15. Родионов А. И., Клушин В. Н., Систер В. Г. Технологические процессы экологической безопасности: учебник. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2000. С. 800.
16. Шестаков В. А. О применении физико-химических методов для очистки рудничных вод и создания закладки [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.cyberleninka.ru/article/n/o-primenenii-fiziko-himicheskih-metodov-dlya-ochistki-rudnichnyh-vod-i-sozdaniya-zakladki (дата обращения: 23.03.2018).

THE STUDY OF THE PROPERTIES OF A GEOCHEMICAL BARRIER BASED ON LIMESTONE

I. V. Bardamova

Geological Institute of SB RAS, e-mail: Ruzhich@crust.irk.ru

Abstract: The use of artificial geochemical barriers is a promising direction in solving environmental problems. Carbonate materials are successfully used in the theory and practice of geochemical barriers. The paper presents the results of experimental studies of the physico-chemical properties of the natural limestone of the Zun-Naryn deposit in interaction with the mine waters of the gallery of the Western sulphide-hubnerite deposit Holtoson. Experimental work was carried out using modern methods of analysis – atomic spectrometry (OPTIMA 2000 DV) and laser diffractometry (SALD-7500nano). The study of the dependence of the degree of extraction of heavy metals by limestone depending on the size of limestone grains, on the ratio of the phases Т: Ж "limestone – mine water" and on the duration of interaction of limestone with mine water. The results of a dispersion analysis of limestone particles before and after interaction with mine water are presented.

Keywords: Artificial geochemical barrier, natural limestone, mine water, mine water treatment, method of laser diffractometry, disperse analysis

УДК: 553.078.2

МИНЕРАЛОРУДООБРАЗОВАНИЕ В ТОЛЩЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ГЛИН ПАУЖЕТСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА)[1]

О. В. Кравченко, С. Н. Рычагов

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский,
e-mail: kovina86@mail.ru; rychsn@kscnet.ru

Аннотация: С помощью проходки скважин и шурфов детально изучена толща гидротермальных глин Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка), выделено 4 основных горизонта. Под горизонтом пластичных глин в относительно сухих интенсивно сульфидизированных аргиллизитах образуются минеральные рудные ассоциации вследствие разгрузки высокотемпературных металлоносных гидротерм. Одновременно происходит вынос многих химических компонентов на дневную поверхность. Эти процессы, вероятно, определяют геохимическую и экологическую обстановку в районе геотермальных месторождений областей современного вулканизма.

Ключевые слова: термальное поле, аргиллизированные породы, гидротермальные глины, геотермальное месторождение

Введение. В областях современного вулканизма гидротермальные глины и аргиллизированные породы приурочены к участкам разгрузки термальных растворов и представляют большой интерес для оценки влияния глубинных эндогенных процессов на верхние горизонты земной коры (Рычагов и др., 2012). Многими исследователями изучены геологические и физико-химические условия образования аргиллизитов, рассмотрен минеральный состав зон серно- и углекислотного выщелачивания в общем контексте эволюции гидротермального метаморфизма вулканогенных пород, предложены механизмы формирования глинистых и некоторых рудных минералов (в частности, пирита), рассмотрены особенности процесса аргиллизации как показателя регрессивной направленности гидротермально-метасоматических процессов (Коржинский, 1951, 1982; Ерощев-Шак, 1992; Коробов, 1994; Пампура, 1977; и др.). Показано значение аргиллизированных пород как индикатора изменения температурного режима и физико-химических параметров геотермальной среды

[1] *Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-05-00007) и ДВО РАН (проект 18-2-003).*

(Русинов, 1989; Рычагов, 2003). В тоже время, детальное изучение толщи глин на термальных полях Южной Камчатки с помощью проходки скважин и шурфов позволило обратить внимание на ряд нерешенных вопросов, связанных с современным минералорудообразованием (Рычагов и др., 2009, 2010, 2015).

Настоящая работа посвящена обобщению данных о литологическом строении, распределении температур, химических и минеральных компонентов толщи гидротермальных глин Восточно-Паужетского термального поля с целью получения критериев выделения основных горизонтов глин и понимания процессов перерождения исходных пород в аргиллизиты. Особое внимание уделено процессам современного минералорудообразования, вероятно, оказывающим прямое влияние на геохимическую и экологическую обстановку в районе Паужетского геотермального месторождения.

Объект исследования и краткая геологическая характеристика. Исследования выполнены на Восточно-Паужетском термальном поле, расположенном на фланге Паужетской гидротермальной системы и одноименного геотермального месторождения (рис. 1).

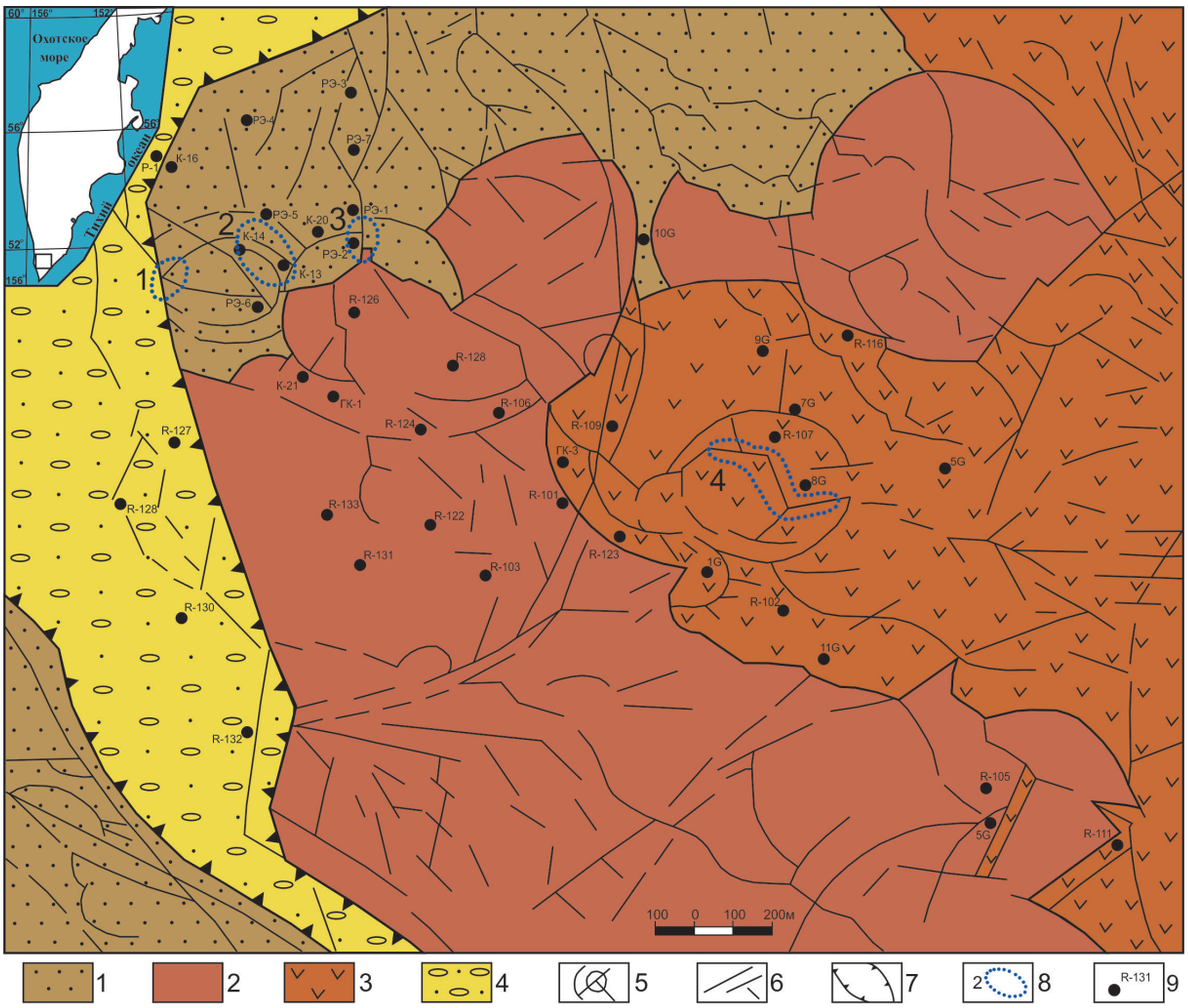

Рис. 1. Схема геологического строения Паужетского геотермального месторождения (Структура …, 1993): 1 – вулканогенно-осадочные породы Верхне-Паужетской подсвиты; 2 – лавы андезидацитов Камбального хребта; 3 – лавы андезибазальтов Камбального хребта; 4 – современный Паужетский грабен; 5, 6 – кольцевые и линейные тектонические нарушения: 5 – дешифрированные в рельефе и подтвержденные геолого-геофизическими, геохимическими и другими материалами, 6 – предполагаемые; 7 – границы Паужетского грабена; 8 – термальные поля: 1 – Южное, 2 – Верхнее, 3 – Нижнее, 4 – Восточное; 9 – скважины колонкового бурения и их номера

Месторождение широко известно вследствие строительства здесь первой в СССР Паужетской геотермальной станции (ГеоЭС), мощность которой в настоящее время составляет 12 МВт$_э$. Начиная с 1967 г., ГеоЭС устойчиво работает, обеспечивая электрической энергией население и рыбопромышленные предприятия южной части Усть-Большерецкого района Камчатского края. Район месторождения расположен в пределах внутренней зоны Курило-Камчатской островной дуги на сочленении трех основных вулканических поясов Камчатки (Долгоживущий …, 1980). Паужетское

геотермальное месторождение имеет классическую для вододоминирующих гидротермальных систем блоково-слоистую структуру: два водоносных горизонта, расположенных на глубинах 100–350 м и 500–750 м, приурочены к залегающим субгоризонтально толщам псефитовых и агломератовых туфов паужетской свиты (N_2^3–Q_1) и туфобрекчий алнейской серии (N_1^3–N_2). Нижним водоупорным комплексом служат анавгайские песчаники, средним – голыгинские игнимбриты, верхним – мелко-тонкообломочные туффиты верхнепаужетской подсвиты. Породы разбиты на субвертикальные блоки за счет внедрения малых интрузий среднего и кислого состава и активных тектонических подвижек в четвертичный период (Паужетские …, 1965; Структура …, 1993).

Восточно-Паужетское термальное поле, как и другие термальные поля Паужетской гидротермальной системы, приурочено к кольцевому тектоническому (тектоно-магматическому ?) поднятию (см. рис. 1). Поле представляет собой участок разгрузки пара и гидротермальных растворов на дневной поверхности. Наиболее прогретая площадь размером 120 × 60 м, оконтуренная по изотерме 20 °С, выделяется парящими грунтами (до 105 °С на глубине 0.6–0.8 м), парогазовыми струями (от 96–98 до 108–109 °С на устьях), грязеводными и водными кипящими котлами и мелкими теплыми озерами. На удалении 150–200 м от горячего участка отмечаются отдельные термальные площадки с грязеводными котлами. Общий размер поля составляет примерно 150 × 500 м. Разгружающиеся на дневной поверхности воды – кислые сульфатные и слабокислые сульфатно-гидрокарбонатные с широким катионным составом, общая минерализация не превышает 0.8–1.0 г/л. Конденсат пара имеет близкий химический состав. Термальное поле перекрыто единым чехлом гидротермальных глин мощностью от 2–3 м на горячем участке до ≥ 5–6 м на периферии. При изучении зоны перехода от пластичных глин к жесткому основанию толщи были обнаружены необычные минеральные ассоциации (Рычагов и др., 2015), что стимулировало авторский коллектив к продолжению исследований и обобщению материала в данном сообщении.

Методика исследований. В целях получения наиболее полных характеристик толщи гидротермальных глин для бурения скважин были выбраны участки с различными физико-химическими условиями разгрузки парогидротерм и прогрева грунтов. Использовался буровой станок КМБ2-10 (максимально допустимая глубина бурения 10 м). Пробурено 16 скважин глубиной до 8.7 м и пройден шурф на глубину 4 м (рис. 2).

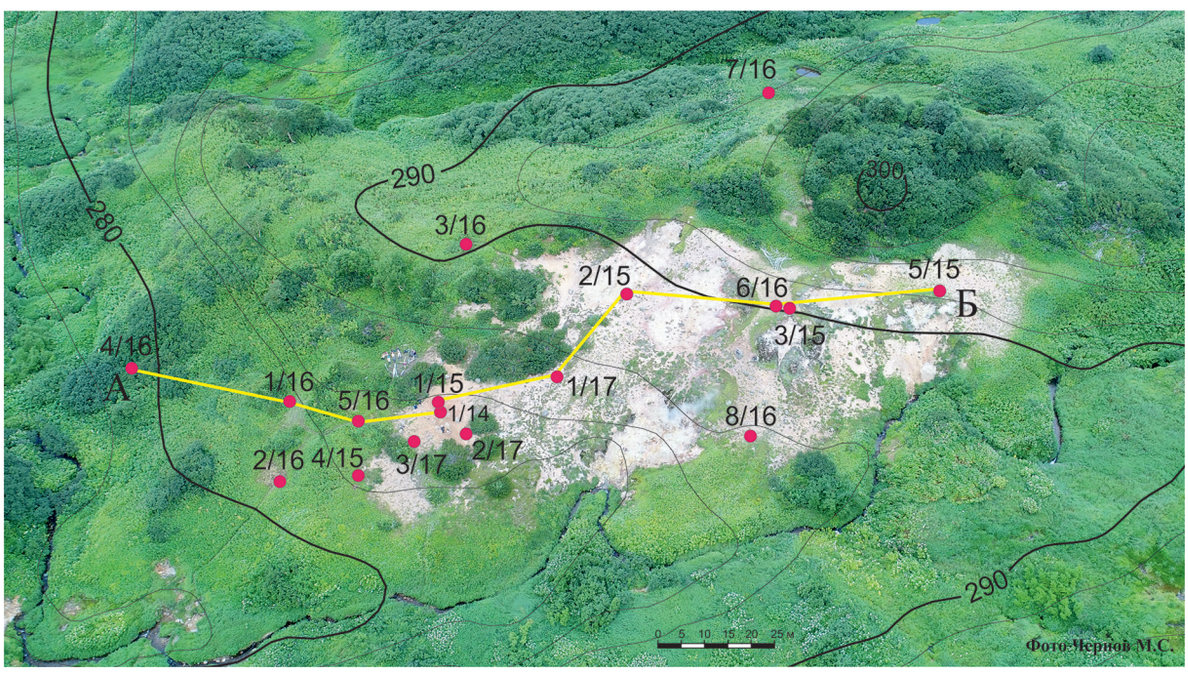

Рис. 2. Ортофотоплан Восточно-Паужетского термального поля с обозначением мест пройденных выработок и линией литологического разреза А-Б

Керн скважин и стенки шурфа детально документировались с послойным отбором проб (в среднем через каждые 15–20 см) на разные виды лабораторных исследований. Образцы глин и керна исследовались методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на приборе S4 PIONEER; ИК-спектрометрии (прибор IR Shimadzu с преобразованием Фурье) и рентгеновской дифрактометрии

(прибор Shimadzu XRD 7000); на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3, оснащенном энергодисперсионным спектрометром X-MAX 80 с фирменным программным обеспечением Aztek; все – в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Микрозондовые исследования проведены также на Геологическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова с помощью растрового электронного микроскопа LEO 1450VP, оснащенного энергодисперсионным спектрометром INCA 300.

Состав и литологическое строение толщи глин. Толща гидротермальных глин имеет слоистую структуру. Выделено 4 горизонта (рис. 3), характеристика которых приводится.

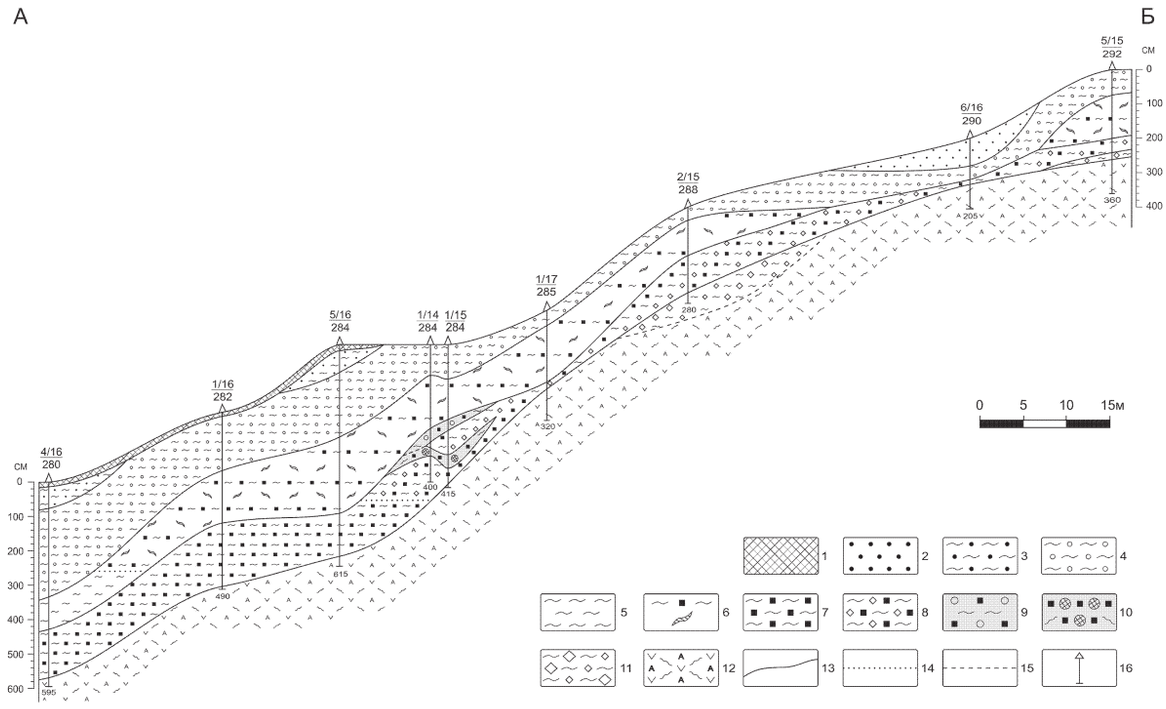

Рис. 3. Литологический разрез толщи гидротермальных глин Восточно-Паужетского термального поля: 1 – почвенно-пирокластические отложения; 2 – супесь; 3 – суглинок; 4 – гидротермальные глины зоны сернокислотного выщелачивания; 5 – гидротермальные глины зоны углекислотного выщелачивания; 6 – гидротермальные глины тугопластичной консистенции с большим количеством кремнезема (в виде корочек, линз и прожилков); 7 – интенсивно пиритизированные гидротермальные глины; 8 – гидротермальные глины с обломками горных пород и пиритом; 9 – твердые сухие глины, включающие фосфатно-алюмосиликатно-сульфидные глобули; 10 – кремнисто-карбонатно-сульфидная жильная зона, включающая аналогичные по составу глобули; 11 – гидротермальные глины с большим количеством обломков разных размеров; 12 – жесткое основание разреза: аргиллизированные лавы андезитов с большим количеством прожилков (линз, жеод) опала, кварца, карбонатов и цеолитов; 13 – установленные границы; 14 – метасоматические границы; 15 – предполагаемые границы; 16 – пробуренные неглубокие скважины

1. Основание толщи гидротермальных глин представлено трещиноватыми и брекчированными интенсивно аргиллизированными андезитами. Матрица пород сложена вторичными минералами: смектиты + хлориты + кварц + опал + карбонаты + цеолиты + сульфиды. Отдельные участки породы представлены относительно менее измененными, но трещиноватыми андезитами. В восточной части термального поля скважинами 5/15 и 8/16 вскрыты зоны (до 20 см), состоящие полностью из вторичных минералов (фрагменты андезитов отсутствуют). Состав их сложный и включает перечисленные выше минералы, а также оксиды железа. На стенках каверн образуются крупные (до 3 мм) кристаллы пирита. На диаграммах распределения основных химических компонентов (рис. 4) горизонт аргиллизированных андезитов выделяется высокими концентрациями щелочных и щелочноземельных элементов, марганца, кремнекислоты; часто – фосфора; низкими – титана и алюминия. Температура пород этого горизонта превышает 90 °С.

2. Выше по разрезу залегает горизонт относительно сухих сульфидизированных глин. Горизонт выдержан по простиранию термального поля и имеет мощность от 20–150 см на горячем участке до 50–200 см на «холодном». Отложения представлены глинами монтмориллонитового состава. В верхних слоях горизонта отмечается переход от каолинита к смектиту с обилием равномерно рассеянного крупнокристаллического пирита и полуразложенных обломков андезитов. Температура горизонта 75–90 °С. Характерно наличие большого количества (до 15–25 об. %) фрагментов, похожих по форме на обломки, но насыщенных кремнистым веществом. Глинистый субстрат отложений

на периферии термального поля отличается высокой открытой трещинно-поровой проницаемостью и наличием большого количества минералов (сульфидов Fe, Cu, Zn, а также оксидов Fe), обладающих повышенной электропроводностью (Феофилактов и др., 2017). Горизонт включает две жильные зоны с минеральными рудными ассоциациями: фосфатно-алюмосиликатно-сульфидной и кремнисто-карбонатно-сульфидной (Рычагов и др., 2015, 2017). Горизонт выделяется высокими содержаниями фосфора, в меньшей степени – щелочных компонентов и кремнекислоты.

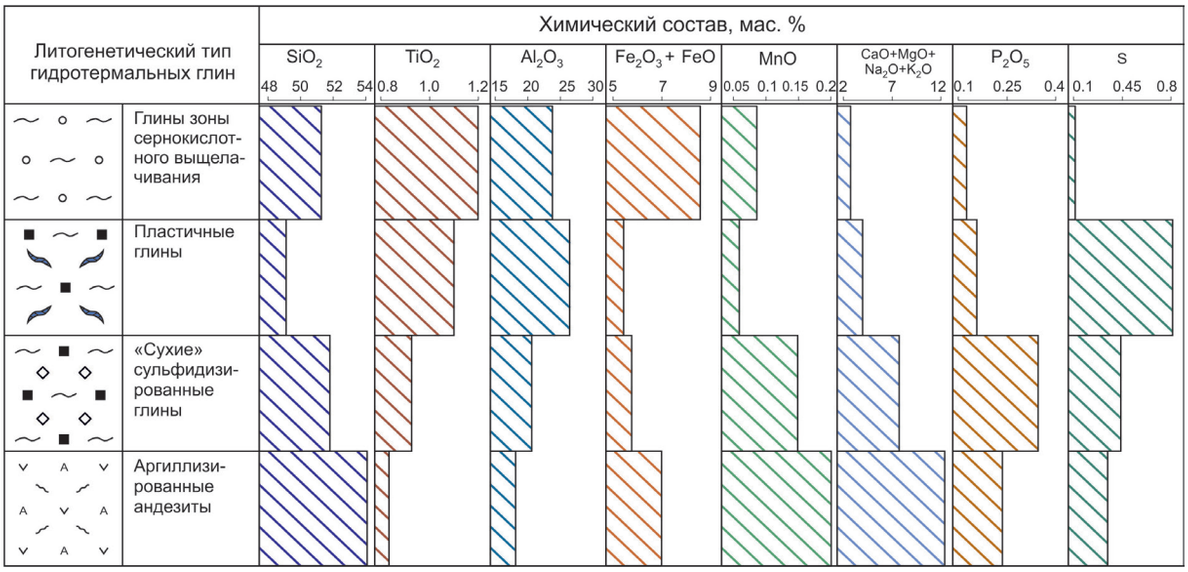

Рис. 4. Распределение химических компонентов по выделенным горизонтам толщи гидротермальных глин. Данные получены на рентгенофлуоресцентном спектрометре S4 PIONEER в институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

3. Глины мягко-тугопластичной до скрытотекучей консистенции образуют горизонт мощностью 90–295 см. Температурный интервал составляет 50–70 °С. Глины сложены каолинитом, α-кварцем, опалом, пиритом, марказитом. Типично большое количество корочек, линз, пленок и тонких прожилков опала и α-кварца. Этот горизонт служит прекрасным водоупором и тепловым изолятором и имеет определяющее значение для формирования минеральных рудных ассоциаций в структуре Восточно-Паужетского термального поля. Пластичные глины характеризуются низкими концентрациями железа, марганца, щелочей, фосфора; сложным распределением других компонентов состава.

4. Завершают разрез глины зоны сернокислотного выщелачивания. Они сложены каолинитом, гидрооксидами (лимонит) и оксидами (гематит) железа, сульфатами Fe–Ca–Mg–…, опалом, в отдельных жеодах претерпевающем раскристаллизацию в халцедон. Глины неоднородные. Мощность горизонта от 50–80 см в центральной части до > 300–350 см на периферии. Температура – до 50 °С. Глины зоны сернокислотного выщелачивания отмечаются высокими содержаниями двуокиси титана и оксидов железа, что обусловлено выносом железа из исходных пород и концентрации его в форме лимонита, гетита и гематита в зоне окисления. Отмечается также тенденция роста отношения закисного к окисному железу к основанию толщи глин, что объяснимо с позиции формирования общей метасоматической зональности при аргиллизации горных пород.

Заключение. Гидротермальные глины представляют слоистую толщу, выдержанную по простиранию и в разрезе термального поля. Получены достаточно четкие минералого-геохимические критерии выделения четырех горизонтов толщи гидротермальных глин. Основание представлено аргиллизированными породами, жесткими, с псевдоморфной структурой андезитов. Для вышележащего горизонта сухих интенсивно пиритизированных глин характерно большое количество полуразложенных относительно жестких обломков андезитов, а также окремненных фрагментов пород. Большую роль в структуре толщи аргиллизитов играет горизонт пластичных глин, обладающий свойствами физико-химического барьера и теплового экрана в структуре термального поля. Температурный режим термального поля достаточно определенно коррелирует с минералогией и геохимией толщи глин. Так, в основании разреза существенно увеличивается и растет с глубиной содержание Ca, Mg, Na, K, Mn и P, что, вероятно, связано с тем, что здесь в условиях повышенной трещинно-поровой проницаемости происходит разгрузка высокотемпературных минерализован-

ных растворов, а преобладающий в глинах смектит является хорошим сорбентом многих металлов. Распределение температуры также коррелирует с границами основных горизонтов. В условиях повышенной проницаемости для высокотемпературных щелочных растворов (под горизонтом пластичных глин) образуются жильные зоны с минеральными рудными ассоциациями: фосфатно-алюмосиликатно-сульфидной и кремнисто-карбонатно-сульфидной. В направление от горячего участка к периферии термального поля жильные зоны объединяются в единый более мощный горизонт, минеральный состав которого становится сложнее (Рычагов и др., 2017). Таким образом, в основании толщи гидротермальных глин разгружаются глубинные высокотемпературные металлоносные водно-солевые растворы с образованием рудных ассоциаций. Одновременно происходит рассеяние и вынос многих химических компонентов на поверхность термального поля. Мы полагаем, что геохимический режим и, соответственно, экологическая обстановка в районе геотермальных месторождений определяются этими эндогенными процессами.

Список литературы

1. Белоусов В. И., Сугробов В. М., Сугробова Н. Г. Геологическое строение и гидрогеологические особенности Паужетской гидротермальной системы // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 23–57.
2. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки. М.: Наука, 1980. 172 с.
3. Ерощев-Шак В. А. Гидротермальный субповерхностный литогенез Курило-Камчатского региона. М.: Наука, 1992. 131 с.
4. Коржинский Д. С. Теория метасоматической зональности. М.: Наука, 1982. 104 с.
5. Коробов А. Д. Гидротермальный литогенез в областях современного вулканизма: автореф. дис. … докт. геол.-мин. наук. М.: ГИН, 1994. 50с.
6. Пампура В. Д. Минералообразование в гидротермальных системах. М.: Наука, 1977. 204 с.
7. Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965. 208 с.
8. Рычагов С. Н. Эволюция гидротермально-магматических систем островных дуг: автореф. дис. … докт. геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 2003. 50 с.
9. Рычагов С. Н., Давлетбаев Р. Г., Ковина О. В. Гидротермальные глины и пирит геотермальных полей: значение в геохимии современных эндогенных процессов (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2009. № 2. С. 39–55.
10. Рычагов С. Н., Сандимирова Е. И., Чернов М. С. Сергеева А. В. Разгрузка щелочных растворов в основании толщи глин Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка) // Вулканизм и связанные с ним процессы: материалы ежегодной конф., посвящ. Дню вулканолога. 2018. С. 200–203.

Рычагов С. Н., Сергеева А. В., Чернов М. С., Философова Т. М. Глобули различного состава в толще гидротермальных глин Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка): к вопросу об источниках фосфора и транспорте металлов // Вулканизм и связанные с ним процессы: материалы ежегодной конф., посвящ. Дню вулканолога. 2015. С. 270–276.

11. Рычагов С. Н., Соколов В. Н., Чернов М. С. Гидротермальные глины как высокодинамичная коллоидно-дисперсная минералого-геохимическая система // ДАН. 2010. Т. 435. С. 806–809.
12. Рычагов С. Н., Соколов В. Н., Чернов М. С. Гидротермальные глины геотермальных полей Южной Камчатки: новый подход и результаты исследований // Геохимия. 2012. № 4. С. 378–392.
13. Рычагов С. Н., Философова Т. М., Чернов М. С., Житова Е. С., Кравченко О. В., Сергеева А. В. Минералорудообразование в основании толщи глин Восточно-Паужетского термального поля Паужетской гидротермальной системы (Южная Камчатка) // Вулканизм и связанные с ним процессы: материалы ежегодной конф., посвящ. Дню вулканолога. 2017. С. 196–199.
14. Феофилактов С. О., Рычагов С. Н., Букатов Ю. Ю., Нуждаев И. А., Нуждаев А. А. Новые данные о строении зоны разгрузки гидротерм в районе Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2017. № 5. С. 36–50.
15. Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. 298 с.

MINERALOGICAL FORMATION IN THE THICKNESS OF HYDROTHERMAL CLAYS PAUZHETSKY GEOTHERMAL DEPOSIT (SOUTH KAMCHATKA)

O. V. Kravchenko, S. N. Rychagov

Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, e-mail: kovina86@mail.ru, e-mail: rychsn@kscnet.ru

Abstract: With the help of drilling wells and pits, the thickness of hydrothermal clays of the Eastern-Pauzhetskoye thermal field (Southern Kamchatka) has been studied in detail, four main horizons have been identified. From the bottom up the section is represented by: 1) argillized andesites; 2) sulfidized clays; 3) plastic clays and 4) clays of the zone of sulfuric acid leaching. Under the horizon of plastic clays, mineral ore associations are formed in relatively dry, intensely sulphidized argillizites due to unloading of high-temperature metalliferous fluids. At the same time,