

Минеральный состав искусственных кремнистых отложений («гейзеритов») Паужетского геотермального месторождения (Южная Камчатка)

Сергеева А.В., Рычагов С.Н., Сандиминова Е.И., Кравченко О.В., Назарова М.А.

Mineral composition of artificial siliceous deposits («geyserites») of the Pauzhetka geothermal field (Southern Kamchatka)

Sergeeva A.V., Rychagov S.N., Sandimirova E.I., Kravchenko O.V., Nazarova M.A.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: anastavalers@gmail.com

Установлено, что минеральные отложения «гейзеритов» Паужетского геотермального месторождения неоднородны по строению и составу: на изливе из скважин преобладают плохо окристаллизованные цеолиты с примесью опала, далее «гейзериты» состоят из аморфного гидратированного кремнезема. В составе отложений фиксируются хлорид натрия и глауберит $\text{CaNa}_2(\text{SO}_4)_2$, наблюдаются повышенные количества Ba, Sr, Rb, As, Au, Hg, др. элементов.

Введение

Исследование минералообразующих процессов, происходящих в системе вода – порода в условиях современных гидротермальных систем, актуально во многих аспектах, из которых наибольший интерес представляют вопросы преобразования и переноса вещества. Паужетское геотермальное месторождение хорошо разбурено и устойчиво эксплуатируется с 1967 г. В течение 30-40 лет из сепараторов нескольких скважин происходит сброс термальной воды на дневную поверхность. В результате образуются минеральные отложения в форме протяженных (до 500 м) и мощных (0.5-0.8 м) «плащей», которые ранее были определены как кремнистые осадки [1, 2]. Наши исследования показали, что эти отложения имеют сложный химический и минеральный составы, при сохранении кремнистой основы на большем протяжении «плащей».

Изучены минеральные отложения скважин ГК-3, R-103, R-106, R-120, R-123, расположенных на основном (Южном) эксплуатационном участке месторождения. Теплоноситель поступает из нижнего водоносного горизонта: водовмещающими являются пропилитизированные агломератовые туфы алнейской серии, глубины примерно 500-700 м на данном участке. На изливе из скважин термальная вода имеет следующие характеристики: температура 97-99 °С; рН=7.8-8.8; минерализация 2.8-4.5 г/л; состав хлоридно-натриевый, из других катионов преобладают К и Са (в равных соотношениях, 80-90 мг/л), из анионов сульфат (90-110 мг/л) и гидрокарбонат (50 мг/л); типично высокое содержание ортокремниевой кислоты – растворенной (150-300 мг/л) и коллоидной (250-400 мг/л), и борной кислоты (150-180 мг/л).

Естественные разгрузки парогидротерм характеризуются относительно невысокой динамикой фильтрации растворов и гидротермально-метасоматических процессов, что приводит к формированию целого ряда хорошо окристаллизованных вторичных минералов. При «мгновенном» изливе гидротерм из скважин минералообразование протекает в сильно неравновесных условиях, формируются плохо окристаллизованные минеральные фазы, но химический состав их в определенной степени отражает процессы, протекающие в недрах гидротермальной системы или на термальных полях.

Таким образом, «гейзериты» Паужетского геотермального месторождения представляют большой интерес с различных точек зрения, в т.ч. для понимания минералообразования и геохимических процессов в зоне разгрузки и в недрах современной гидротермальной системы.

Материалы и методы

Отложения скважин были отобраны в полевые сезоны 2011, 2018 и 2021 гг., в ряде случаев не только у устья скважины, но и по простиранию «плаща», для отслеживания латеральной компоненты зональности (рис. 1). Минеральный состав был исследован методами рентгеновской дифрактометрии (XRDMAX 7000, Shimadzu) и инфракрасной спектроскопии (IRAffinity-1, Shimadzu), а элементный состав определен методом рентгеновской флуориметрии («S4 PIONEER», BRUKER AXS). Все исследования выполнены на базе Аналитического Центра ИВиС ДВО РАН.

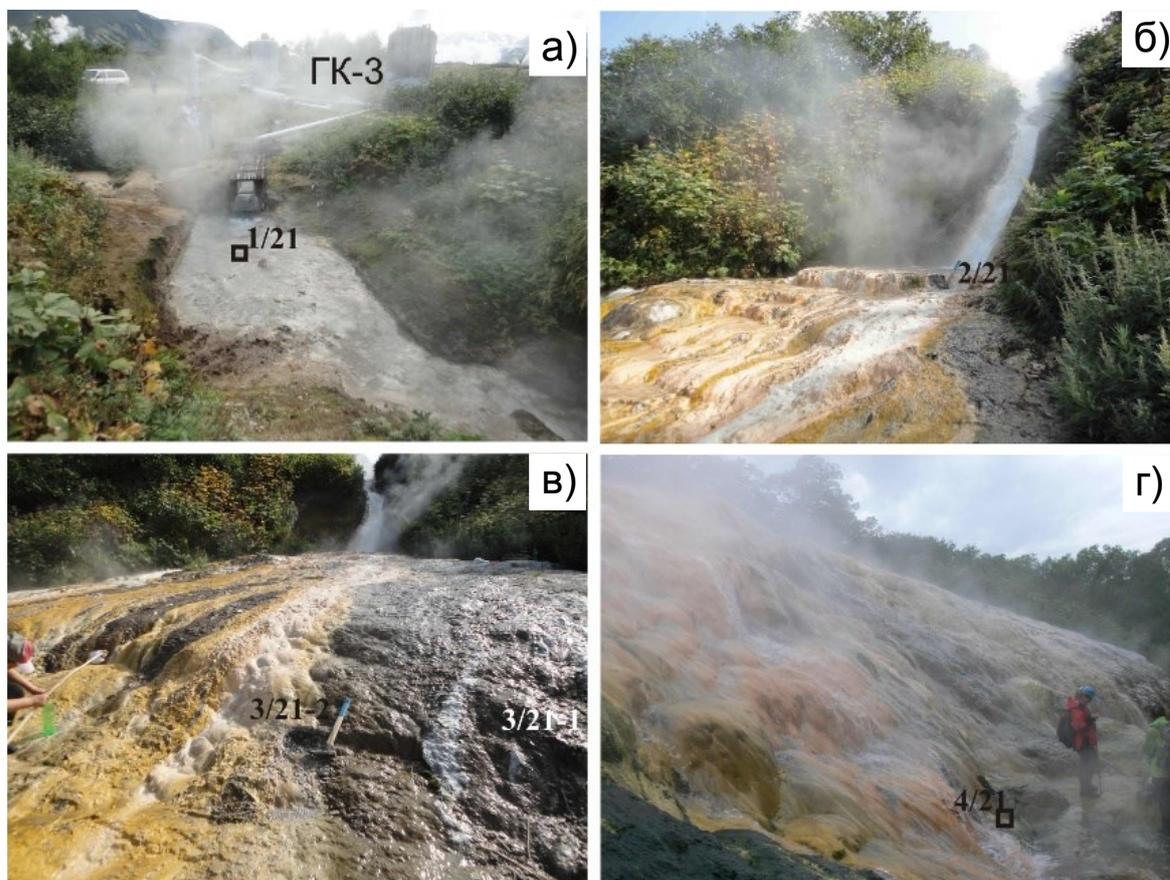


Рис. 1. Схема отбора «гейзеритовых» отложений скважины ГК-3, от истока до устья: а – начало «плаща», б – под водопадом, в – средний участок, г – уступ перед впадением в ручей Быстрый.

Результаты и обсуждение

Идентификация фазового состава осуществлена по совокупности данных дифрактометрии, колебательной спектроскопии и флуориметрии. Наиболее хорошо отличаются цеолитовые и опаловые отложения на инфракрасных спектрах, в то время как на дифрактограммах обычно фиксируется интенсивное гало от рентгеноаморфной фазы (рис. 2, 3). В целом, цеолитовые фазы, формирующиеся на изливе скважины, по элементному составу ближе всего к мордениту. Помимо кремнеземистых отложений, в осадках могут присутствовать соли термальных растворов: хлорид натрия, сульфаты натрия и кальция, карбонаты. Например, на оголовке скважины R-123 обнаружены солевые отложения, состоящие из хлорида натрия с примесью глауберита – двойного сульфата натрия и кальция.

В таблице приведены составы образцов «гейзеритовых» плащей. Видно, что по мере удаления от оголовка скважины, содержание SiO_2 возрастает, а Al_2O_3 – уменьшается, что отражает переход от цеолитовых отложений к опаловым. Такая картина наблюдается и на других изученных скважинах, поэтому данные по ГК-3 приведены как представительный пример. Причиной латеральной зональности, по всей

видимости, является высокая скорость кристаллизации цеолитов в щелочных средах, а pH разгружающихся вод порядка 8-9. При формировании цеолитовых фаз расходуется поступающий из глубин алюминий, поэтому в дальнейшем в составе плащей начинает преобладать опал, так как для образования цеолитовых составов алюминия не хватает. Повышенные содержания рубидия, стронция, бария, зафиксированные в составе «гейзеритовых» плащей, объясняются поступлением элементов с восходящими термальными растворами и их иммобилизацией в цеолитовой или опаловой матрице. В отношении щелочных и щелочноземельных металлов, кремнеземистые отложения играют роль сорбентов, что вообще характерно для цеолитов.

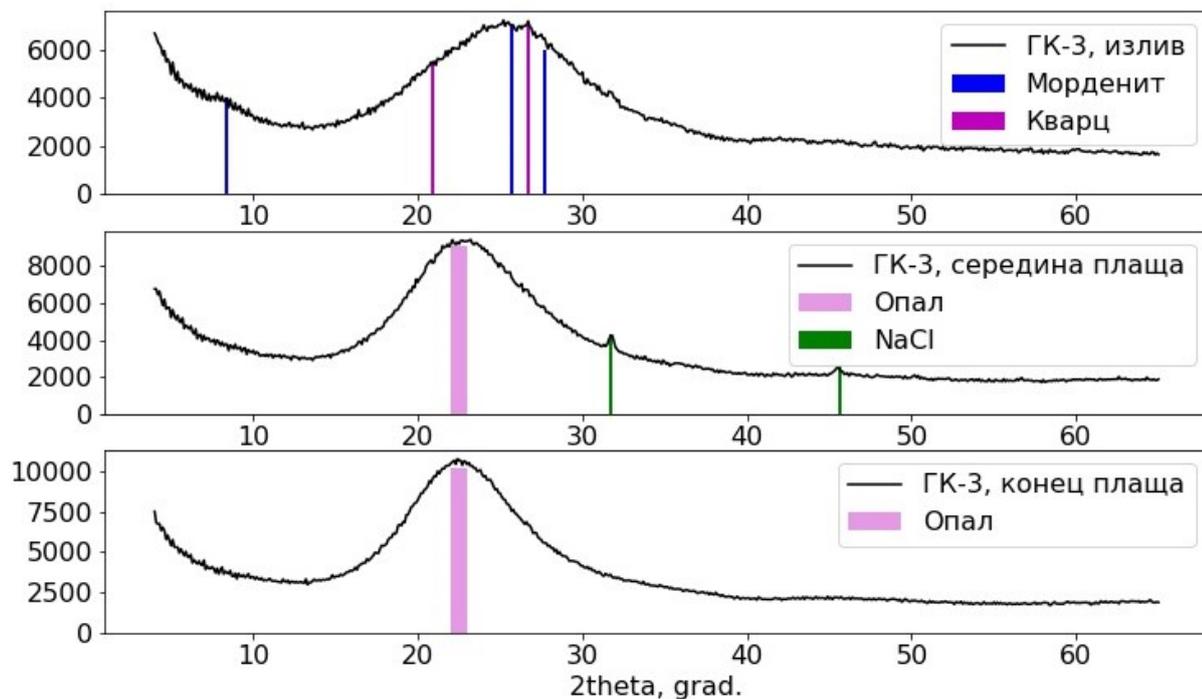


Рис. 2. Дифрактограммы «гейзеритовых» отложений скважины ГК-3, от истока до устья.

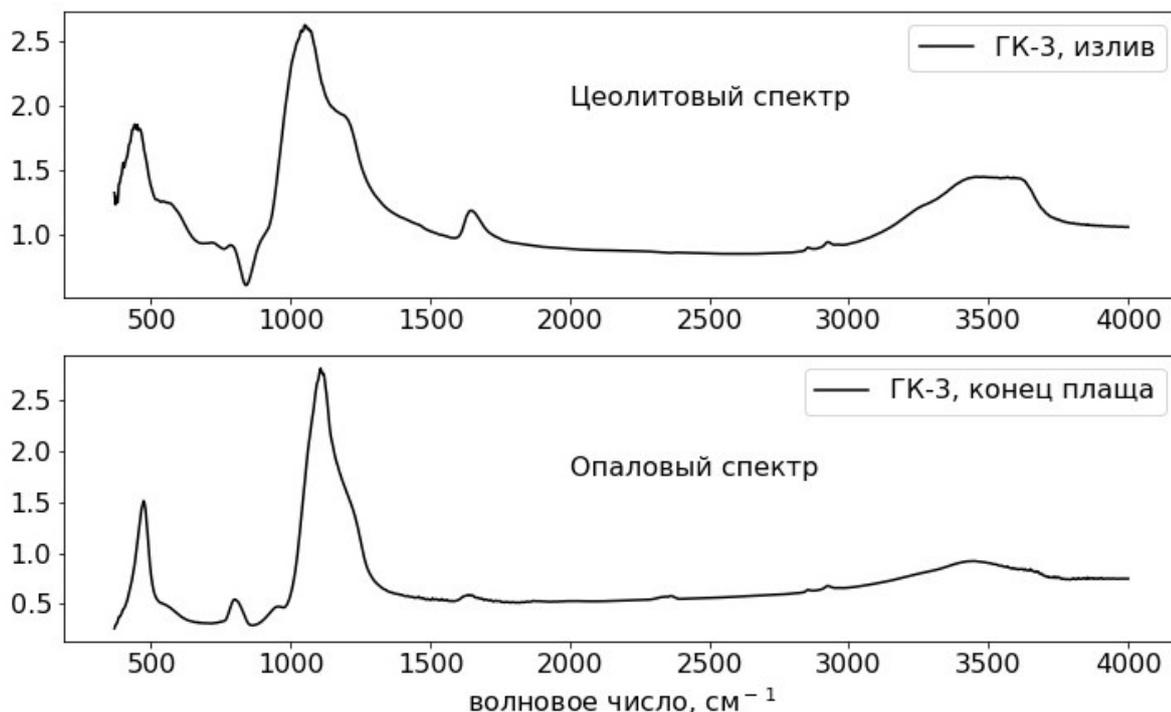


Рис. 3. Примеры спектров «гейзеритовых» плащей, от цеолитового начала до опалового конца.

Таблица. Содержание макроэлементов (масс. %) в образцах «гейзеритового» плаща скважины ГК-3

Образец	Локализация	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
1	Начало плаща	67.22	0.026	13.32	0.32	0.41	4.444	0.219	2.093	1.822
2	Первая треть плаща	79.25	0.050	5.11	0.02	1.12	1.456	0.010	1.375	0.894
3-1	Середина плаща	90.10	0.010	0.01	0.01	0.89	0.279	0.010	0.288	0.073
3-2		96.24	0.010	1.17	0.01	0.89	0.525	0.010	0.633	0.406
4-1	Конец плаща	77.61	0.299	6.00	1.76	2.22	1.773	0.615	1.407	0.943
4-2-1		89.46	0.010	0.01	0.01	0.72	0.237	0.010	0.304	0.083
4-2-2		89.56	0.010	0.01	0.01	0.68	0.274	0.010	0.247	0.059
4-3		90.61	0.010	0.01	0.01	0.48	0.223	0.010	0.298	0.079
4-4		89.17	0.010	0.01	0.01	0.75	0.289	0.010	0.325	0.166

В некоторых случаях в составе отложений фиксируются повышенные концентрации мышьяка. Это может объясняться тем, что в щелочных средах мышьяк сравнительно легко переходит в растворимую форму даже в восстановительных условиях: $As + 3OH^- = AsH_3 + AsO_3^-$. Образующийся арсин AsH_3 способен разлагаться на мышьяк и водород, и суммарный процесс будет выглядеть так: $2As + 6OH^- = 3H_2 + 2AsO_3^-$. Аналогично могут переноситься сурьма, селен и ряд других неметаллов.

Заключение

Искусственные кремнистые отложения Паужетского геотермального месторождения представлены рентгеноаморфными цеолитовыми фазами на сбросе термальной воды из скважин, которые далее по простиранию «плаща» переходят в опаловые. Латеральная зональность объясняется высокой скоростью образования цеолитов в щелочных средах, поэтому вначале сброса воды расходуется большая часть поступающего на поверхность алюминия, а далее избыток кремнезема постепенно откладывается в виде опала. Будучи хорошими ионообменниками, цеолиты и отчасти кремнезем захватывают поступающие с глубинными растворами рубидий, стронций, барий и прочие катионы, в результате «гейзеритовые» отложения обогащаются этими элементами. Мышьяк выносится на поверхность благодаря легкости, с которой он переходит в растворимые формы в щелочных средах, и откладывается на начальных участках сброса термальных вод из скважин.

Список литературы

1. Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. 298 с.
2. Frolova J.V., Ladygin V.M., Bashina J.S. et al. Artificial Silica Deposits from Pauzhetskoe Geothermal Field: Petrophysical Properties and Possibility of Utilization (South Kamchatka, Far East, Russia) // Conference on Mineral Extraction, USA, Tucson, Arizona, 2006. 4 p.