

**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; pH=7.8-8.8; минерализация 2.8-4.5 г/л; состав хлоридно-натриевый, из других катионов преобладают K и Ca (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.

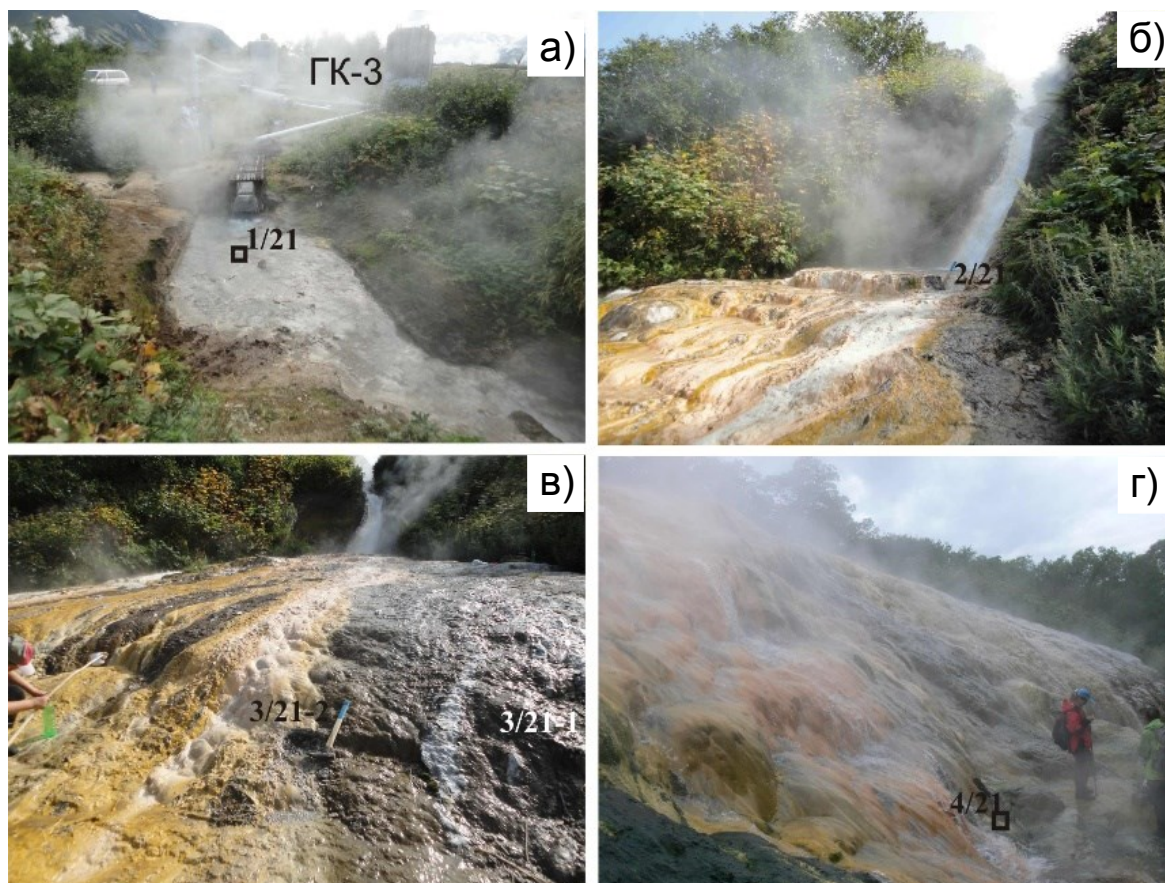


Рис. 1. Схема отбора «гейзеритовых» отложений скважины ГК-3, от истока до устья: а – начало «плаща», б – под водопадом, в – средний участок, г – уступ перед впадением в ручей Быстрый.

## 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  $\text{SiO}_2$  возрастает, а  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 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.

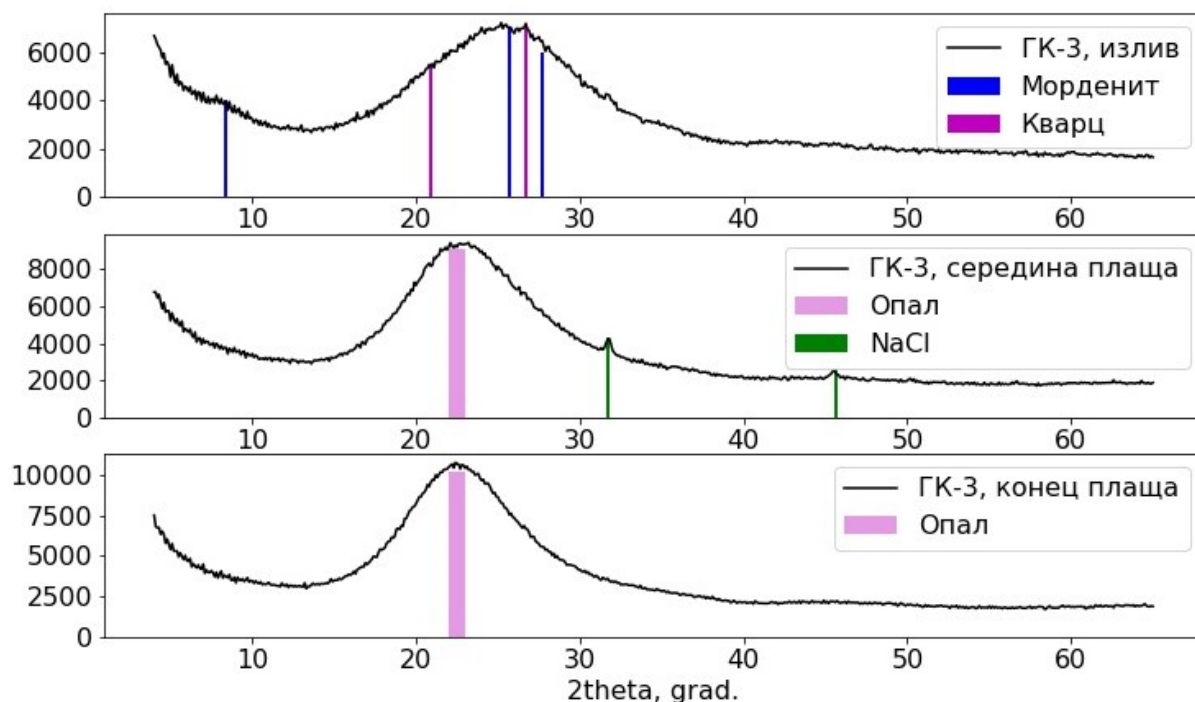


Рис. 2. Дифрактограммы «гейзеритовых» отложений скважины ГК-3, от истока до устья.

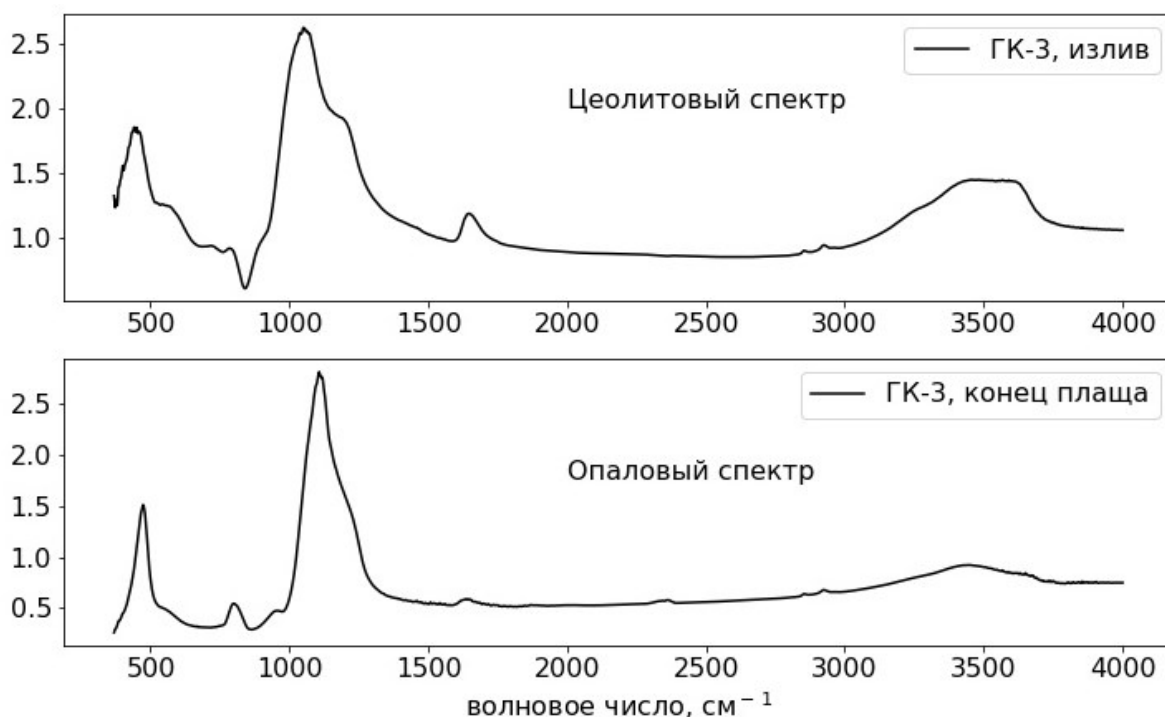


Рис. 3. Примеры спектров «гейзеритовых» плащей, от цеолитового начала до опалового конца.

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

Образец	Локализация	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> 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.