

Экспресс-характеристика минерального состава кернов в исследованиях современных геотермальных систем

Сергеева А.В.¹, Кравченко О.В.¹, Сергеев Я.В.², Назарова М.А.¹, Кузьмина А.А.¹, Карташова Е.В.¹

Express characterization of the mineral composition of cores in studies of modern geothermal systems

Sergeeva A.V., Kravchenko O.V., Sergeev Ya.V., Nazarova M.A., Kuzmina A.A., Kartasheva E.V.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;*

e-mail: anastavalers@gmail.com

² *ООО «Спектрум», г. Москва*

В работе сравниваются возможности инфракрасной спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии для быстрого определения минерального состава образцов, сформированных под влиянием глубинных восходящих нагретых флюидов в пределах современных геотермальных систем.

Введение

Поиск и развитие новых технологий энергетики является приоритетным направлением научных исследований. Геотермальная энергия относится к возобновляемой, чем и обусловлен интерес к современным природным высокотемпературным системам. Также современные геотермальные системы привлекают внимание как потенциальные объекты курортной инфраструктуры, а флюиды рассматриваются в качестве ценного гидроминерального сырья. В ходе геологоразведочных работ современных геотермальных систем исследуется керновый материал, получаемый для уточнения минерального состава, строения зоны разгрузки, реконструкции условий минералообразования. При масштабных работах, объем получаемых образцов довольно большой, вследствие чего становится актуальным вопрос оптимизации минералогических исследований, поиск экспрессных и экономически целесообразных методов определения минерального состава.

В настоящей работе исследуется применение инфракрасной спектроскопии для определения вторичных минералов на примере кернов, полученных в ходе бурения на термальном поле Южно-Камбальное Центральное (ЮКЦ). Это термальное поле входит в группу наиболее мощных геотермальных проявлений Камбального хребта, расположенного на юге Камчатки (рисунок) [3]. Обычно рентгенофазовый анализ и инфракрасная спектроскопия органично дополняют друг друга. Методами ИК спектроскопии удастся охарактеризовать вторичные минералы, обладающие индивидуальными спектрами, определить состояние воды в структурах минералов, уловить тонкие отличия, возникающие при гидротермальном преобразовании первичных минералов. Вопрос, решаемый в настоящей работе, – в какой мере ИК спектроскопия достаточна для реконструкции условий минералообразования, истории месторождения, состава флюидной компоненты.

Материалы и методы

Минеральные ассоциации кернов, полученных в ходе изучения структуры геотермальных месторождений Паужетско-Камбально-Кошелевского района, были исследованы методами рентгеновской дифрактометрии и инфракрасной спектроскопии. Инфракрасные спектры были записаны с помощью инфракрасного спектрофотометра с преобразованием Фурье, IRAffinity-1 (Shimadzu), в диапазоне волновых чисел 400-4000 см⁻¹, с разрешением 4 см⁻¹, число сканов 100. Образцы для исследования были растерты в агатовой ступке с бромидом калия и спрессованы в таблетки. Дифрактограммы записаны с помощью рентгеновского дифрактометра XRD MAX 7000

(Shimadzu), в диапазоне 6-65 °2 θ , с шагом 0.1 °2 θ , скорость сканирования 2 град/мин, при вращении образца.



Рисунок. Южно-Камбальное Центральное термальное поле, вид с севера; на заднем фоне вулкан Камбальный [3], фото М.С. Чернова.

Результаты и обсуждение

В таблице представлены минералы, идентифицированные с помощью инфракрасной спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии. Методом рентгеновской дифрактометрии определяется широкий спектр минералов, как правило, хорошо окристаллизованных. На дифрактограммах хорошо различимы рудные минералы, в нашем случае это в основном пирит и марказит, полевые шпаты, полиморфные модификации кварца, минералы группы алунита и ярозита, сульфаты кальция с различным содержанием кристаллизационной воды, кальцит и др. Однако, плохо окристаллизованный каолинит, аморфные цеолит-опаловые фазы на дифрактограммах практически полностью маскируются яркими кристаллическими минералами.

Между тем, в условиях разгрузки щелочных горячих напорных вод нередко формируются аморфные цеолит-кремнистые или опаловые отложения [2], обладающие повышенной сорбционной емкостью по отношению к ряду элементов термальных флюидов, к ним приурочены рудные минералы, соединения благородных металлов. Если аморфные цеолит-опаловые образования находятся в смеси с хорошо окристаллизованными минералами, то на дифрактограмме они просто не видны. Аморфные цеолит-опаловые смеси являются важным индикатором разгрузки щелочных флюидов [1] и косвенно указывают на благороднометалльную минерализацию. Поэтому методы идентификации подобных образований, особенно в сложных смесях, актуальны.

Таблица. Сравнение минерального состава по данным рентгеновской дифрактометрии и инфракрасной спектроскопии (ИК)

Образец	Минеральный состав по данным дифрактометрии	Минеральный состав по ИК
UKC-1/23-1	Пирит, марказит, аммониярозит, каолинит, анортит, кварц, кристобалит	Каолинит, аммониярозит, модификации кремнезема
UKC-1/23-3	Пирит, аммониярозит, марказит, монтмориллонит, гипс, кремнезем, бассанит	Монтмориллонит, аммониярозит
UKC-1/23-16	Пирит, марказит, аммониярозит, монтмориллонит, кальцит, кварц, анортит, бассанит, натролит	Монтмориллонит, кальцит
UKC-1/23-19	Каолинит, вермикулит, аммониярозит, пирит, марказит, бассанит, микроклин/анортит	Каолинит, смектит
UKC-1/23-39	Монтмориллонит, пирит, аммониярозит, кальцит	Кальцит, смектит
UKC-1/19-53	Кальцит, аммониярозит, пирит, монтмориллонит, каолинит, микроклин	Монтмориллонит, каолинит, кальцит
UKC-2-23-1	Кварц, кальцит, анортит, монтмориллонит, натролит(?)	Монтмориллонит, цеолит
UKC-2-23-7	Кварц, кальцит, монтмориллонит, микроклин, пирит	Монтмориллонит, кальцит
UKC-1/20-60	Кварц(?), кальцит, монтмориллонит, микроклин, пирит	Монтмориллонит, кальцит
UKC-2-23-27	Монтмориллонит, каолинит, пирит, кальцит магнезиальный, микроклин, марказит	Монтмориллонит, каолинит, кальцит
UKC-1/20-27	Монтмориллонит, пирит, марказит, аммониярозит, ангидрит, гипс, кварц	Алунит, ярозит, монтмориллонит
UKC-1/20-11	Монтмориллонит, пирит, аммониярозит, алунит, ангидрит(?)	Монтмориллонит, алунит, аммониярозит
UKC-1/20-4	Каолинит, кристобалит, аммониярозит, алунит, ангидрит	Каолинит, алунит, ярозит, опал
UKC-1/19-46	Кальцит, микроклин, вермикулит	Кальцит, цеолит, монтмориллонит
UKC-1/19-20	Пирит, кварц, алунит, микроклин, смектит, каолинит	Каолинит, алунит, монтмориллонит
UKC-2-19-37	Монтмориллонит, кварц, микроклин, пирит	Монтмориллонит
UKC-2-19-20	Каолинит, кварц, марказит, пирит, кристобалит, алунит, ярозит	Каолинит, алунит, смектит
UKC-2-19-2	Каолинит, кварц, алунит, кристобалит, анортит	Алунит, каолинит, опал
UKC-1/19-1	Монтмориллонит, кварц, ярозит, гейландит, кристобалит, стильбит	Каолинит, смектит, аммониярозит
UKC-1/20-20	Монтмориллонит, пирит, форстерит, феррикопиапит	Монтмориллонит поверхностный
UKC-1/20-30	Монтмориллонит, кварц, пирит, гипс, ярозит	Монтмориллонит, аммониярозит
UKC-1/19-6	Пирит, натролит, микроклин, кварц, аммониярозит	Каолинит, монтмориллонит, аммониярозит или кальцит, цеолиты
UKC-1/20-1	Кварц, кристобалит, анортит, ярозит	Опал, ярозит
UKC-1/19-4	Алунит, ярозит, кварц, пирит, монтмориллонит, каолинит	Каолинит, монтмориллонит, алунит

Методом инфракрасной спектроскопии можно установить ряд вторичных минералов, за исключением рудных. Очень хорошо идентифицируются водные минералы, так как состояние воды в кристаллах замечательно отражается на инфракрасных спектрах. Среди минералов, устанавливаемых с помощью ИК спектроскопии, отметим глинистые, минералы группы алунита и ярозита, карбонаты, в основном кальцит, кристаллогидраты сульфатов кальция. Примечательно, что аморфный цеолит-опаловый гель, «невидимый» для дифрактометра, проявляется на инфракрасных спектрах в виде отчетливого характерного профиля в высокочастотной области, в диапазоне $3000-4000\text{ см}^{-1}$, а также на него указывает смещение основной полосы поглощения силикатных минералов, $\nu_3[\text{SiO}_4]$, которая расположена в диапазоне $1000-1120\text{ см}^{-1}$. При переходе к цеолитам ее максимум смещается от $1030-1040\text{ см}^{-1}$ (каолинит, монтмориллонит диоктаэдрический) к 1050 см^{-1} и выше (большинство цеолитов), а для опала она расположена около 1100 см^{-1} .

Заключение

Вторичные минералы, даже аморфные, хорошо идентифицируются с помощью инфракрасной спектроскопии, что позволяет автоматизировать процесс. Хорошим дополнением является использование рентгеновской дифрактометрии, которая позволяет идентифицировать хорошо окристаллизованные фазы, включая рудные минералы. Если в минеральной ассоциации присутствуют аморфные цеолит-кремнистые смеси, плохо окристаллизованный каолинит, то их сложно идентифицировать с помощью дифрактометрии, но возможно методом инфракрасной спектроскопии.

Работа выполнена в рамках темы НИР ИВиС ДВО РАН № FWME-2024-0005, регистрационный номер 124032200003-7.

Список литературы

1. Сандимирова Е.И., Рычагов С.Н., Сергеева А.В., Чубаров В.М. Цеолитовая минерализация в аргиллизитах Восточно-Паужетского термального поля как индикатор разгрузки щелочного флюида в современной гидротермальной системе (южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2022. № 6. С. 42-62.
2. Сергеева А.В., Рычагов С.Н., Кравченко О.В. и др. Минералого-геохимические особенности цеолит-кремнистых отложений Паужетского геотермального месторождения (южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2024. № 1. С. 36-53.
3. Феофилактов С.О., Рычагов С.Н., Нусебаев И.А. Структура и изменение термальных полей южной группы Камбального вулканического хребта (Камчатка) по температурным съемкам грунтов // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2024. №. 1. Вып. 61. С. 57-71.