ISSN 2078-502X 💿 🛈



2025 VOLUME 16 ISSUE 1 ARTICLE 0813

DOI: 10.5800/GT-2025-16-1-0813

THE GENESIS OF THE THERMAL LAKE LOCATED WITHIN THE COASTAL AREA **OF ITURUP ISLAND (THE KURILS)**

O.R. Khubaeva ¹/₂, A.V. Sergeeva ¹/₂, A.L. Khomchanovsky ¹/₂, M.D. Sidorov ²/₂, F.I. Batanov 1, S.S. Volynkin 3, M.A. Nazarova 1

¹ Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 9 Piip Blvd, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia

² Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 30 Severo-Vostochnove Rte, Petropavlovsk-Kamchatsky 683002, Russia

³ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. The 3D model of tectonic fragmentation of the block of rock for the central part of Iturup Island has been developed to clarify the permeable zones of the upper part of the Earth's crust. The use of the thermal infrared cameras allows us to image the bottom of Lake Utinaya Banya. The differential-leveling survey data helped us to develop the 3D model of the relief of the lake basin and the adjacent areas. We made chemical analyzes of waters and free gases released from the bottom of Lake Utinaya Banya. We revealed mineral composition of sediments collected during drilling in the area of the explosive event on the lake. Also we presented the conceptual model of the hydrothermal-magmatic system of the studied area. Thus, the obtained data suggest that Lake Utinaya Banya, located in the central part of Iturup Island may have been formed as the result of a series of hydrothermal eruptions. So, we can conclude that there is a risk of new hydrothermal explosions at Lake Utinaya Banya in the future.

KEYWORDS: hydrothermal eruption; thermal lake; 3D model of tectonic fragmentation; hydrothermal-magmatic system

FUNDING: The study carried out within the framework of the RSF project (No. 21-17-00049, "Study of volcanic, seismic and tsunami hazards and assessment of geothermal resources for the developing territories of the Kuril Islands"), partly within the framework of the research topic "Volcanism and geodynamics of the Kuril-Kamchatka subduction zone. Complex analysis of geological and geophysical data on the deep structure of volcanic and hydrothermal systems, interrelation of volcanic process with regional seismotectonics, environment and climate. Geo-ecological aspects of interaction between regional volcanism and the Kamchatka cryosphere" (No. FWME-2024-0009).



RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Olga R. Khubaeva, grifon03@yandex.ru

Received: September 11, 2024 Revised: January 10, 2025 Accepted: January 13, 2025

FOR CITATION: Khubaeva O.R., Sergeeva A.V., Khomchanovsky A.L., Sidorov M.D., Batanov F.I., Volynkin S.S., Nazarova M.A., 2025. The Genesis of the Thermal Lake Located Within the Coastal Area of Iturup Island (The Kurils). Geodynamics & Tectonophysics 16 (1), 0813. doi:10.5800/GT-2025-16-1-0813

ГЕНЕЗИС ТЕРМАЛЬНОГО ОЗЕРА В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ о. ИТУРУП (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)

О.Р. Хубаева¹, А.В. Сергеева¹, А.Л. Хомчановский¹, М.Д. Сидоров², Ф.И. Батанов¹, С.С. Волынкин³, М.А. Назарова¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, 9, Россия

² Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, 683002, Петропавловск-Камчатский, Северо-Восточное ш., 30, Россия

³Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

АННОТАЦИЯ. Для центральной части о. Итуруп построена 3D модель тектонической раздробленности с целью уточнения проницаемых зон верхней части земной коры, а также трехмерная модель рельефа оз. Утиная Баня. Проведена температурная съемка дна озерной котловины, гидрохимические исследования воды и свободных газов, выделяющихся со дна озера, определен минеральный состав отложений, отобранных при проходке шурфа в районе взрывного события на оз. Утиная Баня. Представлена концептуальная модель гидротермально-магматической системы исследуемого района. Сделан вывод: расположенное в центральной части о. Итуруп оз. Утиная Баня образовано в результате серии гидротермальных извержений; при существующих условиях в недрах гидротермально-магматической системы гидротермальные взрывы могут повторяться.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидротермальное извержение; термальное озеро; 3D моделирование; тектоническая раздробленность; гидротермально-магматическая система

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено в рамках проекта РНФ (грант № 21-17-00049, «Изучение вулканической, сейсмической и цунами опасности, а также оценка геотермальных ресурсов для развивающихся территорий Курильских островов»), частично в рамках темы НИР «Вулканизм и геодинамика Курило-Камчатской зоны субдукции. Комплексный анализ геолого-геофизических данных о глубинном строении вулканических и гидротермальных систем, взаимосвязи вулканического процесса с региональной сейсмотектоникой, окружающей средой и климатом. Геоэкологические аспекты взаимодействия регионального вулканизма и криосферы Камчатки» (№ FWME-2024-0009).

1. ВВЕДЕНИЕ

Гидротермальные извержения вызывают особый интерес у исследователей во всем мире [Moyle et al., 1990; Browne, Lawless, 2001; White, 1955; Eichelberger et al., 2020; Morgan et al., 2023; Rey-Devesa et al., 2023]. Обусловлено это тем, что гидротермальные извержения могут быть тесно связаны с рудообразованием, приводить к разрушениям сооружений геотермальных станций и трубопроводов; присутствие ряда гидротермальных минералов в выбросах позволяет получить информацию о субповерхностных температурах и типах гидротерм. Также при освоении ресурсов термальных полей современных действующих гидротермальных систем необходимо учитывать риски гидротермальных взрывов и сопутствующих явлений типа обвалов и оползней. Известны случаи, когда гидротермальные извержения приводили к гибели людей, как, например, трагические события на озерах Ниос и Манун (1984 и 1986 гг.) в Республике Камерун [Ionina, Kubeev, 2001]. Таким образом, прежде чем приступить к разработке новых гидротермальных месторождений, важно учитывать возможность и оценивать вероятность в этом районе таких событий.

Термальные проявления Южных Курильских островов изучены достаточно подробно, однако в научной

литературе, посвященной Курильским островам, описание гидротермальных взрывов встречается редко и в основном связано с извержением в кратерных областях вулканических построек [Menyailov et al., 1969; Korzhinsky et al., 2004].

В 2022 г. исследователям стало известно о термальном озере Утиная Баня на о. Итуруп [Degterev et al., 2022]. В 2023 г. вышла статья, в которой высказывалось предположение о происхождении озера в результате серии гидротермальных взрывов [Khubaeva et al., 2023]. Спустя год, после проведения дополнительных полевых работ, у авторов появилось достаточно материала, который позволяет более уверенно говорить о генезисе оз. Утиная Баня.

Цель работы – определение генезиса уникального маарового термального оз. Утиная Баня по комплексу данных, оценка физико-химических характеристик озера и рисков гидротермальных взрывов.

2. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Остров Итуруп является самым крупным островом Большой Курильской гряды. Состав и строение позднекайнозойских отложений Курильской дуги указывает на существование здесь интенсивных и длительных процессов вулканизма [Piskunov, 2004].

Остров относится к Большекурильской структурно-фациальной зоне с широко развитыми вулканическими и вулканогенно-осадочными образованиями неогенового и четвертичного возраста, которые прорываются многочисленными экструзивными, интрузивными, субвулканическими телами различного состава [State Geological Мар..., 2002]. Наиболее широкое распространение на о. Итуруп получили породы неогенового возраста [Gorshkov, 1967]. Неогеновые отложения слагают фундамент четвертичных вулканических построек и обнажаются на поверхности. Самой древней в неогеновом разрезе (более 1200 м) острова является рыбаковская свита (средний - верхний миоцен). Породы представлены переслаивающимися пачками вулканогенно-осадочных и вулканокластических пород. На рыбаковской свите залегает фрегатский вулканический комплекс, сложенный эффузивно-пирокластическими образованиями среднего и основного состава (370 м). На Южных Курильских островах

локально распространена камуйская свита, которая выполняет в основном плиоценовые палеодепрессии. Фрегатский вулканический комплекс и камуйская свита согласно перекрываются пемзовыми песками и песчаниками головинской свиты. Нижняя граница неогена в Большекурильской структурно-формационной зоне не установлена [Gladenkov et al., 1998]. Четвертичными образованиями сложены вулканические аппараты, отложения морских террас, делювиально-пролювиальные плащи под склонами гор.

Остров Итуруп имеет мозаичное строение. На острове выделяется серия продольных и поперечных разломов и разрывных нарушений (рис. 1), определяющих расположение термальных вод.

В центральной части острова выделяется два крупных дуговых разлома [Asaulov et al., 1982], с которыми генетически связаны термальные проявления и зоны формирования термальных вод. Первый разлом протягивается от с. Горячие Ключи до с. Рейдово.



Рис. 1. Тектонические нарушения центральной части о. Итуруп (за основу взята тектоническая схема [Pchelkin et al., 1986; Khubaeva et al., 2023]).

Fig. 1. Tectonic deformations in the central part of Iturup Island (based on the tectonic scheme of [Pchelkin et al., 1986; Khubaeva et al., 2023]).

Второй расположен на 20–30 км южнее. С этим разломом связаны активные вулканы Иван Грозный, Мачеха, Тебенькова, Баранский (рис. 1).

3. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В 2020–2021 гг. нами были проведены исследования в районе оз. Утиная Баня, полученные результаты позволили сделать предположение о том, что озеро имеет взрывное происхождение и представляет собой маар, образовавшийся в результате серии гидротермальных извержений [Khubaeva et al., 2023]. Однако полученных данных было недостаточно для того, чтобы делать выводы о происхождении озера, поэтому в 2022–2023 гг. были выполнены дополнительные исследования:

1) построена 3D модель тектонической раздробленности блока горных пород для центральной части о. Итуруп;

2) определен минеральный состав пород в шурфе 1;

3) проведена температурная съемка дна озера;

4) сделаны химические анализы свободных газов, выделяющихся со дна оз. Утиная Баня;

5) при помощи портативного газового анализатора ГАНК-4 НПО «ПРИБОР» ГАНК» (г. Москва, Россия) проведена газовая съемка над поверхностью озера;

6) получены дополнительные данные о химическом составе воды;

7) на основе данных эхолотной съемки [Khubaeva et al., 2023] и геометрического нивелирования построена 3D модель озерной котловины и вала вокруг нее.

Для идентификации разрывных нарушений на земной поверхности применялся широко распространенный в геологии метод дешифрирования космических снимков и топографических карт. При помощи метода воксельного моделирования была построена 3D модель тектонической раздробленности для центральной части о. Итуруп.

Термосъемка дна озера проводилась при помощи термопары и GPS-навигатора. Замеры температуры выполнялись по профилям с шагом 5–7 м. Всего было пройдено пять профилей вдоль озерной котловины и два профиля в крест.

Дешифрирование космоснимков. Метод дешифрирования спутниковых снимков заключается в распознавании объектов по их признакам, определении характеристик и установлении взаимосвязей с другими объектами. Использовался метод дешифрирования космических снимков разной детальности, современные разрывные тектонические нарушения выделялись с использованием методики Н.П. Костенко [Kostenko, Bryanceva, 2004].

Линеаментный анализ. На основе дешифрирования топографических карт масштаба 1:100000 и 1:50000, а также космических снимков различной детальности были построены схемы линеаментных сетей. Пространственное распределение, плотность и количество пересечений линеаментов на единицу площади являются ключевыми факторами для выделения выВоксельное моделирование (трехмерное моделирование тектонической раздробленности). Основой для построения 3D модели тектонической раздробленности послужили карты линеаментных сетей, полученных в результате дешифрирования спутниковых снимков и топографических карт масштаба 1:100000 и 1:50000. Цифровая обработка проводилась с использованием технологии геоинформационных систем (ГИС). Пространственная привязка и векторизация результатов дешифрирования выполнялись программами ArcMap и ArcView. По векторизованным данным создана единая цифровая карта линеаментов центральной части о. Итуруп.

Раздробленность геологической среды количественно оценивалась по величине удельной длины разломов (УДЛ) [Nechaev, 2010]. УДЛ представляется в виде трехмерной матрицы, из которой формируется объемное (voxel) изображение раздробленности исследованного блока. Тектоническая раздробленность кубического блока определяется отношением объема всех трещин внутри блока к его объему. Объем трещин определяется как сумма произведений длины (1), ширины раскрытия (b) и глубины проникновения (h) отдельных трещин. Для блока кубической формы с ребром а, в котором одной из граней является дневная поверхность, коэффициент тектонической раздробленности будет равен $\Sigma l \cdot b \cdot h/a^3$. По фотоизображению невозможно определить величины *b* и *h*, но для конкретной локализованной территории ширину трещин b можно считать постоянной и в расчете УДЛ не учитывать. Также, исходя из эмпирически установленного правила, что трещиноватость одной грани кубика породы адекватно отражает степень трещиноватости всего образца [Nechaev, 2010], и основываясь на принципах подобия (физические явления и объекты, обладающие подобием геометрии и физических переменных, подобны, деформация макроскопического уровня любого объема земной коры может быть рассмотрена как сумма составляющих его деформаций многочисленных объемов), можно аппроксимировать это правило и для отдельных блоков земной коры. Тогда глубину проникновения разломов *h* можно принять равной ребру а. Таким образом, определяя степень раздробленности как значение удельной длины линеаментов, равной Σ*l/a*² верхней грани блока, и увеличивая последовательно размер элементарной ячейки (куба), можно проследить раздробленность на глубину. Вычисленные значения УДЛ относятся к центру куба на глубине *a*/2.

Построение модели проводилось в несколько этапов. Сначала на карту линеаментов накладывалась квадратная сетка с размером ячейки 1 км², в пределах каждой клетки подсчитывалась суммарная длина линеаментов, нормировалась на площадь клетки, полученные значения относились к центрам кубов. Ребро каждого куба составляло 1 км. Так была составлена матрица УДЛ для глубины 0.5 км. За нулевую отметку принимался уровень моря. На следующем этапе расчетов размер ребра элементарного куба увеличивался на 200 м, и вся процедура повторялась. Полученные данные по всем глубинным уровням соединены в одну 3D матрицу (Х, У, Z, УДЛ), которая использована для объемной визуализации. Удельная длина линеаментов выражена в км⁻¹.

Метод построения 3D модели тектоничекой раздробленности блока пород подробно описан в работах [Nechaev, 2010; Taskin, Sidorov, 2014, 2015; Taskin, 2017; Sidorov, Taskin, 2017; Khubaeva et al., 2020, 2022].

Отбор образцов воды, газа. В период полевых работ в 2022 и 2023 гг. были собраны образцы термальных вод озера и источников (рис. 2).

Неконденсирующиеся газы анализировали хроматографическим методом, на базе газового хроматографа «Кристалл-5000».

Образцы воды отбирали в чистые пластиковые бутылки объемом 1 л, а для анализа на микроэлементный состав пробы отбирали отдельно в пластиковые пробирки объемом 50 мл, подкисляли для консервации азотной кислотой квалификации «осч».

Анализ водных образцов. Анализ микрокомпонентного состава проводили на квадрупольном ICP-MS масс-спектрометре Agilent 7500 с, допустимая ошибка составляла 10 %, пределы обнаружения для различных элементов варьировались от 0.0001 до 241 ppb с медианным значением 0.003 ppb (мг/т, мкг/кг). Анализы были выполнены в ЦКП «Микроанализ» при Лимнологическом институте СО РАН г. Иркутск (исполнитель к.г.-м.н. О.Г. Степанова, лаборатория междисциплинарных эколого-экономических исследований и технологий).

Определение макрокомпонентного состава водных образцов было проведено в Аналитическом центре Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Концентрации кальция, магния, натрия, калия, лития определяли методом атомно-абсорбционной и пламенноэмиссионной спектрометрии, с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра Thermo Electron SOLAAR, методики ПНДФ 14:1:2:4.137-98 и 14:1:2:4.138-98.



Рис. 2. Озеро Утиная Баня. Места отбора проб воды на химический анализ [Khubaeva et al., 2023]. **Fig. 2.** Lake Utinaya Banya. Places where water was sampled for further chemical analysis [Khubaeva et al., 2023].

Алюминий определяли фотометрически, по методике ПНДФ 14:1:2:4.166-2000. Общее содержание железа также определяли фотометрическим методом, по ПНДФ 14:1:2:4.50-96, измерения проводились с помощью спектрофотометра UV-Mini-1240 Shimadzu.

Определение pH было выполнено потенциометрически с помощью pH-метра HANNA Instruments HI 2211, по методике ПНДФ 14:1:2:3:4.121-97. Содержание фторид-ионов определено потенциометрическим методом с неопределенностью 18 %, методика соответствует ПНДФ 14:1:2:4.270-2012.

Концентрация кремнекислоты определена фотометрически, по ПНДФ 14:1:2:4:.215-06. Аммоний определен фотометрически, по методике ПНДФ 14:1:2:3.1-95. Содержание хлоридов определяли аргентометрически, по методике ПНДФ 14:1:2:3.96-97. Концентрация сульфат-иона определена турбидиметрическим методом, по образованию взвеси осадка сульфата бария, по методике ПНДФ 14:1:2:159-2000. Погрешности методик составляли 10–15 % от полученного значения, погрешность рН-метра не более 0.2 единицы рН. Определение минерального состава. Для исследования минерального состава отложений была использована рентгеновская дифрактометрия. Дифрактограммы записаны с помощью порошкового рентгеновского дифрактометра XRD 7000 MAX (Shimadzu) в диапазоне 6–65° 20 с шагом 0.1° 20, скорость сканирования 4 град/мин. Образцы растирались в агатовой ступке, съемка велась при вращении образца. Исследование проведено на базе Аналитического центра ИВиС ДВО РАН.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для центральной части о. Итуруп была построена 3D модель тектонической раздробленности с целью уточнения проницаемых зон верхней части земной коры. В разное время в этом районе исследователями [Pchelkin et al., 1986, 1993; Talovina et al., 2022] выделялась серия крупных разрывных нарушений (см. рис. 1) СВ простирания, которые также прослеживаются на 3D модели тектонической раздробленности в виде зон с высокой тектонической деструкцией (рис. 3). Высокая



Fig. 3. The 3D tectonic model (horizontal profile) (km^{-1}). 1 – SLF (specific length of the faults) isolines; 2 – the line of cross section; 3 – thermal manifestations.

плотность трещин в вулканических районах часто обнаруживается над внедренными магматическими телами. На границах таких зон нередко существуют области перехода участков питания метеорных и глубинных вод и, как следствие, на поверхность выходят термальные проявления (рис. 3).

Озеро Утиная Баня расположено на границе зоны с высокой плотностью трещин (рис. 3), трассирующей крупное дуговое разрывное нарушение (см. рис. 1). На вертикальном разрезе 3D модели (линия А–Б) (рис. 3, 4), в районе дугового разрывного нарушения (см. рис. 1), а также под оз. Утиная Баня, на глубине до 2000 м, отмечаются области аномально высокой плотности трещин, которые сливаются между собой, образуя подобие подводящих каналов, что может свидетельствовать о наличии интрузивного тела на глубине [Taskin, Sidorov, 2014; Taskin, 2016; Khubaeva et al., 2020, 2022], выполняющего роль источника теплового питания термальных выходов на дне озера. Однако такое предположение требует проверки.

Также данные эхолотной съемки котловины оз. Утиная Баня [Degterev et al., 2022; Khubaeva et al., 2023] указывают на наличие двух воронок в восточной и западной части озера. По результатам проведения термосъемки дна озера в 2023 г. была построена карта распределения температур (рис. 5). Наиболее высокие температурные значения совпадают с зонами воронкообразных углублений на дне озера [Khubaeva et al., 2023].

На рис. 5 проявлены два наиболее прогретых участка озерной котловины. Первый участок совпадает с наиболее глубокой частью озера. По данным эхолотной съемки в этом месте зафиксировано V-образное углубление, а также прослеживается акустическая брешь от подводного газогидротермального выхода [Khubaeva et al., 2023]. На поверхности воды наблюдаются выходы газа. Второй участок расположен в ЮЗ части озерной котловины и сопровождается бурлением. Температура на этих участках в зимний период колеблется от 17.0 до 18.7 °С (см. рис. 2). Средняя температура воды в озере в зимний период составляет около 15 °С.

По химическому составу и по физико-химическим характеристикам (рис. 6; табл. 1) воды оз. Утиная Баня похожи на источники, расположенные в районах активных вулканов о. Итуруп: Старозаводское сольфатарное поле (влк. Баранского), Нагорные источники (влк. Тебенькова) и источник Лопастной (влк. Иван Грозный) (рис. 6) [Markhinin, Stratula, 1977; Zharkov, 2014; Pchelkin et al., 1986].

Обобщенный ионный состав воды озера, выраженный через формулу Курлова:

$$\frac{SO_495Cl5}{Ca79Na12Mg8}$$
pH3.5,

вода хлоридно-сульфатная натрий-кальциевая, кислая, основной растворенной солью является сульфат кальция. Минерализация воды составляет около 410 мг/л, а молочно-голубой цвет обусловлен наличием в толще взвешенных частиц. Во время полевых работ авторами наблюдалась биогенная сера в виде длинных волосоподобных колоний микроорганизмов.

Окисление серы в водах озера за счет биогенных и абиогенных процессов ответственно за понижение pH, так как в любом случае приводит к появлению серной кислоты, а само поступление серы свидетельствует о вулканогидротермальной активности структур, лежащих в недрах под озером.

Отметим повышенные относительно фоновых концентрации бора, мышьяка, цинка, лития и фосфора, бария и стронция, эти элементы характерны для термальных источников современных гидротермальных систем [Taran, Kalacheva, 2023; Kalacheva et al., 2016].

Кислые сульфатные кальциевые термы неоднократно наблюдались на юге Камчатки и на Курильских островах, и приурочены они как раз к активным вулканам, к которым прилегают современные гидротермальные системы [Taran, Kalacheva, 2023; Kalacheva et

Fig. 4. The 3D model of tectonic fragmentation of the block of rock for the central part of Iturup Island, vertical section along the A–B line: *1* – SLF isolines; *2* – hydrothermal vents.

Рис. 5. Карта распределения температур на дне оз. Утиная Баня. Замеры температур выполнялись в феврале 2023 г. **Fig. 5.** Map of distribution of temperatures on the bottom of Lake Utinaya Banya. The temperatures were measured in February, 2023.

	-			-	-
Проба	UB-2-2/22	UB-4-2/22	UB-1-2/22	UB 3-1/22	UB 1-5/22
Компонент		·	·	·	
		Содержание	элементов, мг/л		
T °C	16	15	15	14	16
рН	3.5	3.6	3.5	3.4	3.5
Cl-	10.7	10.7	10.9	11.2	10.7
SO4 ²⁻	253.5	249.3	255.6	236.7	253.5
Na⁺	16.8	16.2	16.9	16.1	16.7
Mg ²⁺	5.5	5.4	5.6	5.4	5.5
K⁺	2.9	3.1	2.9	3.8	2.9
Ca ²⁺	92.7	90.0	93.3	87.9	92.4
Sr ²⁺	0.2	0.2	0.2	0.2	0.21
Al ³⁺	0.4	0.5	0.4	1.0	0.4
SiO ₂	28.4	27.6	28.5	27.9	28.1
Fe	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.12	< 0.1
Mn	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4
t(Na/K), °C	233-280	243-290	233-279	263-316	234-280
		Содержание э	лементов, мкг/л		
Li	14.20	13.7	14.3	13.1	14.1
В	81	80.0	80.0	80.0	80.0
Р	21.7	26.9	18.4	184.5	21.0
Sc	5.2	5.0	5.2	5.8	5.2
Ti	2.7	5.1	2.7	15.3	2.6
V	1.1	2.2	1.2	54.1	1.1
Ni	3.2	3.3	3.2	3.1	3.1
Zn	89.2	91.1	50.0	102.9	64.9
As	42.7	53.3	42.3	1736.0	41.7
Rb	7.0	7.0	7.2	8.2	7.1
Y	2.3	2.4	2.3	4.4	2.3
Sb	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2
Те	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2
Cs	2.4	2.4	2.4	2.6	2.5
Ва	14.7	14.9	14.8	18.2	14.9

Таблица 1. Химический состав вод, разгружающихся в оз. Утиная Баня (о. Итуруп, Курильские острова)
Table 1. Chemical composition of waters discharging into Lake Utinaya Banya (Iturup Island, the Kuriles)

Рис. 6. Расположение термальных источников (центральная часть о. Итуруп). *1* – скважины; *2* – термальные источники; *3*– населенные пункты.

Fig. 6. Location of thermal springs (central zone of Iturup Island). 1 – wells; 2 – thermal springs; 3 – settlements.

al., 2016]. Отложения гипса, бассанита и ангидрита, которые являются сульфатами кальция разной степени гидратированности, обнаруживаются на термальных полях современных гидротермальных систем Камчатки [Kiryukhin et al., 2023] и свидетельствуют о наличии сульфатных кальциевых вод.

По совокупности макро- и микрокомпонентного состава, а именно по низкому pH, высокому содержанию сульфата кальция в водах, заметному присутствию стронция и бария, мышьяка и цинка, можно сделать заключение о сходстве воды оз. Утиная Баня и вод других гидротермальных систем [Abrosimova, 2013].

В связи с этим мы полагаем, что воды озера подпитываются глубинными гидротермальными флюидами, с которыми сопряжена опасность гидротермальных взрывов при изменении вулканической активности. Воды озера кислые, в том числе за счет окисления поступающей с глубины серы, агрессивны к вмещающим породам и способствуют выщелачиванию ряда элементов (табл. 1). Поскольку оз. Утиная Баня представляет интерес не только как научный объект, но и как часть уникальных туристических, бальнеологических, стратегических ресурсов Дальнего Востока, необходимо оценивать риски повторения гидротермальных взрывов в перспективе. Для этого рассмотрим геотермометрию озера по химическому составу.

Применение классического Na/K-геотермометра, рассчитанного для равновесия полевых шпатов с водой, несмотря на удобство, наталкивается на сложности, связанные с влиянием вторичных катионообменных минералов на состав вод. На классификационном треугольнике Гиггенбаха воды оз. Утиная Баня лежат в области «магниевого угла» и относительно равновесий воды с полевыми шпатами, слюдами и хлоритом, для которых рассчитаны граничные линии [Giggenbach, 1988], являются незрелыми. Характерно то, что в областях современного вулканизма воды могут быть равновесны с вторичными катионообменными минералами, а относительно равновесий с полевыми шпатами, слюдами и хлоритами имеют «незрелый» облик. Вследствие этого в нашем случае классический Na/K-геотермометр можно использовать лишь формально, оценка температуры формирования состава вод с его помощью дает значения в пределах 230–290 °С, а для прибрежного источника UB3-1/22 (см. рис. 2) – в пределах 263–316 °С.

Высокие температуры отвечают низким значениям соотношения Na/K, которые характерны для вод озера вообще. В свою очередь, низкие соотношения Na/K могут быть связаны как с высокой температурой при формировании состава вод, так и с вторичной минерализацией, например с формированием толщ гидротермальных глин, в состав которых входит слоистый силикат монтмориллонит. Для монтмориллонита, который является эффективным катионообменником, характерны как раз невысокие соотношения Na/K в контактном растворе, и в присутствии смектита применение формулы для классического полевошпатового геотермометра дает завышенные значения, поэтому соотношение Na/K озерных вод обусловлено или контактом с монтмориллонитом, или повышенными температурами в недрах, возможны и обе причины. Давление водяного пара при этих температурах лежит в диапазоне порядка 25–75 атм, что в перспективе чревато разрушением верхнего водоупора и гидротермальным взрывом.

На рис. 7 показаны дифрактограммы отложений, взятых в ходе проходки шурфа 1 (см. рис. 2; рис. 7), с наложенными эталонными данными для дешифровки. Верхний горизонт представлен обломками пород, в составе которых определены типичные породообразующие минералы, а именно полевые шпаты ряда альбит – анортит с составом, сдвинутым в сторону альбита, и кварц, что отвечает скорее кислым исходным породам. Нижележащие слои представлены слабо окристаллизованным ромбическим гетитом Fe0(OH), магнетитом Fe₃O₄ и гидратированным гематитом Fe₂O₃(H₂O)_{*n*}, при этом доминирует гетит, а гематит и магнетит появляются в основании разреза. Сечение второго шурфа, расположенного у основания вала, представлено суглинками [Khubaeva et al., 2023].

О возможном превращении гетита в гематит и магнетит свидетельствует размытость рефлексов гематита (рис. 7), в то время как обычно гематит из исходных

Рис. 7. Минеральный состав отложений, отобранных при проходке шурфа/зачистки/обнажения на о. Итуруп в районе взрывного события оз. Утиная Баня (за основу взят разрез [Khubaeva et al., 2023]).

Fig. 7. Mineral composition of sediments sampled during drilling/clearing/revealing of the hole on Iturup Island in the area of explosive event of Lake Utinaya Banya (based on the section [Khubayeva et al., 2023]).

пород характеризуется узкими четкими рефлексами. Размытость рефлексов может объясняться малой областью когерентного рассеяния, невысокой степенью кристалличности гематита, поэтому весьма вероятно, что гетит претерпел преобразование при локальном нагреве и трансформировался в гематит. Отметим, что промежуточной фазой такого превращения является гидрогематит или протогематит, который по структуре близок гематиту [Gualtieri, Venturelli, 1999; Wolska, Schwertmann, 1989]. Стратиграфические данные Вайотапу [Hedenquist, Henley, 1985] показывают, что гидротермальные извержения развивались снизу вверх в результате локальных изменений давлений в пределах верхних 300 м гидротермальной системы. В других системах (Каверау, Новая Зеландия) [Nairn, Solia, 1980] определяются аналогичные глубины.

Для сравнения, в кальдере Узон, где расположены многочисленные термальные источники, есть оз. Банное, расположенное неподалеку от кордона и по всем признакам имеющее мааровое происхождение. Состав его вод:

$$\frac{SO_481HCO_311Cl8}{Ca36Na30Mg25}pH5.4,$$

соотношение Na/K низкое, около 3.6, а температура, рассчитанная по геотермометру для полевых шпатов, порядка 280 °C. Но оз. Банное в кальдере Узон обрамлено толщей глинистых отложений, которые могут искажать значения температуры, полученные с помощью классического геотермометра, за счет присутствия монтмориллонита завышать их. Явных толщ аргиллизированных пород, глинистых плащей вокруг оз. Утиная Баня не найдено, что не исключает присутствия монтмориллонита в почвах и некоторого его влияния на состав вод [Sergeeva et al., 2023]. Воронкообразный профиль дна озера [Khubaeva et al., 2023], перевернутый/нарушенный порядок отложений на бортах озера, когда осадочные озерные отложения оказались погребены под слоем породообразующих минералов (рис. 7), свидетельствуют о том, что гидротермальные взрывы в истории озера случались. Характерные для гидротермальных взрывов температуры, составляющие сотни градусов, после взрыва вызвали прогрев гетитовых отложений и частичное превращение гетита в магнетит и гематит. Отметим восстановленный характер флюидов, поскольку имел место не только прогрев, но и переход гематита в магнетит.

В настоящее время, возможно, идет подготовка к новому гидротермальному взрыву, о чем детально можно будет говорить лишь после дополнительного комплекса исследований, в том числе мониторинговых.

Свободно выделяющиеся со дна озера газы по составу близки к составу атмосферы, но сдвинуты в сторону азот-аргоновой грани, а не в сторону тех составов воздуха, которые характерны для его водных растворов при разных температурах. Для сравнения на график (рис. 8) нанесены данные из работы [Kalacheva et al., 2022], и видно, что озерные газы являются результатом смешения глубинной вулканогидротермальной компоненты и воздуха атмосферы, так как составы газов источников лежат между составом глубинных газов и составом воздуха. Состав свободно выделяющихся газов указывает скорее на глубинный источник флюидов и глубинное тепловое питание. Содержание СО₂ в свободно выделяющихся газах оз. Утиная Баня составляет порядка 0.16 об. %, а на источниках мыса Конакова не менее 5.7 об. %.

Полевая съемка газов, выделяющихся со дна озера, показала довольно заметные содержания метана и

Рис. 8. Состав воздушных газов оз. Утиная Баня, свободно выделяющихся газов термальных вод о. Итуруп [Kalacheva et al., 2022], состав воздуха, растворенного в воде при различных температурах; треугольник состава масштабирован для удобства восприятия.

Fig. 8. Composition of air gases in Lake Utinaya Banya, emitting gases from thermal waters on Iturup Island [Kalacheva et al., 2022], composition of air dissolved in water at different temperatures; composition triangle scaled for better understanding.

зафиксировала следы присутствия диметилсульфоксида (ДМСО C_2H_6SO), диметилсульфида (ДМС C_2H_6S), сероуглерода (С S_2). Концентрации метана лежат в пределах 0.01–0.03 об. %, что совпадает с данными по свободным газам мыса Конакова [Kalacheva et al., 2022]. Метан, ДМС могут быть как биогенного, так и глубинного происхождения, а ДМСО является продуктом окисления ДМС. Концентрации диметилсульфоксида и диметилсульфида лежали в пределах 0.15–0.30 и 0.90–3.30 мг/м³ соответственно, сероуглерода – 0.08– 0.50 мг/м³. Мониторинг малых компонент газов оз. Утиная Баня представляет интерес, в частности, для выяснения сезонных колебаний концентраций.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование осадочных и взрывных отложений. Верхний горизонт около озера состоит из плотных агрегатов гетита [Khubaeva et al., 2023]. Слабо окристаллизованный гетит образовался при осаждении соединений железа из вод озера, при подпитке термальными источниками. Гетит – это типичная форма, в которой кристаллизуется окисленное железо в условиях разбавленных растворов в слабокислых - близнейтральных средах [Krauskopf, 1963], а эти условия отвечают исследуемому озеру, так как растворимость гетита значительно ниже растворимости сульфатов и хлоридов железа. Присутствие гематита и магнетита в нижней части гетитовых отложений может свидетельствовать о локальных прогревах основания толщи отложений, так как дегидратация, то есть потеря воды, идет при нагревании, а гематит является именно продуктом дегидратации гидроокислов железа и гетита.

Рис. 9. Отложения гидротермального взрыва (Мутновское геотермальное месторождение, Камчатка).

Fig. 9. Deposits of the hydrothermal explosion (Mutnovo geothermal deposit, Kamchatka).

Обращает на себя внимание последовательность минеральных составов исследуемых слоев. Породообразующие минералы располагаются над гидрогенным гетитом, и это нельзя объяснить геоморфологическими или рельефными условиями, которые могли бы обеспечить снос и отложение материала поверх осадочных отложений. В связи с этим наличие породообразующих минералов, залегающих поверх мощного слоя осадочного гетита, может объясняться взрывным событием, которое перевернуло естественно сформировавшуюся последовательность слоев, так как породообразующие минералы должны располагаться под слоем осадочных гетитовых отложений. После взрыва поток горячих флюидов вызвал локальные прогревы основания толщи, вследствие чего образовались магнетит и гематит, и не случайно гематит и магнетит встречаются у основания зачистки, в нижних горизонтах.

Похожий порядок отложений наблюдался на Мутновском геотермальном месторождении (рис. 9) после гидротермального взрыва, произошедшего весной 2024 г.

В результате взрыва образовалась интенсивно парящая воронка с размерами примерно 200×140 м, глубиной порядка 30 м. Взрыв произошел на месте локализации скважин, через которые под давлением разгружалась горячая пароводяная смесь. Ранее длительная разгрузка пароводяной смеси привела к формированию вокруг скважин отложений аморфного кремнезема, который образовывался из парогазовой смеси, и было точно известно его происхождение. После гидротермального взрыва практически весь аморфный кремнезем оказался погребенным под рыхлым, вынесенным взрывом материалом. Проводя аналогию, мы считаем, что породообразующие минералы, залегающие над осадочным гетитом в районе оз. Утиная Баня, вынесены гидротермальным взрывом.

На основе полученных нивелирных профилей и данных батиметрической съемки [Degterev et al., 2022; Khubaeva et al., 2023] была построена 3D модель оз. Утиная Баня (рис. 10), на которой отчетливо виден вал, окружающий озеро, а также углубление на дне озера. По данным батиметрической съемки дно озера представляет собой две воронки с выходом газа к поверхности [Khubaeva et al., 2023]. Все это может свидетельствовать в пользу взрывного происхождения озера.

Следует отметить, что питание озера осуществляется за счет грунтовых вод и атмосферных осадков. Вал, обрамляющий озерную котловину, ограничен сопками, представляющими собой небольшую котловину, открытую на СЗ (см. рис. 2). Из озера вытекает ручей с расходом воды в зимний период около 1.9–2.0 м³/с. Площадь водосбора озера составляет 3600 м³. Сезонно понижение между озерным валом и бортами окружающих озеро сопок заполняется атмосферными осадками, формирующими временный водоток, питающий озеро (см. рис. 2). Не исключено, что были периоды, когда уровень воды поднимался настолько высоко, что озерный вал оказывался под водой. Этим можно объяснить наличие в верхних слоях шурфа (см. рис. 7) темно-зеленых суглинков небольшой мощности (до 20 см), которые могут интерпретироваться как мелководное дно, этим же можно объяснить осаждение гетита.

Концептуальная модель гидротермальной системы оз. Утиная Баня. По линии А–Б (рис. 11) построен профиль, на основе которого была составлена схема гидротермально-магматической системы: р. Аргунь –

Рис. 10. 3D модель рельефа вокруг озера Утиная Баня. **Fig. 10**. 3D terrain model around Lake Utinnaya Banya.

крупное разрывное нарушение СВ простирания – оз. Утиная Баня – разрывное нарушение СВ простирания, восходящий поток гидротерм (рис. 11).

Температура. Выделенные на схеме глубинного строения оз. Утиная Баня изотермы частично основаны на данных замеров дна озерной котловины, максимальные температуры здесь составляют 19–25 °С, а также на данных, полученных в результате применения Na/K геотермометров. Расчеты по геотермометрам указывают на температуру 230–290 °С, глубина этих изотерм неизвестна, поэтому авторы использовали данные поисковой скважины 2к, расположенной в р-не пос. Рейдово, в 6 км от оз. Утиная Баня [Pchelkin et al., 1986].

По результатам термометрии геотермический градиент в скважине составляет 5.48 °С на 100 м. Температура в устье скважины в 1985 г. составляла 21 °С, тогда на глубине около 1200 м температура должна составлять около 252 °С.

Воронки гидротермального взрыва. По данным эхолотной съемки, на дне оз. Утиная Баня выделяется два воронкообразных углубления, сопряженных с зонами разгрузок на поверхность термальных вод.

Малоглубинные гидротермальные взрывы являются обычными на активных геотермальных системах. Такие извержения могут быть обусловлены изменениями локального теплового потока в тех местах, где миграция потока пара изменялась в связи с отложениями

Рис. 11. Схема гидротермально-магматической системы оз. Утиная Баня. *1* – термальные источники; *2* – газопаровые струи; *3* – инфильтрационные воды; *4* – температуры термальных источников; *5* – разрывные нарушения.

Fig. 11. Scheme of the hydrothermal-magmatic system of Lake Utinaya Banya. *1* – thermal springs; *2* – gas-vapour jets; *3* – infiltration waters; *4* – temperatures of thermal springs; *5* – discontinuous fault.

минералов, или там, где происходили изменения субповерхностных гидрогеологических условий [Hedenquist, Henley, 1985; White, 1955].

Сейсмические события, способствующие формированию новых и открытию уже залеченных трещин или образованию усадочных трещин, могут привести к внезапному снижению давления и резкой смене агрегатного состояния вещества в гидротермальной системе с жидкого на газообразное и, как следствие, к гидротермальному взрыву. На возможность гидротермального взрыва указывает также присутствие газов (H₂, CH₄, CO₂) в гидротермальной системе оз. Утиная Баня, наиболее вероятно имеющих вулканическое происхождение.

Разрывные нарушения и магматические очаги. Разрывные нарушения и расположение магматических очагов выделены на основе тектонической схемы, выполненной В.И. Пчелкиным и др. в 1986 г. [Pchelkin et al., 1986], а также по данным 3D модели тектонической раздробленности блока пород для центральной части о. Итуруп. Глубина магматических очагов не установлена.

В районе центральной части о. Итуруп выделяется крупный дуговой разлом (см. рис. 1), который тянется от с. Горячие Ключи до с. Рейдово. С этим разломом генетически связаны зоны формирования термальных вод (Горячие Ключи, Многоозерные, Глухие, Жаркие Воды). Вдоль разлома наблюдается большое количество интрузивных тел и термальных источников (см. рис. 1). Разлом проходит в стороне от современных вулканических систем. Очевидно то, что оз. Утиная Баня географически попадает в зону влияния этого разлома.

Типы вод в гидротермальной системе. В оз. Утиная Баня разгружаются кислые хлоридно-сульфатные натрий-кальциевые воды с повышенными концентрациями бора, мышьяка, цинка, лития и фосфора, бария и стронция. Наличие серы в воде озера может свидетельствовать о вулканогидротермальной активности структур, лежащих в недрах.

Давление в гидротермальной системе. По данным классического Na/K геотермометра определяется высокая температура (230–290 °C) формирования состава вод, свидетельствующая о том, что давление водяного пара при этих температурах лежит в диапазоне порядка 25–75 атм, что может привести к разрушению верхнего водоупора.

Состав газов, выделяющихся со дна озера. Озерные газы являются результатом смешения глубинной вулканогидротермальной компоненты и воздуха атмосферы (см. рис. 8). Состав свободно выделяющихся газов указывает на глубинный источник флюидов и глубинное тепловое питание.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в ходе исследований данные говорят о том, что термальное оз. Утиная Баня образовалось в результате серии гидротермальных взрывов, о чем свидетельствует состав воды и свободно выделяющихся газов; высокая степень тектонической раздробленности вокруг озера; высокие температуры на глубине (по данным Na/K геотермометров); наличие термальных источников на дне озера; вал, окружающий озерную котловину; перевернутый/нарушенный порядок отложений на бортах озера; наличие слоя брекчированной породы в разрезе шурфа 1.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят за помощь в организации полевых работ и консультации жителей с. Рейдово В.В. Ольховского и В.В. Тарико.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Abrosimova N.A., 2013. Geochemistry of Gas-Hydrothermal Springs of Ebeko and Mutnovsky Volcanoes. PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Tomsk, 143 p. (in Russian) [Абросимова Н.А. Геохимия газогидротермальных источников вулканов Эбеко и Мутновский: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск, 2013. 143 с.].

Asaulov G.M., Galversen V.G., Tsinman Yu.M., 1982. On the Search for Thermal Waters in the Area of the "Reidovskoy" Thermal Anomaly (Iturup Island). Report of the Iturup GGP for 1979–82. Vol. 1. Sakhalingeology, Yuzhno-Sakhalinsk, 131 p. (in Russian) [Асаулов Г.М., Гальверсен В.Г., Цинман Ю.М. О поисках термальных вод на участке «Рейдовское» термоаномалии о. Итуруп: Отчет Итурупской ГГП за 1979–82 гг. Южно-Сахалинск: Сахалингеология, 1982. Т. 1. 131 с.].

Browne P.R., Lawless J., 2001. Characteristics of Hydrothermal Eruptions, with Examples from New Zealand and Elsewhere. Earth-Science Reviews 52 (4), 299–331. https:// doi.org/10.1016/s0012-8252(00)00030-1.

Degterev A.V., Kozlov D.N., Hubaeva O.R., Khomchanovskiy A.L., 2022. Expedition to Study New Thermal Manifestations on Iturup Island in 2022. Geosystems of Transition Zones 6 (2), 130–135 (in Russian) [Дегтерев А.В., Козлов Д.Н., Хубаева О.Р., Хомчановский А.Л. Экспедиция по изучению новых термальных проявлений на о. Итуруп в 2022 г. // Геосистемы переходных зон. 2022. Т. 6. № 2. С. 130–135]. https://doi.org/10.30730/gtrz.20 22.6.2.130-135. Eichelberger J., Kiryukhin A., Mollo S., Tsuchiya N., Villeneuve M., 2020. Exploring and Modeling the Magma-Hydrothermal Regime. Geosciences 10 (6), 234. https:// doi.org/10.3390/geosciences10060234.

Giggenbach W.F., 1988. Geothermal Solute Equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca Geoindicators. Geochimica et Cosmochimica Acta 52 (12), 2749–2765. https://doi.org/ 10.1016/0016-7037(88)90143-3.

Gladenkov Yu.B., Salnikov B.A., Borovtsev A.K., Boyarinova M.E., Voevodin Yu.B., Volobueva V.I., Kovtunovich P.Yu., Shantser A.E., 1998. Resolution Interdepartmental Workshops on Paleogene and Neogene Stratigraphy of Russia: Kamchatka, Koryak Upland, Sakhalin, and Kuril Islands. Explanatory Note to Stratigraphic Schemes. GEOS, Moscow, 147 p. (in Russian) [Гладенков Ю.Б., Сальников Б.А., Боровцев А.К., Бояринова М.Е., Воеводин Ю.Б., Волобуева В.И., Ковтунович П.Ю., Шанцер А.Е. Решения рабочих межведомственных региональных стратиграфических совещаний по палеогену и неогену восточных районов России – Камчатки, Корякского нагорья, Сахалина и Курильских островов: Объяснительная записка к стратиграфическим схемам. М.: ГЕОС, 1998. 147 с.].

Gorshkov G.S., 1967. Volcanism of the Kuril Island Arc. Nauka, Moscow, 288 p. (in Russian) [Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 288 с.].

Gualtieri A.F., Venturelli P., 1999. In Situ Study of the Goethite-Hematite Phase Transformation by Real Time Synchrotron Powder Diffraction. American Mineralogist 84 (5–6), 895–904. https://doi.org/10.2138/am-1999-5-625.

Hedenquist J.W., Henley R.W., 1985. Hydrothermal Eruptions in the Waiotapu Geothermal System, New Zealand: Their Origin, Associated Breccias and Relation to Precious Metal Mineralization. Economic Geology 80 (6), 1640–1668. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.6.1640.

Ionina N.A., Kubeev M.N., 2001. 100 Great Disasters. Veche, Moscow, 497 p. (in Russian) [Ионина Н.А., Кубеев М.Н. 100 великих катастроф. М.: Вече, 2001. 497 с.].

Каlacheva E.G., Kotenko T.A., Voloshina E.V., Erdnieva D.Yu., 2022. Coastal Thermal Springs in the Central Part of Iturup Island: Macro- and Microelement Composition. Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences 3, 31–44 (in Russian) [Калачева Е. Г., Котенко Т.А., Волошина Е.В., Эрдниева Д.Ю. Береговые термальные источники центральной части о. Итуруп: макро-и микроэлементный составы // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2022. № 3. С. 31–44]. https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-3-55-31-44.

Kalacheva E.G., Rychagov S.N., Nuzhdaev A.A., Koroleva G.P., 2016. The Geochemistry of Steam Hydrothermal Occurrences in the Koshelev Volcanic Massif, Southern Kamchatka. Journal of Volcanology and Seismology 10, 188–202. https://doi.org/10.1134/S0742046316030040.

Khubaeva O.R., Bergal-Kuvikas O.V., Sidorov M.D., 2020. Identification of Ruptures and Their Interaction with Hydrothermal–Magmatic Systems on Northern Paramushir Isl. (Kuril Islands, Russia): 3D Modeling of Tectonic Fragmentation. Geotectonics 54, 785–796. https://doi.org/10.11 34/S0016852120060072.

Khubaeva O.R., Bergal-Kuvikas O.V., Sidorov M.D., 2022. The Formation and Recharge of the Verkhne-Yuriev Thermal Springs, Paramushir Island, Kuril Islands. Journal of Volcanology and Seismology 16, 206–220. https://doi.org/ 10.1134/S0742046322030034.

Khubaeva O.R., Degterev A.V., Kozlov D.N., Khomchanovskii A.L., Zharkov R.V., Batanov F.I., 2023. Morphology and Specific Features of Formation of Thermal Lake Utinaya Banya (Iturup Island, Southern Kuril Islands). Russian Geology and Geophysics 64 (9), 1048–1057. https://doi.org/ 10.2113/RGG20234551.

Kiryukhin A.V., Sergeeva A.V., Usacheva O.O., 2023. Modeling of the Thermal-Hydrodynamic and Chemical Regime of Geyser Reservoir (Valley of Geyser, Kamchatka). Geothermics 115, 102808. https://doi.org/10.2139/ssrn.4459217.

Когzhinsky M.A., Bocharnikov R.E., Tkachenko S.I., Zhdanov N.N., Shteinberg G.S., 2004. Fumarole Activity of Kudryavy Volcano in the Period 1990–1999. Phreatic Eruption of 1999. In: Experimental Mineralogy. Some Results at the Turn of the Century. Vol. 2. Nauka, Moscow, p. 65–92 (in Russian) [Коржинский М.А., Бочарников Р.Е., Ткаченко С.И., Жданов Н.Н., Штейнберг Г.С. Фумарольная активность вулкана Кудрявый в период 1990–1999 гг. Фреатическое извержение 1999 г. // Экспериментальная минералогия. Некоторые итоги на рубеже столетий. М.: Наука, 2004. Т. 2. С. 65–92].

Коstenko N.P., Bryanceva G.V., 2004. On the Problem of Structural-Geomorphological Interpretation in Closed Spaces. Moscow University Geology Bulletin 4, 34–38 (in Russian) [Костенко Н.П., Брянцева Г.В. К проблеме структурно-геоморфологического дешифрирования в условиях закрытых пространств // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2004. № 4. С. 34–38].

Krauskopf K.B., 1963. Separation of Manganese and Iron in the Sedimentary Process. In: Geochemistry of Lithogenesis. Inostrannaya Literatura, Moscow, p. 259–294 (in Russian) [Краускопф К.Б. Разделение марганца и железа в осадочном процессе // Геохимия литогенеза. М.: Иностранная литература, 1963. С. 259–294].

Markhinin E.K., Stratula D.S., 1977. Hydrotherms of the Kuril Islands. Nauka, Moscow, 212 p. (in Russian) [Мархинин Е.К., Стратула Д.С. Гидротермы Курильских островов. М.: Наука, 1977. 212 с.].

Мепуаilov I.A., Nikitina L.P., Khramova G.G., 1969. Gas-Hydrothermal Eruption of Ebeko Volcano in February – April 1967. Bulletin of Volcanological Stations 45, 3–6 (in Russian) [Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Храмова Г.Г. Газо-гидротермальное извержение вулкана Эбеко в феврале – апреле 1967 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1969. Вып. 45. С. 3–6].

Morgan L.A., Shanks W.C.P., Puerce K.L., Iverson N., Schiller C.M., Brown S.R., Zahajska P., Cartier R. et al., 2023. The Dynamic Floor of Yellowstone Lake, Wyoming, USA: The Last 14 k.y. of Hydrothermal Explosions, Venting, Doming, and Faulting. GSA Bulletin 135 (3–4), 547–574. https:// doi.org/10.1130/B36190.1. Moyle A.J., Doyle B.J., Hoogvliet H., Ware A.R., 1990. Ladolam Gold Deposit, Lihir Island. In: F.E. Hughes (Ed.), Geology of the Mineral Resources of Australia and Papua New Guinea. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, p. 1793–1805.

Nairn I.A., Solia W., 1980. Late Quaternary Hydrothermal Explosion Breccias at Kawerau Geothermal Field, New Zealand. Bulletin of Volcanology 43, 1–13. https://doi.org/ 10.1007/BF02597607.

Nechaev Yu.V., 2010. Lineaments and Tectonic Break. Remote Study of the Internal Structure of the Lithosphere. Publishing House of the Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, 215 c. (in Russian) [Нечаев Ю.В. Линеаменты и тектоническая раздробленность. Дистанционное изучение внутреннего строения литосферы. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2010. 215 с.].

Pchelkin V.I., Galversen V.G., Taranukha V.I. et al., 1986. On the Search for Thermal Waters in the Central Part of Iturup Island. Report of the Iturup GGP for 1977–86. Sakhalingeologiya, Yuzhno-Sakhalinsk, 1496 p. (in Russian) [Пчелкин В.И., Гальверсен В.Г., Тарануха В.И. и др. О поисках термальных вод в центральной части о. Итуруп: Отчет Итурупской ГГП за 1977–86 гг. Южно-Сахалинск: Сахалингеология, 1986. 1496 с.].

Рсhelkin V.I., Ostapenko S.V., Gorobets G.I. et al., 1993. Results of Preliminary Exploration of Steam-Hydrothermal Springs at the "Kipyashchii" Site of the Okeanskoye Field (Iturup Island) as of 01.11.92. Report of the Iturup GGP on Work for 1987–1992. Vostokgeologiya, Yuzhno-Sakhalinsk, 370 p. (in Russian) [Пчелкин В.И., Остапенко С.В., Горобец Г.И. и др. Результаты предварительной разведки парогидротерм на участке «Кипящий» Океанского месторождения (о. Итуруп) по состоянию на 01.11.92 гг.: Отчет Итурупской ГГП по работам за 1987–1992 гг. Южно-Сахалинск: Востокгеология, 1993. 370 с.].

Рiskunov B.N., 2004. The Nature of Basaltoides External and Internal Kuril Ridges. Lithosphere 3, 97–109 (in Russian) [Пискунов Б.Н. Природа базальтоидов Большой и Малой Курильских гряд // Литосфера. 2004. № 3. С. 97–109].

Rey-Devesa P., Prudencio J., Benítez C., Bretón M., Plasencia I., León Z., Ortigosa F., Gutiérrez L., Arámbula-Mendoza R., Ibáñez J.M., 2023. Tracking Volcanic Explosions Using Shannon Entropy at Volcán de Colima. Scientific Reports 13 (1), 9807. https://doi.org/10.1038/s41598-023-36964-x.

Sergeeva A.V., Kiryukhin A.V., Usacheva O.O., Rychkova T.V., Kartasheva E.V., Nazarova M.A., Kuzmina A.A., 2023. The Impact of Secondary Mineral Formation on Na-K-Geothermometer Readings: A Case Study for the Valley of Geysers Hydrothermal System (Kronotsky State Nature Biosphere Reserve, Kamchatka). Journal of Mining Institute 262, 526–540 (in Russian) [Cepreeba A.B., Кирюхин А.B., Усачева О.О., Рычкова Т.B., Карташева Е.B., Назарова М.А., Кузьмина А.А. Влияние вторичного минералообразования на показания Na-K-геотермометра на примере гидротермальной системы Долины гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) // Записки Горного института. 2023. № 262. С. 526–540].

Sidorov M.D., Taskin V.V., 2017. Voxel Model of the Fragmentation of the Crust in Areas of the Geothermal Field (Kamchatka). Mining Informational and Analytical Bulletin S32, 336–341 (in Russian) [Сидоров М.Д., Таскин В.В. Воксельная модель раздробленности коры в районах геотермальных месторождений (Камчатка) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № S32. C. 336–341]. https://doi.org/10.25018/0236-14 93-2017-12-32-336-341.

State Geological Map of the Russian Federation, 2002. Kuril Series. Scale of 1:200000. Sheets K-55, L-55. Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg, 269 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Курильская. Масштаб 1:200000. Листы K-55, L-55: Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2002. 269 с.].

Talovina I.V., Krikun N.S., Yurchenko Y.Y., Ageev A.S., 2022. Remote Sensing Techniques in the Study of Structural and Geotectonic Features of Iturup Island (The Kuril Islands). Journal of Mining Institute 254, 158–172 (in Russian) [Таловина И.В., Крикун Н.С., Юрченко Ю.Ю., Агеев А.С. Дистанционные методы исследования в изучении структурно-геологических особенностей строения о. Итуруп (Курильские острова) // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 158–172]. https://doi.org/10. 31897/PMI.2022.45.

Taran Y., Kalacheva E., 2023. Seawater Hydrothermal System in the Middle of the Kuril Arc: Yankich Island, Ushishir Archipelago. Journal of Volcanology and Geothermal Research 436, 107784. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores. 2023.107784.

Таskin V.V., 2016. The Comparison of the Model of the Tectonic Break of Earth Crust and Results of Gravity Survey. Mining Informational and Analytical Bulletin S31, 138–144 (in Russian) [Таскин В.В. Сопоставление модели тектонической раздробленности земной коры с результатами гравиметрических исследований // Горный информационно-аналитический бюллютень. 2016. № S31. C. 36–41].

Таskin V.V., 2017. Short Overview of Foreign Experience of Lineament Analysis Exploitation in a Sphere of Geology. Mining Informational and Analytical Bulletin S32, 138– 144(in Russian) [Таскин В.В. Краткий обзор зарубежного опыта применения линеаментного анализа в геологии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № S32. C. 138–144]. https://doi.org/10. 25018/0236-1493-2017-12-32-138-144.

Таskin V.V., Sidorov M.D., 2014. 3-D Model of Tectonic Break of Earth Crust Created Using Satellite Optical Data. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space 11 (2), 243–252 (in Russian) [Таскин В.В., Сидоров М.Д. Трехмерная модель тектонической раздробленности земной коры, созданная с использованием космической видеоинформации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 243–252]. Taskin V.V., Sidorov M.D., 2015. The Algorithm of Three-Dimensional Model Creation in the Environment of GIS with Results of Aerospace Image Decipherment Exploitation, Evaluation of It Reliability. Geoinformatics 1, 21–27 (in Russian) [Таскин В.В., Сидоров М.Д. Алгоритм создания трехмерной модели тектонической раздробленности в среде ГИС по результатам дешифрирования аэро- и космоснимков, оценка ее достоверности // Геоинформатика. 2015. № 1. С. 21–27].

White D.E., 1955. Violent Mud-Volcano Eruption of Lake City Hot Springs, Northeastern California. GSA Bulletin 66 (9), 1109–1130. https://doi.org/10.1130/0016-7606(19 55)66[1109:VMEOLC]2.0.C0;2.

Wolska E., Schwertmann U., 1989. Nonstoichiometric Structures During Dehydroxylation of Goethite. Zeitschrift Für Kristallographie – Crystalline Materials 189 (1–4), 223–238. https://doi.org/10.1524/zkri.1989.189. 14.223.

Zharkov R.V., 2014. Thermal Springs of the South Kuril Islands. Dal'nauka, Vladivostok, 378 p. (in Russian) [Жарков Р.В. Термальные источники Южных Курильских островов. Владивосток: Дальнаука, 2014. 378 с.].