УДК 553.078.2

Практическое значение литологических и минералого-геохимических исследований геотермальных систем, новые данные (Паужетский район, Камчатка)

С.Н. Рычагов[1], Е.И. Сандимирова[1], А.В. Сергеева[1], О.В. Кравченко[1], М.С. Чернов[2], Г.А. Пальянова[3]

[1]*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*
rychsn@kscnet.ru
[2]*Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[3]*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*

На основании детальных геологических исследований геотермальных систем Паужетского района Южной Камчатки рассмотрены составы, свойства и механизмы образования аргиллизированных горных пород, гидротермальных глин и минеральных осадков, образующихся в зоне разгрузки термальных вод под влиянием глубинного щелочного флюида. Показано практическое значение изучения строения аргиллизитов и минеральных рудных ассоциаций, условий транспорта и накопления металлов в геотермальных средах.

Practical Value of Lithological and Mineralogical Geochemical Researches of Geothermal Systems, New Data (Pauzhetsky Area, Kamchatka)

Sergei N. Rychagov[1], Elena I. Sandimirova[1], Anastasia V. Sergeeva[1], Olga V. Kravchenko[1], Mikhail S. Chernov[2], Galina A. Palyanova[3]

[1]*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*
rychsn@kscnet.ru
[2]*Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[3]*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy RAS, Novosibirsk, Russia*

On the basis of detailed geological researches of geothermal systems of Pauzhetsky area of the Southern Kamchatka the structures, properties and mechanisms of formation of the argillized rocks, hydrothermal clays and mineral precipitation, which are formed in an unloading zone of thermal waters under the influence of deep alkaline fluid, are considered. The practical value of studying the structure of argillizites and mineral ore associations, conditions of transport and accumulation of metals in geothermal environments are shown.

Введение

Геотермальные системы традиционно рассматриваются с позиции извлечения тепловой и электрической энергии. При разведке и эксплуатации геотермальных месторождений обычно используется широкий комплекс научных исследований с целью оценки температурных условий в недрах систем, выделения геотермальных резервуаров, картирования зон, проницаемых для теплового потока. Авторы доклада обращают внимание на другие практические аспекты изучения современных гидротермальных систем и геотермальных месторождений на примере Паужетского (Паужетско-Камбально-Кошелевского) района Южной Камчатки: минералообразование в зоне аргиллизации горных пород как начальный этап формирования рудных месторождений; сорбционные процессы в минеральных отложениях, образующихся при утилизации геотермального теплоносителя; разработку новых методик экспресс-анализа метасоматитов при разведочном и/или эксплуатационном бурении; исследование новообразованных минеральных ассоциаций с точки зрения прогноза рудоносности вулканогенных формаций; и др.

Фактический материал и его обсуждение

Аргиллизированные породы и гидротермальные глины занимают особое место в ряду измененных пород областей современного вулканизма. Они образуются в зонах разгрузки термальных вод и парогазового флюида и являются чутким индикатором эволюции гидротермальных систем, трассируют проницаемые для теплового потока трещинно-брекчиевые структуры; аргиллизация горных пород часто сопровождается формированием золото-серебряных, медно-молибден-порфировых, эпитермальных полиметаллических и др. месторождений [1–3]. Авторским коллективом при детальном изучении термальных полей с помощью бурения картировочных скважин и проходки шурфов выделены геотермальные системы, в которых длительная разгрузка щелочных термальных вод приводит к формированию в основании толщи глин мощного (≥ 5–10 м) горизонта «пластичных глин» [4]. Показано, что этот горизонт служит водоупором и тепловым экраном в структуре геотермальной системы, к нему приурочен комплексный геохимический барьер; в подошве горизонта образуются кремнисто-карбонатные жильные зоны с сульфидами цветных металлов, фосфатами РЗЭ, интерметаллидами и самородными металлами [5], рис. 1. В кремнистых «плащах», по-видимому, образующихся на начальных этапах развития геотермальной системы, также диагностирован широкий спектр рудных минералов, включая фосфаты иттрия, сульфиды Fe и Cu, интерметаллические соединения, фосфид железа [6]. Полученные данные свидетельствуют в пользу влияния на верхние горизонты геотермальной системы глубинного восстановленного металлоносного флюида и представляют большой интерес для реконструкции первых этапов формирования рудных месторождений (как правило, начало рудообразования затушевано последующими тектоническими, метаморфическими, гидротермально-метасоматическими и др. процессами и недоучет этого фактора часто приводит к принципиальным ошибкам при разведке и эксплуатации месторождений).

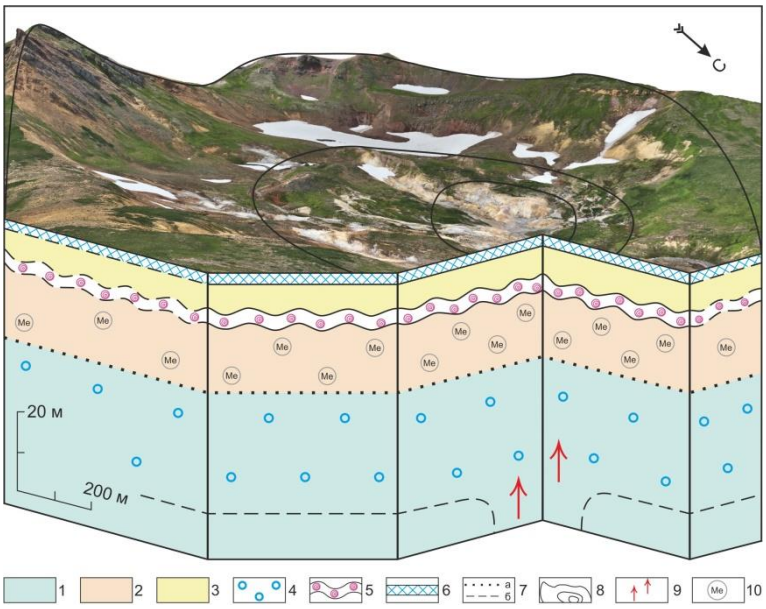


Рисунок 1 –
Геолого-геохимическая модель Южно-Камбальной геотермальной системы.

Условные обозначения:
1 – вмещающие андезибазальты,
2 – аргиллизированные породы,
3 – гидротермальные глины,
4 – близповерхностный геотермальный резервуар,
5 – зона карбонатизации и образования конкреций сложного состава,
6 – кремнистые отложения,
7 – границы горизонтов,
8 – границы морфоструктур,
9 – восходящий тепловой поток,
10 – рудные ассоциации

Эксплуатация высокотемпературных геотермальных месторождений на Камчатке сопровождается утилизацией отработанного геотермального теплоносителя в форме сброса сепарата на рельеф дневной поверхности. В результате на Паужетском геотермальном месторождении, начиная с 1960-х годов, сформировались минеральные отложения в виде «плащей» протяженностью ≥500 м, мощностью до 0.8–1 м и шириной ≥5–10 м, выполняющие распадки и долины ручьев. Нами закартировано 10 таких «плащей». Первоначально считалось, что отложения состоят исключительно из минералов кремнезема (опала, тридимита и кристобалита, на отдельных участках раскристаллизованных в халцедон). Но исследования последних лет показали, что в начале сброса термальных вод из сепараторов скважин минеральные осадки состоят из аморфного низкотемпературного K-Na-Ca цеолита (морденита) с примесью опала [7]. Далее по простиранию отложения становятся полностью

кремнистыми (рис. 2). Примечательной особенностью состава осадков в начале сброса термальных вод является геохимическая аномалия серебра. Более того, была установлена минеральная форма Ag – низкотемпературный сульфид акантит, образующийся непосредственно из термальных вод при сорбции водорастворимых соединений Ag аморфной опал-морденитовой смесью. Детальное изучение цеолитов, а также рудных минералов в близповерхностной зоне аргиллизации горных пород Паужетского месторождения показало принципиальную сходимость условий и направленности минерало- рудообразующих процессов в зоне разгрузки парогидротерм и в недрах системы, где породы представлены рудовмещающими пропилитами и вторичными кварцитами [4, 8]. Полученный результат имеет большое практическое значение для прогноза рудоносности вулканогенных формаций, а также оценки геотехнологических свойств новообразованных минеральных осадков.

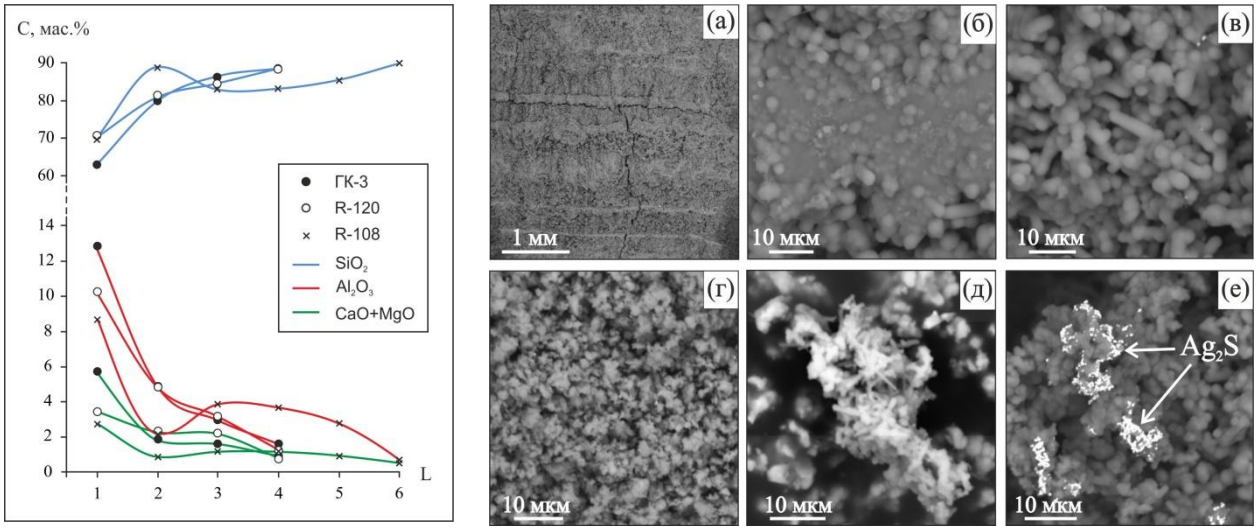


Рисунок 2 – Распределение основных компонентов химического состава цеолит-кремнистых отложений скважин ГК-3, R-120 и R-108 Паужетского геотермального месторождения по простиранию «плащей» (L) – диаграмма слева; и микростроение этих осадков в начале сброса термальных вод по данным микрозондовых исследований (а – слоистая структура, б-д – различные другие структуры цеолитов, е – пластинки акантита на агрегате цеолита)

В основании толщи гидротермальных глин Южно-Камбальной геотермальной системы выделены карбонатные конкреции сложного химического и минерального составов: слои арагонита чередуются с микрослоями, включающими оксиды Fe и Si, сульфаты Ca и Ba, сульфиды Fe и цветных металлов, карбонаты Fe и Mn, Si-Fe-Mn образования, соединения азота, фосфаты Ca и других металлов. Конкреции образуются вследствие внедрения щелочных металлоносных растворов в открытые полости (разуплотненный горизонт, см. рис. 1) в основании толщи глин, последующего вскипания, охлаждения и пересыщения растворов относительно основных компонентов состава (гидрокарбоната, ортокремниевой коллоидной и растворенной кислоты, сульфата и аммония). Разнообразие, определенная последовательность и повторяемость структур свидетельствует в пользу многостадийного пульсационного характера образования конкреций. Таким образом, данные карбонатные конкреции являются индикатором динамики глубинного металлоносного флюида. Разнообразие в строении этого каменного материала (выделяются слоистые, массивные, колломорфно-полосчатые, глобулярные, крустификационные, радиально-лучистые и др. структуры), рис. 3, привлекает к нему внимание в качестве интересных коллекционных образцов для геологических музеев. В частности, три крупных образца конкреций были подготовлены и переданы в музей Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.



Рисунок 3 – Структурно-текстурные особенности карбонатных конкреций сложного состава, музейные образцы (Южно-Камбальное Центральное термальное поле). Размер образцов по удлинению от 20 до 25 см

Заключение

Изложенные результаты востребованы при поисках, разведке и эксплуатации геотермальных и рудных месторождений; разработке новых технологий извлечения металлов из водных растворов, минеральных осадков и горных пород; прогнозе рудоносности вулканогенных формаций; оценке влияния утилизации геотермального теплоносителя на окружающую среду.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме НИР Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН № FWME-2025-0001.

Список литературы

1. *Дворник Г.П.* Золоторудные метасоматические формации Центрально-Алданского района // Литосфера. 2012. № 2. С. 90–105.

2. *Марущенко Л.И.* Кварц-серицитовые метасоматиты и аргиллизиты Au-Mo-Cu месторождения Песчанка (Чукотка) / *Л.И. Марущенко, И.А. Бакшеев, Е.В. Нагорная и др.* // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 3. С. 239–252. DOI: 10.7868/S001677701503003X.

3. *Набоко С.И.* Металлоносность современных гидротерм в областях тектоно-магматической активности. М.: Наука. 1980. 198 с.

4. *Рычагов С.Н.* Минералообразование на Восточно-Паужетском термальном поле (Южная Камчатка) как отражение влияния глубинного щелочного флюида и эпитермальной рудообразующей системы / *С.Н. Рычагов, Е.И. Сандимирова, М.С. Чернов и др.* // Геология и геофизика. 2023. Т. 64. № 2. С. 255–279. DOI: 10.15372/GiG2022211.

5. *Rychagov S.N.* The Structure and Origin of the South Kambalny Central Thermal Field, Kamchatka / *S.N. Rychagov, O.V. Kravchenko, E.I. Sandimirova et al.* // Journal of Volcanology and Seismology. 2025. Vol. 19. No. 5. pp. 411–434. DOI: 10.1134/S0742046325700277.

6. *Пальянова Г.А.* Необычная рудная минерализация кремнистых отложений Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка) / *Г.А. Пальянова, С.Н. Рычагов, Е.Н. Светова и др.* // ДАН. 2024. Т. 519. № 1. С. 80–89. DOI: 10.1134/S1028334X24603535.

7. *Сергеева А.В.* Минералого-геохимические особенности цеолит-кремнистых отложений Паужетского геотермального месторождения (Южная Камчатка) / *А.В. Сергеева, С.Н. Рычагов, О.В. Кравченко и др.* // Вулканология и сейсмология. 2024. № 1. С. 38–55. DOI: 10.1134/S0742046323700422

8. *Сандимирова Е.И.* Цеолитовая минерализация в аргиллизитах Восточно-Паужетского термального поля как индикатор разгрузки щелочного флюида в современной гидротермальной системе (Южная Камчатка) / *Е.И. Сандимирова, С.Н. Рычагов, А.В. Сергеева, В.М. Чубаров* // Вулканология и сейсмология. 2022. № 6. С. 42–62. DOI: 10.31857/S020303622060086