



Научная статья

Включения кристаллов алмаза в турмалине шерл-увитового ряда: проблемы генезиса

А.В.КОРСАКОВ¹✉, Д.С.МИХАЙЛЕНКО¹, ЛЭ ЧЖАН², ЮГАНГ ШУ²¹ Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия² Институт геохимии и Центр изучения глубинного строения Земли Китайской академии наук, Гуанчжоу, Китай

Как цитировать эту статью: Корсаков А.В., Михайленко Д.С., Чжан Лэ, Шу Юганг. Включения кристаллов алмаза в турмалине шерл-увитового ряда: проблемы генезиса // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 833-841. EDN UMQOXX

Аннотация. Детально исследованы минералогическо-геохимические особенности кристаллов турмалина (шерл-увитового ряда), содержащих включения кристаллов алмаза, из гранат-клинопироксеновых пород Кумдыкольского месторождения (Северный Казахстан). Формирование основных породообразующих минералов (гранат + К-содержащий клинопироксен) происходило в поле стабильности алмаза при 4–6 ГПа и 950–1000 °С. Кристаллизация К-содержащего клинопироксена при этих параметрах возможна в присутствии ультракалийевого флюида или расплава, образовавшегося в результате плавления корового материала, в зонах субдукции. Кристаллы турмалина (до 1 см), содержащие включения алмаза, выполняют жилы, секущие высокobarические ассоциации. Состав отдельных зон варьирует от шерла до увита в пределах как одного зерна, так и образца в целом. Содержание калия в этом турмалине не превышает 0,1 мас.% K₂O, а изотопный состав бора $\delta^{11}\text{B}$ варьирует от –10 до –15,5 ‰, что значительно отличается от установленного ранее изотопного состава бора в кристаллах маруямаита ($\delta^{11}\text{B}$ 7,7 ‰ в ядре и –1,2 ‰ в кайме) этого же месторождения. Анализ полученных данных о $\delta^{11}\text{B}$ в турмалинах алмазной субфации метаморфизма в пределах Кумдыкольского месторождения позволяет предположить существование двух источников бора, следствием чего стала кристаллизация К-содержащих кристаллов турмалина (маруямаит-дравитового ряда) и безкалийевых турмалинов серии шерл-увитового ряда.

Ключевые слова: турмалин; алмаз; изотопный состав бора; силикатно-карбонатные породы; субдукция; метаморфизм высоких давлений; Кокчетав

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 18-17-00186.

Поступила: 01.12.2022

Принята: 19.01.2023

Онлайн: 18.05.2023

Опубликована: 25.12.2023

Введение. Акцессорные минералы (циркон [1–3], касситерит [4], берилл [5, 6] и др.) и особенности их состава широко используются в современных минералогическо-петрологических построениях. Турмалин является одним из таких уникальных минералов, стабильным в широком диапазоне температур и давлений [7, 8], позволяющим реконструировать состав флюидной фазы в зонах субдукции [9, 10]. Турмалин успешно применяется при изучении эволюции состава флюида в месторождениях различных полезных ископаемых [11, 12]. Находки включений кристаллов алмаза в богатых калием кристаллах турмалина [13] в породах Кумдыкольского месторождения технических алмазов (Кокчетавский массив, Северный Казахстан) позволили не только предположить, что кристаллизация этого турмалина начиналась на пике метаморфизма 6 ГПа и ~1000 °С в поле стабильности алмаза, но и привели к утверждению нового минерального вида – маруямаита [14]. Однако Ar-Ar датирование К-содержащего турмалина [15] и отсутствие других включений высокobarических фаз в этом минерале [7, 16] заставили усомниться в высокobarической природе маруямаита. Успешный синтез К-дравита реализован при давлении 4 ГПа и 700 °С из ультракалийевого флюида [17–19], что вернуло интерес к высокobarической модели образования маруямаита. Ранее в породах Кокчетавского массива выявлен другой К-содержащий минерал – клинопироксен (с содержанием



K₂O до 1,5 мас.%), происхождение которого также связывают с высокими давлениями и температурами в присутствии ультракалиевого флюида (расплава) [20-22]. Следы существования ультракалиевых флюидов (расплавов) в этих же породах диагностированы в субмикроскопических включениях в кристаллах алмаза [23], а также породообразующих минералах [24]. В этих же породах В.С.Шацким впервые включения кристаллов алмаза диагностированы в турмалине, но его состав неизвестен. В отличие от кимберлитовых кристаллов алмаза, высокобарическое происхождение которых не вызывает сомнений [25], первые находки кристаллов алмаза в низкобарических минералах привели к возникновению метастабильной модели образования алмаза в коровых метаморфических породах [26]. В статье приводятся результаты изотопно-геохимического исследования кристаллов алмазосодержащего турмалина из гранат-пироксеновых пород Кумдыкольского месторождения, способствующие совершенствованию представлений о поведении бороносных флюидов (расплавов) и их мобильности в зонах субдукции.

Кокчетавский массив приобрел широкую известность благодаря находкам алмаза в коровых породах [27]. Он расположен в центральной части Урало-Монгольского складчатого пояса [28]. Кокчетавский массив рассматривается как зона мегамеланжа, протяженностью более 80 км и шириной около 17 км [28]. Кумдыколь – самый известный участок сверхвысоких давлений в пределах этого массива. Это месторождение микроалмазов, расположенное на южном берегу одноименного озера. Внутренняя структура этого блока известна благодаря результатам детальных геологоразведочных работ, выполненных при оценке запасов месторождения. В структурном плане породы Кумдыкольского блока залегают субвертикально с крутым углом падения слоев (~70°) в юго-западном направлении. Здесь описаны следующие типы пород: эклогиты, амфиболиты, карбонатно-силикатные породы, мигматиты, сланцы и различные гнейсы, являющиеся основным типом руд [26, 27, 29]. Более детальное описание пород и руд данного месторождения представлено в публикациях [30, 31].

Методы. Аналитические работы выполнены в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Новосибирск) и Институте геохимии КАН (Гуанчжоу, Китай). Состав минералов определялся на рентгеноспектральном микроанализаторе Jeol JXA-8100 с ускоряющим напряжением 20 кВ и током зонда 30 нА. Природные минералы и синтетические аналоги использовались в качестве стандартов [32].

Определение *in situ* изотопного состава бора в турмалине осуществлялось на Neptune Plus MC-ICP-MS и ELEMENT XR (Thermo Fisher Scientific), оснащенных системой лазерной абляции (ArF) с лазером 193 нм (Resolution M-50, Resonetics LLC, USA) в Институте геохимии КАН. В качестве стандарта при определении изотопного состава бора использовался IMR RB2 –12,53±0,57 ‰; при определении концентрации рассеянных элементов калибровка производилась на ТВ-1G, BCR-2G, BHVO-2G и GSD-1G с дальнейшим нормированием на содержание SiO₂ в турмалине. Детально данная методика изложена в работе [33]. Аббревиатура минералов приведена согласно работе [34].

Обсуждение результатов. Образец гранат-пироксеновой породы (O24-16) отобран в штольне (24 орт) Кумдыкольского месторождения технических алмазов. Эти породы сложены гранатом (60 об.%) и К-содержащим клинопироксеном (40 об.%). В интерстициях между порфиробластами граната и клинопироксена в незначительном количестве присутствует калиевый полевой шпат (КПШ) и реже кальцит. В исследованном образце прослой, обогащенные гранатом и клинопироксеном, смяты в складки (рис.1). Турмалин выполняет центральные части секущих жил, мощность которых может достигать 1,5 см (рис.1, а). Вокруг этих жил наблюдаются зоны развития хлорита и амфибола (рис.1, б).

В гранате диагностированы следующие минеральные твердофазные включения: алмаз, рутил, клинопироксен (рис.2). В клинопироксене в ядерных частях наряду со структурами распада, представленными ламелями КПШ и фенгита (рис.3, а, б), идентифицированы включения алмаза, граната и рутила. Включения кристаллов алмаза диагностированы в кристаллах турмалина (рис.3, в, г), а также амфибол-хлоритовых агрегатах, замещающих гранат и клинопироксен. Морфология всех исследованных кристаллов алмаза не зависит от минерала-хозяина.

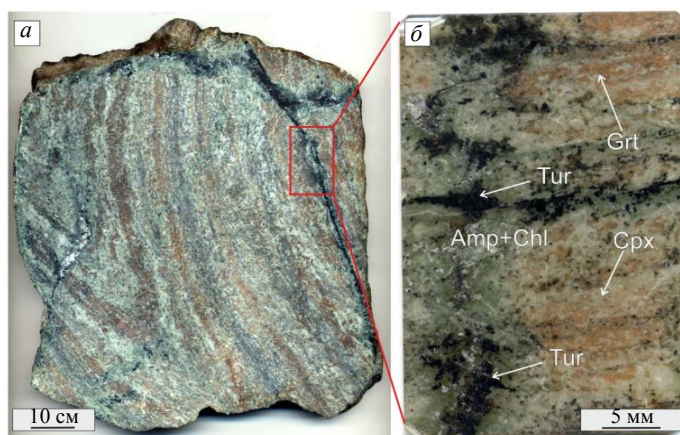


Рис.1. Турмалинсодержащая гранат-клинопироксеновая порода из разведочной штольни Кумдыкольского месторождения алмазов (24 орт): *a* – срез образца; *б* – микрофотография полированной пластинки фрагмента образца, демонстрирующая замещение первичных ассоциаций амфиболом и хлоритом вдоль турмалиновых прожилков

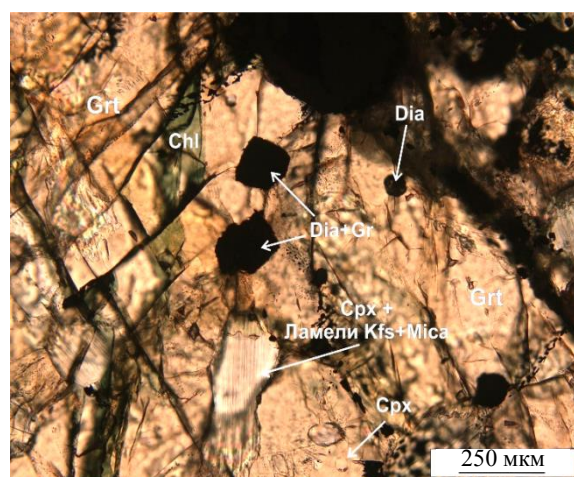


Рис.2. Микрофотография полированной пластинки фрагмента образца гранат-клинопироксеновой породы, демонстрирующая многообразие твердофазных включений в порфиробласте граната

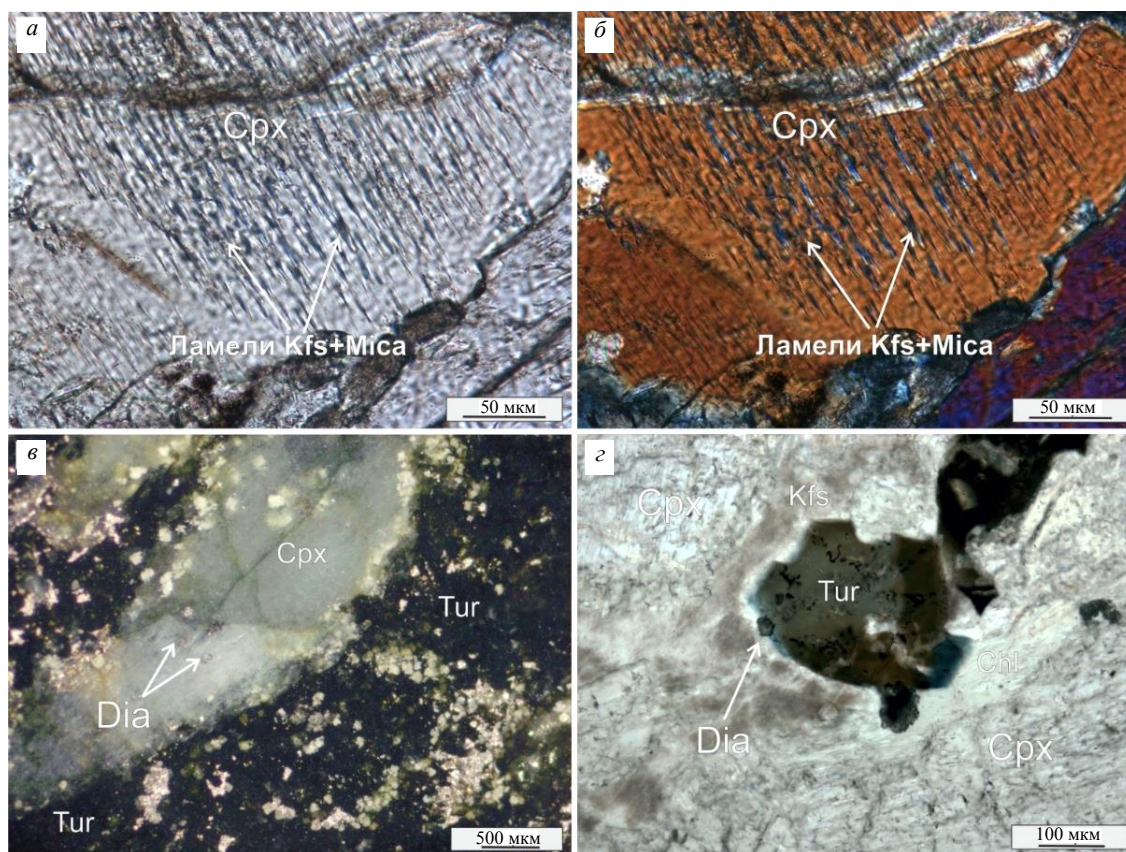


Рис.3. Микрофотографии отдельных участков образца гранат-клинопироксеновой породы (образец O24-16): *a, б* – порфиробласты клинопироксена со структурами распада в ядре, окруженные чистой каймой (николи параллельны и скрещены соответственно); *в* – многочисленные включения кристаллов алмаза (бледно-желтые кристаллы) в клинопироксене и турмалине; *г* – включения кристаллов алмаза в различных зонах зерна турмалина

Составы кристаллов граната и пироксена идентичны составам одноименных минералов ранее изученных образцов гранат-клинопироксеновых пород Кокчетавского массива [27, 29]. Гранаты представлены твердыми растворами пироп-гроссуляр-альмандинового ряда, которые имеют однородное ядро ($\text{Alm}_{23}\text{Sps}_{22}\text{Prp}_{25}\text{Grs}_{50}$), а основные изменения в составе фиксируются в тонких каймах. В каймах увеличивается содержание гроссулярового минала и снижается содержание пиропового



Анализ турмалина из образца
гранат-клинопироксеновых пород
(образец О24-16)

Состав		Зона кристалла	
		Ядро	Край
SiO ₂		35,8	36,0
TiO ₂		0,51	0,65
Al ₂ O ₃		30,0	29,6
Cr ₂ O ₃		н.п.	н.п.
FeO		10,80	6,48
MnO		0,07	0,08
MgO		6,1	9,2
CaO		2,16	3,16
Na ₂ O		1,67	1,25
K ₂ O		0,09	0,05
F		н.о.	н.о.
Σ		87,2	86,5
B	B	3,00	3,00
T	Si	5,98	5,97
	Al	0,02	0,03
	Σ	6,00	6,00
Al (общ.)		5,92	5,78
Z	Al	5,90	5,75
	Cr	0,00	0,00
	Mg	0,10	0,25
	Σ	6,00	6,00
Y	Al	0,00	0,00
	Ti	0,06	0,08
	Cr	0,00	0,00
	Fe ²⁺	1,51	0,90
	Mn ²⁺	0,01	0,01
	Mg	1,41	2,01
Σ		3,00	3,00
X	Ca	0,39	0,56
	Na	0,54	0,40
	K	0,02	0,01
	Вакансия	0,05	0,03
	Σ	1,00	1,00
V	ОН (V+W)	3,66	3,59
	ОН	3,00	3,00
	O	0,00	0,00
W	ОН	0,66	0,59
	F	0,00	0,00
	O	0,34	0,41
V+W общ.		4,00	4,00

Примечания: н.п. – ниже пределов обнаружения; н.о. – не определялось. Структурная формула турмалина $XY_3Z_6(T)_6(B)_3O_{18}V_3W$, где X = (Na, Ca, вакансия); Y = (Fe^{2+/3+}, Mg, Mn, Al, Li, Cr, V); Z = (Mg, Fe³⁺, Al, Cr, V); T = (Si, Al); B = (BO₃); V = (OH, O); W = (OH, F, O).

поскольку экспериментально поле стабильности для турмалина данного состава не исследовалось. Экспериментальные исследования области устойчивости дравита в метapelитовой системе показали, что эта фаза остается стабильной до давлений 5 ГПа при ~700 °C [37]. Однако поле стабильности шерла несколько меньше, и его разложение происходит при давлении 3,5 ГПа [38]. Разложение увита при атмосферном давлении происходит в интервале температур 800-900 °C [39], а продуктами разложения являются редкая минеральная ассоциация индиалит (Mg₂Al₄Si₅O₁₈) + юаньфулит (Mg_{0,73}Fe²⁺_{0,3}Fe³⁺_{0,5}Al_{0,2}Mg_{0,1}Ti_{0,1}(BO₃)O) + плагиоклаз + борсодержащий муллит +

минала (Alm₂₃Sps₂Prp₂₁Grs₅₄) при практически постоянном содержании альмандинового и спессартинового миналов. По химическому составу порфиобласты клинопироксена могут быть отнесены к диопсид-геденбергитовому ряду. Содержание K₂O в ядрах порфиобластов не превосходит 0,3 мас.%, однако наличие многочисленных ламелей КПШ и слюд (рис.3, а, б), идентифицированных методами рентгеноспектрального микроанализа (рис.3, а, б), указывает на то, что изначально это был богатый калием клинопироксен. В краевых зонах порфиобластов структуры распада отсутствуют, а содержание K₂O ниже предела обнаружения.

Макроскопически в исследованном образце кристаллы турмалина выглядят практически черными (рис.3, в), тогда как в шлифах характеризуются ярко выраженной цветовой зональностью – коричневое ядро и голубая кайма (рис.3, г). По химическому составу эти зоны можно отнести к шерлу и увиту по классификации [35], пересчет состава на формульные коэффициенты выполнен согласно рекомендациям [35] (см. таблицу, рис.4).

Включения кристаллов алмаза (размер 10-300 мкм) диагностированы во всех зонах кристаллов турмалина (см. рис.3, в, г). Это первая находка в мире включений кристаллов алмаза в турмалинах шерл-увитового ряда. Ранее включения алмаза были диагностированы исключительно в кристаллах маруямаита [13] и использовались в качестве одного из доказательств высокобарического образования этого необычного турмалина. Аномально высокие содержания калия и необычный изотопный состав бора в маруямаитах также рассматривались с позиции высокобарического образования данного минерала [13, 36]. В исследованном образце турмалиносодержащие жилы рассекают исходно высокобарические минералы – гранат и K-содержащий клинопироксен (см. рис.1) и однозначно доказывают, что кристаллизация турмалина оторвана во времени от формирования основной порообразующей ассоциации. Отсутствие значимых концентраций калия в составе изученного турмалина (см. таблицу) не позволяет датировать время его образования Ar-Ar методом [15] и свидетельствует о том, что ультракалиевая жидкость, являющаяся материнской средой кристаллизации K-содержащего пироксена, не могла быть такой и для турмалина. Достоверно оценить физико-химические условия кристаллизации зерен турмалина шерл-увитового ряда не представляется возможным,

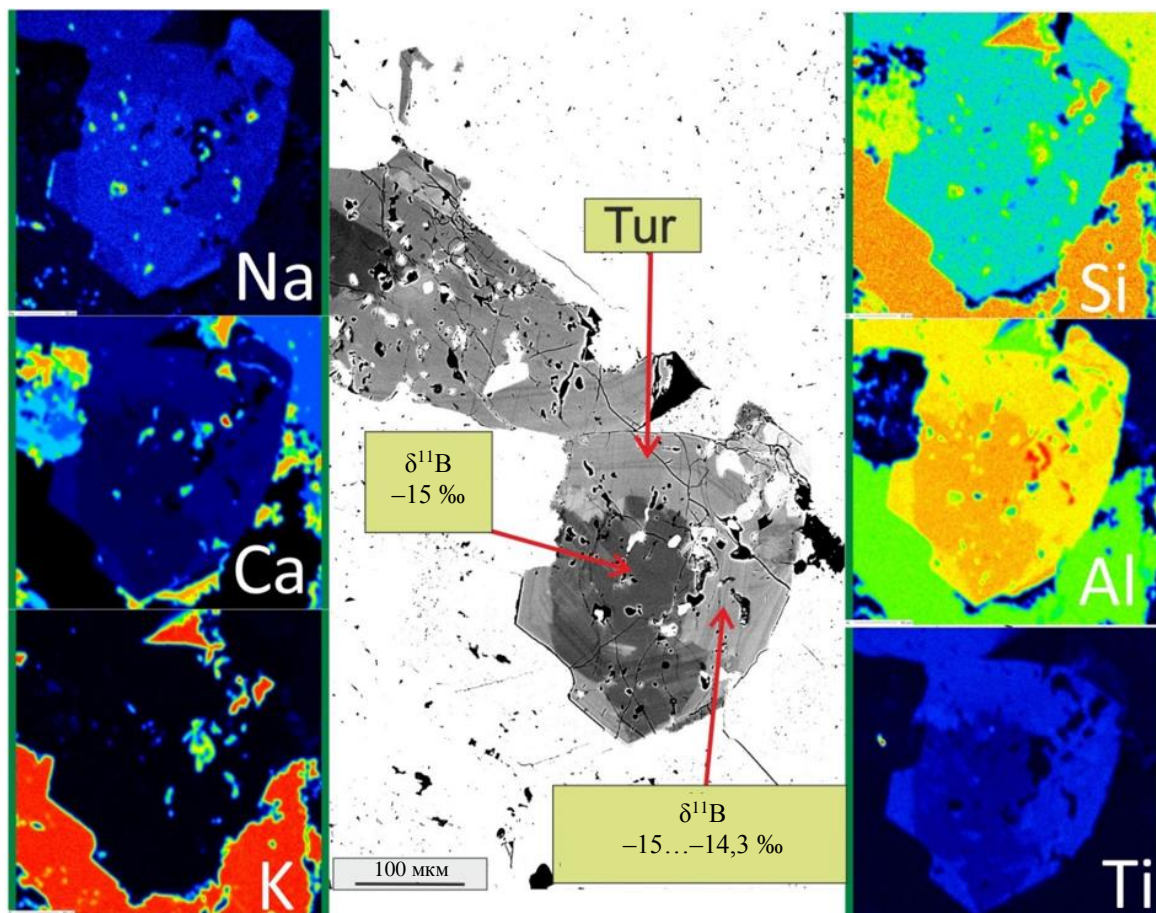


Рис.4. Изображение кристалла турмалина (см. рис.3, з) в обратнорассеянных электронах и карты распределения отдельных элементов в нем

+ гематит. Влияние давления на стабильность этой разновидности турмалина пока не исследовано. Учитывая эти экспериментальные данные, можно предполагать, что кристаллизация турмалина шерл-увитового ряда должна происходить на регрессивном этапе при давлении ниже 3,5 ГПа и температуре < 900 °С. Сосуществование турмалина с КПШ (рис.3, з) еще больше снижает область давлений, в которой может происходить совместная кристаллизация этих минералов, поскольку в водосодержащей системе КПШ нестабилен при давлении выше 2 ГПа и 600 °С [40], тогда как в сухой системе турмалин не был синтезирован [41]. Наличие зон хлоритизации и амфиболитизации вокруг турмалиновых жил (см. рис.1, б) указывает, что их формирование происходило до того как начали формироваться минеральные ассоциации, типичные для зеленосланцевой фации метаморфизма.

Анализ изотопного состава бора $\delta^{11}\text{B}$ в кристаллах турмалина шерл-увитового ряда варьирует от -10 до -15,5 ‰ и значительно отличается от изотопного состава кристаллов маруямаита ($\delta^{11}\text{B}$ 7,7 ‰ в ядре и -1,2 ‰ в кайме) [7, 36]. Для объяснения необычного изотопного состава бора кристаллов маруямаита предложены две модели [7, 36]. Согласно модели, предложенной в [36], изотопный состав бора связан с субдукцией корового материала на глубины более 120 км и кристаллизацией маруямаита вблизи пика метаморфизма из флюидов, образовавшихся при разложении серпентинизированных пород литосферной мантии. Однако в пределах Кокчетавского массива ультраосновные породы встречаются крайне редко и в западном блоке представлены небольшим выходом гранат-клиногумитовых пород [42]. Альтернативная модель [7] предполагает, что данный изотопный состав бора в маруямаите мог возникнуть в результате хроматографического эффекта при просачивании бороносного флюида уже в коровых условиях. Высокое содержание турмалина (до 30 об.%) в этих породах исключает возможность его образования за счет бора, присутствовавшего в протолите. Таким образом, образование богатых турмалином пород маруямаит-дравитового ряда возможно при интенсивном метасоматическом преобразовании



исходного субстрата. Ag-Ag датирование К-содержащих кристаллов турмалина показало, что его кристаллизация значительно оторвана во времени от формирования высокобарических ассоциаций [15]. Полученные изотопные данные (рис.5) свойственны кристаллам турмалина, формирование которых связывают с фракционированием изотопного состава бора в результате метаморфических реакций дегидратации слюды, и отвечают изотопным характеристикам пород континентальной коры [7, 36]. Для формирования турмалиновых жил также требуется значительный привнос бора [7, 43], так как его содержание в метаосадках редко превосходит 50-150 ppm [44]. В метаморфических породах высоких давлений образование флюида, обогащенного бором, обычно связывают с разложением слюды мусковит-фенгитового ряда на прогрессивном этапе метаморфизма в ходе субдукции коровых пород [45]. Однако, согласно экспериментальным данным [40], фенгит может быть стабилен в породах Кокчетавского массива вплоть до пика метаморфизма, а его разложение начинаться на начальных этапах эксгумации с образованием расплава [46].

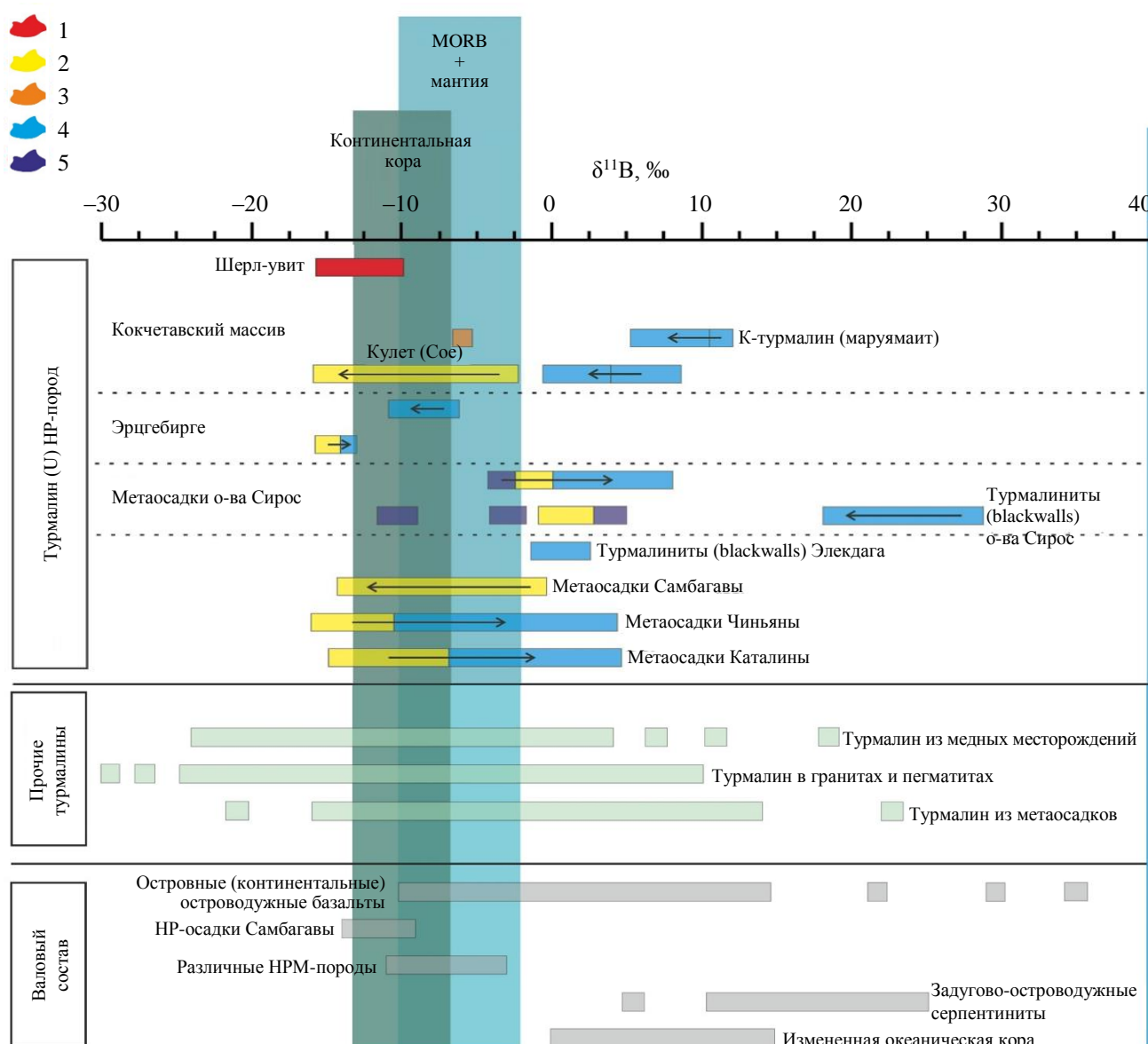


Рис.5. Особенности изотопного состава бора в кристаллах турмалина шерл-увитового ряда (красный прямоугольник) из алмазонасных пород Кокчетавского массива в сравнении с составами турмалина из других типов пород и некоторых наиболее важных геохимических резервуаров [7] (стрелки показывают изменение состава бора в зональных зернах турмалина и направлены от центра к кайме)

1 – данные авторов; 2-5 – типы: 2 – A1 (источник бора – слюда); 3 – A2 (разложение борсодержащих минералов); 4 – B (метасоматический привнос бора); 5 – C (детритовые ядра); MORB – базальты срединно-океанических хребтов; HP-осадки – метаморфизованные осадки в условиях высоких давлений; НРМ-породы – высокобарические метаморфические породы



Эти высокобарические расплавы могут содержать высокое количество воды до 30 мас.% и других элементов, включая бор. Отделение флюида от данного расплава, вероятнее всего, будет происходить на относительно небольших глубинах (40 км), что косвенно может свидетельствовать в пользу образования турмалина на заключительных стадиях эксгумации высокобарических пород. Предыдущими исследователями также предполагалось образование части кристаллов турмалина на регрессивном этапе [13], но вопросы, связанные с источниками и временем формирования бороносных флюидов, в их работе не обсуждались из-за отсутствия изотопных данных. Находки алмазсодержащих кристаллов турмалина (маруямаит-дравитового и шерл-увитового ряда), контрастных по химическому и изотопному составу в пределах одного месторождения, указывают на то, что не существовало единого большого резервуара бороносного флюида, приведшего к кристаллизации турмалина на Кумдыкольском месторождении. Вероятнее всего, мобильность бороносных флюидов была ограничена при формировании различных разновидностей турмалина, независимо от условий (давления и температуры) их образования. Также помимо изотопного состава эти флюиды могли различаться и по содержанию калия, поскольку образование калийсодержащего турмалина (маруямаит-дравитового ряда) реализовано только в присутствии ультракалиевого флюида [17, 18]. Реликты высококалиевых флюидов диагностированы в субмикронных включениях в кристаллах алмаза метаморфических пород Кокчетавского массива [23]. Однако в силу малых размеров включений измерения концентрации бора не проводились. В пороодообразующих минералах из образцов гранат-клинопироксеновых пород диагностированы продукты раскристаллизации высокобарических расплавов [24], которые характеризуются высокими содержаниями калия, а концентрации бора в них составляют 28 г/т [24]. Фракционирование и эволюция состава данных расплавов на регрессивном этапе метаморфизма могли привести к обособлению флюидов (богатых бором и калием), необходимых для кристаллизации калийсодержащего турмалина маруямаит-дравитового ряда, находки которых следовало бы ожидать именно в гранат-клинопироксеновых породах. В гранат-клинопироксеновых породах диагностированы только кристаллы турмалина шерл-увитового ряда, содержащие включения алмаза (см. рис.3), с концентрацией калия до 0,1 мас.% (см. таблицу), что исключает возможность участия высокобарических флюидов и (или) расплавов в образовании алмазсодержащих кристаллов турмалина в изученных образцах. Кристаллы алмаза представляют собой реликтовые ассоциации, уничтоженные в разной степени более поздними метасоматическими процессами в гранат-клинопироксеновых и турмалин-КПШ-кварц породах Кумдыкольского месторождения.

Заключение. Комплексное минералого-геохимическое исследование кристаллов турмалина (шерл-увитового ряда), содержащих включения кристаллов алмаза из гранат-клинопироксеновых пород Кумдыкольского месторождения (Северный Казахстан), и сопоставление с ранее опубликованными данными для маруямаитов позволили выявить существование контрастных источников бороносного флюида (обогащенных тяжелым и легким изотопом бора), которые привели к формированию указанных разновидностей турмалина в пределах одного месторождения. Если формирование турмалинов происходило синхронно, то мобильность флюидов в глубоко субуцированных коровых породах была очень ограниченной. Находки включений кристаллов алмаза в минералах следует использовать с большой осторожностью (для последующих петрологических реконструкций) из-за высокой степени сохранности этого минерала в ходе регрессивных преобразований минеральных ассоциаций высокобарических пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Melnik A.E., Korolev N.M., Skublov S.G. et al. Zircon in mantle eclogite xenoliths: a review // Geological Magazine. 2021. Vol. 158. Iss. 8. P. 1371-1382. DOI: [10.1017/S0016756820001387](https://doi.org/10.1017/S0016756820001387)
2. Skublov S.G., Rummyantseva N.A., Qiuli Li et al. Zircon Xenocrysts from the Shaka Ridge Record Ancient Continental Crust: New U-Pb Geochronological and Oxygen Isotopic Data // Journal of Earth Science. 2022. Vol. 33. Iss. 1. P. 5-16. DOI: [10.1007/s12583-021-1422-2](https://doi.org/10.1007/s12583-021-1422-2)
3. Скублов С.Г., Макеев А.Б., Красоткина А.О. и др. Изотопно-геохимические особенности циркона из Пижемского титанового месторождения (Средний Тиман) как отражение гидротермальных процессов // Геохимия. 2022. Т. 67. № 9. С. 807-829. DOI: [10.31857/S0016752522090060](https://doi.org/10.31857/S0016752522090060)



4. Rizvanova N.G., Alenicheva A.A., Skublov S.G. *et al.* Early Ordovician Age of Fluorite-Rare-Metal Deposits at the Voznesensky Ore District (Far East, Russia): Evidence from Zircon and Cassiterite U-Pb and Fluorite Sm-Nd Dating Results // *Minerals*. 2021. Vol. 11. Iss. 11. № 1154. DOI: [10.3390/min11111154](https://doi.org/10.3390/min11111154)
5. Скублов С.Г., Гагрильчик А.К., Березин А.В. Геохимия разновидностей берилла: сравнительный анализ и визуализация аналитических данных методами главных компонент (PCA) и стохастического вложения соседей с t-распределением (t-SNE) // *Записки Горного института*. 2022. Т. 255. С. 455-469. DOI: [10.31897/PMI.2022.40](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.40)
6. Abdel Gawad A.E., Ene A., Skublov S.G. *et al.* Trace Element Geochemistry and Genesis of Beryl from Wadi Nugrus, South Eastern Desert, Egypt // *Minerals*. 2022. Vol. 12. Iss. 2. № 206. DOI: [10.3390/min12020206](https://doi.org/10.3390/min12020206)
7. Marshall H.R., Korsakov A.V., Luvizotto G.L. *et al.* On the occurrence and boron isotopic composition of tourmaline in (ultra) high-pressure metamorphic rocks // *Journal of the Geological Society*. 2009. Vol. 166. Iss. 4. P. 811-823. DOI: [10.1144/0016-76492008-042](https://doi.org/10.1144/0016-76492008-042)
8. Berryman E.J., Dongzhou Zhang, Wunder B., Duffy T.S. Compressibility of synthetic Mg-Al tourmalines to 60 GPa // *American Mineralogist*. 2019. Vol. 104. Iss. 7. P. 1005-1015. DOI: [10.2138/am-2019-6967](https://doi.org/10.2138/am-2019-6967)
9. Marshall H.R., Shao-Yong Jiang. Tourmaline Isotopes: No Element Left Behind // *Elements*. 2011. Vol. 7. № 5. P. 313-319. DOI: [10.2113/gselements.7.5.313](https://doi.org/10.2113/gselements.7.5.313)
10. van Hinsberg V.J., Franz G., Wood B.J. Determining subduction-zone fluid composition using a tourmaline mineral probe // *Geochemical Perspectives Letters*. 2017. Vol. 3. № 1. P. 160-169. DOI: [10.7185/geochemlet.1719](https://doi.org/10.7185/geochemlet.1719)
11. Trumbull R.B., Codeço M.S., Shao-Yong Jiang *et al.* Boron isotope variations in tourmaline from hydrothermal ore deposits: A review of controlling factors and insights for mineralizing systems // *Ore Geology Reviews*. 2020. Vol. 125. № 103682. DOI: [10.1016/j.oregeorev.2020.103682](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103682)
12. Da-Long Hu, Shao-Yong Jiang. In-situ elemental and boron isotopic variations of tourmaline from the Maogongdong deposit in the Dahutang W-Cu ore field of northern Jiangxi Province, South China: Insights into magmatic-hydrothermal evolution // *Ore Geology Reviews*. 2020. Vol. 122. № 103502. DOI: [10.1016/j.oregeorev.2020.103502](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103502)
13. Shimizu R., Ogasawara Y. Diversity of potassium-bearing tourmalines in diamondiferous Kokchetav UHP metamorphic rocks: A geochemical recorder from peak to retrograde metamorphic stages // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2013. Vol. 63. P. 39-55. DOI: [10.1016/j.jseas.2012.11.024](https://doi.org/10.1016/j.jseas.2012.11.024)
14. Lussier A., Ball N.A., Hawthorne F.C. *et al.* Maruyamaite, K(MgAl₂)(Al₅Mg)Si₆O₁₈(BO₃)₃(OH)₃O, a potassium-dominant tourmaline from the ultrahigh-pressure Kokchetav massif, northern Kazakhstan: Description and crystal structure // *American Mineralogist*. 2016. Vol. 101. Iss. 2. P. 355-361. DOI: [10.2138/am-2016-5359](https://doi.org/10.2138/am-2016-5359)
15. Корсаков А.В., Травин А.В., Юдин Д.С., Маршал Х.Р. Турмалин, как ⁴⁰Ar/³⁹Ar геохронометр на примере метаморфических пород Кокчетавского массива (Казахстан) // *Доклады Академии наук*. 2009. Т. 424. № 4. С. 531-533.
16. Мусияченко К.А., Корсаков А.В., Летников Ф.А. Новое проявление маруямаита // *Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле*. 2021. Т. 498. № 1. С. 58-65. DOI: [10.31857/S268673972105011X](https://doi.org/10.31857/S268673972105011X)
17. Berryman E., Wunder B., Rhede D. Synthesis of K-dominant tourmaline // *American Mineralogist*. 2014. Vol. 99. № 2-3. P. 539-542. DOI: [10.2138/am.2014.4775](https://doi.org/10.2138/am.2014.4775)
18. Berryman E.J., Wunder B., Wirth R. *et al.* An experimental study on K and Na incorporation in dravitic tourmaline and insight into the origin of diamondiferous tourmaline from the Kokchetav Massif, Kazakhstan // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2015. Vol. 169. Iss. 3. № 28. DOI: [10.1007/s00410-015-1116-9](https://doi.org/10.1007/s00410-015-1116-9)
19. Berryman E.J., Wunder B., Ertl A. *et al.* Influence of the X-site composition on tourmaline's crystal structure: investigation of synthetic K-dravite, dravite, oxy-uvite, and magnesio-foitite using SREF and Raman spectroscopy // *Physics and Chemistry of Minerals*. 2016. Vol. 43. № 2. P. 83-102. DOI: [10.1007/s00269-015-0776-3](https://doi.org/10.1007/s00269-015-0776-3)
20. Perchuk L.L., Safonov O.G., Yapaskurt V.O., Barton Jr J.M. Crystal-melt equilibria involving potassium-bearing clinopyroxene as indicator of mantle-derived ultrahigh-potassic liquids: an analytical review // *Lithos*. 2002. Vol. 60. Iss. 3-4. P. 89-111. DOI: [10.1016/S0024-4937\(01\)00072-X](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(01)00072-X)
21. Сафонов О.Г., Перчук Л.Л., Литвин Ю.А. Равновесие калийсодержащего клинопироксена с расплавом как модель для барометрии глубинных ассоциаций // *Геология и геофизика*. 2005. Т. 46. № 12. С. 1318-1334.
22. Шацкий В.С., Скузоватов С.Ю., Разозин А.Л., Соболев Н.В. Подвижность элементов в зоне континентальной субдукции (на примере метаморфического комплекса сверхвысоких давлений Кокчетавского массива) // *Геология и геофизика*. 2015. Т. 56. № 7. С. 1298-1321. DOI: [10.15372/GiG20150704](https://doi.org/10.15372/GiG20150704)
23. Shyh-Lung Hwang, Pouyan Shen, Hao-Tsu Chu *et al.* Crust-derived potassic fluid in metamorphic microdiamond // *Earth and Planetary Science Letters*. 2005. Vol. 231. Iss. 3-4. P. 295-306. DOI: [10.1016/j.epsl.2005.01.002](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.01.002)
24. Korsakov A.V., Hermann J. Silicate and carbonate melt inclusions associated with diamonds in deeply subducted carbonate rocks // *Earth and Planetary Science Letters*. 2006. Vol. 241. Iss. 1-2. P. 104-118. DOI: [10.1016/j.epsl.2005.10.037](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.10.037)
25. Васильев Е.А., Криулина Г.Ю., Гаранин В.К. Термическая история алмаза кимберлитовых трубок Архангельская и имени А.П.Карпинского-I // *Записки Горного института*. 2022. Т. 255. С. 327-336. DOI: [10.31897/PMI.2022.57](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.57)
26. Лаврова Л.Д., Печников В.А., Плеваков А.М. и др. Новый генетический тип алмазных месторождений. М.: Научный мир, 1999. 221 с.
27. Sobolev N.V., Shatsky V.S. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks: a new environment for diamond formation // *Nature*. 1990. Vol. 343. Iss. 6260. P. 742-746. DOI: [10.1038/343742a0](https://doi.org/10.1038/343742a0)
28. Dobretsov N.L., Sobolev N.V., Shatsky V.S. *et al.* Geotectonic evolution of diamondiferous paragneisses of the Kokchetav complex, Northern Kazakhstan – the geologic enigma of ultrahigh-pressure crustal rocks within Phanerozoic foldbelt // *The Island Arc*. 1995. Vol. 4. Iss. 4. P. 267-279. DOI: [10.1111/j.1440-1738.1995.tb00149.x](https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.1995.tb00149.x)
29. Shatsky V.S., Sobolev N.V., Vavilov M.A. Diamond-bearing metamorphic rocks of the Kokchetav massif (northern Kazakhstan) // *Ultra-High Pressure Metamorphism*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. P. 427-455.
30. Шацкий В.С., Разозин А.Л., Скузоватов С.Ю. и др. Изотопно-геохимические свидетельства природы протолитов алмазоносных пород Кокчетавской субдукционно-коллизонной зоны (Северный Казахстан) // *Геология и геофизика*. 2021. Т. 62. № 5. С. 678-689. DOI: [10.15372/GiG2020200](https://doi.org/10.15372/GiG2020200)



31. Шацкий В.С., Скузоватов С.Ю., Рагозин А.Л. Изотопно-геохимические свидетельства коровой контаминации протолитов эклогитов Кокчетавской субдукционно-коллизийной зоны // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 12. С. 1958-1978. DOI: [10.15372/GiG20181203](https://doi.org/10.15372/GiG20181203)
32. Лаврентьев Ю.Г., Карманов Н.С., Усова Л.В. Электронно-зондовое определение состава минералов: микроанализатор или сканирующий электронный микроскоп? // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 8. С. 1473-1482. DOI: [10.15372/GiG20150806](https://doi.org/10.15372/GiG20150806)
33. Le Zhang, Zhong-Yuan Ren, Nichols A.R.L. et al. Lead isotope analysis of melt inclusions by LA-MC-ICP-MS // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2014. Vol. 29. Iss. 8. P. 1393-1405. DOI: [10.1039/C4JA00088A](https://doi.org/10.1039/C4JA00088A)
34. Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // American Mineralogist. 2010. Vol. 95. № 1. P. 185-187. DOI: [10.2138/am.2010.3371](https://doi.org/10.2138/am.2010.3371)
35. Henry D.J., Novák M., Hawthorne F.C. et al. Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals // American Mineralogist. 2011. Vol. 96. № 5-6. P. 895-913. DOI: [10.2138/am.2011.3636](https://doi.org/10.2138/am.2011.3636)
36. Ota T., Kobayashi K., Kunihiro T., Nakamura E. Boron cycling by subducted lithosphere, insights from diamondiferous tourmaline from the Kokchetav ultrahigh-pressure metamorphic belt // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2008. Vol. 72. Iss. 14. P. 3531-3541. DOI: [10.1016/j.gca.2008.05.002](https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.05.002)
37. Ota T., Kobayashi K., Katsura T., Nakamura E. Tourmaline breakdown in a pelitic system: implications for boron cycling through subduction zones // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2008. Vol. 155. Iss. 1. P. 19-32. DOI: [10.1007/s00410-007-0228-2](https://doi.org/10.1007/s00410-007-0228-2)
38. Celata B., Stagno V., Capizzi L.S. et al. Schorl breakdown at upper mantle conditions: Insights from an experimental study at 3.5 GPa // Lithos. 2022. Vol. 438-439. № 106999. DOI: [10.1016/j.lithos.2022.106999](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106999)
39. Ballirano P., Celata B., Bosi F. In situ high-temperature behaviour and breakdown conditions of uvite at room pressure // Physics and Chemistry of Minerals. 2022. Vol. 49. Iss. 10. № 40. DOI: [10.1007/s00269-022-01216-3](https://doi.org/10.1007/s00269-022-01216-3)
40. Hermann J., Spandler C.J. Sediment Melts at Sub-arc Depths: an Experimental Study // Journal of Petrology. 2008. Vol. 49. Iss. 4. P. 717-740. DOI: [10.1093/petrology/egm073](https://doi.org/10.1093/petrology/egm073)
41. Cheng L., Zhang C., Zhou Y. et al. Experiments reveal enrichment of ^{11}B in granitic melt resulting from tourmaline crystallization // Geochemical Perspectives Letters. 2022. Vol. 20. P. 37-42. DOI: [10.7185/geochemlet.2206](https://doi.org/10.7185/geochemlet.2206)
42. Селяцкий А.Ю., Ревердатто В.В. Термобарические условия эксгумации Ti-клиногумитовых гранатитов Кокчетавской субдукционно-коллизийной зоны (Северный Казахстан) // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 8. С. 1051-1074. DOI: [10.15372/GiG2021147](https://doi.org/10.15372/GiG2021147)
43. Xu J., Zhang G.B., Marschall H.R. et al. Boron isotopes of white mica and tourmaline in an ultra-high pressure metapelite from the western Tianshan, China: dehydration and metasomatism during exhumation of subducted ocean-floor sediments // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2022. Vol. 177. Iss. 4. № 46. DOI: [10.1007/s00410-022-01916-7](https://doi.org/10.1007/s00410-022-01916-7)
44. Jan C.M., De Hoog, Savov I.P. Boron Isotopes as a Tracer of Subduction Zone Processes // Boron Isotopes. Cham: Springer International Publishing, 2018. P. 217-247. DOI: [10.1007/978-3-319-64666-4_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-64666-4_9)
45. Halama R., Konrad-Schmolke M., Jan C.M., De Hoog. Boron isotope record of peak metamorphic ultrahigh-pressure and retrograde fluid-rock interaction in white mica (Lago di Cignana, Western Alps) // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2020. Vol. 175. Iss. 3. № 20. DOI: [10.1007/s00410-020-1661-8](https://doi.org/10.1007/s00410-020-1661-8)
46. Stepanov A.S., Hermann J., Korsakov A.V., Rubatto D. Geochemistry of ultrahigh-pressure anatexis: fractionation of elements in the Kokchetav gneisses during melting at diamond-facies conditions // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2014. Vol. 167. Iss. 5. № 1002. DOI: [10.1007/s00410-014-1002-x](https://doi.org/10.1007/s00410-014-1002-x)

Авторы: А.В.Корсаков, д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник, korsakov@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4922-7658> (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), Д.С.Михайленко, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0585-3021> (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), Лэ Чжан, PhD, заведующий лабораторией, <https://orcid.org/0000-0001-9161-0653> (Институт геохимии и Центр изучения глубинного строения Земли Китайской академии наук, Гуанчжоу, Китай), Юганг Шу, академик Китайской академии наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-9531-7208> (Институт геохимии и Центр изучения глубинного строения Земли Китайской академии наук, Гуанчжоу, Китай).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.