

«Силикатный снег» Мутновского геотермального месторождения: состав, условия образования

Сергеева А.В.¹, Кирюхин А.В.¹, Журавлев Н.Б.¹, Воронин П.О.¹, Хубаева О.Р.¹, Лыга Р.И.², Карташева Е.В.¹, Назарова М.А.¹, Кузьмина А.А.¹, Мальцева Н.А.², Верескун А.Д.²

«Silicate Snow» of the Mutnovsky geothermal deposit: Composition and formation conditions

Sergeeva A.V., Kiryukhin A.V., Zhuravlev N.B., Voronin P.O., Khubaeva O.R., Lyga R.I., Kartasheva E.V., Nazarova M.A., Kuzmina A.A., Maltseva N.A., Vereskun A.D.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский; e-mail: anastavalers@gmail.com*

² *Донецкий государственный университет, г. Донецк; e-mail: lygarita@mail.ru*

В работе рассмотрены отложения кремнезема в окрестности скважин, работающих на выпуск пароводяной смеси, на Мутновском геотермальном месторождении. Отложения визуально напоминают снег, по составу близки к силикагелю. Микроэлементный состав отложений указывает на рудообразующие процессы в недрах геотермальной системы.

Введение

Мутновское геотермальное месторождение приурочено к вулкану Мутновский, расположено на Камчатке, на расстоянии 60-70 км к югу от г. Петропавловск-Камчатский. В настоящее время геотермальное месторождение используется для обеспечения инфраструктурных объектов Камчатки электроэнергией. Мутновский геотермальный комплекс эксплуатируется с 1999-2002 гг. В результате выпуска пароводяной смеси из сепараторов скважин, последующего охлаждения пара, конденсации и выпадения осадков, в окрестности скважин сформировались толщи отложений кремнезема мощностью до нескольких десятков сантиметров (рис. 1). Визуально отложения напоминают снег, за что и получили свое название.



Рис. 1. Примеры силикатных отложений в окрестности скважин Мутновского геотермального месторождения: а – отложения в окрестности скважин 019 и 022; б – силикатный снег на снежнике в окрестности скважины 047; в – пароводяная струя от скважины 047 на фоне силикатных отложений и снежника.

Объектами исследования были силикатные отложения скважин 047, 035 и 022, последняя из скважин не пережила серию гидротермальных взрывов, начавшуюся в 2023 г., и закончившуюся в 2024-2025 гг. образованием воронки взрыва с размерами порядка 140×200 м [3]. Отложения, устилающие пространство возле скважин, представляют собой белые студенистые осадки, рыхлые и влажные, за исключением скважины 035, где сформировались плотные агрегаты непосредственно в колонне скважины [1].

Осадки образуются при остывании пароводяной смеси, уменьшении растворимости кремнезема и выпадении капель аэрозоля с частичками выделившегося аморфного $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, так как растворимость увеличивается с ростом температуры и

pH, в щелочных средах она выше, чем в близонейтральных или кислых. Рудообразующие процессы в недрах Мутновской геотермальной системы протекают преимущественно в щелочных средах [5], однако смешение с метеорными водами, конденсатами, вскипание на различных уровнях гидротермальной системы усложняют состав флюида и реконструкцию условий минералообразования. В этой связи сорбционные свойства силикагеля, которым являются исследуемые осадки, помогают зафиксировать микроэлементный состав минералообразующей среды и оценить рудоносный потенциал. Аналогичные исследования, выполненные на Паужетском геотермальном месторождении, показали формирование аморфных смесей цеолитового состава, с переходом в опаловый состав [4]. Поэтому целью настоящего исследования является описание и характеристика отложений кремнезема вокруг скважин, выпускающих пароводяную смесь на Мутновском геотермальном месторождении.

Материалы и методы

Образцы были собраны во время полевых работ в 2023-2025 гг. Элементный состав был определен количественно и качественно, с применением метода фундаментальных параметров, с помощью рентгенофлуоресцентных спектрометров МАКС-GVM (Спектроскан, Россия) и S4-PIONEER (Bruker, Германия). Дифрактограммы были записаны с помощью порошкового дифрактометра XRD-7000 (Shimadzu), инфракрасные спектры записаны с помощью ИК спектрофотометра с преобразованием Фурье IRAffinity-1 (Shimadzu) в диапазоне волновых чисел 400-4000 см⁻¹, с разрешением 4 см⁻¹, число сканов 100.

Результаты

В макроэлементном составе скважинных отложений преобладает кремнезем, как показано в таблице.

Таблица. Макроэлементный состав силикатных отложений некоторых скважин Мутновского геотермального месторождения, масс. %

Образец	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ + FeO	MgO	CaO	
СКВ 022, 1	87.76	0.03	0.26	0.13	0.15	0.14	
СКВ 022, 2	89.94	0.02	0.75	0.11	0.13	0.27	
СКВ 035, 1	87.64	0.03	0.21	0.17	0.22	0.79	
СКВ 035, 2	87.89	0.03	0.20	0.22	0.15	0.49	
СКВ 047, 1	84.42	0.02	0.46	<0.01	0.19	1.81	
СКВ 047, 2	86.49	0.02	0.26	<0.01	0.14	0.83	
СКВ 047, 3	88.66	0.02	0.02	0.05	0.18	1.11	
Образец	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	S	ППП	Сумма
СКВ 022, 1	0.50	0.34	0.02	0.02	0.66	9.99	99.34
СКВ 022, 2	0.56	0.42	0.02	0.01	0.08	7.68	99.91
СКВ 035, 1	0.42	0.96	0.02	0.02	0.22	9.31	99.78
СКВ 035, 2	0.28	0.27	0.02	0.01	0.22	10.22	99.78
СКВ 047, 1	2.57	1.44	0.02	0.01	0.20	9.07	100.00
СКВ 047, 2	0.15	0.36	0.01	0.01	0.70	11.03	99.30
СКВ 047, 3	0.52	0.36	0.02	0.01	0.07	8.98	99.93

На инфракрасных спектрах отложений (рис. 2) фиксируются полосы, характерные для опала, интенсивная полоса колебания $\nu_3[\text{SiO}_4]$ расположена около 1100 см⁻¹, в высокочастотной области расположена интенсивная полоса воды, по спектральным характеристикам близкая к жидкой воде.

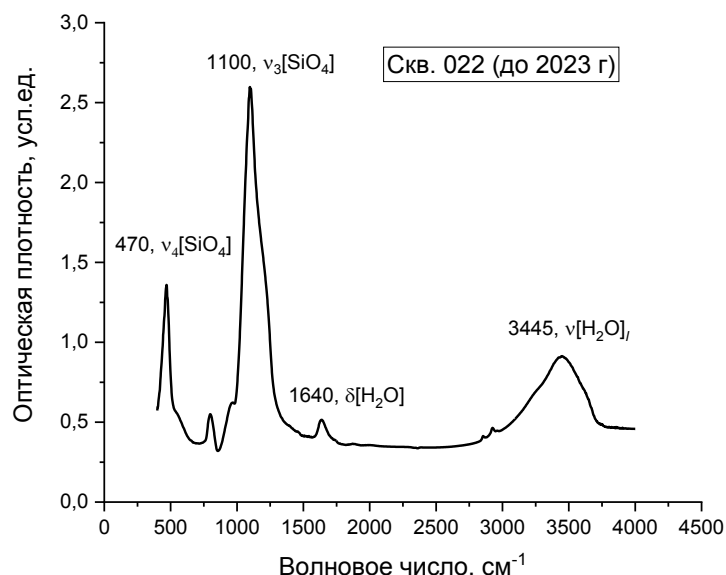


Рис. 2. Пример инфракрасного спектра «силикатного снега», отвечающего опалу $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, скважина 022, до того, как на ней произошел гидротермальный взрыв.

Методом фундаментальных параметров в осадках скважин в виде примесей обнаружены следующие элементы: галлий, индий, германий, хлор, бром, йод, селен, теллур, мышьяк, висмут, серебро, никель, цинк, стронций.

Обсуждение

При повышении температуры и pH растворимость силикатов увеличивается благодаря участию кремнезема в протолитических равновесиях 1-5:



В итоге растворимость кремнезема S зависит не только от температуры, но и от pH:

$$S = S_0(T) \left(1 + \sum_{i=1}^4 \frac{K_i}{[\text{H}^+]^i} \right), \quad (6)$$

где K_i – полные константы диссоциации кремнекислоты по i -й ступени, $S_0(T)$ – температурная зависимость растворимости кремнезема. Множитель, зависящий от pH, резко возрастает в щелочной среде. Поэтому формирование отложений кремнезема вокруг скважин может указывать не только на высокую температуру продуктивного резервуара, но и на слабощелочной или близнейтральный состав термальных флюидов. В случае сильнощелочного флюида, вместо опаловых осадков формировались бы отложения цеолитового состава. Микроэлементный состав свидетельствует о наличии в недрах продуктивного резервуара процессов формирования и преобразования рудных минералов, и скорее всего, с участием блеклых руд [2].

Заключение

На Мутновском месторождении пара происходит выпуск пароводяной смеси из скважин, и в течение многих лет вокруг них сформировались отложения аморфного кремнезема в виде рыхлых студенистых осадков. Отложения визуально напоминают снег, содержат порядка 90 % SiO_2 , и выпадают из пароводяного облака, поступающего из скважин, когда поток охлаждается, вода начинает конденсироваться в виде мелких

капель аэрозоля, с параллельным выделением малорастворимых осадков. Образующийся кремнезем сорбировал элементы термального флюида, среди которых есть рудные, что свидетельствует о поступлении пароводяной смеси из области современного рудообразования. Повышенная растворимость кремнезема в термальном флюиде обусловлена как повышенной температурой продуктивного резервуара, так и pH раствора, который, скорее всего, близнеутральный или слабощелочной.

Работа выполнена в рамках темы НИР «Тепломассоперенос, сейсмичность и минеральные преобразования в гидротермальных и вулканических системах, термогидродинамическое геохимическое геомеханическое моделирование, приложения для оценки геотермальных ресурсов, прогноза катастрофических гидротермальных процессов, извержений вулканов и сильнейших землетрясений» (FWME-2024-0007), с использованием ресурсов ЦКП ИВиС ДВО РАН «Камчатский центр элементного, минерального, изотопного анализа».

Список литературы

1. *Зобенько О.А., Округин В.М., Чернев И.И. и др.* Хемогенные отложения Мутновского геотермального комплекса (Южная Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2021. Вып. 55. № 3. С. 66-76.
2. *Скильская Е.Д., Шишканова К.О., Козлов В.В. и др.* Состав и классификация минералов группы блеклых руд Мутновского золото-серебро-полиметаллического месторождения, Южная Камчатка // Материалы XXVIII конференции, посвященной Дню вулканолога. 24-29 марта 2025 г. ИВиС ДВО РАН, 2025. С. 327-328.
3. *Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Sergeeva A.V. et al.* Magmatic activity of Mutnovsky volcano and the formation of a crater at the place of the blowing well 022 // Journal of Volcanology and Seismology. 2025. V. 19. Is. 4. P. 303-318.
4. *Sergeeva A.V., Rychagov S.N., Kravchenko O.V. et al.* Mineral and geochemical features of zeolite-silica deposits of the Pauzhetka Geothermal Field (Southern Kamchatka) // Journal of Volcanology and Seismology. 2024. V. 18. Is. 1. P. 32-47.
5. *Skilskaya E.D., Sergeeva A.V., Zobenko O.A., Chernev I.I.* Geochemical characteristics and the Ore potential of the Mutnovsky Geothermal Field, Southern Kamchatka // Journal of Volcanology and Seismology. 2025. V. 19. Is. 5. P. 435-450.