На правах рукописи

PornanuturoAB

Романенко Александр Владимирович

Поведение структур К-кимрита (KAlSi₃O₈·H₂O) и кокчетавита (KAlSi₃O₈) при высоком давлении

1.6.4 – «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геологоминералогических наук

Новосибирск - 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск.

Научный руководитель:	РАЩЕНКО Сергей Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории метаморфизма и метасоматоза Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
Официальные оппоненты:	ГРОМИЛОВ Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией кристаллохимии Института неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН
	СПИВАК Анна Валерьевна, доктор геолого- минералогических наук, заведующая лабораторией мантии Института экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского РАН
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится «20» мая 2025 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.050.02, созданного на базе ФГБУН ИГМ СО РАН, в конференц-зале.

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Гаськовой О.Л. Тел./факс: +7 (383) 373-03-28; +7(383) 373-05-61 е-mail: gaskova@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН ИГМ СО РАН https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles_dzubenko/romanenko/dis-Romanenko.pdf

Автореферат разослан «14» апреля 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 24.1.050.02 доктор геол.-минер. наук

Aurt

О.Л. Гаськова

введение

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Субдукция коровых пород способна влиять на геохимические характеристики мантии, привнося в неё вещество океанической и континентальной коры. Системы, моделирующие породы океанической коры, хорошо изучены при *PT*-параметрах субдукции, в то время как поведение в субдукционных процессах пород, содержащих калиевый полевой шпат, изучено гораздо слабее и, главным образом, на примере «сухих» модельных составов [1,2]. В присутствии же водосодержащего флюида поведение калиевых полевых шпатов существенно изменяется в сравнении с безводной системой. Согласно экспериментам при высоких *PT*-параметрах, стабильной фазой в системе KAlSi₃O₈-H₂O является «Ккимрит» (KAlSi₃O₈·H₂O), обладающий клатратной структурой [3,4].

Термодинамические расчеты многокомпонентной В системе моделирующие NCKFMASH-H₂O, состав флюилонасышенной континентальной коры, показали, что геотерма «горячей» субдукции пересекает поле стабильности К-кимрита в интервале глубин 200-310 км (~6.5-10 ГПа) [5]. При этом экспериментально стабильность К-кимрита и параметры его уравнения состояния, используемые в термодинамических расчетах, были исследованы только в диапазоне давлений до 6 ГПа. Эти обстоятельства требуют проведения уточняющих экспериментов при бо́льших давлениях [3].

Последние экспериментальные исследования в азотсодержащей метапелитовой системе показали, что в структуру К-кимрита может быть включено до 4 массовых процентов азота [6,7]. Таким образом, К-кимрит можно рассматривать и как фазу-концентратор этого элемента, способную транспортировать азот в мантию в ходе субдукции. Однако возможность обмена летучими компонентами между азотсодержащим К-кимритом и сосуществующим флюидом остается неизученной.

Экспериментально также была получена дегидратированная форма К-кимрита, сохраняющая топологию его кристаллической структуры [8]. Природный аналог данной дегидратированной фазы был обнаружен в 2004 году во включениях в минералах метаморфических пород сверхвысокого давления Кокчетавского массива и зарегистрирован как минерал «кокчетавит» [9]. Генезис этой и многочисленных последующих находок кокчетавита в минеральных включениях из пород метаморфических комплексов и импактитов не имеет однозначной интерпретации [10–14]. В пользу гипотезы образования при высоком давлении говорит необычная стабильность (по крайней мере до 10 ГПа) «рыхлой» каркасной структуры кокчетавита, показанная КР-спектроскопических экспериментах и представляющая большой интерес для кристаллографического изучения данной фазы *in situ* [15].

Научная новизна

монокристальной Благодаря использованию рентгеновской дифракции, в данной работе впервые удалось обнаружить сверхструктурные рефлексы на дифракционных снимках кокчетавита и однозначно показать, что он характеризуется пространственной группой симметрии P6/mcc (Z = 8), не выявленную ранее с использованием порошковой дифракции. В данной работе впервые экспериментально зафиксированы фазовые переходы кристаллических установлена эволюция структур К-кимрита И и кокчетавита при повышении давления, а также параметры сжимаемости необхолимые лля термодинамического моделирования фаз. этих минеральных равновесий с их участием. Поляризационная зависимость КРспектров К-кимрита и аномальное смещение полос ОН-колебаний при повышении давления также описаны в данной работе впервые. Кроме того, в работе показаны и сопоставлены температурные зависимости особенностей КР-спектров, связанных с удалением гостевых молекул H₂O и N₂ из структуры К-кимрита.

Цель и задачи исследования

Целью настоящего исследования является кристаллохимическая характеристика кокчетавита и К-кимрита (включая его азотсодержащую форму) и их поведение при высоких давлениях и температурах, в том числе для дальнейшего использования полученных данных при реконструкции механизмов транспорта калия и летучих компонентов в субдуцируемых коровых породах. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- Определить пространственную группу и координаты атомов структуры кокчетавита
- Определить зависимость объема элементарной ячейки и координат атомов структур кокчетавита и К-кимрита от давления
- Выявить влияние гостевых молекул азота на высокотемпературное поведение К-кимрита

Теоретическая и практическая значимость работы

- В работе установлено, что анизотропия структур К-кимрита и кокчетавита ведёт к значительной зависимости интенсивности линий в спектрах комбинационного рассеяния от ориентации образца, что является необходимой информацией для корректной диагностики этих фаз.
- Полученные результаты показывают, что при дегидратации (удалении молекул H₂O из структуры) монокристаллы К-кимрита могут преобразовываться в монокристаллический кокчетавит, делая невозможной однозначную интерпретацию находок монокристаллов кокчетавита во включениях как результата прямой кристаллизации из расплава/флюида.
- Опубликованные в работе параметры уравнений состояния (в диапазоне до 20 ГПа для К-кимрита и до 10 ГПа для кокчетавита) будут востребованы для термодинамического моделирования минеральных равновесий в породах субдуцирующей континентальной коры.
- В работе экспериментально показано, что в отличие от многих каркасных структур с крупными незаполненными полостями (например, дегидратированных цеолитов), которые, как правило, разрушаются при сжатии до нескольких ГПа [16], кокчетавит сохраняет кристаллическую структуру до давления не менее 10 ГПа. свидетельствовать Последнее моделей может в пользу высокобарического образования находок кокчетавита в полиминеральных включениях.
- Результаты настоящей работы показывают, что азотсодержащий Ккимрит, способный возникать в богатых азотом субдуцирующих метаосадках, при удалении гостевых молекул (N₂, NH₃) может трансформироваться в кокчетавит. Таким образом, образование кокчетавита может происходить при разложении как водного, так и азотсодержащего кимрита, поэтому его находки не могут быть использованы для реконструкции прекурсора.

3

Фактический материал, методы исследования и личный вклад автора

В основе работы лежат данные лабораторных и синхротронных монокристальных дифракционных экспериментов, выполненных при нормальных условиях и при высоком давлении до 20 ГПа с использованием техники алмазных наковален. Для лабораторных экспериментов при комнатных условиях использовался дифрактометр Oxford Diffraction Gemini R Ultra в Новосибирском государственном университете.

Монокристальные дифракционные эксперименты при высоком давлении (в гидростатических условиях) были выполнены в Немецком национальном синхротронном центре (DESY) на станции P02.2. Данные высокотемпературной и высокобарической спектроскопии комбинационного рассеяния были получены на спектрометре Horiba Jobin Yvon LabRAM HR800 в ИГМ СО РАН. Большинство экспериментов и вся обработка данных проводились соискателем.

Основные защищаемые положения

- Структура минерала кокчетавита (KAlSi₃O₈) имеет пространственную группу симметрии *P6/mcc* (*Z* = 8); параметры *а* и *с* элементарной ячейки кокчетавита удвоены относительно параметров ячейки К-кимрита (*P6/mmm*, *Z* = 1)
- При повышении давления до ~0.3 ГПа кокчетавит (KAlSi₃O₈) испытывает фазовый переход P6/mcc → P6c2; при давлении выше 10 ГПа наблюдаются признаки несоразмерной модуляции. Фаза с симметрией P6c2 в диапазоне давлений 0.3 10 ГПа имеет параметры уравнения состояния Берча-Мурнагана второго порядка V₀ = 1486(3) Å³, K₀ = 59(2) ГПа.
- К-кимрит сохраняет исходную симметрию *P6/mmm* до давления ~8 ГПа, а при дальнейшем повышении давления наблюдается появление сателлитных рефлексов, аналогичных наблюдавшимся у кокчетавита выше 10 ГПа. Сжимаемость К-кимрита в диапазоне давлений до 20 ГПа описывается уравнением Берча-Мурнагана третьего порядка с параметрами V₀ = 190.45(12) Å³, K₀ = 56.5(7) ГПа, K₀' = 3.2(12);
- В отличии от К-кимрита, в котором потеря «гостевых» молекул H₂O начинается при 300°C и заканчивается при 500°C, азотсодержащий (~5% мас.) К-кимрит сохраняет «гостевые» молекулы N₂ до температуры 550°C, теряя их в узком диапазоне температур 550-

600°С. В обоих случаях продуктом потери гостевых молекул является кокчетавит.

Публикации и апробация результатов исследования

По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Основные положения работы представлены на 4 российских и 1 международной конференции.

Соответствие результатов работы научным специальностям

Результаты работы соответствуют пунктам 8 (Кристаллография и кристаллохимия минералов, их техногенных и синтетических аналогов), 10 (Теория симметрии кристаллов) и 11 (Рентгеноструктурный анализ и другие методы изучения строения кристаллов) паспорта научной специальности 1.6.4 «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых».

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения общим объемом 87 страниц. В ней содержится 41 рисунок и 5 таблиц. Список литературы включает 83 наименования.

Благодарности

Автор выражает искренние благодарности к.г.-м.н. Ращенко С.В., д.г.-м.н. Корсакову А.В., д.г.-м.н. Соколу А.Г., д.х.н. Сереткину Ю.В., Dr. habil. Глазырину К.В., д.г.-м.н. Коху К.А., Елисеевой Л.П., Мусияченко К.А., к.г.-м.н. Лихачевой А. Ю., к.ф-м.н. Горяйнову С.В., д.х.н. Болдыревой Е.В., д.г.-м.н. Сокол Э.В., д.г.-м.н. Беккер Т.Б.

ГЛАВА 1

В данной главе приводятся результаты исследования кристаллических структур К-кимрита (KAlSi₃O₈·H₂O) и его дегидратированной формы — кокчетавита (KAlSi₃O₈) и анализируются их структурные различия.

Было установлено, что К-кимрит обладает высшей для данной топологии структуры гексагональной пространственной группой симметрии P6/mmm (Z = 1) с параметрами ячейки a = 5.3361(3) Å и c = 7.7081(7) Å. Структура К-кимрита состоит из попарно соединенных через мостиковые атомы кислорода тетраэдрических сеток [(Al,Si)₂O₅]_{2∞} мусковитого типа. Все тетраэдрических сеток имеют шестичленные кольца правильную гексагональную форму с Т-О-Т углом равным 120°. Попарно соединенные сетки образуют двойные тетраэдрические слои, внутри которых между смежными шестичленными кольцами находятся полости с объемом порядка ~100 Å³ (см. Рисунок 1*b*). Полости заселены молекулами H₂O в расщепленной вдоль оси с позиции. Двойные тетраэдрические слои чередуются с катионами К⁺, так что шестичленные кольца соседних слоев имеют общую ось, на которой и располагаются катионы. Таким образом, 12 атомов кислорода шестичленных колец координируют катионы К⁺, образуя гексагональную призму. При этом расстояние до кислорода молекулы H₂O, расположенной внутри двойного тетраэдрического слоя, не позволяет отнести ее к координации катионов К⁺.

Дегидратация К-кимрита с образованием кокчетавита происходит с сохранением монокристаллического состояния, что свидетельствует о способности молекул H₂O покинуть при высокой температуре кристаллическую структуру без ее разрушения.

В отличие от К-кимрита, кокчетавит (KAlSi₃O₈) имеет пространственную группу P6/mcc с удвоенными параметрами ячейки по всем направлениям a = b = 10.5757(3) Å и c = 15.6404(6) Å (Z = 8). В работе показано, что структура кокчетавита включает как правильные (І-го типа), так и искаженные (ІІ-го типа) шестичленные кольца, что обуславливается, главным образом, отсутствием стабилизирующих молекул H₂O в полостях двойных тетраэдрических слоев (см. Рисунок 1*d*).

6



Рисунок 1. Структуры К-кимрита и кокчетавита: (*a*, *b*) вдоль направления [001]; (*c*, *d*) в перспективе; (*e*, *f*) вдоль направления [100]

В структуре кокчетавита расстояния от катионов K⁺ в позиции K1, находящихся на оси колец I-го типа, до атомов кислородов этих колец сохраняются эквивалентными друг другу. Таким образом, координационный полиэдр позиции K1 остается правильной гексагональной призмой. В то же время, расстояния между K⁺ в позиции K2 и атомами кислорода шестичленных колец II-го типа становятся неэквивалентными, и координационным полиэдром оказывается искаженная гексагональная призма.

Важным отличием структуры кокчетавита является увеличенное межслоевое расстояние и уменьшенное расстояние между центрами шестичленных колец в пределах тетраэдрической сетки.

ГЛАВА 2

Во второй главе приводятся результаты исследования сжимаемости кокчетавита до давления 11.8 ГПа, выполненные при помощи

монокристальной синхротронной рентгеновской дифракции. Исходная модификация кокчетавита («кокчетавит-І», P6/mcc) претерпевает фазовый переход уже при давлении 0.3 ГПа с уменьшением объема на 2.7% в модификацию с пространственной группой $P\overline{6}c2$ — кокчетавит-II (см. Рисунок 2). Этот переход обусловлен искажением шестичленных колец І-го типа, угол дитригонального разворота которых изменяется с 0 до 2° (при этом соответствующий угол в кольцах II-го типа составляет 4°). Угол дитригонального разворота выражается следующей формулой: $\alpha = 1/6 \cdot \sum_{i=1}^{6} |120 - \varphi_i|/2$; где φ_i — угол между базальными вершинами соседних тетраэдров, сочлененных в шестичленное кольцо.



Рисунок 2. (а) Структура кокчетавита при атмосферном давлении; (b) кокчетавит-II при давлении 0.8 ГПа; (c) результат скачкообразного увеличения дитригонального разворота шестичленных колец кокчетавита-II при увеличения давления с 0.8 до 1.8 ГПа. Римские цифры обозначают типы колец.

При дальнейшем повышении давления с 0.8 до 1.8 ГПа угол дитригонального разворота увеличивается до 10-11° для обоих типов колец.

Это приводит к возникновению псевдосимметрии *P*6₃/*mcm* с уменьшением интенсивности рефлексов, запрещенных в данной пространственной группе. Эти рефлексы, однако, сохраняются вплоть до давления 10.8 ГПа.

Расстояния от катионов K⁺ (в обеих позициях K1 и K2) до трех пар атомов кислородов координирующих их шестичленных колец при дитригональном развороте увеличиваются, а до других трех пар – сокращаются. Это приводит к тому, что при давлении 1.8 ГПа три пары атомов кислорода выходят из координации K⁺, и координация катионов меняется с гексагональной призматической на октаэдрическую.

При давлении выше 10.4 ГПа на дифракционных картинах сателлитные рефлексы, указывающие кокчетавита появляются на возникновение модуляции структуры, подобной описанной для минерала кимрита BaAl₂Si₂O₈·H₂O. После сброса давления структура кокчетавита монокристаллическому возврашается исходному состоянию к пространственной группой Р6/mcc. Для фазы кокчетавит-II в диапазоне давлений от 0.3 до 10.4 ГПа было рассчитано уравнение состояния Берча-Мурнагана второго порядка с параметрами $V_0 = 1486(3)$ Å³, $K_0 = 59(2)$ ГПа.

ГЛАВА З

В третьей главе приводятся результаты исследования поведения структуры К-кимрита до 20 ГПа методом монокристальной синхротронной рентгеновской дифракции. В отличие от кокчетавита, который при давлении ~0.3 ГПа претерпевает фазовый переход из пространственной группы P6/mcc в $P\overline{6}c2$, К-кимрит сохраняет исходную симметрию P6/mmm до давления ~8 ГПа.

В противоположность поведению кокчетавита, где основным механизмом сжатия является сокращение межслоевого расстояния и дитригонализация колец, в структуре К-кимрита при повышении давления до ~8 ГПа дитригонализации колец не наблюдается, а сжатие происходит, главным образом, за счет сокращения межслоевого расстояния. Это явление связано с присутствием в полостях двойного тетраэдрического слоя молекул H₂O, которые предотвращают искажение каркаса.

Расстояния между катионами K^+ И атомами кислорода координирующих его шестичленных колец остаются эквивалентными за счет симметрически «зафиксированной» формы колец. При этом при давлении 3.3 ГПа расстояние до атома кислорода молекулы H₂O. расположенной внутри двойного тетраэдрического слоя, становится сопоставимым с расстоянием между калием и атомами кислорода шестичленных колец, позволяя отнести молекулу H₂O к координации K⁺.

9



Рисунок 3. Зависимость от давления нормированого на Z объема элементарной ячейки К-кимрита (квадраты – данные этой работы, треугольники – данные [3]; линиями даны соответствующие уравнения состояния). Для сравнения крестиками приведены данные кокчетавита.

При давлении выше ~8 ГПа на дифракционных картинах К-кимрита сателлитные рефлексы, аналогичные наблюдавшимся появляются V кокчетавита выше ~11 ГПа и указывающие на возникновение модуляции структуры. В то же время, в диапазоне давлений 8 – 20 ГПа приближенную (без учета модуляции) структуру можно по-прежнему уточнить В пространственной группе Р6/ттт. Использование в эксперименте гидростатической среды и более широкого диапазона давлений позволило ранних публикаций) уточнить (относительно существенно модуль объемного сжатия К-кимрита $K_0 = 56.5(7)$ ГПа (см. Рисунок 3).

ГЛАВА 4

В главе обсуждаются поляризационная зависимость КР-спектров Ккимрита, температурная зависимость КР-спектров К-кимрита и азотсодержащего К-кимрита, а также зависимость КР-спектров К-кимрита от давления (включая анализ высокочастотной области ОН-колебаний).

Поляризационная зависимость линий на 833 см $^{-1}$ и в ОН-области указывает на принадлежность данных колебаний к симметрии типа E_{2g} , а

присутствие линии 381 см⁻¹ во всех ориентациях подтверждает принадлежность к симметрии A_{1g} (см. Рисунок 4). В случае ОН-колебаний, наблюдаемая поляризационная зависимость свидетельствует о том, что ориентация ковалентных связей О-Н молекул H₂O почти перпендикулярна оси [001].



Рисунок 4. Поляризованные КР-спектры К-кимрита (KAlSi₃O₈·H₂O) в зависимости от ориентации образца

В отличие от К-кимрита, в котором дегидратация проявляется в равномерном смещении линий КР-спектра в широком диапазоне температур 300-550°С (см. Рисунок 5), в азотзамещенной форме аналогичный процесс (потеря «гостевых» молекул N₂) происходит в более узком диапазоне температур (550-600°С) и характеризуется резким изменением положения линий в КР-спектре (см. Рисунок 5). При этом продукт распада обеих фаз идентичен и представляет собой кокчетавит. Различная температурная зависимость полосы 833 см⁻¹ (823 см⁻¹ в случае азотсодержащего К-кимрита) демонстрирует, что молекулы H₂O также участвует в колебаниях каркаса (см. Рисунок 5*b*).



Рисунок 5. Температурная зависимость частот КР-линий К-кимрита (синий цвет) и азотсодержащего К-кимрита (красный цвет)

Эксперимент по сжатию К-кимрита показал, что основные полосы $(381 \text{ см}^{-1} \text{ и } 833 \text{ см}^{-1})$ в КР-спектре К-кимрита при высоком давлении сдвигаются в высокочастотную область (см. Рисунок 6*b*-*c*), тогда как полоса ОН-колебаний демонстрирует аномальное поведение (см. Рисунок 6*a*). При увеличении давления с 1 атм до 2 ГПа эта полоса сдвигается в низкочастотную область, затем (2 – 4 ГПа) ее частота возрастает до исходного значения и при более высоких давлениях (4 – 12 ГПа) остается неизменной (см. Рисунок ба). Такое поведение, по-видимому, связано с изменением ориентации молекул H₂O и перестройкой системы водородных связей.



Рисунок 6. Зависимость от давления частот частот КР-линий К-кимрита: (a) ОН-область; (b) полоса 382 см⁻¹; (c) полоса 830 см⁻¹

Заключение

Результаты данной работы свидетельствуют о том, что ключевым фактором, определяющим геометрию клатратных кристаллических структур К-кимрита и кокчетавита, а также их поведение при высоком давлении и высокой температуре, является наличие и природа «гостевых» молекул.

Так, результаты первой главы демонстрируют, что симметрия Al/Siкаркаса К-кимрита и кокчетавита определяется наличием или отсутствием гостевой молекулы H₂O в полости двойного тетраэдрического слоя. В частности, наличие H₂O предотвращает дитригональное искажение каркаса, «фиксируя» гексагональную симметрию шестичленных колец.

Сопоставление результатов второй и третьей глав позволяет сделать вывод о роли «гостевых» молекул в полиморфных переходах и эволюции кристаллических структур К-кимрита и кокчетавита при повышении давления. В частности, структурные различия этих фаз, наблюдаемые при атмосферном давлении, в высокобарических условиях становятся еще более выраженными: в безводной фазе происходит дальнейшая деформация шестичленных колец, в то время как водосодержащая фаза сохраняет их гексагональную симметрию за счет стабилизирующей молекулы H₂O в полости двойного тетраэдрического слоя.

Результаты работы, описанные в четвертой главе, показывают, что температура удаления «гостевых» молекул из полостей клатратной структуры К-кимрита зависит от природы этих молекул и отличается в случае H_2O и N_2 . Интересно, что гостевые молекулы в структуре К-кимрита могут играть не только «стерическую» роль (стабилизация геометрии шестичленных колец двойного тетраэдрического слоя молекулами H_2O и N_2), но и роль «химическую» (образование ионно-дипольных связей с катионами K^+ и водородных связей с атомами кислорода двойного тетраэдрического слоя молекулами H_2O).

Список научных трудов по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Romanenko A.V., Rashchenko S.V., Sokol A.G., Korsakov A.V., Seryotkin Yu. V., Glazyrin K.V., Musiyachenko K.A., Crystal structures of K-cymrite and kokchetavite from single-crystal X-ray diffraction // American Mineralogist. 2021. Vol. 106, № 3. P. 404–409.

2. Romanenko A.V., Rashchenko S.V., Korsakov A.V., Sokol A.G., Kokh K.A., Compressibility and pressure-induced structural evolution of

kokchetavite, hexagonal polymorph of KAlSi₃O₈, by single-crystal X-ray diffraction // American Mineralogist. 2024. Vol. 109, \mathbb{N}_{2} 7. P. 1284–1291. 3. Korsakov A.V., Romanenko A.V., Sokol A.G., Musiyachenko K.A., Raman spectroscopic study of the transformation of nitrogen-bearing K-cymrite during heating experiments: Origin of kokchetavite in high-pressure metamorphic rocks // Journal of Raman Spectroscopy. 2023. Vol. 54, \mathbb{N}_{2} 11. P. 1183–1190.

4. Romanenko A.V., Rashchenko S.V., Korsakov A.V., Sokol A.G., High pressure behavior of K-cymrite (KAlSi₃O₈·H₂O) crystal structure // Physics and Chemistry of Minerals. 2024. Vol. 51, N_{2} 3. P. 36.

Тезисы конференций:

1. Романенко, А. В. Кристаллическая структура и сжимаемость высокобарического KAlSi₃O₈·H₂O и его дегидратированной формы / А. В. Романенко // MHCK-2020: Материалы 58-й Международной научной студенческой конференции, Новосибирск, 10–13 апреля 2020 года. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2020. – С. 148.

2. Романенко А.В., Ращенко С.В., Корсаков А.В., Глазырин К.В. Уравнение состояния и эволюция структуры кокчетавита при высоком давлении по данным монокристалльной рентгеновской дифракции / А. В. Романенко // ВЕСЭПМГ 2023: Тезисы докладов Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии, Москва, 11-12 апреля 2023 г. – Москва: Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, 2023. – С. 107.

3. Romanenko A.V., Rashchenko S.V., Korsakov A.V. «Highpressure behavior of K-cymrite OH-band» / A.V. Romanenko // GeoRaman 2022: Book of Abstracts of 15th International GeoRaman Conference, г. Прага, Чехия, 29 августа – 1 сентября 2022,) – Prague: Charles University, 2022. – C. 58

4. Romanenko A.V., Rashchenko S.V., Korsakov A.V. «HPHT decomposition of K-cymrite (KAlSi₃O₈·H₂O)» / A.V. Romanenko // GeoRaman 2022: Book of Abstracts of 15th International GeoRaman Conference, г. Прага, Чехия, 29 августа – 1 сентября 2022,) – Prague: Charles University, 2022. – С. 59

5. Романенко, А. В. Сжимаемость и структурная эволюция при высоком давлении гексагонального полиморфна KAlSi₃O₈ по данным монокристальной рентгеновской дифракции / А. В. Романенко //

МНСК-2022: Материалы 60-й Международной научной студенческой конференции, Новосибирск, 10–20 апреля 2022 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2022. – С. 194.

6. Романенко, А. В. Ращенко С.В., Корсаков А.В. Разложение Ккимрита (KAlSi₃O₈·H₂O) при высоких РТ-параметрах / А. В. Романенко // ВЕСЭПМГ 2023: Тезисы докладов Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии, Москва, 11-12 апреля 2023 г. – Москва: Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, 2023. – С. 111.

Список литературы:

- 1. Armstrong R.L. et al. Radiogenic isotopes: the case for crustal recycling on a near-steady-state nocontinental-growth Earth // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. Royal Society, 1997. Vol. 301, № 1461. P. 443–472.
- Irifune T., Ringwood A.E., Hibberson W.O. Subduction of continental crust and terrigenous and pelagic sediments: an experimental study // Earth and Planetary Science Letters. 1994. Vol. 126, № 4. P. 351–368.
- Fasshauer D.W., Chatterjee N.D., Marler B. Synthesis, structure, thermodynamic properties, and stability relations of K-cymrite, K[AlSi₃O₈]· H₂O // Physics and Chemistry of Minerals. 1997. Vol. 24, № 6. P. 455– 462.
- 4. Seki Y., Kennedy G.C. The breakdown of potassium feldspar, KAlSi₃O₈ at high temperatures and high pressures // American Mineralogist. 1964. Vol. 49. P. 1688–1706.
- Chapman T., Clarke G.L., Daczko N.R. The role of buoyancy in the fate of ultra-high-pressure eclogites // Scientific Reports. 2019. Vol. 9, № 1.
- Sokol A.G. et al. Nitrogen storage capacity of phengitic muscovite and K-cymrite under the conditions of hot subduction and ultra-high pressure metamorphism // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2023. Vol. 355. P. 89–109.
- Sokol A.G. et al. Cymrite as mineral clathrate: An overlooked redox insensitive transporter of nitrogen in the mantle // Gondwana Research. 2020. Vol. 79. P. 70–86.
- Thompson P. et al. The breakdown of potassium feldspar at high water pressures // Contrib Mineral Petr. 1998. Vol. 130. P. 176–186.
- Hwang S.L. et al. Kokchetavite: a new potassium-feldspar polymorph from the Kokchetav ultrahighpressure terrane // Contrib Mineral Petr. 2004. Vol. 148. P. 380–389.
- Carvalho B.B. et al. Anatexis and fluid regime of the deep continental crust: New clues from melt and fluid inclusions in metapelitic migmatites from Ivrea Zone (NW Italy): 7 // Journal of Metamorphic Geology. 2019. Vol. 37, № 7. P. 951–975.
- 11. Baldwin S.L. et al. Garnet sand reveals rock recycling processes in the youngest exhumed high- and ultrahigh-pressure terrane on Earth // PNAS. National Academy of Sciences, 2021. Vol. 118, № 3. P. e2017231118.
- Ferrero S. et al. Kumdykolite, kokchetavite, and cristobalite crystallized in nanogranites from felsic granulites, Orlica-Snieznik Dome (Bohemian Massif): not evidence for ultrahigh-pressure conditions: 1 // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2016. Vol. 171, № 1. P. 1–12.
- 13. Stähle V. et al. Newly detected shock-induced high-pressure phases formed in amphibolite clasts of the suevite breccia (Ries impact crater, Germany): Liebermannite, kokchetavite, and other ultrahigh-pressure phases // Contrib Mineral Petrol. 2022. Vol. 177, № 8. P. 80.
- 14. Nicoli G., Gresky K., Ferrero S. Mesoarchean melt and fluid inclusions in garnet from the Kangerlussuaq basement, Southeast Greenland // Mineralogia. 2022. Vol. 53, № 1. P. 1–9.
- 15. Kanzaki M. et al. Raman and NMR spectroscopic characterization of high-pressure K-cymrite (KAlSi₃O₈·H₂O) and its anhydrous form (kokchetavite) // J Miner Petrol Sci. 2012. Vol. 107. P. 114–119.
- Thibaud J.-M. et al. High-Pressure Phase Transition, Pore Collapse, and Amorphization in the Siliceous 1D Zeolite, TON // J. Phys. Chem. C. American Chemical Society, 2017. Vol. 121, № 8. P. 4283–4292.