является сход крупного оползня в русло ближайшего ручья, что впоследствии за счет снятия значительной доли литостатического давления вызвало несколько крупных гидротермальных взрывов, отложения которых распространились вокруг воронки на площади более 100000 м².

Ключевые слова: гидротермальный взрыв, оползень, Мутновское месторождение, Камчатка.

ВВЕДЕНИЕ

Гидротермальные взрывы впервые были описаны в работе (Muffler et al., 1971) как взрывы, происходящие при переходе воды, содержащейся в приповерхностных породах, в пар и сопровождающиеся разрушением вмещающих пород.

Гидротермальные взрывы наблюдаются в районах гидротермальной и вулканической активности во многих регионах Земли. Так, гидротермальные взрывы, связанные с магматической активностью, описаны на хребте Кверкфьедль (Исландия) (Montanaro et al., 2016) и вулканах Онтакэ (Япония) (Kato et al., 2015; Yamamoto et al., 2014), Руапеху и Те-Маари (Новая Зеландия) (Breard, et al., 2014; Kilgour et al., 2010) и др. Гидротермальные взрывы, связанные с гидротермальными системами, являются менее мощными и фиксируются как на объектах с естественной разгрузкой, так и на объектах, где ведется эксплуатация и добыча геотермальной энергии: Оникобе (Япония) (Akasaka et al., 2015), Йеллоустон (США) (Muffler et al., 1971),

Таупо (Новая Зеландия) (Bixley, Browne, 1988). В работе (Browne, Lawless, 2001) приводится большой литературный обзор ранее описанных гидротермальных взрывов в Новой Зеландии и других вулканически активных районах мира. В результате таких взрывов формировались воронки диаметром от 2 до 50 м, которые, иногда вызывали оползневые и обвальные процессы, приводившие к разрушениям и человеческим жертвам. Наиболее разрушительным по количеству погибших людей считается гидротермальный взрыв на месторождении Зуниль в Гватемале в 1991 г. (Goff, Goff, 1997), который спровоцировал оползень, унесший жизни 23 человек.

Крупные гидротермальные взрывы происходят в вулканических районах достаточно редко. В большинстве случаев, это небольшие события, которые характеризуются малым количеством отложений, и поэтому их следы плохо сохраняются в геологических разрезах. Несмотря на малую изученность причин, их вызывающих, сам механизм этих взрывов хорошо описан, и даже предложено несколько моделей (Browne,

Lawless, 2001; Montanaro et al., 2016). В общих чертах механизм возникновения гидротермальных взрывов представляется следующим образом: гидротермальный раствор, поступая к дневной поверхности, вскипает в приповерхностных условиях и при превышении литостатического давления и прочности вышележащих пород выбрасывает эти породы, формируя небольшие, глубиной до первых метров, воронки взрыва. В результате происходит уменьшение давления вышележащего пласта и одновременное увеличение площади поступления пара, что приводит к повторным взрывам большей мощности, к расширению и углублению формируемой воронки до тех пор, пока система не придет в равновесие. При этом значительная часть материала может находиться внутри воронки и многократно перемешивается во время продолжающихся взрывов. Другим механизмом, приводящим к гидротермальным взрывам, может быть резкий сброс давления за счет схода оползня или дренирования крупного водоема, как это было описано на вулкане Кверкфьёдль (Исландия) (Montanaro et al., 2016), где гидротермальный взрыв произошел после резкого понижения уровня кратерного озера Генгиссиг, что привело к резкому падению литостатического давления и, как следствие — вскипанию гидротермальных растворов и последующему гидротермальному взрыву.

Мутновское геотермальное месторождение расположено в 70 км от Петропавловска-Камчатского (рис. 1). Среди многочисленных термопроявлений в пределах месторождения выделяется группа термальных полей Северо-Мутновской вулкано-тектонической зоны (Вакин и др., 1976), к которой относятся Северо-Мутновские и Дачные термальные источники (рис. 1). Они расположены на участке длиной 15 км, протянувшемся от северных склонов Мутновского вулкана до долины реки Жировой (Вакин и др., 1976). На территории месторождения эксплуатируется две геотермальные электростанции общей мощностью 50 МВт. Данному месторождению посвящена серия различных работ (Кирюхин, 2010; Kiryukhin, 2022).

Первые сообщения о том, что в районе группы скважин (рис. 1), расположенной в 2 км ниже по течению р. Фальшивой относительно Мутновской ГеоЭС, образовалась крупная прогретая парящая площадка, появились 11.04.2024 г. (устное сообщение спасателей Камчатского Поисково-спасательного отряда). В начале июня группы туристов предоставили авторам фотоматериалы, по которым можно было предположить, что в районе скважины 022, произошел гидротермальный взрыв, в результате которого образовалась воронка взрыва диаметром больше 100 м.

Ранее на Камчатке гидротермальные взрывы описывались лишь на Мутновском место-

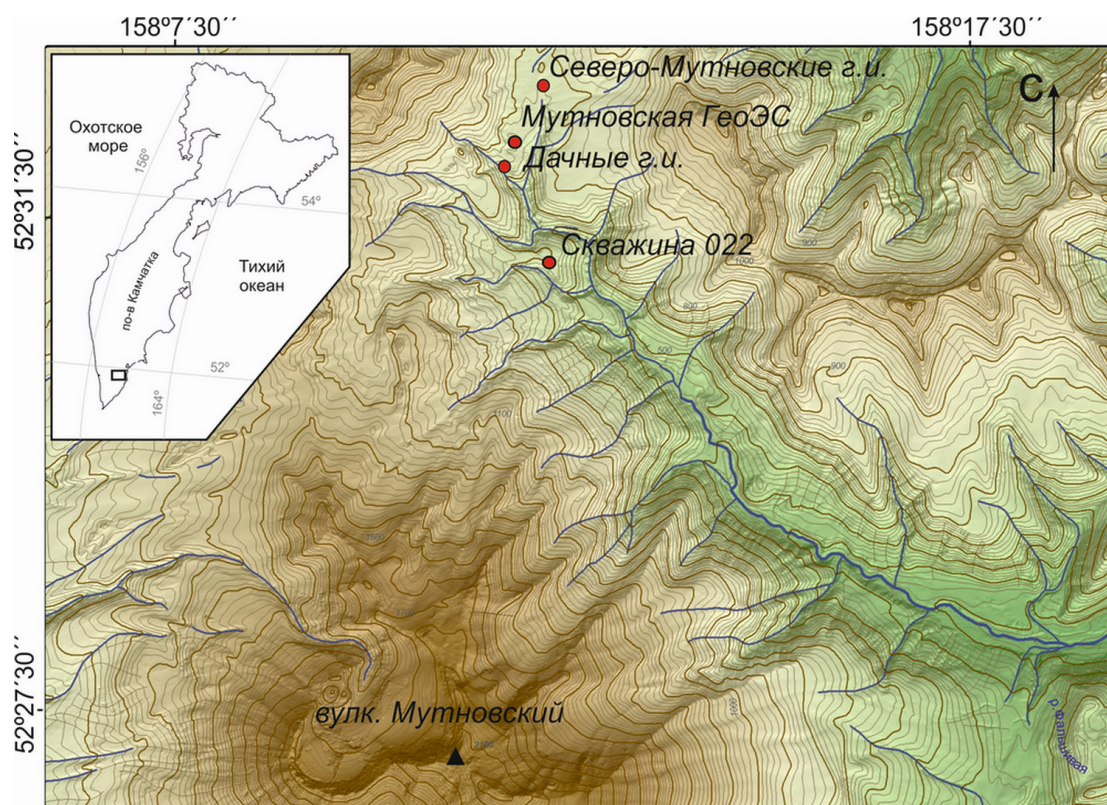


Рис. 1. Схема расположения Мутновской ГеоЭС и скважины 022.

Fig. 1. Location map of the Mutnovskaya Geothermal Power Plant (GeoPP) and Well 022.

ФОРМИРОВАНИЕ ВОРОНКИ В РАЙОНЕ СКВАЖИНЫ 022 МУТНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

рождении парогидротерм в районе скважины 022 (Мельников, 2004), однако события 2003 и 2004 гг. имели гораздо меньший масштаб. Согласно данным Д.В. Мельникова (2004) в районе скважины 022 произошло два гидротермальных взрыва и образовалась воронка диаметром около 50 м и глубиной 1.5–2 м, а материал, выброшенный при взрывах, распространился на площади около 5000 м². Выброшенный материал в основном был представлен глинистыми отложениями и обломками гидротермально измененных туфов размером до 30 см в поперечнике. На момент взрывов 2003 и 2004 гг. скважина не эксплуатировалась и была закрыта (Мельников, 2004).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В конце августа 2024 г. были проведены полевые работы, в ходе которых выполнялась оценка размеров и состояния образовавшейся воронки. Проведен отбор минералогических проб с поверхности воронки, проб воды из небольшого прогретого озера внутри воронки, выполнены прямые измерения температуры с использованием

термопар, а также измерения температуры при помощи тепловизионной камеры на беспилотном летательном аппарате.

Для установления даты образования воронки был проведен анализ различных имеющихся в открытом доступе космических снимков Landsat 8, 9 и Sentinel-2A с разрешением до 10 м/пиксель за период с ноября 2023 г. по август 2024 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ многоканальных снимков Sentinel-2A и Landsat 8, 9 показал, что формирование воронки произошло в результате серии последовательных событий. Первое и основное событие произошло в период с 15.11.2023 по 02.12.2023 г. Более детальная идентификация конкретной даты невозможна в связи с редкостью космической съемки данного района и частых неудовлетворительных погодных условий в данном районе. Анализ спутниковых снимков показывает, что в период с 15.11.2023 по 03.12.2023 г. произошло изменение русла ручья притока реки Фальшивой (рис. 2а, 2б). Наснимках от 03.11.2023 г. и 15.11.2023 г. (рис. 2а, 2б),

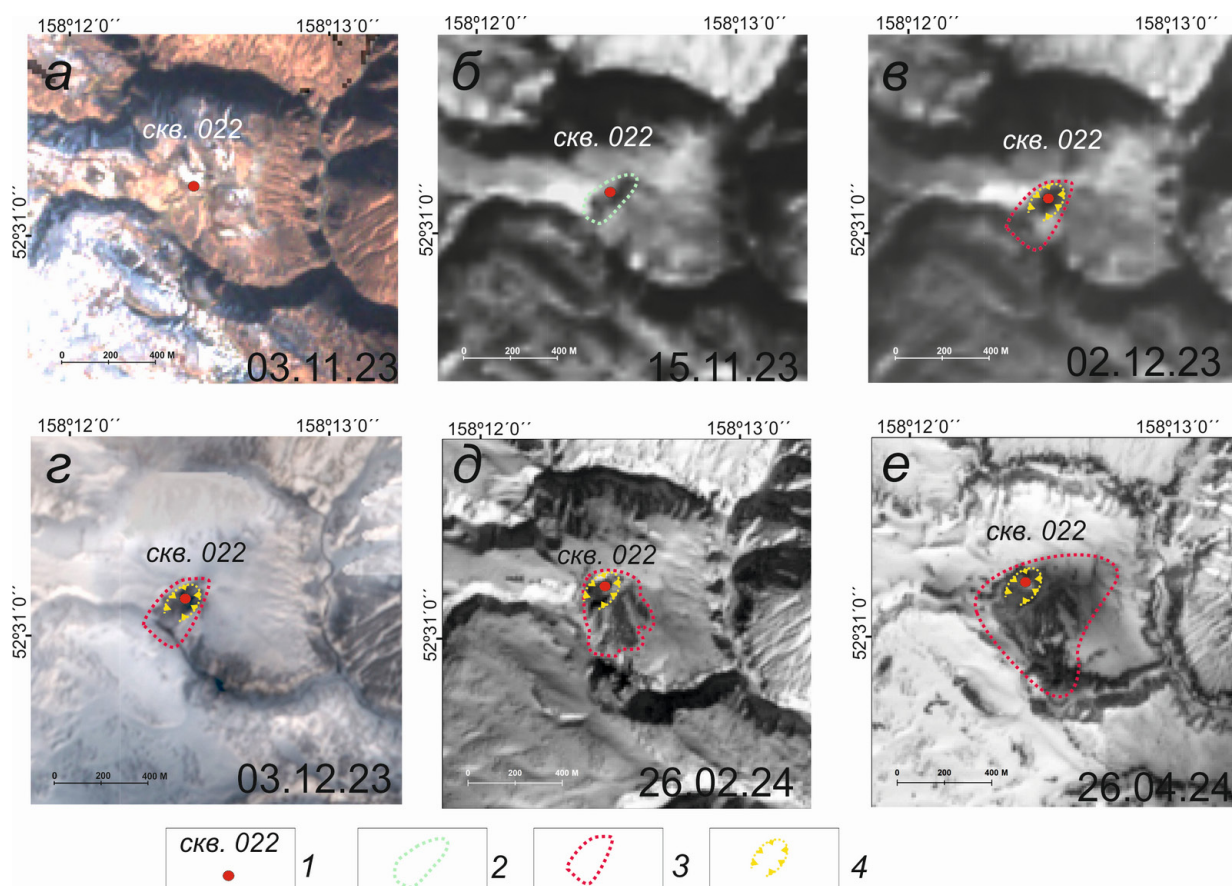


Рис. 2. Фрагменты космических снимков Sentinel-2A, Landsat 8, на район скважины 022. 1 — скважина 022; 2 — участок прогрева; 3 — площади распространения отложений воронки; 4 — границы сформированной воронки.

Fig. 2. Fragments of Sentinel-2A and Landsat 8 satellite images of the area around well 022 area. 1 — well 022; 2 — heating area; 3 — areas of the funnel deposits distribution; 4 — boundaries of the formed funnel.

видно, что ручей в районе скважины имеет изогнутое русло, в то время как на снимках от 02.12.2023 г. и 03.12.2023 г. (рис. 2в, 2г) заметно значительно измененное (спрямленное) русло реки, и также на снимках различимы лишённые снега, перемещённые ниже по склону относительно скважины в юго-западном направлении отложения. Кроме того, при сравнении снимков от 03.12.2023 г. и всех последующих отчетливо видно, что образовавшаяся воронка уже в этот момент имеет размеры практически не отличающиеся от зафиксированных на момент проведения полевых работ (рис. 2в–е). Это позволяет сделать вывод о том, что основное геологическое событие произошло именно в указанный период. Впоследствии внутри воронки произошло несколько гидротермальных взрывов, наиболее крупные из которых имели место в периоды с 16 по 26 февраля 2024 г. (рис. 2д) и с 6 по 26 апреля 2024 г. (рис. 2е), и привели к выбросу значительного количества материала из воронки на окружающие склоны, при этом основной объем пород выбрасывался в южном направлении. Данные отложения являются именно отложениями взрыва, а не результатом прогрева и оттаивания склона, так как они ложатся поверх устойчивого снежного покрова, который фиксировался на снимках в феврале 2024 г.

Визуальный осмотр, произведенный 22 августа 2024 г. подтвердил, что на месте скважины 022 образовалась крупная отрицательная структура, имеющая овальную форму воронки с плоским

дном и вытянутая в субмеридианальном направлении (рис. 3).

Воронка имеет крутые обрывистые борта, за исключением юго-западного сектора, где борт отсутствует и наблюдается понижение, примыкающее к левому борту ручья (рис. 3). В донной части воронки и ее северо-западном склоне наблюдалось интенсивное парение. Вокруг воронки (на расстоянии до 100 м в северном направлении и до 300 м в южном направлении) поверхность покрыта выброшенным из воронки несортированным материалом, состоящим в основном из обломков гидротермально измененных туфов, лав и глинистых отложений, отдельные обломки достигают размеров до 0.5 м в поперечнике. Мощность отложений на северном борту более 1 м (рис. 3в, 4а), и мощность отложений на бортах увеличивается в западном и южном секторах. Внутри воронки на момент полевых работ имела почти плоское дно, вся поверхность которого покрыта небольшими кратерами диаметром 2–4 м и глубиной 1–2 м (рис. 3а, 3б). На момент осмотра, отложения, находившиеся на периферии воронки, уже были остывшими, парящими оставались только небольшие кратеры в центральной части воронки и в бортах юго-западного склона. Вся поверхность центральной части воронки покрыта слоем минеральных выцветов, мощность которых в отдельных местах в центральной части воронки достигала 5 см (рис. 4б).

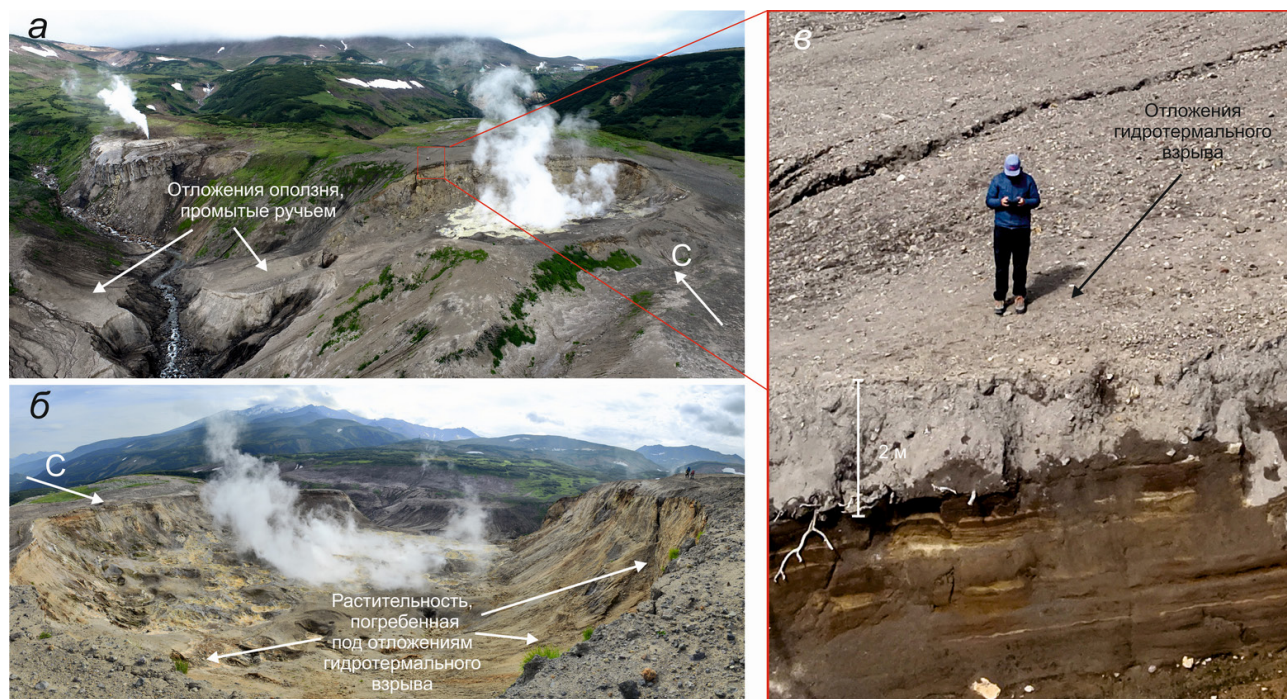


Рис. 3. Общий вид воронки в районе скважины 022: а — вид сверху; б — вид с востока; в — фрагмент снимка, на котором выделен масштаб и мощность взрывных отложений.

Fig. 3. General view of the crater: а — top view; б — view from the east; в — fragment of the photograph showing the scale and thickness of the explosive deposits.



Рис. 4. Вид воронки изнутри: *а* — центральная часть воронки и ее северный борт (пунктирной линией выделена нижняя граница взрывных отложений); *б* — дно воронки; *в* — горячее озеро.

Fig. 4. View of the crater from the inside: *a* — central part and the northern rim (the lower boundary of explosive deposits is marked by a red dotted line); *b* — funnel floor; *v* — hot lake.

Ниже воронки, на склоне в сторону притока р. Фальшивой, где через рыхлые отложения фильтруется сток горячих вод, под крупным блоком размером порядка 5 м сформировалась горячая лужа (рис. 4в) размером 2–2 м с прозрачной водой, температура которой в момент проведения полевых работ составляла 65°C. Ещё ниже по склону, в сторону русла притока р. Фальшивой, из-под материала переотложенного при формировании воронки, вытекал горячий ручей, который промывал свежие отложения (рис. 5а). Ручей интенсивно парил. Выход теплой воды гипсометрически находится ниже парящего участка в центре воронки и, по всей видимости, является продуктом конденсации пара, поступающего к поверхности. В русле

притока р. Фальшивой наблюдались рыхлые отложения, мощность которых достигала 35 м. Они заполняли все русло ручья и располагались также на противоположном его борту. Растительность вокруг (на расстоянии до 300 м в ЮЗ направлении, до 60 м в СЗ, до 100 м в ЮВ и 30 м СВ направлениях) была перекрыта рыхлыми отложениями, по всей видимости, сингенетичными с воронкой (рис. 3б).

В результате обработки результатов съемки, проведенной с беспилотного летящего аппарата в августе 2024 г., были построены ортофотоплан участка, где произошло формирование воронки (рис. 5б), цифровая модель рельефа (рис. 5в), и рассчитаны параметры сформировавшейся воронки: размеры 190–125 м,

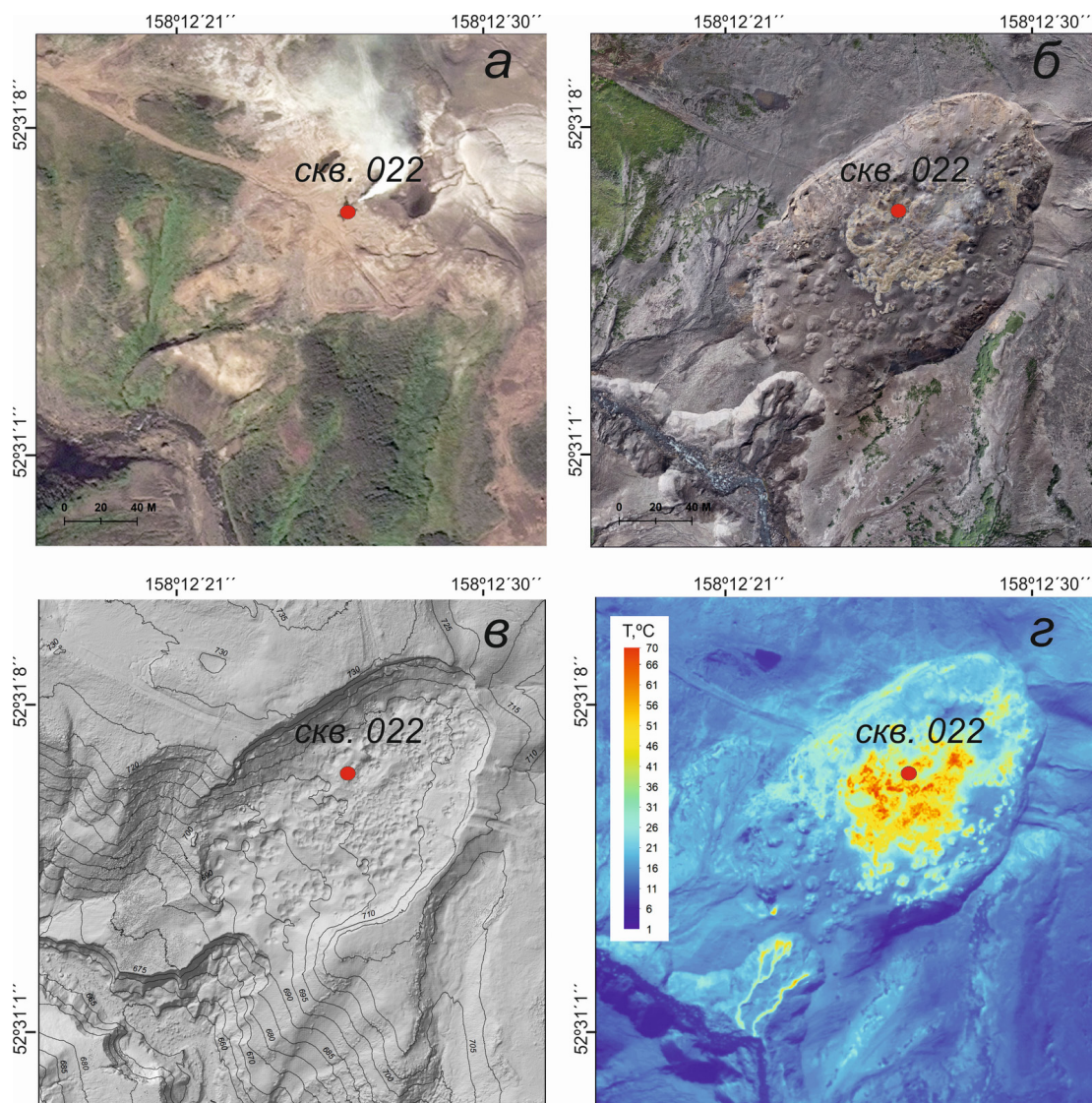


Рис. 5. Район скважины 022: *а* — фрагмент спутникового снимка, сделанного до 2023 г.; *б* — ортофотоплан, сделанный в августе 2024 г.; *в* — цифровая модель рельефа, построенная по данным, полученным в августе 2024 г.; *г* — изображение, полученное в инфракрасном диапазоне.

Fig. 5. Area of well 022: *a* — fragment of a satellite image taken before 2023; *б* — orthophotoplan created in August 2024; *в* — digital elevation model constructed from data obtained in August 2024; *г* — image obtained in the infrared range.

высота бортов (глубина) воронки составляет от 13 до 25 м, превышение от северного борта к южному составило 15 м, площадь воронки — 19150 м², объем перемещенного из воронки материала ~ 200000 м³. Площадь распространения сформировавшихся отложений свыше 107000 м², при этом основной объем материала переместился вниз по склону, в юго-западном направлении в сторону ближайшего к скважине притока р. Фальшивой (рис. 1) его объем оценен нами в 180000 м³. В результате схода оползня было перегороджено русло ручья, однако достаточно быстро было сформировано его новое прямое русло, значительно отличающееся от предыдущего и отчетливо заметное на спутниковом снимке от 03.12.2024 г. (рис. 2г).

Температурная съемка, выполненная с помощью беспилотного летательного аппарата, позволила получить схему распределения температур в воронке (рис. 5г), показавшую, что основная температурная аномалия сосредоточена в центральной части воронки. Площадь поверхности, температура которой превышает 20 °С составляет 7484 м², а 40 °С — 1877 м², площадь с максимальными температурами, превышающими 60 °С — 115 м².

Температура грунта внутри парящей зоны, измеренная на земле с помощью термомпары на глубине 40–50 см, составляла 80–90 °С. Измерения, на глубинах от 0.2 до 1.5 м показали, что с глубиной температура практически не меняется и не превышает 106 °С. При этом значения

измерений на глубине 0.2 м близки к значениям, полученным инфракрасной камерой дистанционным методом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате комплексного анализа спутниковых снимков, а также полевых наблюдений, можно заключить, что основное перемещение материала, формировавшего воронку, произошло в результате схода оползня в период с 15.11.2023 г. по 02.12.2023 г. в юго-западном направлении в русло правого притока реки Фальшивая (рис. 1). Основным признаком того, что образование воронки произошло именно в результате схода оползня, является тот факт, что абсолютное большинство перемещенного материала (около 90%) находится в русле реки, а высота отложений, перемещенных на противоположный борт ручья не превышает высоты исходного расположения устья скважины 022. При этом, часть материала расположено непосредственно в месте, куда оно было перемещено в момент оползня, а часть была перенесена ниже по руслу водными потоками, размывшими завальную плотину. Важным вопросом для прогнозирования подобных процессов в будущем является выявление причин возникновения оползня. Авторам данной статьи представляется рациональным предположение о несомненном влиянии на активизацию указанного процесса избыточного давления пара, возникшего в присклоновом массиве в результате закрытия сброса парогазовой смеси из скважины 022 в августе 2023 г. (данные из устного сообщения сотрудников Мутновской ГеоЭС). Весьма вероятно, что сход оползня в том числе был вызван возникновением избыточного давления флюида, которое в момент активизации оползневого процесса, за счет снятия литостатического давления, вызвало гидротермальный взрыв. Два этих явления оказываются неразрывно связаны друг с другом. Однако, назвать именно гидротермальный взрыв основной причиной возникновения воронки не представляется возможным из-за того, что подавляющее большинство материала было перенесено именно гравитационным процессом в соответствующем направлении. Вокруг воронки отсутствуют мощный бортовой вал материала, а объем материала, распространенный взрывами во всех направлениях, кроме направления ручья можно охарактеризовать как сравнительно несущественный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В результате проведенных работ была получена информация о новообразованной воронке, сформировавшейся в результате серии взаимосвя-

занных геологических процессов произошедших с ноября 2023 г. по апрель 2024 г., и предложена возможная последовательность событий, объясняющих ее формирование, согласно которой основным процессом, приведшим к возникновению указанной воронки, является сход оползня, спровоцированный накоплением избыточного давления пара внутри присклонового массива в результате прекращения выпуска пара из скважины 022. Последовавшие за оползнем гидротермальные взрывы, являются наиболее крупными событиями такого рода из ранее описанных на Мутновском месторождении. Периодичность возникновения наиболее крупных взрывов внутри образовавшейся воронки была приблизительно равна двум месяцам, а объем выбрасываемого ими материала достигал десятков тысяч кубических метров.

Сопоставление с описанными в литературе данными (Breard, et al., 2014; Kato et al., 2015; Kilgour et al., 2010; Yamamoto et al., 2014) позволяет сделать вывод, что совокупность геологических процессов, сформировавших данное событие, была мощнее большинства ранее описанных гидротермальных взрывов в других районах мира.

В связи с тем, что произошедшее геологическое событие является одним из крупнейших, зафиксированных в исторический период, а также произошло на территории эксплуатируемого гидротермального месторождения, в непосредственной близости от популярных туристических маршрутов, необходимо дальнейшее изучение этого и подобных процессов с целью их более глубокого понимания.

Работы выполнены в рамках государственного задания Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН «Геохимия продуктов современной вулканической и поствулканической деятельности» (FWME-2024-0013), утвержденного Минобрнауки России (тема № 124080600037-9).

Список литературы

- Вакин Е.А., Кирсанов И.Т., Кирсанова Т.П.* Термальные поля и горячие источники Мутновского вулканического района // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 85–114 [*Vakin E.A., Kirsanov I.T., Kirsanova T.P.* Thermal fields and hot springs of the Mutnovsky volcanic region // Hydrothermal systems and thermal fields of Kamchatka. Vladivostok: FESC of the USSR Academy of Sciences, 1976. P. 85–114 (in Russian)].
- Кирюхин А.В., Кирюхин В.А., Манухин Ю.Ф.* Гидрогеология вулканогенов. Санкт-Петербург: Наука, 2010. 395 с. [*Kiryukhin A.V., Kiryukhin V.A., Manukhin Y.F.* Hydrogeology of volcanogens. St. Petersburg: Nauka, 2010. 395 p. (in Russian)].
- Мельников Д.В.* Некоторые особенности морфологии гидротермальных взрывов в районе Мутновской

- гидротермальной электростанции // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2004. № 4. С. 120–124 [Melnikov D.V. Some features of the morphology of hydrothermal explosions in the area of the Mutnovskaya hydrothermal power plant // Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle. 2004. № 4. P. 120–124 (in Russian)].
- Akasaka C., Takizawa K., Todaka N. et al. Restoration from a Large Scale Steam Explosion at the Well Site of the Onikobe Geothermal Power Station // Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne. 2015.
- Allis R.G. The April 9, 1983 steam eruption at craters of the Moon Thermal area, Wairakei // Report-Geophysics Division. 1984. № 196.
- Bixley P.F., Browne P.R.L. Hydrothermal eruption potential in geothermal development // Proceedings of the 10-th New Zealand Geothermal Workshop. 1988. P. 195–198.
- Breard E.C.P., Lube G., Cronin S.J. et al. Using the spatial distribution and lithology of ballistic blocks to interpret eruption sequence and dynamics: August 6 2012 Upper Te Maari eruption, New Zealand // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2014. V. 286. P. 373–386. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.07.006>
- Browne P.R.L., Lawless J.V. Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere // Earth-Science Reviews. 2001. V. 52. № 4. P. 299–331. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00030-1)
- Cristian Montanaro, Emily Mick, Jessica Salas-Navarro et al. Phreatic and Hydrothermal Eruptions: From Overlooked to Looking Over // Bulletin of Volcanology. 2022. V. 84. Art. 64. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01571-7>
- Goff F., Goff S. Fumarole Degassing and Hydrothermal Explosions at Zunil Geothermal Field, Guatemala // Proceedings of the Twenty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, 1997. P. 11–18.
- Kato A., Terakawa T., Yamanaka Y. et al. Preparatory and precursory processes leading up to the 2014 phreatic eruption of Mount Ontake, Japan // Earth Planets Space. 2015. V. 67. Art. 111. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0288-x>
- Kilgour G., Manville V., Della Pasqua F. et al. The 25 September 2007 eruption of Mount Ruapehu, New Zealand: directed ballistics, surtseyan jets, and ice-slurry lahars // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2010. V. 191. № 1–2. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.01.009>
- Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Voronin P.O. et al. Magma fracturing and production reservoirs beneath and adjacent to Mutnovsky volcano based on seismic data and hydrothermal activity // Geothermics. 2022. V. 105. Art. 102474. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102474>
- Montanaro C., Scheu B., Gudmundsson M.T. et al. Multidisciplinary constraints of hydrothermal explosions based on the 2013 Gengissig lake events, Kverkfjöll volcano, Iceland // Earth and Planetary Science Letters. 2016. V. 434. P. 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.11.043>
- Muffler L.J., White D.E., Truesdell A.H. Hydrothermal explosion craters in Yellowstone National Park // Geological Society of America Bulletin. 1971. V. 82. № 3. P. 723–740. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1971\)82\[723:HECIYN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1971)82[723:HECIYN]2.0.CO;2)
- Yamamoto T. The pyroclastic density currents generated by the September 27, 2014 phreatic eruption of Ontake Volcano, Japan // Bulletin of the Geological Survey of Japan. 2014. V. 65. № 3–4. P. 117–127. <https://doi.org/10.9795/bullgsj.65.117>

FORMATION OF A CRATER IN THE AREA OF THE WELL 022 AT THE MUTNOVSKOE STEAM-HYDROTHERM FIELD IN 2023–2024 (KAMCHATKA)

A.A. Nuzhdaev¹, R.A. Kuznetsov¹, I.E. Bolshakov^{1,2}, A.N. Matveev¹, V.O. Davydova^{1,2}

¹*Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006; e-mail: nuzhdaev@gmail.com*

²*Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Moscow, Russia, 119234*

Received October 28, 2024; revised November 7, 2025; accepted December 25, 2025

In late November – early December 2023, a large crater measuring approximately 190×125 m formed in the area of well 022 at the Mutnovsky steam-hydrothermal field. At the end of August, field work was carried out at this site which included orthophotography in the visible and infrared ranges, measurements of the temperature field at different depths in the bottom part of the crater, and the description and selection of sediments displaced from the crater. The work carried out, together with a comprehensive study of multispectral satellite images, made it possible to establish the timing and mechanism of the formation of this funnel. The main geological event that led to the formation of this funnel was a large landslide into the bed of the nearest stream, which subsequently caused several large hydrothermal explosions due to the removal of a significant portion of the lithostatic pressure, the deposits of which spread around the funnel over an area of more than 100000 m².

Keywords: hydrothermal explosion, landslide, Mutnovsky deposit, Kamchatka.