

Научная статья

УДК 550.4:556.314(571.6)

DOI: 10.37102/0869-7698_2023_230_04_9

EDN: SANVRV

Геологическое строение и гидрогеохимические характеристики термального месторождения Теплый Ключ

А.А. Павлов✉, И.В. Брагин, Г.А. Челноков,
Б.И. Челнокова, Н.А. Харитоновна

Андрей Андреевич Павлов

инженер, аспирант

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

Andreyapvlov792@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8793-4871>

Иван Валерьевич Брагин

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

bragin_ivan@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3280-716X>

Георгий Алексеевич Челноков

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Геологический институт РАН, Москва, Россия

geowater@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6020-9277>

Берта Ивановна Челнокова

кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник

Владивостокский филиал Дальневосточного научного центра физиологии и патологии дыхания – Научно-исследовательский институт медицинской климатологии и восстановительного лечения, Владивосток, Россия

berta-20@mail.ru

Наталья Александровна Харитоновна

доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

tchenat@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0855-3385>

Аннотация. Приведены современные геохимические данные о воде термального месторождения Теплый Ключ, расположенного в восточной части горной системы Сихотэ-Алинь. Согласно ранним исследованиям (1959–2022 гг.), воды месторождения относятся

к теплым, ультрапресным, гидрокарбонатным, натриевым, кремнистым, щелочным. В практическом отношении воды исследуемого месторождения пригодны для наружного применения в лечебно-профилактических целях.

Ключевые слова: термальные воды, гидрогеохимия, бальнеология, Теплый Ключ, Дальний Восток России

Для цитирования: Павлов А.А., Брагин И.В., Челноков Г.А., Челнокова Б.И., Харитонов Н.А. Геологическое строение и гидрогеохимические характеристики термального месторождения Теплый Ключ // Вестн. ДВО РАН. 2023. № 4. С. 128–144. http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_230_04_9.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность Юрию Владимировичу Печенко за помощь в организации отбора проб на месторождении Теплый Ключ, Алексею Николаевичу Челнокову за помощь в поиске и предоставлении наиболее современных данных по месторождению Теплый Ключ, а также рецензенту журнала «Вестник ДВО РАН» за полезные замечания и ценные рекомендации, высказанные при подготовке статьи к публикации.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ДВГИ ДВО РАН FWMF-2022-0004 «Особенности геологических процессов и изменения природной среды зоны перехода от Евразийского континента к Тихому океану в антропогене».

Original article

Geological structure and hydrogeochemical characteristics of the Teply Klyuch thermal deposit

A.A. Pavlov, I.V. Bragin, G.A. Chelnokov, B.I. Chelnokova, N.A. Kharitonova

Andrey A. Pavlov

Engineer, Ph.D. student

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Andreyapavlov792@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8793-4871>

Ivan V. Bragin

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Senior Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

bragin_ivan@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3280-716X>

Georgy A. Chelnokov

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher

Geological Institute RAS, Moscow, Russia

geowater@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6020-9277>

Berta I. Chelnokova

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Researcher

Vladivostok Branch of Far Eastern Scientific Center of Physiology and Pathology of Respiration – Research Institute of Medical Climatology and Rehabilitative Treatment, Vladivostok, Russia
berta-20@mail.ru

Natalia A. Kharitonova

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy, Principal Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
tchenat@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0855-3385>

Abstract. The article presents modern geochemical data on the results of water sampling of the Teply Klyuch thermal field located in the eastern part of the Sikhote-Alin mountain system. According to the known geochemical sampling data from 1959 to 2022, the waters of the deposit were classified as warm, ultra-fresh, hydrocarbonate, sodium, siliceous, alkaline. In practical terms, the waters of the studied deposit are suitable for use in therapeutic and prophylactic purposes for external use.

Keywords: thermal waters, hydrogeochemistry, balneology, Teply Klyuch, Russian Far East

For citation: Pavlov A.A., Bragin I.V., Chelnokov G.A., Chelnokova B.I., Kharitonova N.A. Geological structure and hydrogeochemical characteristics of the Teply Klyuch thermal deposit. *Vestnik of the FEB RAS*. 2023;(4):128-144. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_230_04_9.

Acknowledgement: The authors express their deep gratitude to Yury Pechenko for his help in sampling organizing at the Teply Klyuch deposit. The authors also would like to express their deep gratitude to Alexey Chelnokov for his help in finding and providing the most up-to-date data on the study of the Teply Klyuch deposit. The authors express their sincere gratitude to the unknown reviewer of the Vestnik FEB RAS for useful comments and valuable recommendations made in the preparation of the article for publication.

Funding. Work was carried out within the framework of the state task of the Far East Geological Institute FWMF-2022-0004 “Geological processes and environmental changes in the transition zone from the Eurasian continent to the Pacific Ocean in the Anthropogenic period”.

Введение

Природные воды интересовали человека с древнейших времен, поскольку оказывали существенное влияние на состояние его здоровья. С развитием науки появилась возможность углубленного исследования тонких механизмов формирования и накопления в подземных водах различных химически и биологически активных компонентов [1]. Изучение проблемы формирования как подземных вод в целом, так и минеральных вод в частности традиционно развивается по двум направлениям: гидродинамическому и гидрогеохимическому, которые тесно связаны между собой. Первичный анализ проблемы показывает, что без изучения состава горных пород и его влияния на состав подземных вод разобраться в процессах формирования месторождений довольно трудно. Подземные минеральные термальные воды – сложные многофазные системы, содержащие в растворенном виде различное количество веществ, как органических, так и неорганических, а также и газов, являются еще более сложными объектами для изучения в силу условий формирования и эволюции.

Представляемая статья содержит современные сведения по геологии, гидрогеологии, гидрогеохимии и генезису термальных вод месторождения Теплый Ключ. Она посвящена решению основных задач гидрогеохимического направления, т.е. генезису вод, изучению процессов, происходящих в них, выявлению факторов, влияющих на их состав, оценке взаимодействия вод с породами, установлению общих закономерностей формирования химического состава вод. Актуальность рассматриваемой проблемы обусловлена не только научным, но и практическим интересом: результаты работы могут быть использованы при поисках новых месторождений термальных вод определенного состава, для прогноза изменения состава вод, а также рациональной эксплуатации разрабатываемых месторождений.

Цели и задачи

Целями работы являлись определение характеристики термальных вод месторождения Теплый Ключ и установление условий их формирования. Решаемые задачи: 1) определение макро- и микросостава вод, 2) проведение геохимической типизации изученной термы, 3) выяснение происхождения термальных вод, 4) установление особенностей формирования термальных вод месторождения Теплый Ключ.

Методы

Из отчета по участку «Теплый Ключ» за 2017–2018 гг. [2] известно, что в эти годы отобрали пробы воды на следующие виды анализов: полный химический [3] и полный химический с определением микрокомпонентов¹ [4]. Отбор проб термальной воды на полный химический анализ с определением микрокомпонентов производился после пробной откачки из колодца, раз в квартал в период промышленной эксплуатации, а также перед проведением опытно-эксплуатационной откачки и по ее завершении. Полные химические анализы подземных вод с определением микрокомпонентов выполнены в Центральной лаборатории ОАО «Приморгеология».

В 2021–2022 гг. авторы для изучения химического состава воды отобрали 4 пробы. Ее пропускали через фильтр 0,45 мкм и наливали в 50 мл пробирки, подкисляли концентрированной азотной кислотой из расчета 2 мл кислоты на 50 мл пробы (для анализов на микрокомпоненты и катионы). Также на месте измеряли температуру, pH, Eh, TDS. Весь материал исследовали в Центре коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН. Катионы и анионы определяли на жидкостном хроматографе Shimadzu LC-10, микрокомпоненты – на масс-спектрометрах Agilent 7700х и ICAP6500 Duo.

География района месторождения

Месторождение термальных подземных вод Теплый Ключ приурочено к восточной части горной системы Сихотэ-Алинь, к долине р. Амгу, впадающей

¹ ГОСТ Р 54316-2020. Воды минеральные природные питьевые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2020. 66 с.

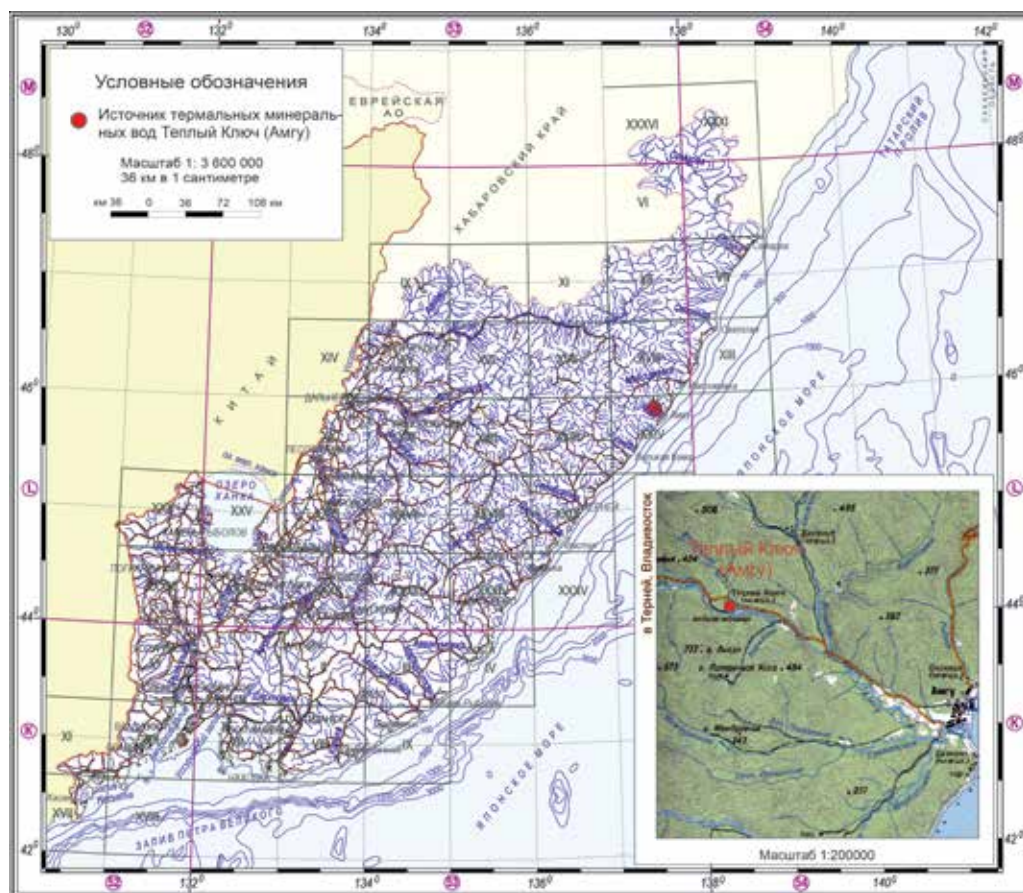


Рис. 1. Обзорная схема расположения источника Теплый Ключ

в Японское море. Источник расположен в 18 км на север от ближайшего населенного пункта – пос. Амгу и в 220 км от районного центра – пгт. Терней (рис. 1). Расстояние от краевого центра г. Владивосток 890 км.

На базе месторождения многие годы действует бальнеолечебница «Теплый Ключ». Строения бальнеолечебницы: ванный корпус, спальный корпус, столовая, жилые дома сотрудников – одноэтажные, деревянные с печным отоплением, не канализованные².

В настоящее время источник находится в ванном корпусе, каптирован колодезем. Колодец стоит на коренном, скальном основании. Дно колодца неровное, максимальная глубина 1,7 м, слой воды 1,2 м. Вода в колодце прозрачная с голубоватым оттенком. На дне видна зияющая трещина, из которой периодически поднимаются пузырьки газа.

Участок геологического и горного отвода, где непосредственно расположен источник, в предварительных границах ограничен координатами: 45°53'51"–45°53'54" с.ш., 137°31'27"–137°31'34" в.д. Абсолютные отметки поверхности 300–873 м, наивысшая точка 873 м – г. Пик. Площадь участка составляет 1 га.

² Федеральный закон «О природных лечебных ресурсах, лечебно-оздоровительных местностях и курортах» 23.02.1995 г. № 26-ФЗ.

Источник имеет координаты: 45°53'51,7"с.ш., 137°31'30,5"в.д. с абсолютной отметкой 108 м [5].

Рядом с источником проходит шоссейная автомобильная дорога, связывающая базу отдыха с селом Амгу и пгт. Терней. В экономическом отношении район работ освоен слабо, практически не заселен.

Геологическая структура района

Кузнецовский комплекс базальтов представлен кузнецовской свитой (P_{1-2}^{kz}), широко распространенной в бассейне р. Амгу. Свита сложена почти исключительно лавами базальтов, андезитобазальтов и андезитов, среди которых отмечаются редкие слои агломератовых и псефитовых туфов и единичные линзовидные прослои туффов, туфопесчаников и туфоалевролитов.

Славянский риолит-базальтовый комплекс представлен гранатовой толщей ($P_3 - N_{1gr}$). Толща была выделена в бассейне р. Амгу, где она несогласно залегает на позднемеловых вулканогенных и интрузивных образованиях. Разрез толщи представлен двумя мощными (100 и 150 м) горизонтами оливиновых базальтов, между которыми расположена пачка (80 м) переслаивающихся разномасштабных песчаников, аргиллитов, опок, реже псефитовых туфов базальтов.

*Приморский комплекс риолитовый в составе приморской серии и крупных экстррузий составляет большую часть Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса. Практически по всей его территории развита *приморская серия* (K_{pr}). Она выполняет крупные вулканотектонические депрессии, образованные в результате погружения отдельных блоков складчатого фундамента. В пределах этих впадин располагаются многочисленные и порой весьма крупные стратовулканы, сложенные вулканитами серии, а порой и более молодыми вулканогенными образованиями. Залегает резко несогласно на раннемеловых и более древних отложениях и с размывом на породах петрозевской и синанчинской свит. Состав серии сравнительно однообразный. Преобладают риолитовые и риодацитовые пирокластические образования, вулканиты дацитового состава встречаются значительно реже, а среднего состава – в единичных случаях. Характерным признаком является широкое развитие игнимбритов и спекшихся туфов.*

Ольгинский гранитовый комплекс (γK_2o) образует прерывистую полосу массивов вдоль побережья Японского моря. Гранитоиды ольгинского комплекса отличаются от сходных пород татибинского комплекса отчетливой и повсеместной повышенной намагнитченностью, благодаря чему хорошо фиксируются в магнитном поле. Ольгинские гранитоиды обнаруживают тесную петрохимическую, геохимическую, структурную, одним словом, генетическую связь с вулканитами приморской серии, образуя сложную вулканоплутоническую ассоциацию, в которой плутонические породы по времени являются завершающими. В составе комплекса обособляются две петрографические группы пород: диориты (редко габбро) и кварцевые диориты – гранодиориты, граниты, лейкократовые (аляскистовые) граниты.

В геодинамическом отношении район месторождения Теплый Ключ относится к южному сегменту Кемского террейна, представляющего собой часть зрелой островной дуги, аккрецированной к континенту в готерив-альбское время. Она сложена морскими базальт-андезитовой и флишевой формациями, которые смяты в крутые линейные складки, осложненные сдвиго-надвиговыми разрывами [6].

Участок относится к Амгинской верхнемеловой купольной интрузии и ее обрамлению, переходящему в крупную кальдеру проседания. Границы, обрамляющие палеоцен-миоценовые вулканические комплексы, приурочены к типичным эпиконтинентальным рифтовым депрессиям, так или иначе связанным с

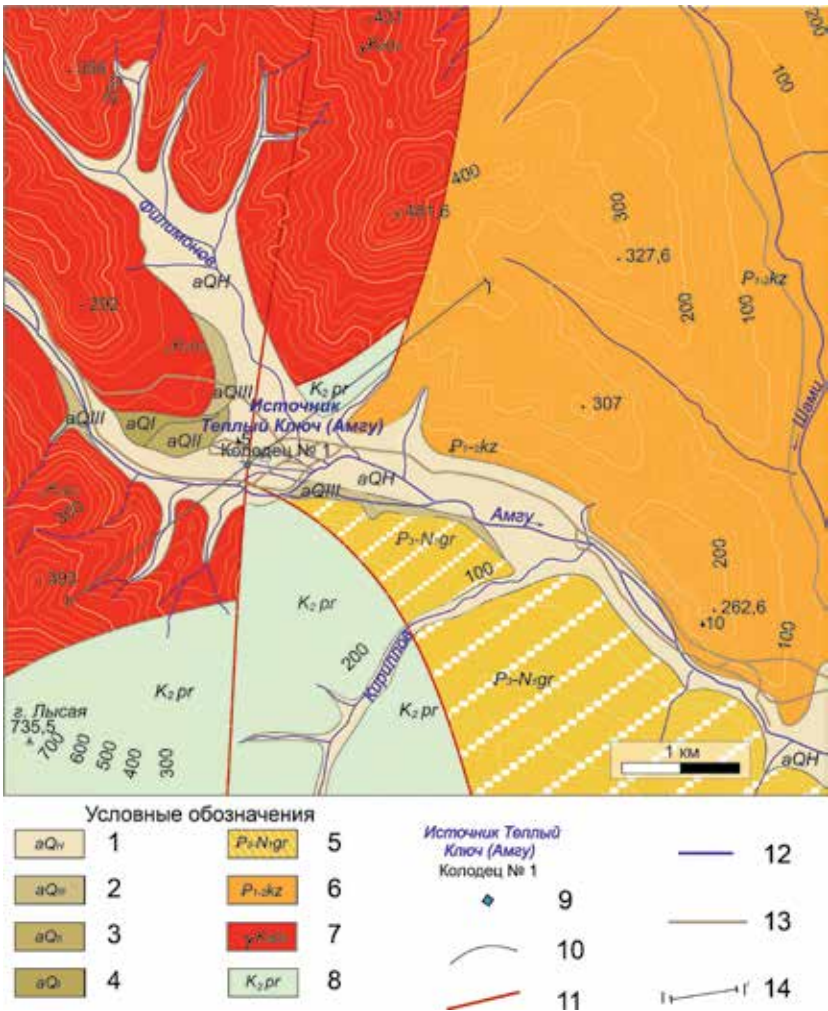


Рис. 2. Схематическая геолого-гидрогеологическая карта участка источника Теплый Ключ (цит. по: [7] с изменениями и дополнениями). 1 – аллювиальные отложения: пески, галечники, гравийники, валунники, глины, илы (до 28 м); 2 – неоплейстоцен, верхнее звено: пески, глины, гравийники, супеси, алевриты, суглинки (до 25 м); 3 – неоплейстоцен, среднее звено: галечники, глинистые пески, глины, глинистые алевриты (до 35 м); 4 – неоплейстоцен, нижнее звено: пески, алевриты, галечники, гравийники (до 50 м); 5 – олигоцен-среднемиоценовая гранатовая толща: базальты, их туфы, песчаники, аргиллиты, опоки (360 м); 6 – палеоцен-эоценовая кузнецовская свита: базальты, андезитобазальты, андезиты, трахиандезиты и трахибазальты, их туфы, туффиты, туфопесчаники, туфо-алевролиты, туфоконгломераты (300–500 м); 7 – вторая фаза граниты ольгинского комплекса; 8 – сантон-кампанская приморская серия: риолиты, риодациты, их туфы, игнимбриты, андезиты, их туфы, конгломераты, туфопесчаники, туффиты (1000–1600 м); 9 – колодец (источник термальных вод); 10 – граница водоносных горизонтов и зон; 11 – разломы различного генезиса и морфологии; 12 – реки; 13 – дорога; 14 – линия разреза I–I'

активизацией крупных швов, разделяющих разнородные геоблоки. Участок находится вблизи зоны тектонического сочленения верхнемеловой интрузивно-купольной структуры и верхнемеловых-палеогеновых вулканогенно-эффузивных пород. Зона сочленения неоднократно активизировалась. Границы верхнемеловой интрузии очень разнородны и имеют причудливую форму, в разрезе очень близки к штокам и лаколитам.

Палеогеновые и неогеновые вулканы чаще залегают горизонтально, заполняя грабенообразные понижения. На участке выхода Амгинских термальных источников повсеместно развита разломная тектоника. Наиболее крупный разлом, проходящий через весь участок с юга на север, изучен слабо и только на отдельных участках. По своей природе это левосторонний взбросо-сдвиг. Разлом сопровождается серией сближенных субпараллельных ему или же кососекущих разрывов, часто переходящих в надвиги. Предполагается, что разлом возник в позднем палеозое и его активность закончилась в миоцене. Разлом сечет как приморскую серию, так и гранатовую и кузнецовскую свиты. Смещение пород на участке составляет около 1 км. Остальные разломы являются кольцевыми и сопровождают кальдеру проседания вокруг купольной интрузии. Разломы в основном с вертикальным сместителем. Амплитуда смещения невелика.

Выходы термальных вод приурочены к оперяющим и кольцевым разломам, сопровождающим более крупное тектоническое нарушение, что характерно для прибрежных терм (рис. 2).

Геолого-гидрогеологические условия месторождения

Месторождение термальных подземных вод Теплый Ключ локализуется вокруг естественного выхода подземных вод в долине р. Амгу и имеет малые пространственные размеры.

Месторождение расположено в пределах Кемской подзоны Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса [8]. Территория вблизи источника характеризуется сильной тектонической раздробленностью. Термальные воды месторождения локализуются в зоне тектонического дробления на контакте вулканогенных и интрузивных образований верхнего мела, перекрытых с поверхности аллювиальными четвертичными отложениями.

В пределах участка и месторождения Теплый Ключ выделены водоносный горизонт четвертичных аллювиальных отложений, водоносная зона вулканогенных образований палеоген-неогена и верхнего мела, водоносная зона интрузивных образований верхнего мела (рис. 3).

Водоносный горизонт четвертичных аллювиальных отложений (аQ) приурочен к долине р. Амгу и ее притоков. Водовмещающие породы представлены песками, гравийно-галечными, валунными отложениями. Мощность горизонта составляет 5–7 м.

Предположительно, горизонт характеризуется высокой водообильностью. Гидродинамические особенности изучены только на сопредельных территориях. Воды безнапорные, поровые. Вскрываются на глубинах 0,5–4,0 м. Питание горизонт получает за счет инфильтрации атмосферных осадков, поверхностных речных вод, с которыми имеет совершенную гидравлическую связь. Разгрузка идет испарением на площади распространения водоносного горизонта. В периоды низкого стояния уровня воды разгрузка происходит в реку.

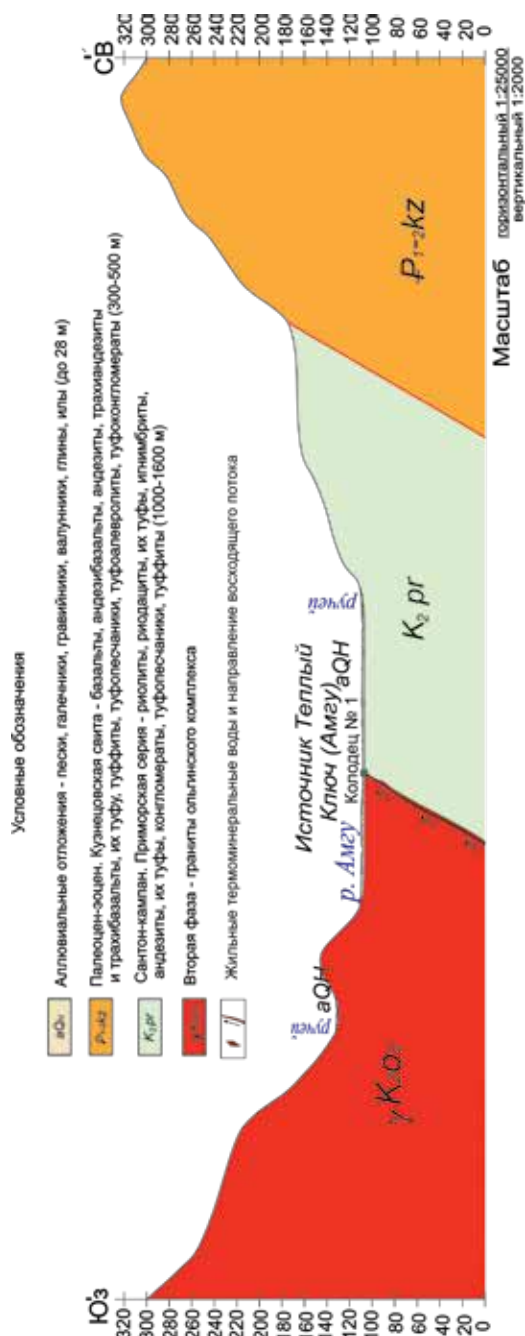


Рис. 3. Геолого-гидрогеологический разрез по линии I-I' (см. рис. 2). Разрез составлен по [2] с изменениями и дополнениями

По химическому составу воды пресные с минерализацией 0,05–0,3 г/дм³, гидрокарбонатные кальциевые, магниво-кальциевые, нейтральные и слабокислые.

Водоносный горизонт служит источником хозяйственно-питьевого водоснабжения водолечебницы. Для нецентрализованного водоснабжения используется колодец.

Водоносная зона вулкано-генных образований палеоген-неогена (P-N) распространена в восточной части и захватывает незначительную часть территории. Водовмещающие породы представлены трещиноватыми базальтами, андезито-базальтами, андезитами, их туфами, туффитами, туфопесчаниками, туфоконгломератами.

Верхняя трещиноватая зона развита в долине реки до глубины 25–30 м, на склонах и водоразделах несколько больше. Водообильность пород невысокая. Дебиты скважин не превышают 1,0–2,5 л/с при значительном понижении. Максимальные дебиты характерны для скважин, вскрывающих зоны тектонического дробления. Питание горизонта идет за счет атмосферных осадков. Разгрузка – родниками с дебитом до 0,05 л/с. Воды пресные.

Водоносная зона вулкано-генных образований верхнего мела (K₂pr) распространена в южной и юго-западной частях района. Водовмещающие породы представлены трещиноватыми риолитами, перлитами, дацитами, риодацитами, игнимбристами, андезитами,

андезито-базальтами, лавобрекчиями, их туфами, туффитами, туфоконгломератами.

Зона содержит напорные и безнапорные пресные воды. Подземные воды, приуроченные к верхней трещиноватой зоне, залегают первыми от поверхности. Статический уровень устанавливается на глубине 5–12 м. Дебит родников изменяется от 0,05 до 0,2 л/с. Дебит скважин 0,10–2,25 л/с при понижении 15–20 м (за пределами рассматриваемого района). Скважины, вскрывающие тектонические зоны, значительно обводнены. Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и разгрузки вод других горизонтов. Разгрузка идет многочисленными родниками, на заболачивание, прослеживающееся у подошвы потоков в эрозионных врезках.

По химическому составу воды гидрокарбонатные пресные. Минерализация 0,1–0,2 г/дм³. К контакту этих пород и гранитоидов приурочены выходы термальных вод источника Теплый Ключ.

Водоносная зона интрузивных образований верхнего мела (γK_2O_2). Водовмещающие породы представлены трещиноватыми гранитами, гранодиоритами.

Мощность верхней трещиноватой зоны, обусловленной процессами выветривания, составляет до 30 м. Ниже трещиноватость связана с разломами. Водобильность пород очень неравномерна. Удельный дебит скважин изменяется от 0,01 до 1,0 л/с (за пределами района). Дебит родников достигает 0,5–1,0 л/с. Максимальной водобильностью обладают хорошо проработанные зоны разломов, выходящие в приповерхностную трещиноватую зону. Воды напорные в пониженных частях рельефа, безнапорные на возвышенностях и водоразделах. Уровень подземных вод устанавливается на глубине от 3,5 до 20,0 м.

Питание подземные воды получают за счет инфильтрации атмосферных осадков на водоразделах и перетока из перекрывающих горизонтов. Разгрузка идет родниками, на заболачивание распадков, испарением.

По химическому составу воды в основном пресные, гидрокарбонатные магниевые-кальциевые. К отдельным активным зонам разломов приурочены термальные воды.

Жильные термальные воды месторождения Теплый Ключ. Термальные жильные воды являются обособленными и имеют локальное распространение, в пределах месторождения выходят на поверхность по активной (раскрытой) зоне разлома на контакте вулканогенных и интрузивных образований верхнего мела, перекрытых с поверхности аллювиальными четвертичными отложениями (рис. 2, 3) [2, 9].

Разлом не имеет сопутствующей проработанной трещиноватой зоны. Регулирующие резервуары трещинных вод большой емкости отсутствуют. Также не наблюдается значительного прогрева массива горных пород вблизи источника. В водоносном горизонте аллювиальных четвертичных отложений термальные воды частично растекаются, купол растекания не более 72 м (по данным термометрической съемки). Источник восходящий. Первоначально, в естественных условиях, термальные воды источника Теплый Ключ пробивали толщу четвертичных аллювиальных отложений и выходили на поверхность. Когда источник каптировали, уровень воды в колодеце установился на отметке не выше 0,4–0,5 м от поверхности земли. Следовательно, когда колодец не эксплуатируется, наблюдается разгрузка термальных вод в водоносный горизонт четвертичных аллювиальных отложений, что и показала термометрическая съемка.

Дебит колодца при проведении пробной откачки 0,65 л/с, или 56 м³/сут. при понижении 0,47 м. Среднесуточная температура воды жильных вод месторождения Теплый Ключ составляет 36,5–37 °С [10, 11].

С поверхности термальные воды не защищены от проникновения загрязнения. Покровные глинистые отложения в районе источника отсутствуют.

Питание как пресные, так и термальные минеральные воды получают за счет инфильтрации атмосферных осадков. Разгрузка идет родниками в пониженных частях рельефа и в долину р. Амгу.

Термальные воды являются инфильтрационными атмосферными (по исследованиям соотношения изотопов кислорода и водорода, углерода). Химический состав минеральных вод формируется под воздействием уголекислоты воздуха на вмещающие интрузивные породы.

Термальные воды имеют минерализацию 0,14–0,15 г/дм³, они щелочные – рН 9,32–9,62, по общему ионному составу гидрокарбонатные (карбонатные) натриевые [12], слабогазирующие. Вода очень мягкая (общая жесткость до 0,3 ммоль/дм³). Окисляемость 0,32–0,86 мг/дм³. Установлена повышенная концентрация кремнекислоты (63,13–78,42 мг/дм³) [2].

Из анализа условий формирования термальных вод следует:

запасы и ресурсы термальных вод соответствуют величине естественной разгрузки (родниковый сток) и несколько выше дебита опытно-эксплуатационного выпуска (в течение трех месяцев) из колодца;

термальные воды месторождения Теплый Ключ контролируются активной частью зоны тектонического дробления на контакте вулканогенных и интрузивных образований верхнего мела, перекрытых с поверхности аллювиальными четвертичными отложениями. Водовмещающие породы представлены верхнемеловыми гранитами, гранодиоритами, андезитами, диоритами, туфами, туффитами, туфоконгломератами. Термальные воды не защищены от проникновения поверхностного загрязнения³.

Химический состав воды источника Теплый Ключ

Качество термальных вод источника Теплый Ключ детально изучено по результатам полных химических анализов воды в период с 2021 по 2022 г. Получены представительные результаты химических анализов и истинные значения температуры в годовом разрезе (без разбавления термальных вод холодными).

За весь период наблюдений воды месторождения Теплый Ключ характеризуются как теплые (34–37,5 °С), ультрапресные (минерализация 0,104–0,208 г/дм³), щелочные (рН 8,1–9,7), по общему ионному составу вода гидрокарбонатная натриевая кремнистая: HCO₃ – 64–85 мг-экв.%, Na – 69–97 мг-экв.%, Si – 18,5–28,7 мг/дм³ [13].

Для характеристики качества термальной воды, помимо опробования в 2021 и 2022 гг., использованы результаты анализов проб, отобранных из источника сторонними организациями в предыдущие годы (1959–2017 гг.). Пределы изменения

³ Правила разработки и охраны месторождений минеральных вод и лечебных грязей: постановление Госгортехнадзора РФ от 06.06.2003. URL: <https://legalacts.ru/doc/postanovlenie-gosgortekhnadzora-rf-ot-06062003-n-72/?ysclid=lioh7lfio0417679578>.

содержания основных компонентов в воде источника Теплый Ключ получены по результатам шести анализов за период 1959–2005 гг., одиннадцати анализов, полученных в течение 2012–2017 гг. и четырех анализов проб, отобранных в период с 2021 по 2022 г. (табл. 1).

Согласно результатам химических анализов с 1959 по 2022 г., микрокомпонентный состав воды очень разнообразен при невысокой общей минерализации. Содержания кремния, алюминия, лития, стронция, молибдена и вольфрама повышенные, алюминия и кремния – весьма переменные (соответственно 0,01–0,18 и 18,5–28,7 мг/л). Колебания концентраций стронция и молибдена зафиксированы в пределах от 0,01 до 0,05 мг/л, лития – от 0,01 до 0,08 мг/л, вольфрама – от 0,007 и до 0,02 мг/л. Данные значения микрокомпонентного состава характерны для

Таблица 1
Химический состав (мг/дм³) вод термального месторождения Теплый Ключ

Год	Число проб	pH	Si	Na ⁺	K ⁺	Li ⁺	NH ₄ ⁺	Ca ⁺
1959	2	9,3	20,8–22	38,9–42,8	0,7	0,011–0,3	–	2,5–3,3
1973	1	9,3	18,5	41,2	0,2	0,01	–	2,4
2000	1	8,1	28,7	32,73*		0,05	0,05	4,01
2004	1	–	19,8	41*		0,08	0,05	4,01
2005	1	9,3	22,9	32,63	0,42	0,0008	0,05	4,4
2012	1	9,5	26,5	29,8	0,69	0,0064	0,165	2,2
2013	1	9,7	22,7	30,49*		0,009	0,05	2
2014	1	9,7	27,1	31,7	<0,5	0,0099	0,05	1,4
2015	2	9,5	24,7–25	29,5–32	<0,1–0,28	0,013	0,05–0,5	1,2–1,7
2016	2	9,5–9,7	25–28,2	25,2–32,3	0,50–0,53	0,011–0,015	0,5	1,9–2,6
2017	4	9,2–9,5	24,4–27	29,5–37,2	<0,1–0,5	0,0086–0,013	0,05–0,5	0,64–1,7
2021	3	8,9–9,5	23,6–24,4	32,8–33,1	0,44–0,48	0,01	0,1	0,92–1,52
2022	1	9,5	27,3	34,37	0,77	0,01	0,1	1,64
		Mg ⁺	F ⁻	Cl	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	TDS
1959	2	0,3–0,5	1–1,2	4,1–6,2	12–18,1	26,3–40,1	0,1	0,19
1973	1	3	1,2	6,4	18	41,5	0,1	0,208
2000	1	1,22	0,5	5,7	12	73,2	0,1	0,176
2004	1	0,5	0,6	7,1	8	97,6	0,1	0,15
2005	1	0,5	0,001	7,4	9	122	1	0,104
2012	1	0,115	0,55	3	14	43	0,1	0,126
2013	1	0,6	1	4	15	73,2	0,4	0,14
2014	1	0,25	0,99	3,3	13,7	61	0,2	0,14–0,15
2015	2	0,25–1	0,9–1,2	3,4–3,5	12,7–13,4	69,5–70,1	0,001–0,5	0,14
2016	2	0,25	1,2	3,6–8,3	14–14,2	61–68,6	0,5–1,3	0,14–0,16
2017	4	0,25–1	0,9–0,97	2,2–3,5	12,7–14,8	69,5–82	0,001–0,2	0,116
2021	3	0,1	0,96–1,06	3,6–3,8	13,9–14,3	60,3–62,9	0,1	0,121
2022	1	0,1	1,13	4,64	15,1	64,4	0,61	0,17–0,2

* Na + K.

Примечание. Здесь и в табл. 2: использованы данные работы [2], прочерк – нет данных.

Таблица 2

Микрокомпонентный химический состав вод месторождения Теплый Ключ (среднее содержание, мг/дм³)

Год	1959	1973	2000	2004	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2021	2022
Число проб	2	1	1	1	1	1	1	2	2	4	3	1
Fe ³	0,05	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	<0,05	0,009923	0,005842
Cu	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,000719	0,007103
Zn	0,003	0,003	0,0016	0,004	0,018	<0,01	<0,005	0,0063	0,015	0,045	0,001386	0,008353
Ni	<0,001	<0,001	0,0002	0,0002	0,026	0,025	0,056	0,016	<0,005	0,017	0,000239	0,000858
Cr	<0,001	<0,001	0,004	0,01	<0,001	<0,001	<0,001	0,006	0,006	0,0047	0,0000573	0,0000844
Pb	0,02	0,02	0,0059	0,001	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,0047	0,0091	0,000161	0,000364
V	<0,05	<0,05	0,001	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001098	0,001066
Mo	0,02	0,02	0,004	0,0026	<0,001	<0,001	<0,05	<0,001	<0,001	<0,001	0,02387	0,023806
Co	0,0003	0,0003	0,005	0,005	<0,04	<0,04	<0,04	<0,001	<0,001	<0,001	0,00000773	0,0000159
Cd	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,0000157	0,0000486
Ag	0,00007	0,00005	0,01	0,01	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0000122	0,0000137
Sr	0,023	0,025	0,05	0,05	<0,01	<0,01	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,029923	0,027048
Al	0,1	0,1	0,092	0,087	0,182	0,03	0,037	0,028	0,032	0,014	0,019303	0,0182
Mn	<0,01	<0,01	0,1	0,01	<0,04	<0,04	<0,04	0,024	0,059	0,054	0,00018	0,000403
B	<0,05	<0,05	0,05	0,05	<0,01	<0,01	<0,005	<0,001	<0,001	0,0018	0,009047	≤0,01
As	<0,01	<0,01	0,01	0,01	<0,05	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	<0,05	0,004661	0,004706
Hg	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,01	<0,01	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	–	–
U	<0,002	<0,002	0,04	0,04	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,00001	<0,00001	<0,00001	0,0000507	0,0000481
Se	<0,0001	<0,0005	<0,0001	<0,0001	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	≤0,000011	≤0,000048
Li	0,011	0,01	0,08	0,08	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,006663	0,005376
W	–	–	–	0,02	0,0064	0,009	0,01	0,013	0,0064	0,009	0,008608	0,007688

термальных вод, формирующихся в подобных геологических условиях (табл. 2) [14, 15].

Для оценки температур глубинного резервуара, в котором происходит формирование геохимического облика термальных вод, нами был использован халцедоновый геотермометр [16], доказавший свою эффективность в работе [14]:

$$T = 1032 / (4,69 - \log(\text{SiO}_2)) - 273,15.$$

Формирование химического состава термальных подземных вод источника Теплый Ключ

Схема формирования термальных (теплых) вод представляется следующим образом. На возвышенных участках при наличии раскрытых трещин разломов глубокого заложения атмосферные воды нисходящим потоком проникают на глубины 2,0–2,5 км. Под действием тепла локально прогретых в зоне разлома горных пород подземные воды приобретают температуру 30–40 °С. По расчетам, используя халцедоновый геотермометр, температура глубинного резервуара варьирует от 57,4 до 79 °С. Восходящее движение нагретых вод к поверхности, вероятно, обусловлено явлением термолифта. Разгрузка термальных вод идет по открытым трещинам в ослабленных зонах, чаще всего в речных долинах. Метеорное происхождение исходных вод подтверждается результатами изотопных исследований O^{18} и дейтерия [17]. Термальные воды гидрокарбонатные, натриевые, слабощелочные и щелочные. Если холодные подземные воды в районе по катионам существенно кальциевые, то термальные – натриевые. Также повышено содержание кремнекислоты. Преобразование состава идет при взаимодействии подземных вод, содержащих углекислоту атмосферного генезиса, с вмещающими породами, в основном гранитами [18].

В процессе реакции повышается рН раствора за счет уменьшения количества свободных кислот, повышения концентрации ионов щелочных металлов. Значительного увеличения минерализации подземных термальных вод не происходит по причине недостатка свободной углекислоты, а также непродолжительного времени взаимодействия вода–порода.

Натрий является основным катионом в термальных водах Приморья. При возрастании температуры вод содержание натрия возрастает, а кальция – падает. Как видно, натрий и кальций связаны обратной зависимостью (такая же зависимость натрия и кальция наблюдается на Горячключевом месторождении термальных вод). Термальные воды источника Теплый Ключ формируются в зоне тектонического дробления на контакте интрузивных и вулканогенных образований верхнего мела. Водовмещающими породами являются граниты, в которых содержание натрия в несколько раз превосходит содержание кальция. В силу названных причин становится понятным, почему воды здесь преимущественно натриевые. Концентрации кальция устойчивы в термальных водах Приморья и составляют 1–4 мг/дм³, что лежит внутри пределов колебаний кальция в термальных водах гранитных массивов.

Источником кремния в водах являются алюмосиликаты. Кремний мигрирует в растворе в виде полимерных соединений, соотношение которых может быть различным при различных рН среды.

Закключение

Изучение термальных вод источника Теплый Ключ показало, что они являются жильными, приурочены к зонам разломов на контакте вулканогенных и интрузивных образований верхнего мела, перекрытых с поверхности аллювиальными четвертичными отложениями.

Месторождение контролируется активной частью разлома, который проходит по руслу р. Амгу и ее водотоков, в зоне пересечения более мелким нарушением. Разлом имеет сложное строение. На ограниченном участке в зоне открытой трещиноватости, связанной с разломом, выходят жильные термальные воды, насыщенные метакремниевой кислотой.

Воды месторождения Теплый Ключ характеризуются как теплые (34–37,5 °С), ультрапресные (минерализация 0,104–0,208 г/дм³), щелочные (рН 8,07–9,71). По общему ионному составу вода гидрокарбонатная натриевая слабокремнистая: HCO₃ – 64–85 мг-экв.%, Na – 69–97 мг-экв.%, Si – 18,52–28,75 мг/дм³. По общему составу воды месторождения Теплый Ключ близки водам Кульдурского типа [19]. Из наблюдений видно, что микрокомпонентный состав воды очень разнообразен, отличается невысокими значениями, которые, однако, показывают стабильность во времени. У кремния, алюминия, лития, стронция, молибдена, и вольфрама значения более высокие и колеблются, но это характерно для вод данного типа.

Формирование термальных вод, вероятно, происходило в раскрытых трещинах разломов глубокого заложения, где атмосферные воды нисходящим потоком проникали на глубины 2,0–2,5 км и под действием тепла локально прогретых в зоне разлома горных пород приобрели температуру 30–40 °С. Температура глубинного резервуара варьирует от 57,4 до 79 °С. Восходящее движение нагретых вод к поверхности, вероятно, обусловлено явлением термолифта. Разгрузка их идет по открытым трещинам в ослабленных зонах, расположенных в речных долинах (как в случае источника Теплый Ключ).

В практическом отношении воды исследуемого месторождения применимы в лечебно-профилактических целях, наружно, в виде ванн при заболеваниях опорно-двигательного аппарата, кожных заболеваниях, последствиях ожогов^{4,5}.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Челнокова Б.И., Гвозденко Т.А., Иванова И.Л. и др. Минеральные воды Дальнего Востока. Ч. 1. Владивосток: Дальнаука, 1999. 232 с.
2. Дубинская Г.А., Исупова Т.И. и др. Отчет о результатах работ по объекту «Поиски и разведка Теплоключевого месторождения термоминеральных подземных вод» в Тернейском районе Приморского края (с подотчетом запасов по состоянию на 01.01.2018 г.). Отчет по участку «Теплый Ключ» за 2017–2018 гг. Росгеолфонд, 2018. № 237915.
3. Крайнов С.Р., Швеи В.М. Гидрогеохимия. М.: Недра, 1992. 463 с.

⁴ Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации (Минздрав России) от 31 мая 2021 № 557н «Об утверждении классификации природных лечебных ресурсов, медицинских показаний и противопоказаний к их применению в лечебно-профилактических целях» (с изменениями и дополнениями).

⁵ Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации (Минздрав России) от 31 мая 2021 № 558н «Об утверждении норм и правил пользования природными лечебными ресурсами, лечебно-оздоровительными местностями и курортами».

4. Кулаков В.В., Сидоренко С.В. Минеральные воды и лечебные грязи Приамурья. Хабаровск: Изд-во ДВГМУ, 2017. 474 с.
5. Авдеева А.Б. Основные типы минеральных вод юга Дальнего Востока (Приморский, Хабаровский края) и их ресурсы // *Вопр. изучения лечебных минеральных вод, грязей и климата: сб. науч. тр. ЦНИИКиФ. М.*, 1976. Т. 31. С. 19–30.
6. Голозубов В.В. Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2006. 239 с.
7. Касьян Е.Д., Грабко Л.И. Государственная геологическая карта СССР. Масштаб 1 : 200 000, л. L-53-24. М., 1981.
8. Белянский Г.С. Отчет по объекту № 14-10 «Создание комплекта государственной геологической карты масштаба 1:1 000 000 площади листа L-52 (Пограничный), L-53 (оз. Ханка); K-52 (Владивосток), K-53 (Находка)». URL: <https://rfgf.ru/catalog/docview.php?did=43bdd29cf8c4f79dde3b46f95a88e5a8> (дата обращения: 10.06.2023).
9. Барабанов Л.Н., Дислер В.Н. Азотные термы СССР. М.: Геоминвод, 1968. 120 с.
10. Минеральные воды и лечебные грязи Дальнего Востока: справочник / сост. Б.И. Челнокова, Т.А. Гвозденко. 3-е изд., доп. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2017. 220 с.
11. Юшакин Е.П., Радчук П.И. Отчет по обследованию минеральных источников Приморского края, проведенному Владивостокской партией Артемовской экспедиции в 1961–1966 гг. Росгеолфонд, 1968. № 288726.
12. Кирюхина В.А., Резникова А.А. Микрокомпоненты в лечебных водах азотных терм юга Дальнего Востока // *Вопросы специальной гидрогеологии Сибири и Дальнего Востока. Вып. 1. Иркутск*, 1962. С. 71–83.
13. Иванов В.В., Невраев Г.А. Классификация подземных минеральных вод. М.: Недра, 1964. 167 с.
14. Чудаев О.В., Чудаева В.А., Брагин И.В. Геохимия термальных вод Сихотэ–Алиня // *Тихоокеанская геология*. 2008. Т. 27, № 6. С. 73–81.
15. Чудаева В.А., Чудаев О.В., Челноков А.Н., Эдмундс М., Шанд П. Минеральные воды Приморья (химический аспект). Владивосток: Дальнаука, 1999. 160 с.
16. Arnorsson S., Gunnlaugsson E., Svavarsson H. The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1983. Vol. 47. P. 567–577.
17. Чудаев О.В. Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2003. 216 с.
18. Bragin I., Kharitonova N., Chelnokov G., Aseeva A., Chudaev O. REY geochemistry in ground-water from Paratunka geothermal area (Kamchatka peninsula, Far East of Russia) // *Environmental Earth Sciences*. 2018. Vol. 77. Article number: 376.
19. Лямина Л.А., Харитонов Н.А., Расторгуев А.В., Челноков Г.А., Брагин И.В. Концептуальная модель формирования азотных термальных вод в кристаллических массивах пород (на примере месторождения Кульдур) // *Вестн. Московского университета. Серия 4. Геология*. 2022. № 2. С. 78–90.

REFERENCES

1. Chelnokova B.I., Gvozdenko T.A., Ivanova I.L. et al. Mineral'nye vody Dal'nego Vostoka. Pt. 1. Vladivostok: Dal'nauka; 1999. 232 s. (In Russ.).
2. Dubinskaya G.A., Isupova T.I. et al. Otchet o rezul'tatah rabot po ob'ektu «Poiski i razvedka Teplokluychevogo mestorozhdeniya termomineral'nyh podzemnykh vod» v Ternejskom rajone Primorskogo kraja (s podotchetom zapasov po sostoyaniyu na 01.01.2018 g.). Otchet po uchastku «Teplyj Klyuch» za 2017–2018 gg. Rosgeolfond; 2018. № 237915. (In Russ.).
3. Krainov S.R., Shvets V.M. Gidrogeokhimiya. Moscow: Nedra; 1992. 463 s. (In Russ.).
4. Kulakov V.V., Sidorenko S.V. Mineral'nye vody i lechebnye gryazi Priamur'ya. Khabarovsk: DVG-MU Publ.; 2017. 474 s. (In Russ.).
5. Avdeeva A.B. Osnovnye tipy mineral'nykh vod yuga Dal'nego Vostoka (Primorskii, Khabarovskii kraja) i ikh resursy. In: *Voprosy izucheniya lechebnykh mineral'nykh vod, gryazei i klimata*. Vol. 31. Moscow; 1976. S. 19–30. (In Russ.).
6. Golozubov V.V. Tektonika yurskikh i nizhnemelovykh kompleksov severo-zapadnogo obramleniya Tikhogo okeana. Vladivostok: Dal'nauka; 2006. 239 s. (In Russ.).

7. Kas'yan E.D., Grabko L.I. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR masshtab 1 : 200 000, list L-53-24. Moscow; 1981. (In Russ.).
8. Belyanskij G.S. Otchet po ob'ektu № 14-10 "(Sozдание komplekta gosudarstvennoj geologicheskoy karty masshtaba 1:1 000 000 ploshchadi lista L-52 (Pogranichnyj), L-53 (oz. Hanka); K-52 (Vladivostok), K-53 (Nahodka)". (In Russ.). URL: <https://rfgf.ru/catalog/docview.php?did=43bdd29cf8c4f79dde3b46f95a88e5a8> [cited 10.06.2023].
9. Barabanov L.N., Disler V.N. Azotnye termy SSSR. Moscow: Geominvod; 1968. 120 s. (In Russ.).
10. Chelnokova B.I., Gvozdenko T.A. (comps.). Mineral'nye vody i lechebnye gryazi Dal'nego Vostoka: spravochnik. 3rd ed. Vladivostok: Far Eastern Federal Univ. Print; 2017. 220 s. (In Russ.).
11. Yushakin E.P., Radchuk P.I. Otchet po obsledovaniyu mineral'nyh istochnikov Primorskogo kraya, provedennomu Vladivostokskoj partiej Artemovskoy ekspedicii v 1961–1966 gg. Rosgeolfond; 1968. N 288726. (In Russ.).
12. Kiryukhina V.A., Reznikova A.A. Mikrokomponenty v lechebnykh vodakh azotnykh term yuga Dal'nego Vostoka. In: *Voprosy spetsial'noi gidrogeologii Sibiri i Dal'nego Vostoka*. Iss. 1. Irkutsk; 1962. S. 71-83. (In Russ.).
13. Ivanov V.V., Nevraev G.A. Klassifikatsiya podzemnykh mineral'nykh vod. Moscow: Nedra; 1964. 167 s. (In Russ.).
14. Chudaev O.V., Chudaeva V.A., Bragin I.V. Geokhimiya termal'nykh vod Sikhote-Alinya. *Tikhookeanskaya geologiya*. 2008;27(6):73-81. (In Russ.).
15. Chudaeva V.A., Chudaev O.V., Chelnokov A.N., Ehdmonds M., Shand P. Mineral'nye vody Primor'ya (khimicheskii aspekt). Vladivostok: Dal'nauka; 1999. 160 s. (In Russ.).
16. Arnorsson S., Gunnlaugsson E., Svavarsson H. The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1983;47:567-577.
17. Chudaev O.V. Sostav i usloviya obrazovaniya sovremennykh gidrotermal'nykh sistem Dal'nego Vostoka Rossii. Vladivostok: Dal'nauka; 2003. 216 s. (In Russ.).
18. Bragin I., Kharitonova N., Chelnokov G., Aseeva A., Chudaev O. REY geochemistry in groundwater from Paratunka geothermal area (Kamchatka peninsula, Far East of Russia). *Environmental Earth Sciences*. 2018;77:376.
19. Lyamina L.A., Kharitonova N.A., Rastorguev A.V., Chelnokov G.A., Bragin I.V. Kontseptual'naya model' formirovaniya azotnykh termal'nykh vod v kristallicheskikh massivakh porod (na primere mestorozhdeniya Kul'dur). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 4: Geologiya*. 2022;(2):78-90. (In Russ.).

