УДК 553.251.2 + 551.234

Отложения коллоидного кремнезема из скважин Мутновского геотермального месторождения

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

[1]*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*
anastavalers@gmail.com
[2]*Донецкий государственный университет, 283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, ДНР, Россия*

В работе изучены отложения коллоидного кремнезема, мощностью до десятков сантиметров, и протяженностью до десятков метров вокруг скважин Мутновского месторождения, Камчатка, Россия. Содержание SiO_2 в образцах 80−90%. Методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (фундаментальные параметры) выявлены заметные концентрации Sr, Ba, As, Sb, Se, Te, Cr, Sn и др. Состав отложений связан с глубинными рудообразующими процессами, формированием минералов Au, Ag, Sb, Te, Se, As. Атмосферные осадки не вымывают микроэлементы, так как кремнезем обладает высокой сорбционной емкостью, и тяжелые металлы иммобилизуются в коллоидной силикатной матрице. Отложения формируются из-за поступления на поверхность раствора, пересыщенного относительно выделения аморфного кремнезема, опала. Высокие концентрации кремнезема в растворе обусловлено как щелочной средой, так и высокой температурой продуктивного резервуара.

Colloidal Silica Deposits From The Mutnovsky Geothermal Field Wells

Anastasia V. Sergeeva[1], Nikita B. Zhuravlev[1], Alexey V. Kiryukhin[1], Rita I. Lyga[2], Elena V. Kartasheva[1], Maria A. Nazarova[1], Anna A. Kuzmina[1], Olga R. Khubaeva[1], Pavel O. Voronin[1], Natalya A. Maltseva[2], Anastasia D. Vereskun[2]

[1]*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky, Russia*
[2]*Donetsk State University, 24 Universitetskaya Street, Donetsk, Russia*

The work studies colloidal silica deposits, up to tens of centimeters thick, and up to tens of meters long, around the wells of the Mutnovskoye field, Kamchatka, Russia. The SiO_2 content in the samples is 80−90%. Using X-ray fluorescence spectroscopy (fundamental parameters), significant concentrations of Sr, Ba, As, Sb, Se, Te, Cr, Sn, and other elements were identified. The composition of the deposits is related to deep-seated ore-forming processes, the formation of minerals Au, Ag, Sb, Te, Se, As. Precipitation does not wash out trace elements, as silica has a high sorption capacity, and heavy metals are immobilized in a colloidal silicate matrix. Deposits are formed due to the arrival at the surface of a solution that is supersaturated with respect to the allocation of amorphous silica, opal. High concentrations of silica in the solution are due to both the alkaline environment and the high temperature of the productive reservoir.

Введение

Геотермальное месторождение Мутновское, названное по имени вулкана, к которому оно приурочено, находится в 70 км южнее Петропавловска-Камчатского, оно активно используется добычными предприятиями и служит в качестве уникального туристического объекта. Месторождение эксплуатируется для генерации электроэнергии более двух десятков лет, а геологоразведочные работы проводились с середины XX века. От прежних этапов разведки и освоения геотермальных ресурсов, на территории Мутновского геотермального (рудного) района, остались несколько скважин, работающих на выпуск парогазовой смеси. За годы работы вокруг этих скважин сформировались толщи отложений коллоидного кремнезема, мощностью до первых десятков сантиметров, простирающиеся на десятки метров в пределах устья, рис. 1.

Исследованные фонтанирующие скважины расположены на северной периферии вулкана Мутновский. Устья скважин находятся на абсолютных отметках от 765 м для скважины 020, до 1120 м для скважины 035. Скважина 047 расположена в 1200 м к западу от Верхне-Мутновской ГеоЭС на абсолютной отметке 905 м. По результатам ежегодного пробоотбора газа, конденсата, и измерения устьевых температур фонтанирующих скважин установлено, что Na-K геотермометр по химическому составу воды указывает на температуры в диапазоне от 254 до 366 ℃ для скважин 035, и от 270 до 353 ℃ для скважин 020, 022. Скважины разгружают флюиды, обогащенные газом, с соотношением газ/вода от 0.1 до 600 л/кг. Высокие скорости истечения газов вызывают громкий шум, более 110 дБ, и распыл водно-флюидной составляющей потока в виде аэрозоля. Из-за резкого расширения температура струи на устье падает вследствие дроссельного эффекта, например на устье скважины 035 температура факела распыла порядка 80 ℃ [1].



Рисунок 1 – Примеры отложений коллоидного кремнезема; а – вид отложений аморфного кремнезема; б – отложения аморфного кремнезема возле скважины 047 на снежнике

Помимо тепловых ресурсов, в недрах Мутновской геотермальной (рудной) системы сосредоточены запасы ценных металлов, и под влиянием тепла подземных флюидов происходят рудообразующие процессы. Рудоносный потенциал глубинного флюида Мутновского месторождения исследован ранее, отмечаются повышенные концентрации рудных элементов, наличие рудных минералов [2].

Материалы и методы

Образцы отложений были отобраны возле скважин 020, 047, 022, в период 2022–2025 гг. Отдельно для сравнения приведены данные по скважине 035, в стволе которой сформировались отложения кремнезема, но площадь вокруг которой не покрыта осадками. Параллельно были отобраны конденсаты из скважин, для анализа микро- и макроэлементного состава. Элементный состав был выполнен с помощью рентгенофлуоресцентных спектрометров Pioneer-4 (Bruker) и MAX-GVM (Спектрон, Россия). Минеральный состав исследован с помощью рентгеновского дифрактометра Max XRD-7000

(Shimadzu) в диапазоне 6–60 °2θ, с шагом 0.1 °2θ, скорость сканирования составляла 2 град/мин, что эквивалентно выдержке в точке в течение 3 секунд, при вращении образца. Инфракрасные спектры были записаны с помощью инфракрасного спектрометра с преобразованием Фурье IRAffinity-1, в диапазоне волновых чисел 400–4000 $см^{-1}$, с разрешением 4 $см^{-1}$, число сканов составляло 100 [3].

Результаты

Все осадки рентгеноаморфны (рис. 2), в некоторых случаях в составе фиксируется хлорид натрия, глубинный компонент, поступающий вместе с флюидом. Инфракрасные спектры полностью отвечают опалу. Наиболее яркие полосы на инфракрасных спектрах отвечают колебаниям молекул воды и тетраэдрической группировки [SiO_4]. Полосы поглощения широкие, диффузные, что в целом соответствует аморфному состоянию материала отложений. Полоса около 1100 $см^{-1}$, отвечающая колебанию $\nu_3[SiO_4]$, самая интенсивная в инфракрасном спектре силикатов, сливается с полосой около 1000 $см^{-1}$, от полносимметричного колебания $\nu_1[SiO_4]$. Около 800 $см^{-1}$ находится широкая полоса средней интенсивности, у кварца в этой области расположен дублет с максимумами 780 и 800 $см^{-1}$, у опала происходит слияние полос из-за уширения пиков. Полоса деформационного колебания $\nu_2[SiO_4]$ расположена около 470 $см^{-1}$. В высокочастотной области находятся широкие полосы поглощения молекул воды, около 3445 и 3660 $см^{-1}$. По положению они ближе всего к полосам поглощения жидкой воды, так как выделение коллоида происходило при низких температурах, при которых степень гидратации высокая [3].

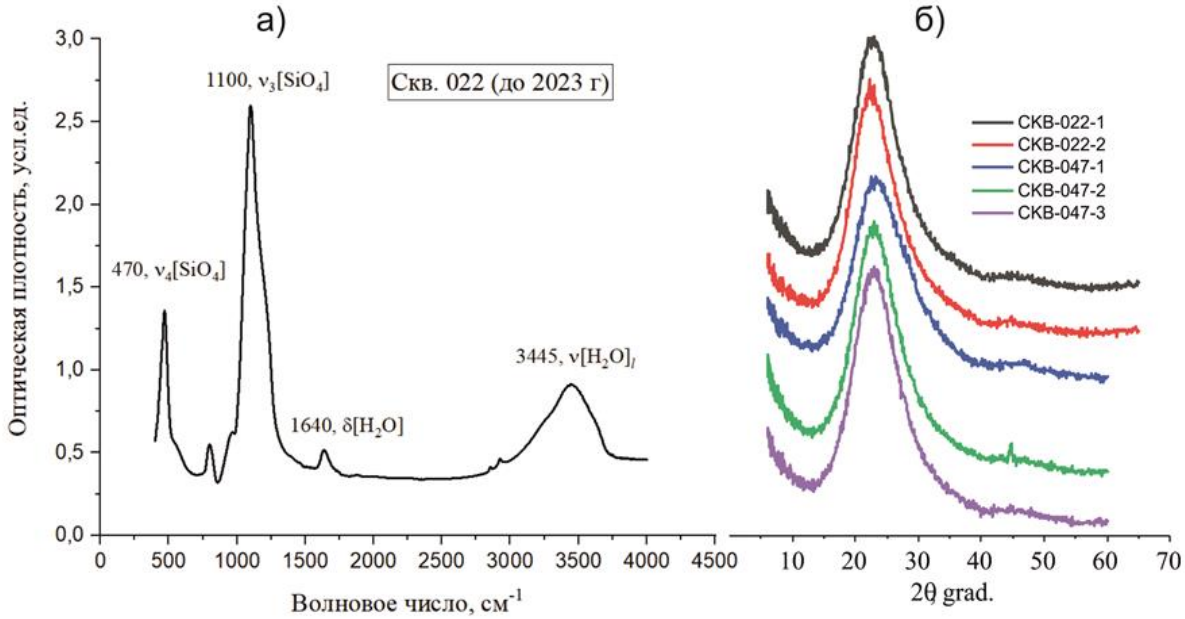


Рисунок 2 – Инфракрасный спектр (а) и дифрактограмма (б) силикатных отложений [3]

Содержание кремнезема находится в пределах 85–90% по массе, концентрации натрия, кальция, калия, магния, алюминия находятся на уровне десятых долей процента. Наиболее вероятно, что алюминий замещает кремний в коллоидном кремнеземе, при этом натрий, калий, кальций компенсируют возникающий отрицательный заряд каркаса. В этом случае сорбционная емкость кремнистых материалов увеличивается, так как подвижные катионы легко обмениваются с катионами окружающей среды. Оценка микроэлементного состава была выполнена с помощью полуколичественного бесстандартного метода фундаментальных параметров, реализованного на рентгенофлуоресцентном спектрометре MAX-GVM. Обнаружены заметные концентрации Sr, Ba, As, Sb, Se, Te, Sb, Cr, Sn,Cs и др.

Обсуждение результатов

В составе отложений коллоидного кремнезема отмечаются повышенные содержания серы, хлора, стронция и бария, эти элементы часто встречаются в составе глубинных нагретых вод. Из микроэлементов присутствуют мышьяк, сурьма, висмут, селен, теллур, золото, цинк, никель, олово, хром, никель, рубидий, цезий, церий, иттрий и др. Этот перечень практически полностью отвечает рудной минерализации, которая известна на месторождениях, приуроченных к Мутновскому вулкану. Наличие микроэлементов в составе отложений может быть объяснено как сорбцией металлов матрицей кремнезема, так и механическими примесями рудных минералов [2].

Образование кремнистых отложений, и их распространение по прискважинным площадям определяется выпадением осадков из остывающего аэрозоля теплоносителя в атмосфере, когда скважина работает на выпуск парогазовой смеси. Глубинный теплоноситель, поступая на дневную поверхность, распыляется под давлением в виде парогазового шлейфа, почти не претерпевая изменений, связанных с взаимодействием вода-порода, смешении с водами различного генезиса, которые неизбежны при естественных разгрузках, однако процессы вскипания и конденсации, по всей видимости, могут присутствовать. Поэтому он несет фактически не искаженную информацию о составе глубинного флюида Мутновского месторождения, его рудоносном потенциале, условиях на глубине, о переносе рудных элементов, которую можно интерпретировать с учетом возможных процессов кипения и конденсации.

Заключение

На Мутновском геотермальном рудном месторождении, расположенном на юге Камчатки, действуют несколько старых скважин, через которые в атмосферу распыляется глубинный флюид, обогащенный кремнеземом и целым спектром других элементов. Струя парогазовой смеси, расширяясь, быстро остывает до атмосферной температуры, водяной пар конденсируется, и образуется аэрозоль. Выпадая на прискважинном пространстве в течение десятков лет, распыляемый аэрозоль сформировал отложения аморфного коллоидного кремнезема, мощностью до первых десятков сантиметров, и протяженностью до первых десятков метров вокруг скважин. Содержание SiO_2 в отложениях находится в пределах 80–90 масс. %, содержание алюминия, натрия, калия, кальция, магния составляет десятые доли процентов, наблюдаются повышенные содержания серы, хлора, стронция, бария. В микроэлементном составе присутствуют Sn, Ba, Au, As, Sb, Zn, Te, Se, P, Ni, Bi, Cr, Ti, Mn, Y, Ce, V, Bi, Rb, I, Cs. Олово, золото, мышьяк, сурьма, теллур, селен, и ряд других элементов входят в состав рудных минералов Мутновского месторождения, чаще всего в виде сульфидов и сульфосолей. Для них благоприятна щелочная среда, так как сульфосоли неустойчивы в кислых средах вследствие протонирования атомов серы в сульфоанионе. Поэтому микроэлементный состав отложений коллоидного кремнезема отражает современные процессы рудообразования Мутновского геотермального рудного месторождения.

Работа выполнена в рамках темы НИР Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН «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, регистрационный номер 124032200001-3.

Использованы ресурсы центра коллективного пользование ИВиС ДВО РАН «Камчатский центр элементного, минерального, изотопного анализа».

Список литературы

1. *Kiryukhin A.V.* Magma Fracking and Production Reservoirs Beneath and Adjacent to Mutnovsky Volcano Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity / *A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, P.O. Voronin, N.B. Zhuravlev, O.O. Usacheva, A.V. Solomatin, P.A. Kiryukhin* // Geothermics. 105. 2022. 102474.

2. *Skilskaya E.D.* Geochemical Characteristics and the Ore Potential of the Mutnovsky Geothermal Field, Southern Kamchatka / *E.D. Skilskaya et al.* // Journal of Volcanology and Seismology. 2025. Т. 19. №. 5. С. 435–450.

3. *Сергеева А.В.,* «Силикатный снег» Мутновского геотермального месторождения: состав, условия образования // В сборнике: Вулканизм и связанные с ним процессы / *А.В. Сергеева, А.В. Кирюхин, Н.Б. Журавлев, П.О. Воронин, О.Р. Хубаева, Р.И. Лыга, Е.В. Карташева, М.А. Назарова, А.А. Кузьмина, Н.А. Мальцева, А.Д. Верескун* // Материалы XXIX ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский. 2025. С. 275–278.