



УДК 549.646.1:550.42

DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-2-4

РЕДКОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ БЕРИЛЛА ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СПОДУМЕНОВЫХ ПЕГМАТИТОВ ПРОВИНЦИИ КУНАР, АФГАНИСТАН

С.Г. Скублов¹, А. Юсуфзай^{2,3}, А.Н. Евдокимов², А.К. Гаврильчик²

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, наб. Макарова 2, г. Санкт-Петербург, 199034 Россия; skublov@yandex.ru

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 21 линия, 2, г. Санкт-Петербург, 199106 Россия; s215138@stud.spmi.ru, evdokimov_an@pers.spmi.ru

³ Кабульский Политехнический Университет, Кабул, Афганистан

Статья поступила в редакцию 16.04.2024 г., после доработки 07.05.2024 г., принята к печати 11.05.2024 г.

Аннотация. Исследование редкоэлементного состава берилла из месторождений Чамбалак и Дигал пегматитового поля Дарай Печ провинции Кунар (Афганистан) методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) позволило установить секториальность кристалла берилла из месторождения Чамбалак. Внутренняя часть профиля идентифицирована как зона, обусловленная секторами роста пинакоида (0001), внешняя часть – как зона, обусловленная ростом граней призмы (10 $\bar{1}$ 0). На границе этих двух простых форм наблюдается резкое увеличение содержания Cs, Na, Ca, Fe, Mg и V. В зоне роста призмы проявлена ростовая зональность берилла: понижение в процессе роста к краю кристалла содержания Na, Fe, V, Ni и Sr. Для воды и Mg установлена тенденция повышения содержания в зоне роста призмы. Для берилла из месторождения Дигал граница между секторами роста пинакоида и призмы не наблюдается. Есть основание рассматривать профиль для него как отражение роста граней призмы. Сопоставление берилла по содержанию индикаторных элементов, рост которых отвечает тренду фракционирования пегматитового расплава – Cs, Li и Rb, из пегматитовых месторождений провинции Кунар с бериллом из других объектов показало, что пегматитовый расплав в месторождениях провинции Кунар был умеренно фракционированным, соответствующим начальным стадиям эволюции. Показано, что состав берилла из зон роста призмы и пинакоида может принципиально отличаться в отношении ряда элементов.

Ключевые слова: берилл, сподуменовые пегматиты, типоморфизм минералов, редкие элементы, метод SIMS, провинция Кунар, Афганистан.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы научно-исследовательских работ Института геологии и геохронологии докембрия РАН № FMUW-2022-0005.

Благодарности. Авторы признательны С.Г. Симакину и Е.В. Потапову за аналитические работы на ионном зонде и М.П. Попову (Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург) за конструктивные замечания и рекомендации в процессе подготовки рукописи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. С.Г. Скублов, А. Юсуфзай, А.Н. Евдокимов – разработка концепции, исследование, написание черновика рукописи; А.К. Гаврильчик – визуализация, редактирование финального варианта рукописи. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Скублов С.Г., Юсуфзай А., Евдокимов А.Н., Гаврильчик А.К. Редкоэлементный состав берилла из месторождений сподуменовых пегматитов провинции Кунар, Афганистан. Минералогия, 10(2), 58–77. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-2-4.

TRACE ELEMENT COMPOSITION OF BERYL FROM SPODUMENE PEGMATITE DEPOSITS OF THE KUNAR PROVINCE, AFGHANISTAN

S.G. Skublov¹, A. Yosufzai^{2,3}, A.N. Evdokimov², A.K. Gavrilchik²

¹ Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, nab. Makarova 2, St. Petersburg, 199034 Russia; skublov@yandex.ru

² Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, 21 liniya 2, St. Petersburg, 199106 Russia; s215138@stud.spmi.ru, evdokimov_an@pers.spmi.ru

³ Kabul Polytechnic University, Kabul, Afghanistan

Received 16.04.2024, revised 07.05.2024, accepted 11.05.2024

Abstract. The study of trace element composition of beryl from the Chambalak and Dugal deposits of the Darai Pech pegmatite field of the Kunar province (Afghanistan) using secondary ion mass spectrometry (SIMS) revealed the sectoriality of the beryl crystal from the Chambalak deposit. The inner and outer parts of the profile are identified as the pinacoid (0001) and prism (10 $\bar{1}$ 0) growth zones, respectively. At the boundary of these two simple forms, the Cs, Na, Ca, Fe, Mg, and V content strongly increases. The prism growth zone exhibits the growth pyramids: a decrease in the Na, Fe, V, Ni, and Cr content during growth towards the edge of the beryl crystal. The H₂O and Mg content increases in the prism growth zone. No boundary between the pinacoid and prism growth zones is observed in beryl from the Dugal deposit. There is a reason to consider its profile as the prism growth zone. A comparison of beryl based on the content of indicative elements, the increase of which corresponds to the fractionation trend of pegmatite melt (Cs, Li, and Rb), from pegmatite deposits of the Kunar province with beryl from other objects showed that pegmatite melt in the studied deposits was moderately fractionated corresponding to the initial evolution stages. It is shown that the content of some elements of beryl from the prism and pinacoid growth zones can fundamentally differ.

Keywords: beryl, spodumene pegmatites, typomorphism of minerals, trace elements, SIMS method, Kunar province, Afghanistan.

Funding. This study was supported by state contract of the Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences no. FMUW-2022-0005.

Acknowledgements. The authors are grateful to S.G. Simakina and E.V. Potapov for ion probe analyses and M.P. Popov (Urals State Mining University, Yekaterinburg) for criticism and recommendations, which allowed us to improve the manuscript.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Author contribution. S.G. Skublov, A. Yosufzai, A.N. Evdokimov – conceptualization, investigation, writing – original draft; A.K. Gavrilchik – visualization, writing – review & editing. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

For citation: Skublov S.G., Yosufzai A., Evdokimov A.N., Gavrilchik A.K. Trace element composition of beryl from spodumene pegmatite deposits of the Kunar Province, Afghanistan. *Mineralogy*, **10**(2), 58–77. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-2-4

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время такие редкие металлы, как Li, Be, Cs, Ta и ряд других, во многих странах рассматриваются как стратегически важное сырье («критические» металлы), имеющее принципиальное значение для национальных экономик, вопросов безопасности и технологического развития (Попов, 2022; Алексеев, 2023; Jiang et al., 2023). Редкометалльные пегматиты провинции Кунар в составе пегматитового поля Дарай Печ, расположенные в северо-восточной части Афганистана и известные с древнейших времен, образуют одну из

крупнейших пегматитовых провинций мира с промышленной минерализацией Ta, Nb, Li, Cs, Be, Sn и драгоценных камней (Mashkoo et al., 2022).

Берилл является наиболее распространенным бериллийсодержащим минералом в гранитных пегматитах. Он имеет широкий спектр окраски из-за примесей различных малых и редких элементов (Lum et al., 2016; Khaleal et al., 2022). В берилле могут реализовываться два типа парного гетеровалентного изоморфизма: октаэдрическое замещение двухвалентным катионом трехвалентного Al – ${}^VI\text{Al}^{3+} + {}^C\Box \leftrightarrow {}^VI\text{M}^{2+} + {}^C\text{Na}^+$ – и тетраэдрическое замещение одновалентным катионом двухвалент-

ного $\text{Be} - {}^{\text{IV}}\text{Be}^{2+} + {}^{\text{C}}\square \leftrightarrow {}^{\text{IV}}\text{Li}^{+} + {}^{\text{C}}\text{Na}^{+}$ (Auricchio et al., 1988). Оба типа замещения требуют вхождения катиона Na^{+} в структурные каналы для баланса зарядов. Для Li, кроме вхождения в тетраэдрическую позицию на место Be (Auricchio et al., 1988), также предполагается вхождение в структурные каналы, или в октаэдрическую позицию Y на место Al (Staatz et al., 1965; Andersson, 2006).

Особенности редкоэлементного состава берилла могут указывать на эволюцию вмещающего его пегматита. Тенденция изменения состава берилла при образовании пегматитов в направлении увеличения содержания щелочей (Na, Li и Cs) и понижения содержания Fe и Mg, установленная на основе микрорентгеноспектрального анализа содержания главных и малых элементов, была задокументирована на примере различных пегматитов по всему миру (Duan et al., 2024). Тем не менее, ряд недавних исследований редкоэлементного состава берилла показал, что эта тенденция не распространяется на все пегматиты (Lum et al., 2016; Vačik et al., 2021; Pauly et al., 2021; Fan et al., 2022; Suo et al., 2022; Lei et al., 2023).

Многие исследования зональности берилла по малым и редким элементам не учитывают возможную секториальность этого минерала, когда изменения состава связаны не с изменениями условий кристаллизации, а с различной «емкостью» секторов роста простых форм в отношении ряда малых и редких элементов (Sunagawa, Urano, 1999). В настоящей работе представлены результаты исследования методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) зональности в отношении малых и редких элементов двух крупных кристаллов берилла из месторождений Чамбалак и Дигал провинции Кунар, Афганистан, с позиций как возможной секториальности кристаллов, так и изменения условий кристаллизации при пегматитообразовании.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Месторождения сподумена, берилла, колумбита и танталита, из которых были отобраны образцы берилла, расположены в пределах пегматитового поля Дарай Печ в провинции Кунар на востоке Афганистана (рис. 1). Пегматитовые тела месторождений Чамбалак и Дигал обнажаются в бортах одноименных долин рр. Чамбалак и Дигал в диапазоне абсолютных превышений над уровнем моря от 1546 до 2200 м.

Пегматитовое поле Дарай Печ расположено в центральной части тектонической зоны Нуристан в провинции Кунар. Здесь широко развиты мезо-кайнозойские интрузии, с которыми связаны пегматитовые жилы. Интрузивные породы занимают около 50 % площади района: выделяются раннемеловые габбро-монзонит-диориты комплекса Нилау и олигоценные граниты комплекса Лагман. Характерной особенностью гранитов палеогенового возраста является наличие многочисленных жил редкометалльных пегматитов, пространственно связанных с двуслюдяными гранитами третьей фазы комплекса Лагман (Rossovskiy, Chmyrev, 1977).

В районе наблюдается сильно пересеченный горный рельеф, где обнажены многофазовые проявления пегматитов на разных гипсометрических уровнях (Rossovskiy, Chmyrev, 1977; Mosazai et al., 2017). Снизу вверх по разрезу обнажений на склонах гор расположены 1) плагиоклаз-микроклиновые пегматиты с биотитом, мусковитом и редким бериллом; 2) микроклин-альбитовые пегматиты с рудоразборным (добыча которого производится вручную после производства буровзрывных работ) бериллом; 3) альбитовые пегматиты со сподуменом, колумбит-танталитом, полихромным турмалином и кунцитом; 4) сподумен-микроклин-клевеландитовые пегматиты с лепидолитом, танталит-колумбитом, полихромным турмалином и кунцитом.

Наиболее широко распространены альбитизированные микроклиновые пегматиты с крупнокристаллическим бериллом. Этот тип пегматитовых жил распространен в массивах габбродиоритов и кварцевых диоритов.

Минералы Be в пегматитах Афганистана представлены почти всеми известными разновидностями берилла, включая: 1) крупнокристаллические бесщелочные и слабощелочные разновидности; 2) крупнокристаллический Na берилл; 3) крупнокристаллический Na-Li берилл; 4) мелкокристаллический Na и Na-Li берилл; 5) крупнокристаллический Li-Cs берилл. Практическое значение имеют рудоразборные кристаллический бесщелочной и слабощелочной берилл. В меньшей степени в качестве рудоразборного сырья представлен Na и Na-Li берилл. Кондиционным считается берилл, индивиду которого по длине составляют более 0.5 см.

Месторождения Чамбалак и Дигал приурочены к зоне эндоконтакта массива габброидов с кварцевым диоритом раннемелового возраста комплекса Нилау. Замеры трещиноватости габброидов свидетельствуют о многостадийности тектонических дви-

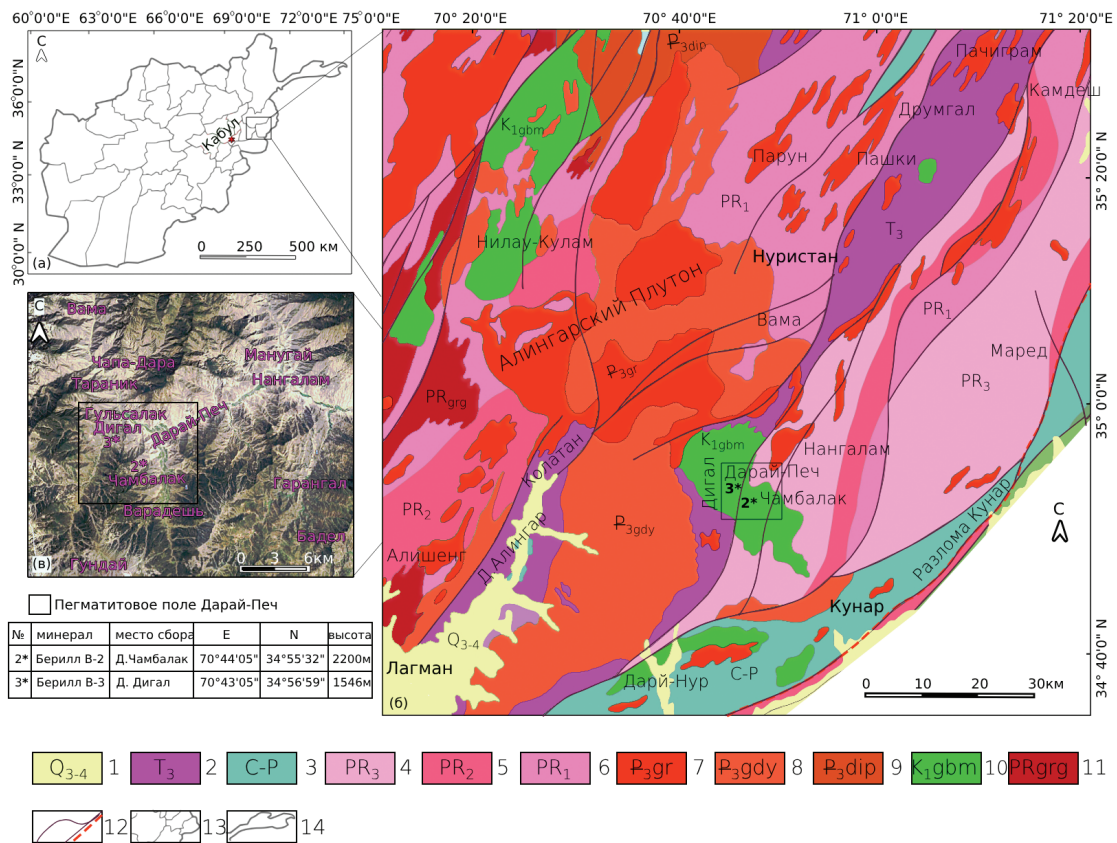


Рис. 1. Район исследований: а – общее положение тектонической зоны Нуристан в Афганистане; б – геологическая карта центральной части пегматитового пояса Восточного Афганистана, составлено авторами по материалам (Rossovskiy, Chmyrev, 1977; Doebrich et al., 2006; Mosazai et al., 2017); в – спутниковый снимок пегматитового поля Дарай Печ и положение месторождений Чамбалак (2) и Дигал (3).

1 – аллювий, пески, гравий, глины, Q₃₋₄; 2 – сланцы, алевролиты, песчаники, T₃; 3 – песчаники, андезиты, базальты, С-Р; 4 – гнейсы, сланцы, кварциты, амфиболиты, PR₃; 5 – мраморы, гнейсы, кварциты, амфиболиты, PR₂; 6 – гнейсы, кварциты, амфиболиты, PR₁; 7–11: магматические породы: 7–9 – олигоценый комплекс Лагман: 7 – граниты-III, P_{3gr}; 8 – гранодиориты, граносиениты-II, P_{3gdy}; 9 – диориты, плагиограниты-I, P_{3dip}; 10 – комплекс Нилау, K_{1gbm}: габбро, монзониты, диориты, гранодиориты; 11 – комплекс Панджшир, PRgrg: гранитогнейсы; 12 – крупные и мелкие разломы; 13 – граница провинции; 14 – граница страны. Прямоугольником показан район исследования.

Fig. 1. Area of studies: а – general position of the Nuristan tectonic zone in Afghanistan; б – geological map of the central part of the pegmatite belt of Eastern Afghanistan, composed using materials (Rossovskiy, Chmyrev, 1977; Doebrich et al., 2006; Mosazai et al., 2017); в – satellite image of the Darai Pech pegmatite field and the position of the Chambalak (2) and Digal (3) deposits.

1 – alluvium, sand, gravel, clay, Q₃₋₄; 2 – shale, siltstone, sandstone, T₃; 3 – sandstone, andesite, basalt, С-Р; 4 – gneiss, schist, quartzite, amphibolite, PR₃; 5 – marble, gneiss, quartzite, amphibolite, PR₂; 6 – gneiss, quartzite, amphibolite, PR₁; 7–11 – igneous rocks: 7–9 – Oligocene Lagman complex: 7 – granite-III, P_{3gr}; 8 – granodiorite, granosyenite-II, P_{3gdy}; 9 – diorite, plagiogranite-I, P_{3dip}; 10 – Nilau complex, K_{1gbm}: gabbro, monzonite, diorite, granodiorite; 11 – Panjshir complex, PRgrg: granite gneiss; 11 – large and small faults; 12 – border of provinces; 13 – border of the country. Rectangle shows the area of study.

жений в постинтрузивную стадию с образованием серии пологопадающих контракционных трещин, которые впоследствии были выполнены пегматитовыми жилами. Тела пегматитов имеют плитообразную форму и пологое залегание, их протяженность достигает 2.0 км, а средняя мощность 2.5 м.

Внутреннее строение жил зональное или частично-зональное (рис. 2а-в). Минеральный состав представлен разномасштабным кварц-альбитовым агрегатом, блоками пегматоидных кварц-микроклиновых сростаний, блоками кварца и блоковым микроклином, выполняющими целые зоны. Отдельные интервалы выполнены кварц-

мусковитовым агрегатом и мономинеральным сахаровидным альбитом. Берилл является рудным минералом и встречается во многих минеральных ассоциациях. Как правило, он образует крупные кристаллы, сосредоточенные, в основном, в краевых зонах рудных тел в кварц-альбитовой ассоциации. Однако размер кристаллов неодинаковый и увеличивается от зальбандов к центральной зоне пегматитов. В краевых частях жильных тел кристаллы берилла достигают не более 4 см в длину, а в зоне развития блокового микроклина их размер увеличивается до 15 см. В ядре пегматитовых тел встречаются отдельные экземпляры берилла длиной до 40 см.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При изготовлении препарата (стандартной шайбы диаметром один дюйм) кристаллы берилла из месторождений Чамбалак и Дигал были разрезаны перпендикулярно граням призмы (оси удлинения), чтобы изучить зональность берилла по траверсу от центра к краю кристалла в плоскости, параллельной базальному пинакоиду (рис. 2г, д). Фрагменты кристаллов берилла были помещены в шайбы вместе с зернами оливина, необходимого для оценки фона при анализе содержания летучих компонентов. Анализ состава берилла выполнялся на ионном зонде Cameca IMS-4f в Ярославском филиале Физико-Технологического института им. К.А. Валиева РАН (г. Ярославль, аналитики Е.В. Потапов и С.Г. Симакин). Методика измерения содержания малых и редких элементов, включая летучие компоненты (воду и галогены), подробно изложена в работах (Скублов и др., 2022, 2024). Точность определения составляет 10–15 % для элементов с концентрацией >1 г/т и 10–20 % для элементов с концентрацией 0.1–1 г/т. Предел обнаружения определен как 5–10 мг/т. Диаметр аналитического кратера составляет около 20 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Берилл из месторождения Чамбалак

Образец берилла В2 с фрагментом граней призмы имеет короткостолбчатый облик (рис. 2г), его размер в поперечнике превышает 10 см. Для исследования был выпилен сектор с точками определений состава 22–20 из центральной части кристалла, которой условно соответствует точка 22.

Основной фрагмент с точками 19–1 представляет собой продолжение части кристалла от края мелкого фрагмента (точка 19) до грани призмы (точка 1). Точки 1–6 поставлены по линии, перпендикулярной грани призмы со сгущением, примерно на расстоянии 1 мм друг от друга. Остальные точки расположены на прямой линии, идущей к проекции оси удлинения, на расстоянии примерно 2–3 мм друг от друга. В исследованном сечении берилла фиксируется зональность: внутренняя (центральная) часть кристалла имеет более светлый оттенок, кроме того, она более однородная без видимых трещин. В эту часть берилла были поставлены точки 22–12. Внешняя часть кристалла визуально отличается слабым коричневатым оттенком, возможно, из-за присутствия микровключений. В эту часть берилла были поставлены точки 1–11. Ниже рассмотрим зональность по малым и редким элементам по профилю (табл. 1, рис. 3).

Крупноионные литофильные элементы. Эти элементы входят в каналы структуры берилла, за исключением Li, замещающего Be в тетраэдрической позиции. Наибольшее содержание среди щелочных элементов установлено для Na (1486 г/т, здесь и ниже для интервалов приводится среднее содержание по точкам без учета выбросов). Центральная часть кристалла (точки 22–12, рис. 3) отличается пониженным, по сравнению с краевой, содержанием этого элемента – от 1099 до 1636 г/т, в среднем, 1254 г/т. Какая-либо закономерность в вариациях содержания Na в центральной части не наблюдается. Во внешней части кристалла происходит скачкообразное увеличение содержания Na – от 1308 г/т в точке 12 до 1916 г/т в точке 11. В точках 11–1 содержание Na варьирует от 1343 до 2462 г/т, при среднем содержании 1718 г/т. Наблюдается тенденция понижения содержания Na от точки 11 к краю кристалла (точка 1).

Распределение K контрастирует с распределением Na: для большей части точек (15 точек) оно не превышает 1352 г/т при минимальном значении 95 г/т, при этом какие-либо закономерности в вариациях не наблюдаются. В других 7 точках содержание K заметно выше – от 1966 до 5669 г/т, что может быть связано с попаданием в поле анализа микровключений калийсодержащих минералов (например, калиевого полевого шпата, биотита).

На третьем месте по уровню содержания находится Cs (385 г/т). В центральной части кристалла его содержание варьирует от 169 до 263 г/т, в среднем, 217 г/т. Характер распределения Cs в этом

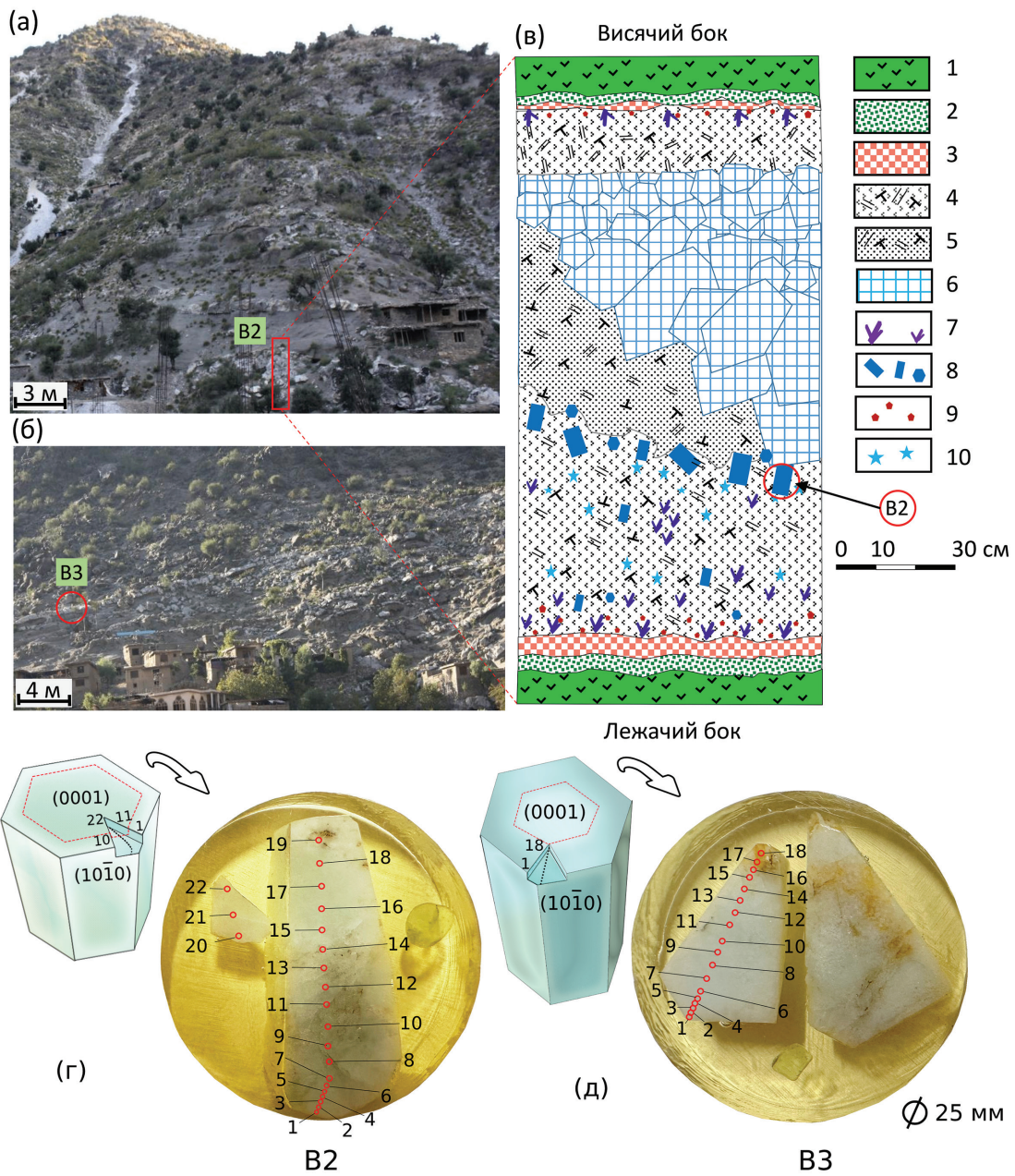


Рис. 2. Общий вид размещения и схема строения пегматитовых жил с положением изученных кристаллов и аналитических точек (составлено А. Юсуфзаем): а – месторождение Чамбалак; б – месторождение Дигал; в – внутреннее строение микроклин-альбитовых пегматитовых жил месторождение Чамбалак; г – обр. В2, месторождение Чамбалак; д – обр. В3, месторождение Дигал.

1 – биотит-амфиболовые диориты, кварцевые диориты, габбродиориты; 2 – зона измененного диорита; 3 – зона аплита; 4 – зона среднезернистого, сахаровидного и мелкопластинчатого альбита с кварцем, мусковитом, шерлом, бериллом, апатитом и гранатом; 5 – зона крупнозернистого кварц-альбит-микроклинового пегматита; 6 – кристаллы блокового микроклина; 7 – шерл; 8 – берилл; 9 – гранат; 10 – апатит.

Fig. 2. General view of location and structure of pegmatite veins with position of the studied beryl crystals and analytical points (compiled by A. Yosufzai): а – Chambalak deposit; б – Digal deposit; в – internal structure of microcline-albite pegmatite veins of the Chambalak deposit; г – sample B2, Chambalak deposit; д – sample B3, Digal deposit.

1 – biotite-amphibole diorite, quartz diorite, gabbro diorite; 2 – altered diorite zone; 3 – aplite zone; 4 – medium-grained, sugar-like and fine platy albite zone with quartz, muscovite, schörl, beryl, apatite, and garnet; 5 – coarse-grained quartz-albite-microcline pegmatite zone; 6 – blocky microcline crystals; 7 – schörl; 8 – beryl; 9 – garnet; 10 – apatite.

Таблица 1
Table 1Содержание малых и редких элементов (г/т) в берилле месторождения Чамбалак (обр. В2)
Trace element content (ppm) of beryl from the Chambalak deposit (sample B2)

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
P	24.8	н.о.	55.2	54.7	н.о.	н.о.	29.9	101	н.о.	101	н.о.	н.о.	17.3	44.3	133	92.2	78.1	71.4	73.6	48.3	н.о.	н.о.
Ca	41.9	40.4	70.3	58.9	38.6	22.7	76.1	37.8	45.7	22.2	65.9	29.0	30.3	21.0	21.7	20.2	28.2	24.1	21.0	31.6	49.0	33.7
Cr	5.54	4.06	10.8	14.0	11.8	12.0	1.17	20.6	17.2	8.52	13.7	26.3	28.8	5.33	23.3	18.3	34.8	7.36	17.3	43.7	40.0	53.5
Rb	54.7	26.6	25.2	39.6	19.8	21.2	71.2	19.5	30.9	31.6	40.9	41.8	81.8	27.4	14.9	14.7	21.4	47.5	14.5	25.3	46.1	40.5
Sr	0.47	1.48	0.36	1.60	0.89	0.09	31.7	0.19	3.14	0.20	1.96	0.30	0.27	0.09	0.04	0.06	0.23	0.17	0.04	0.35	2.40	0.30
Cs	470	587	464	616	592	493	839	502	557	447	520	263	227	175	182	169	194	241	219	241	245	235
Ga	10.8	11.5	9.77	9.89	9.54	10.3	14.3	14.9	11.6	11.3	14.3	10.7	10.2	10.0	9.86	8.70	8.87	9.80	8.44	9.90	9.21	10.0
Mn	82.7	71.1	97.6	82.8	78.6	82.7	80.7	93.9	101	91.2	736	101	87.5	53.8	72.1	59.2	69.5	91.8	73.1	84.7	87.4	126
V	2.67	2.73	55.2	3.42	3.59	3.96	3.21	7.41	5.41	4.12	4.54	2.19	1.86	1.52	1.65	1.66	1.85	2.33	1.87	2.15	2.24	1.91
Ti	2.69	4.52	2.59	3.16	2.18	1.88	3.18	4.57	2.75	2.36	3.42	3.15	3.30	3.18	2.42	1.92	2.14	2.66	2.22	2.49	2.21	2.56
K	1968	411	273	882	288	201	2120	112	636	1352	1050	1992	5669	1082	95.4	285	692	4347	95.0	728	2611	1966
Mg	553	537	518	514	480	508	473	783	654	629	693	418	426	356	363	375	384	467	410	315	344	377
Na	1343	1579	1642	1696	1527	1547	2462	1593	1959	1636	1916	1308	1345	1124	1102	1141	1169	1636	1339	1099	1341	1188
Sc	1.09	4.47	1.51	1.00	0.41	0.67	1.78	1.42	1.06	1.31	1.97	1.55	1.89	2.63	5.59	0.07	2.22	1.10	1.67	0.89	0.66	1.01
Fe	1824	1975	1834	1874	2026	2054	2265	2104	2228	2045	2925	1736	1591	1726	1487	1381	1551	1910	1546	1444	1436	1685
Co	0.35	0.44	0.44	0.42	0.28	0.32	0.33	0.78	0.84	0.56	1.24	1.07	1.35	0.61	0.72	0.37	0.68	0.76	0.64	0.73	0.59	0.61
Ni	22.7	12.6	41.9	36.7	31.3	42.2	3.24	81.8	97.8	31.1	346	152	141	33.4	131	84.1	187	38.1	82.2	249	209	259
B	17.8	1.43	2.55	8.63	2.99	0.45	49.4	0.69	18.8	1.34	6.27	1.18	0.51	1.86	11.1	1.13	1.37	0.46	0.27	8.95	1.18	6.57
Li	158	152	154	116	134	160	137	69.2	116	122	135	131	126	109	122	152	144	150	189	140	130	136
H ₂ O	19703	21194	19508	16983	17345	16952	14987	13292	15661	12195	13114	14571	13699	14872	17582	14773	14438	15401	22499	17674	16291	14880
F	57.7	8.67	12.5	71.2	15.6	19.2	383	16.6	24.2	10.8	21.6	13.3	11.5	16.5	23.9	32.8	11.2	16.5	14.4	21.4	16.0	42.5
Cl	264	270	268	311	264	322	585	253	287	318	371	267	297	228	249	364	305	312	275	240	197	286

Примечание. Здесь и в табл. 2, н.о. – содержание элемента не определено.
Note. Here and in Table 2, н.о. – the content of element is not determined.

домене повторяет распределение Na – от точки 18 до точки 14 содержания понижаются, а далее к точке 12 наблюдается отчетливый рост. Во внешней части происходит резкое увеличение содержания Cs – от 447 до 616 г/т, в среднем 525 г/т (не учитывая точку 7 с содержанием 839 г/т).

Для распределения Са характерно обеднение центральной части кристалла этим элементом (20.2–49.0 г/т, в среднем 28.2 г/т) по сравнению с внешней (22.2–76.1 г/т, в среднем, 47.3 г/т), несмотря на перекрытие составов по трем точкам.

Содержание Li, за исключением двух «выбросов» (точка 8 – 69.2 г/т, точка 19 – 189 г/т) находится в узком диапазоне от 109 до 160 г/т при среднем значении 136 г/т. При этом содержание Li в центральной и внешней частях кристалла перекрывается. Для краевой части можно говорить о тенденции увеличения содержания Li к самому краю кристалла берилла.

Аналогично выглядит распределение Rb с перекрытием состава для двух частей кристалла и отсутствием закономерностей. Содержание Rb варьирует от 14.5 до 81.8 г/т, в среднем, составляя 34.4 г/т. Содержание Sr в берилле находится на низком уровне, в основном не превышая 0.5 г/т и достигая значения 3.1 г/т (не учитывая вероятный захват включения в точке 7).

Помимо крупноионных литофильных элементов в каналы кристаллической структуры берилла могут входить молекулы H₂O, а также галогены (Cl и F) и В. Измеренное содержание H₂O составляет в среднем 16255 г/т. В центральной части кристалла (не учитывая точку 19) содержание H₂O закономерно варьирует от 13699 до 17674 г/т, составляя в среднем 15418 г/т. В краевой части содержание H₂O

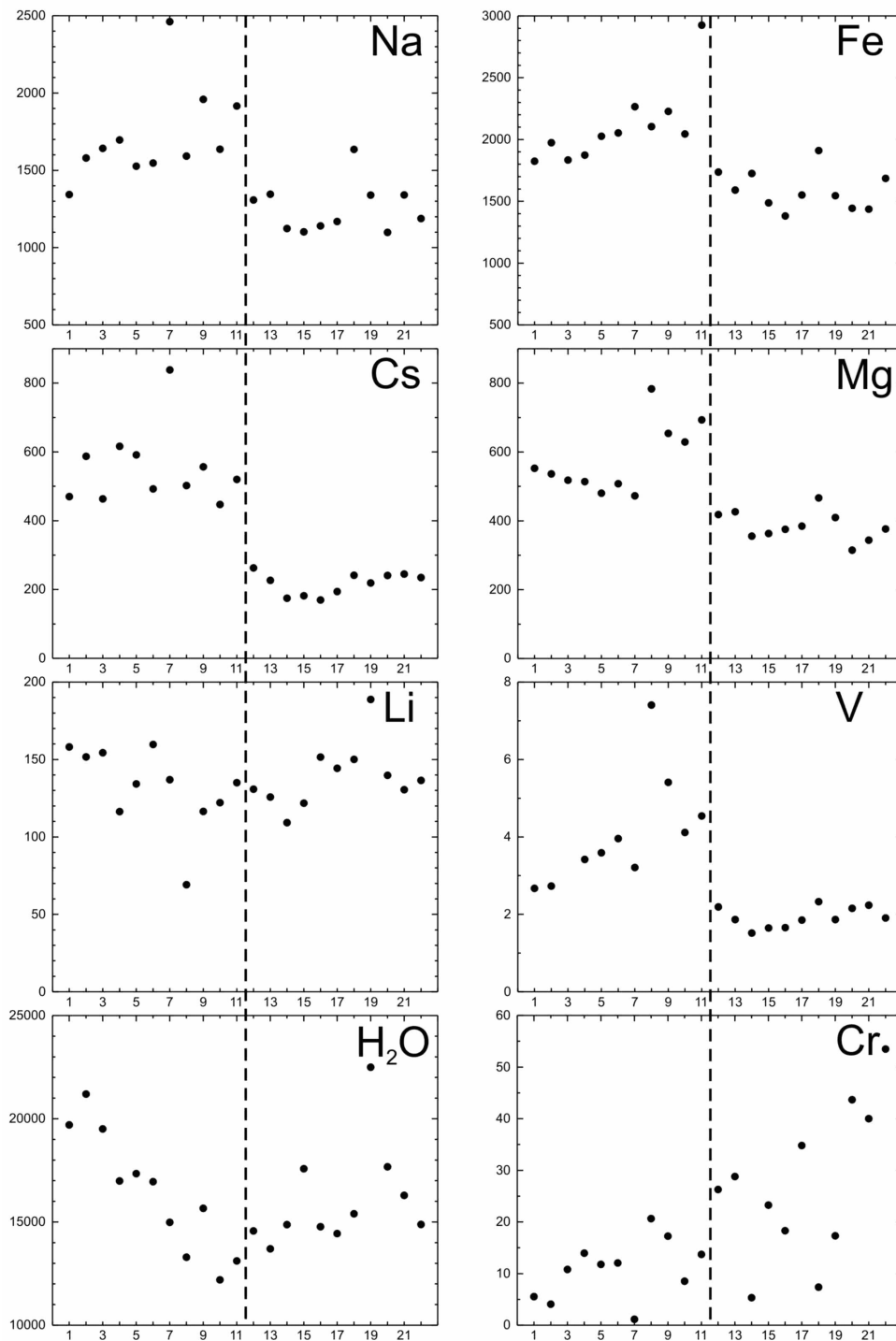


Рис. 3. Профили распределения малых и редких элементов (г/т) в берилле (обр. В2) из месторождения Чамбалак с положением аналитических точек.

Пунктиром показана предполагаемая граница между секторами роста простых форм (пинакоида и призмы).

Fig. 3. Distribution profiles of trace elements (ppm) in beryl (sample B2) from the Chambalalak deposit with analytical points.

The dotted line shows the suggested boundary between the growth zones of simple forms (pinacoid and prism).

монотонно увеличивается (от 12195 до 21194 г/т, в среднем 16448 г/т), достигая максимума в краю кристалла. Переход в содержании H₂O между центральной и краевой частями кристалла плавный, а не скачкообразный.

Содержание F варьирует от 8.67 до 71.2 г/т, в среднем 22.8 г/т, не обнаруживая закономерностей. Содержание Cl заметно выше – от 197 до 371 г/т при среднем значении 283 г/т, но его вариации по профилю точек также бессистемны. Содержание В

в основном не превышает 20 г/т и не изменяется. В одной точке содержание В составляет около 50 г/т, что, вероятно, связано с микровключениями борсодержащих минералов.

Переходные металлы. Эти элементы, к которым следует отнести и Fe, замещают Al в октаэдрической позиции. Примесь Fe наиболее значительна (1796 г/т). Центральная часть кристалла характеризуется меньшим диапазоном содержания Fe (1381–1910 г/т при среднем содержании 1590 г/т), чем краевая (1824–2265 г/т при среднем содержании 2023 г/т). Переход в содержании Fe между центральной и краевой частями кристалла скачкообразный. В точке 12 содержание составляет 1736 г/т, а в точке 10, относящейся уже к краевой части, содержание Fe заметно выше – 2045 г/т. При этом для краевой части зафиксирован тренд уменьшения содержания Fe к краю кристалла.

Распределение Mg демонстрирует более сложные тенденции. В центральной части его содержание закономерно варьирует от 315 до 467 г/т при среднем содержании 385 г/т. На границе центральной и краевой частей происходит скачкообразное увеличение содержания Mg: 418 г/т в точке 12 и 693 г/т в точке 11, относящейся уже к краевой части. Далее по профилю к краю кристалла четыре точки (11–8) имеют максимальное содержание Mg в диапазоне 629–783 г/т. Затем в точке 7 содержание Mg падает до 473 г/т и далее монотонно увеличивается к краю кристалла до 553 г/т.

Содержание Mn варьирует от 53.8 до 126 г/т, составляя, в среднем 84.2 г/т. В центральной части кристалла (точки 22–12) видимые закономерности в распределении Mn не наблюдаются, а вариации в содержании – максимальные. В краевой части (точки 11–1), переход к которой по профилю распределения плавный, прослеживается тенденция понижения содержания Mn к краю кристалла.

В распределении V, несмотря на его низкое содержание (не более 8 г/т), установлена тенденция скачкообразного повышения содержания при переходе от центральной к краевой части кристалла и далее тренд понижения содержания к краю кристалла. При этом во всех точках краевой части содержание V выше, чем в любой точке из центральной части. Профиль распределения для центральной части субгоризонтальный без выраженной зональности.

Содержание Co более низкое, чем содержание V, но характер распределения этого элемента в центральной и краевой частях повторяет распре-

деление V. Отличие заключается в том, что содержания перекрываются для различных частей кристалла. Содержание Ti и Sc также низкое (на уровне первых граммов на тонну), закономерности в распределении этих элементов не обнаружены.

Распределение Ni имеет иной характер: наблюдается общий тренд понижения содержания от центра к краю кристалла. Диапазон содержания Ni меняется в широких пределах – от 259 г/т в центре берилла до первых граммов на тонну на краю кристалла. Аналогичная ситуация с общим трендом понижения содержания от центра к краю кристалла наблюдается и для Sr, максимальное содержание которого в центре кристалла составляет 53.5 г/т.

Содержание Ga, рассеянного элемента «двойника» Al, варьирует от 8.44 до 14.9 г/т и составляет в среднем 10.6 г/т. В центральной части кристалла распределение Ga не зональное и составляет в среднем 9.61 г/т. В краевой части (точка 11) оно скачкообразно повышается до 14.3 г/т и далее к краю кристалла понижается с широкими вариациями до значений около 10 г/т, характерных для центральной части.

Берилл из месторождения Дигал

Образец берилла В3 представляет собой выкол с фрагментами граней призмы. Первоначальный размер крупного кристалла оценить сложно. Для исследования был выпилен фрагмент (сектор) от граней призмы по направлению к центру кристалла длиной около 2 см (рис. 2д), в который были поставлены точки 18 (край кристалла) – 1 (направление к центру). Окраска исследованного фрагмента кристалла однородная молочно-зеленоватого оттенка. В районе точек 17 и 18 наблюдается потемнение, вызванное, вероятно, вторичными процессами. Ниже рассмотрим зональность по малым и редким элементам (табл. 2, рис. 4).

Крупноионные литофильные элементы. Содержание Na ступенчато понижается по профилю от 1815 г/т в точке 18 до 1267 г/т в точке 5 и потом повышается к краю (1517 г/т в точке 1). Содержание K варьирует в широком диапазоне: от 110 до 7632 г/т при среднем содержании 2547 г/т. В самом краю кристалла (точки 3–1) оно систематически падает. Содержания Cs демонстрируют закономерное увеличение от начала профиля в центральной части (точка 18 – 239 г/т) до края кристалла (706 г/т в точке 2 и 600 г/т в точке 1). Между точками 10 и 11 наблюдается разрыв в едином распределении.

Таблица 2
Table 2

Содержание малых и редких элементов (г/т) в берилле месторождения Дигал (обр. В3)
Trace element content (ppm) of beryl from the Digal deposit (sample В3)

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
P	113	н.о.	29.6	н.о.	н.о.	1.46	86.9	81.4	44.1	н.о.	22.0	76.5	77.5	н.о.	66.7	71.2	70.6	н.о.
Ca	30.8	37.8	33.0	32.7	35.3	32.3	31.4	27.2	31.1	27.0	24.3	25.1	35.1	28.6	27.3	25.4	27.9	29.2
Cr	37.0	64.2	47.1	53.1	77.2	48.9	52.1	34.7	47.7	52.0	24.7	28.5	57.8	26.9	18.6	27.1	36.8	30.8
Rb	30.6	42.8	35.7	126	44.0	70.1	80.5	32.0	60.2	37.6	60.3	23.6	45.3	24.9	56.5	19.4	33.7	81.0
Sr	0.33	1.28	0.38	1.93	0.70	2.10	0.95	0.36	1.43	0.77	0.21	0.15	0.52	0.15	1.33	0.06	0.17	0.17
Cs	600	706	612	616	527	484	506	428	493	476	316	336	326	279	248	241	218	239
Ga	11.7	11.5	10.1	11.0	10.8	11.0	11.5	12.4	12.8	12.2	10.9	11.9	12.2	10.9	10.9	10.4	12.2	12.2
Mn	69.6	93.3	84.8	83.0	78.3	80.0	89.2	104	94.3	94.4	88.6	98.2	86.9	92.2	77.9	94.2	86.6	84.2
V	2.80	2.19	2.71	2.56	2.60	2.79	4.15	3.24	1.62	1.99	4.63	5.50	4.74	7.61	3.73	3.64	3.81	3.94
Ti	5.28	3.72	3.66	3.07	3.13	2.99	2.50	3.11	3.49	2.46	2.11	2.27	1.87	2.23	2.07	2.27	1.96	1.92
K	808	1253	1569	7633	2270	4658	5262	1527	3794	2138	3823	302	1716	198	2871	110	927	4985
Mg	692	637	638	570	568	557	541	528	548	517	602	633	644	753	619	740	800	803
Na	1517	1458	1426	1329	1267	1278	1348	1540	1571	1520	1464	1585	1512	1780	1548	1759	1781	1815
Sc	5.17	2.38	1.91	2.76	2.40	1.99	2.64	1.85	1.34	1.34	1.63	2.50	1.79	0.14	1.83	1.87	0.81	1.06
Fe	1797	1635	1540	1475	1486	1679	1912	2180	2321	2385	2048	2274	2356	2242	2175	2278	2145	2191
Co	1.74	1.34	1.11	1.53	1.35	0.96	0.91	1.11	0.99	0.93	0.67	1.05	0.94	0.69	0.51	0.68	0.99	0.77
Ni	256	339	246	306	438	281	264	202	251	291	124	150	315	135	85.8	124	196	149
B	8.44	1.05	2.42	0.98	1.58	2.45	1.13	7.30	17.82	0.63	1.25	2.23	5.09	2.55	2.62	0.82	4.48	1.16
Li	155	143	134	122	125	125	135	122	100	118	112	104	121	116	120	138	132	134
H ₂ O	51389	21835	15332	9111	10519	10728	10450	9742	9308	10686	10144	12394	9230	18810	22304	23935	19072	24694
F	442	228	143	31.6	33.7	16.8	27.4	199	48.8	39.2	34.4	61.7	55.5	25.3	25.7	12.3	13.2	13.3
Cl	545	477	436	353	326	302	357	380	297	281	287	360	379	313	235	253	241	192

Содержание Са в берилле варьирует в узких пределах: от 24.3 до 37.8 г/т (в среднем 30.1 г/т), при этом можно говорить о слабой тенденции увеличения содержания к краю кристалла. Содержание Li варьирует от 100 до 155 г/т. при среднем значении 125 г/т. В интервале точек 18–3 содержание Li варьирует в пределах 120 ± 20 г/т. К краю кристалла (точки 2 и 1) Li демонстрирует рост до 155 г/т. Содержание Rb бессистемно варьирует в пределах 20–80 г/т (не считая выброс в точке 4 – 126 г/т). Содержание Sr в берилле низкое, в основном не превышает 1.5 г/т и достигает значения 2.1 г/т.

Распределение H₂O более сложное: в центральной части кристалла (точки 18–12) содержание понижается от 24694 до 12394 г/т и далее в интервале точек 11–4 остается на уровне около 10000 г/т. На краю кристалла происходит резкий рост до 21835 г/т в точке 2. В точке 1 на самом краю кристалла зафиксировано аномально высокое содержание 51389 г/т, которое, возможно, связано с попаданием в область анализа флюидного включения.

Распределение F во многом копирует распределение содержаний H₂O. От точки 18 до точки 4 (исключая точку 8) оно варьирует от 12.3 до 61.7 г/т, составляя в среднем 31.4 г/т. К краю кристалла происходит резкий рост содержания до 228 г/т в точке 2. Максимальное содержание 442 г/т на самом краю кристалла отмечено в точке 1, как и в случае с H₂O, что также можно связать с флюидным включением. Содержание Cl заметно выше: от 192 г/т в точке 18 до 545 г/т в точке 1. От точки 18 к точке 6 (302 г/т) оно увеличивается по сложной волнообразной траектории и далее к краю кристалла возрастает прямолинейно. Содержание В, в основном, не превышает 8.5 г/т, не обнаруживая закономерностей. В точке 9 содержание В составляет около 18 г/т, что можно рассматривать как выброс.

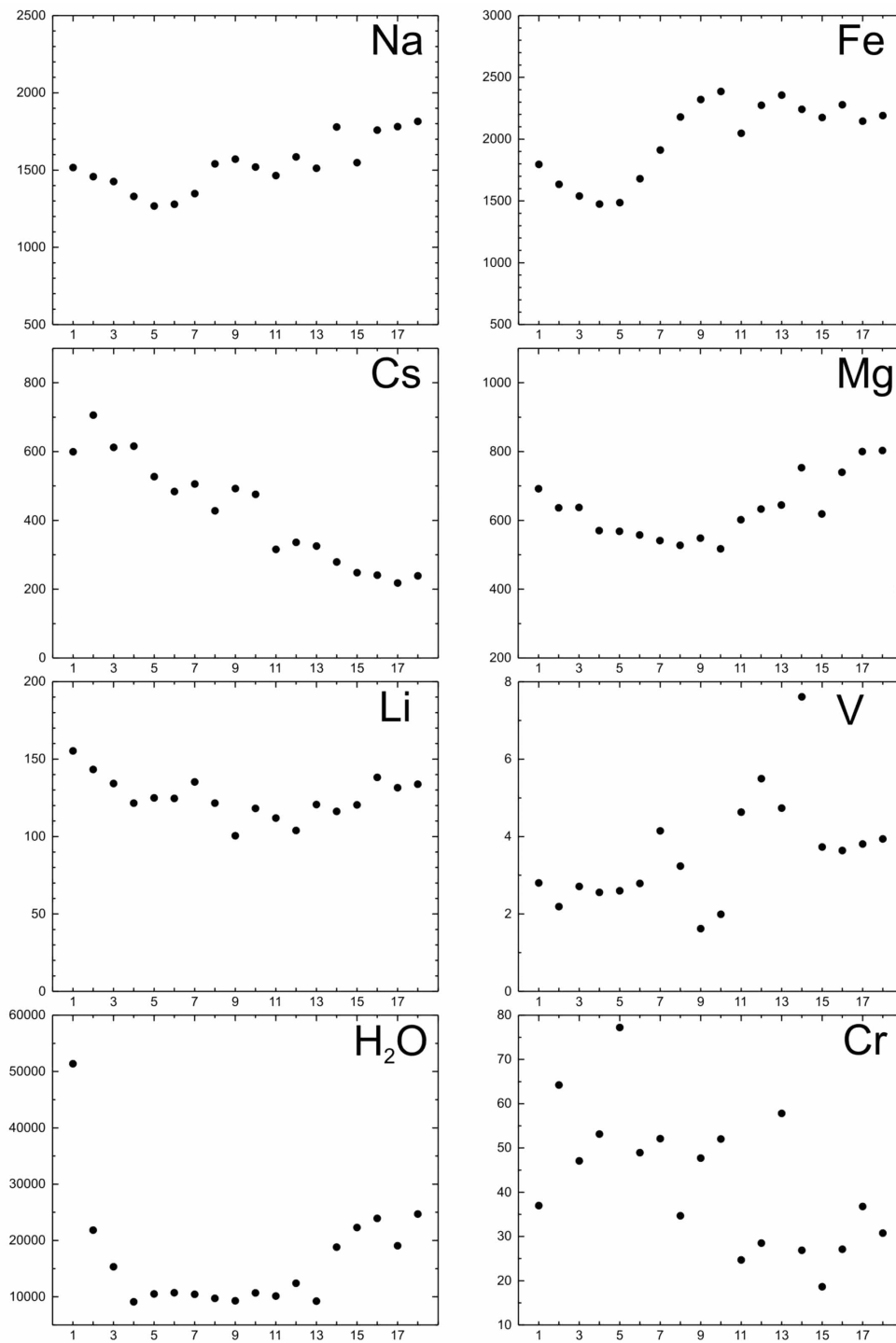


Рис. 4. Профили распределения малых и редких элементов (ppm) в берилле (обр. В3) из месторождения Дигал с положением аналитических точек.

Fig. 4. Distribution profiles of trace elements (ppm) in beryl (sample B3) from the Dugal deposit with analytical points.

Переходные металлы. Содержание Fe наиболее значительно (2007 г/т). От точки 18 до точки 9 оно варьирует незначительно (2048–2385 г/т, в среднем 2241 г/т), понижается к точке 5 с содержанием 1486 г/т и плавно повышается к краю кри-

сталла (1797 г/т в точке 1). Распределение Mg более простое: от точки 18 (803 г/т) происходит понижение содержания к точке 8 (528 г/т) и далее плавное увеличение к краю кристалла (692 г/т в точке 1). Содержание Mn не систематически варьирует от

69.6 до 104 г/т, составляя в среднем 87.8 г/т. Содержание V лежит в диапазоне от 1 до 8 г/т, составляя в среднем 3.6 г/т. Несмотря на отклонения в средней части профиля, можно говорить о тенденции понижения содержания V к краю кристалла берилла. Содержание Co укладывается в интервал 0.4–1.8 г/т. Наблюдается тенденция увеличения содержания Co к краю кристалла.

Содержание Ti и Sc низкое, на уровне первых граммов на тонну. Также как и Co, Ti демонстрирует тенденцию к увеличению содержания к краю кристалла. Закономерности в распределении Sc не обнаруживаются. Диапазон содержания Ni меняется в широких пределах: от 85.8 г/т в центре берилла до 438 г/т в краевой части. В целом содержание Ni увеличивается от центра к краю кристалла. Распределение Cr по профилю повторяет поведение Ni, несмотря на вариации состава: содержание Cr растет к краю кристалла. Содержание Ga варьирует в узких пределах от 10.1 до 12.8 г/т (в среднем 11.5 г/т), не обнаруживая зональности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Секториальность. К настоящему времени накоплен значительный фактический материал, связанный с неоднородным строением кристаллов минералов. Возникновение секториальности кристаллов объяснялось отличием в относительных скоростях роста граней разных простых форм, соотношением скорости роста кристалла и диффузии элементов вблизи поверхностного слоя кристаллической решетки (Watson, Liang, 1995; Watson, 1996), отличающейся адсорбцией катионов на поверхности грани (Dowty, 1976). Также высказано предположение об отличии механизмов роста граней разных простых форм (Попов, 2011).

Для целого ряда минералов установлено отличие в распределении редких элементов в пирамидах роста разных простых форм (Rakovan, Reeder, 1994, 1996; Rakovan et al., 1997; Левашова и др., 2022). Однако об особенностях распределения редких элементов в секторах роста разных простых форм информация ограничена (Taran, Vishnevsky, 2019; Pauly et al., 2021). Изучение берилла показало, что его самые стабильные и распространенные простые формы – (0001) и (10 $\bar{1}$ 0), из-за разной скорости роста которых (для базального пинакоида скорость примерно вдвое выше) образуется характерное секториальное строение (Sunagawa, Urano, 1999).

Кристалл берилла, как правило, имеет призматический габитус, образованный восемью гранями, шесть из которых относятся к призме (10 $\bar{1}$ 0), а две – к базальному пинакоиду (0001) (Giuliani et al., 2019). Соответственно, в идеальном случае зона, образованная секторами роста пинакоида, находится в центральной части сечения, перпендикулярного оси удлинения призмы, а зона, образованная секторами роста призмы, окаймляет зону роста пинакоида. При этом соотношение объема (площади в плоском сечении, перпендикулярном оси удлинения) зон роста пинакоида и призмы меняется в зависимости от степени удаления от гипотетического центра, от которого начался рост кристалла. Вблизи центра зона роста пинакоида – минимальная, а зона роста призмы – максимальная по площади. И, наоборот, к краю кристалла площадь секторов роста призмы становится минимальной, а площадь сектора роста пинакоида – максимальной. Тем не менее, на конкретных примерах установлено, что в сечении призматического кристалла берилла параллельно оси удлинения преобладает зона, обязанная росту пинакоида, а зона роста призмы имеет подчиненное значение (Sunagawa, Urano, 1999).

В результате исследования состава берилла микрорентгеноспектральным методом в специально выбранных сечениях определено, что граница между зонами, обусловленными ростом разных простых форм берилла, фиксируется резким (скачкообразным) изменением содержания ряда элементов (Mg и Na) в профиле, идущем от проекции оси удлинения к краю кристалла перпендикулярно границам зон роста простых форм (Scandale, Lucchesi, 2000).

По результатам изучения примесного состава берилла из грейзенов месторождения Шерловая гора по профилям в сечениях, перпендикулярных оси удлинения, показано, что существует два типа распределения ряда редких элементов (С.Г. Скублов, А.К. Гаврильчик, неопубл. данные). Первый – максимальное содержание элемента выдержано в центральной зоне кристалла, которое резко (скачкообразно) снижается по краям, а второй обратен первому. При отсутствии четко выраженной цветовой зональности и равномерном распределении флюидных включений предполагается, что такой характер распределения элементов связан с особенностями зон роста простых форм в кристалле. Используя представления о секториальном строении кристалла берилла (Sunagawa, Urano, 1999; Giuliani et al., 2019), центральную часть профиля можно

отнести к сектору роста пинакоида (0001), а оставшуюся внешнюю часть профиля от резкого изменения характера распределения ряда редких элементов (границы зона роста пинакоида) и до граней кристалла – к секторам роста призмы (10 $\bar{1}$ 0). На примере аквамарина из месторождения Шерловая гора показано, что в секторе роста пинакоида происходит накопление Fe, Ga и Cs, а в секторе роста призмы – накопление Li, Mg и Cl (С.Г. Скублов, А.К. Гаврильчик, неопубл. данные).

Для берилла В2 из месторождения Чамбалак граница между зонами роста пинакоида (внутренняя часть профиля) и призмы (внешняя часть профиля), весьма вероятно, находится между точками 12 и 11 (рис. 3). Именно в этой части профиля наблюдается отчетливое резкое увеличение содержания Cs (в среднем 217 г/т для сектора роста пинакоида и 525 г/т – для сектора роста призмы), Na (1254 г/т и 1718 г/т, соответственно), Ca (28.2 г/т и 47.3 г/т), Fe (1590 г/т и 2023 г/т), Mg (385 г/т и 576 г/т) и V (1.93 г/т и 8.75 г/т). Наиболее контрастно смена характера распределения на условной границе секторов роста двух простых форм (пинакоида в центральной части сечения, перпендикулярного оси удлинения кристалла, и призмы в краевой части) проявлена для Cs, Na, Mg и V.

Если рассматривать только часть профиля, относящуюся к сектору роста призмы, то можно охарактеризовать ростовую зональность берилла, поскольку рост граней призмы происходил в направлении, перпендикулярном оси удлинения кристалла от центра к краю кристалла. Соответственно, часть кристалла, которая ближе к оси удлинения (точка 11), образовалась раньше участка с точкой 10, точка 10 – раньше точки 9 и т. д. Для части профиля, соответствующего сектору роста пинакоида, ростовая зональность может не наблюдаться, т. к. идеальная модель роста кристалла предполагает примерно одновременное формирование грани пинакоида по мере удаления от геометрического центра кристалла.

В случае с кристаллом берилла В2 в части профиля, относящейся к сектору роста призмы, зафиксировано понижение в процессе роста кристалла содержания Na, Fe и V. Кроме того, понижается содержание Ni и Cr. Характер распределения Ni и Cr нетипичный, их содержание понижается от центра к краю кристалла также и в части профиля, относящегося к сектору роста пинакоида, что сложно проинтерпретировать. Для воды и Mg установлена тенденция повышения в секторе роста призмы по

мере роста кристалла. Для Mg эта закономерность проявлена не для всех точек, а только для внешней части зоны сектора роста призмы (точки 1–7). Для воды увеличение содержания наблюдается на всем протяжении сектора роста призмы, но зато отсутствует резкая граница в переходе от пинакоида к призме.

Для берилла В3 из месторождения Дигал в распределении по профилю ни по одному элементу не наблюдается скачкообразного изменения в содержании, которое можно рассматривать в качестве границы между секторами роста пинакоида и призмы (рис. 4). Наиболее показательно распределение Cs: его содержание монотонно увеличивается от наиболее удаленной от граней кристалла (точка 18) до приближенной к ним (точка 1). Похоже ведет себя и Cl, но с некоторыми отклонениями в виде двух максимумов в профиле. Есть основание считать данный профиль как представляющий сектор роста только одной простой формы – призмы, если предположить, что в исследованный фрагмент уплощенного кристалла не попала центральная его часть, отвечающая сектору роста пинакоида, или сектор роста пинакоида был подавлен по каким-то причинам.

Характер распределения других элементов несколько более сложный. Содержание Na постепенно уменьшается от центральной части к точке 6 и далее от точки 5 до края кристалла (точка 1) возрастает. Содержание Mg аналогично уменьшается от 18 до 10 точки и потом возрастает от 8 до 1 точки. Возрастание только в краевой зоне от 4 к 1 точке демонстрируют Li, вода, F и Fe, при этом в остальной части профиля распределение этих элементов может быть незакономерным. Содержание Ni, Cr, Co и Ti увеличивается от центральной части кристалла (точка 18) до его края (точка 1), но не так однозначно как в случае с Cs.

Состав берилла как отражение эволюции пегматитового расплава. В процессе фракционирования расплава берилл, образованный на более поздних стадиях, отличается повышенным содержанием щелочных элементов (например, Na, Cs, Li) и обеднением Fe, Mg, и геохимически им близкими редкими элементами по сравнению с бериллом, образованным на ранних стадиях эволюции расплава (Černý, Turnock, 1975; Černý, 2002; Černý et al., 2003; Neiva, Neiva, 2005; Uher et al., 2010; Sardi, Heimann, 2014). В частности, содержание Cs в берилле устойчиво растет в процессе магматической эволюции во всех пегматитах мира (Černý, 2002; Pauly et al., 2021; Fan et al., 2022). Также при исследовании

довании берилла из различных участков зональных пегматитов установлено, что содержание Na в нем может понижаться по мере эволюции пегматитовой системы (Uher et al., 2010; Sardi, Heimann, 2014; Suo et al., 2022). Одной из причин, объясняющих эту тенденцию, является кристаллизация альбита, совместная с бериллом, в значительных количествах на поздних стадиях. Кроме того показано, что содержание Li в берилле далеко не всегда является индикатором эволюции магматического расплава (Duan et al., 2024).

Поведение Fe в берилле подчиняется более сложным закономерностям. С одной стороны, установлен существенный рост содержания Fe при сравнении ранних генераций пегматитового берилла и поздних (например, в среднем, 1352 г/т и 3079 г/т соответственно) (Duan et al., 2024). Но такая закономерность не согласуется с общим трендом фракционирования, установленным для пегматитовых систем (Neiva, Neiva, 2005; Uher et al., 2010; Suo et al., 2022). Как правило, понижение содержания Fe в берилле является следствием совместной кристаллизации с ним таких железосодержащих минералов, как турмалины, гранаты и танталониобаты (Neiva, Neiva, 2005; Uher et al., 2010; Suo et al., 2022). Поэтому использование Fe в составе берилла в качестве индикатора эволюции магматической системы спорно, поскольку фактор минерального парагенезиса, включающего минералы-концентраторы Fe, является переменным и сложно учитываемым.

По сути дела, как показывает анализ различных источников, только увеличение содержания Cs в пегматитовом берилле может уверенно положительно коррелировать с процессом эволюции магматического расплава, что подтверждается результатами исследования пегматитов мира (Černý et al., 2003; Wang et al., 2009; Vačík et al., 2021; Pauly et al., 2021). С другой стороны, для конкретных объектов и остальные малые и редкие элементы в составе берилла могут выступать индикаторами условий образования пегматитов.

На диаграмме соотношения содержания Cs и Li в берилле фигуративные точки состава берилла из секторов роста призмы для образцов B2 и B3 имеют близкий состав (рис. 5а). Среднее содержание Cs для них составляет 474 г/т. Берилл из зоны роста пинакоида для образца B2 отличается от них более низким содержанием Cs (в среднем, 217 г/т), что необходимо учитывать при оценке степени фракционирования пегматитового расплава по редкоэлементному составу берилла. Сравнение

данных по составу берилла из промежуточной и верхней зоны пегматитов месторождения Шихюао (Shihuiyao), северо-восточный Китай (группы фигуративных точек 4 и 5 на рис. 5а), показывает, что в процессе эволюции пегматитового расплава состав берилла существенно обогатился как Cs, так и Li. На их фоне пегматитовый расплав из месторождений Чамбалак и Дигал можно охарактеризовать как умеренно фракционированный.

Сравнение составов магматической и метасоматической генераций берилла из пегматитов месторождения Калифорния Блю Майн (California Blue Mine), США (группы фигуративных точек 6 и 7 на рис. 5а), проанализированных в пределах одного зерна, где центральная часть отвечает магматической стадии, а внешняя кайма – метасоматической, показывает экстремальное обогащение краевых частей берилла Cs под воздействием водного флюида, и сопоставимое с предыдущим примером обогащение Li. При этом состав центральной части берилла, отвечающий магматической стадии, пересекается с составом берилла из зон роста призмы из месторождений провинции Кунар. Тренды изменения состава берилла из месторождений Шихюао и Калифорния Блю Майн в целом соответствуют направлению тренда фракционирования пегматитового расплава, приведенного в (Duan et al., 2024). Фигуративные точки состава берилла из месторождений провинции Кунар не образуют подобного тренда и в большей степени соответствуют начальным стадиям эволюции пегматитового расплава.

Аналогичная ситуация наблюдается на диаграмме соотношения содержания Cs и Rb в берилле для тех же самых объектов (рис. 5б). Отличаясь по содержанию Cs, фигуративные точки берилла из месторождений провинции Кунар сходны по содержанию Rb. Из них с точками, отвечающими секторам роста призмы, по составу пересекается берилл магматической стадии из месторождения Шихюао. Берилл из этого месторождения, образованный на следующей стадии эволюции пегматитового расплава, отличается повышенным содержанием как Cs, так и Rb. Состав берилла магматической стадии из месторождения Калифорния Блю Майн отвечает тренду фракционирования пегматитового расплава по (Duan et al., 2024), отличаясь повышенным содержанием Rb. В метасоматическом берилле содержание Rb резко падает, несмотря на увеличение содержания Cs, однако в пределах краевой части зерна по мере роста метасоматической генерации берилла содержание Rb увеличивается, а содержание

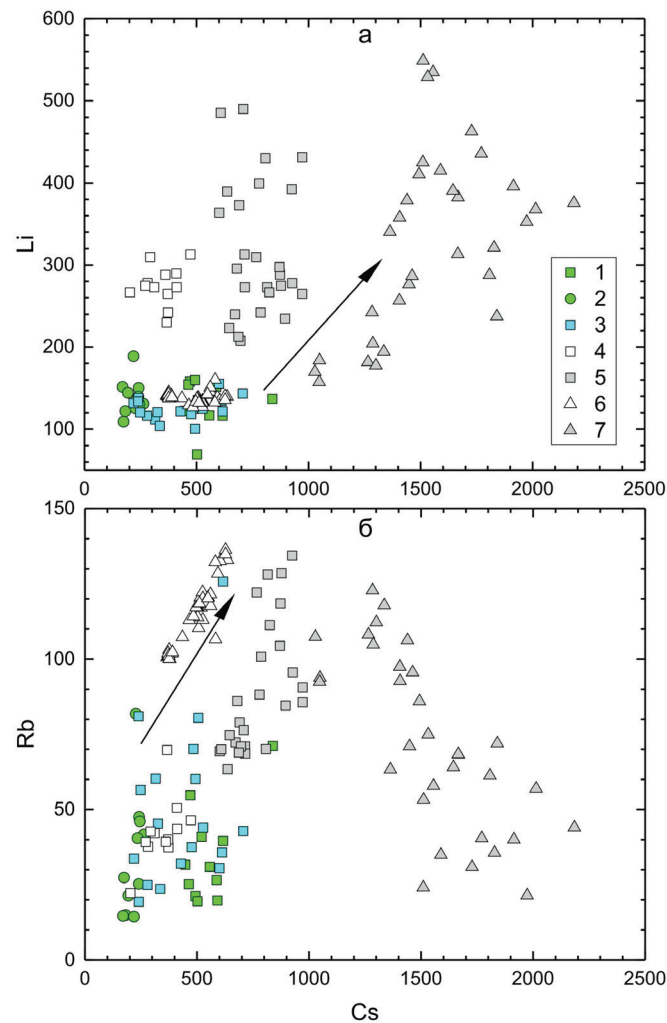


Рис. 5. Соотношение содержания (г/г) Cs с Li (а) и Rb (б) для берилла из пегматитовых месторождений провинции Кунар (1, 2 – точки, относящиеся к секторам роста призмы и пинакоида, соответственно, обр. В2, месторождение Чамбалак; 3 – точки, относящиеся к секторам роста призмы, обр. В3, месторождение Дигал), пегматитов месторождения Шихюао, Китай (4 – из пегматитов промежуточной зоны; 5 – из пегматитов верхней зоны; Duan et al., 2024) и пегматитов месторождения Калифорния Блю Майн, США (6 – ранняя магматическая генерация; 7 – поздняя метасоматическая генерация; Pauly et al., 2021). Тренд фракционирования показан согласно (Duan et al., 2024).

Fig. 5. Cs vs Li (a) and Rb (b) correlation (ppm) for beryl from pegmatite deposits of the Kunar province (1, 2 – points related to the prism and pinacoid growth zone, respectively, sample B2, Chambalak deposit; 3 – points related to the prism growth zone, sample B3, Digal deposit), pegmatites of the Shihuiyao deposit, China (4 – intermediate zone pegmatites; 5 – upper pegmatite zone; Duan et al., 2024), and pegmatites of the California Blue Mine deposit, United States (6 – early magmatic generation; 7 – late metasomatic generation; Pauly et al., 2021). The fractionation trend is shown according to (Duan et al., 2024).

Cs, напротив, уменьшается (Pauly et al., 2021). Такой тренд изменения состава противоположен магматическому тренду, а его возникновение, вероятно, связано с особенностями метасоматических процессов на данном месторождении. В итоге, по соотношению Cs и Rb берилл из месторождений провинции Кунар также не демонстрирует тренда эволюции состава и больше соответствует бериллу из пегматитов начальной стадии фракционирования.

ВЫВОДЫ

Исследование редкоэлементного состава берилла из пегматитовых месторождений Чамбалак и Дигал провинции Кунар методом SIMS позволило установить секториальность кристалла берилла из месторождения Чамбалак. Внутренняя часть профиля идентифицирована как сектор роста пинакоида (0001), а внешняя часть – как сектор роста

призмы (10 $\bar{1}0$). На границе пирамид роста двух простых форм наблюдается отчетливое резкое увеличение содержания Cs (в среднем 217 г/т для зоны роста пинакоида и 525 г/т для зоны роста призмы), Na (1254 г/т и 1718 г/т соответственно), Ca (28.2 г/т и 47.3 г/т), Fe (1590 г/т и 2023 г/т), Mg (385 г/т и 576 г/т) и V (1.93 г/т и 8.75 г/т). Наиболее контрастно смена характера распределения на границе двух простых форм проявлена для Cs, Na, Mg и V. Часть профиля, относящаяся к сектору роста призмы, отвечает ростовой зональности берилла, которая состоит в понижении в процессе роста кристалла содержания Na, Fe и V, а также Ni и Sr. Содержание Ni и Sr понижается от центра к краю кристалла также и в части профиля, относящегося к сектору роста пинакоида, что сложно проинтерпретировать. Для воды и Mg установлена тенденция повышения в секторе роста призмы по мере роста кристалла. Для берилла из месторождения Дигал в распределении по профилю ни по одному элементу не наблюдается скачкообразного изменения в содержании, которое можно рассматривать в качестве границы между секторами роста пинакоида и призмы. Наиболее показательно распределение Cs: его содержание монотонно увеличивается от наиболее удаленной от граней кристалла до приближенной к ним. Есть основание считать данный профиль как обусловленный ростом только одной простой формы – призмы.

Сопоставление берилла по содержанию индикаторных элементов, увеличение которых отвечает тренду фракционирования пегматитового расплава (Cs, Li и Rb) из пегматитовых месторождений провинции Кунар с бериллом, отвечающим разным стадиям пегматитообразования для месторождения Шихюао (Китай) и Калифорния Блю Майн (США), показало, что пегматитовый расплав из месторождений Чамбалак и Дигал можно охарактеризовать как умеренно фракционированный. Фигуративные точки состава берилла из месторождений провинции Кунар не образуют тренда фракционирования, установленного для других объектов, и в большей степени соответствуют начальным стадиям эволюции пегматитового расплава. Другой важный вывод – установленная секториальность берилла, при которой состав минерала из сектора роста призмы систематически отличается повышенным содержанием Cs и ряда других индикаторных элементов, по сравнению с сектором роста пинакоида.

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев В.И. (2023) Воджинит как минерал-индикатор танталоносных пегматитов и гранитов. *Записки Горного института*, 262, 495–508. DOI: 10.31897/PMI.2023.19
- Левашова Е.В., Попов В.А., Левашов Д.С., Румянцева Н.А. (2022) Распределение редких элементов по секторам и зонам роста в цирконе из миаскитового пегматита Вишневогорского массива, Южный Урал. *Записки Горного института*, 254, 136–148. DOI: 10.31897/PMI.2022.29
- Попов В.А. (2011) Практическая генетическая минералогия. Екатеринбург, УрО РАН, 167 с.
- Попов М.П. (2022) Особенности редкометалльного оруденения и генетическая связь минеральных ассоциаций в восточном обрамлении Мурзинско-Адуйского антиклинория (Уральская изумрудоносная полоса). *Записки Горного института*, 255, 337–348. DOI: 10.31897/PMI.2022.19
- Скублов С.Г., Гаврильчик А.К., Березин А.В. (2022) 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*, 255, 455–469. DOI: 10.31897/PMI.2022.40
- Скублов С.Г., Левашова Е.В., Мамыкина М.Е., Гусев Н.И., Гусев А.И. (2024) Полифазный Белокурихинский массив гранитов, Горный Алтай: изотопно-геохимическое исследование циркона. *Записки Горного института*, 1–24. EDN RGKCIJ
- Andersson L.O. (2006) The positions of H⁺, Li⁺ and Na⁺ impurities in beryl. *Physics and Chemistry of Minerals*, 33, 403–416. <https://doi.org/10.1007/s00269-006-0086-x>
- Aurischio C., Fioravanti G., Grubessi O., Zanazzi P.F. (1988) Reappraisal of the crystal chemistry of beryl. *American Mineralogist*, 73, 826–837.
- Bačík P., Fridrichová J., Uher P., Vaculovič T., Bizovská V., Škoda R., Dekan J., Miglierini M., Malíčková I. (2021) Beryl crystal chemistry and trace elements: Indicators of pegmatite development and fractionation (Damara Belt, Namibia). *Lithos*, 404, 106441. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106441>
- Černý P. (2002) Mineralogy of beryllium in granitic pegmatites. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 50, 405–444. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.50.10>
- Černý P., Turnock A. (1975) Beryl from the granitic pegmatites at Greer Lake, Southeastern Manitoba. *The Canadian Mineralogist*, 13, 55–61.
- Černý P., Anderson A.J., Tomascak P.B., Chapman R. (2003) Geochemical and morphological features of beryl from the Bikita granitic pegmatite, Zimbabwe. *The Canadian Mineralogist*, 49, 1003–1011. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.4.1003>

- Doeblich J.L., Wahl R.R., Chirico P.G., Wandrey C.J., Bohannon R.G., Orris G.J., Bliss J.D., Wasy A., Younusi M.O. (2006) Geologic and mineral resource map of Afghanistan (No. 2006-1038). *Geological Survey (US)*. <https://pubs.usgs.gov/of/2006/1038/>
- Dowty E. (1976) Crystal structure and crystal growth; II, Sector zoning in minerals. *American Mineralogist*, 61, 460–469.
- Duan Z., Jiang S.Y., Su H.M., Salvi S., Monnier L., Zhu X., Lv X. (2024) Beryl as an indicator for elemental behavior during magmatic evolution and metasomatism in the large Shihuiyao Rb-Nb-Ta-Be deposit, Inner Mongolia, NE China. *Ore Geology Reviews*, 166, 105940. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.105940>
- Fan Z.W., Xiong Y.Q., Shao Y.J., Wen C.H. (2022) Textural and chemical characteristics of beryl from the Baishawo Be-Li-Nb-Ta pegmatite deposit, Jiangnan Orogen: Implication for rare metal pegmatite genesis. *Ore Geology Reviews*, 149, 105094. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105094>
- Giuliani G., Groat L.A., Marshall D., Fallick A.E., Branquet Y. (2019) Emerald deposits: A review and enhanced classification. *Minerals*, 9, 105. <https://doi.org/10.3390/min9020105>
- Jiang S.Y., Wang W., Su H.M. (2023) Super-enrichment mechanisms of strategic critical metal deposits: current understanding and future perspectives. *Journal of Earth Sciences*, 34, 1295–1298. <https://doi.org/10.1007/s12583-023-2001-5>
- Khaleal F.M., Saleh G.M., El Saeed R.L., Lentz D.R. (2022) Occurrences and genesis of emerald and others beryl mineralization in Egypt: A review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128, 103266. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103266>
- Lei X.F., Jiang S.Y., Romer R.L., Su H.M., Cao M.Y., Zhao C.L. (2023) Petrogenesis of the Weiling beryl-bearing granitic pegmatite – A giant LCT-type pegmatite in the Northern Wuyi area, South China. *Ore Geology Reviews*, 160, 105572. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105572>
- Lum J.E., Viljoen F., Cairncross B., Frei D. (2016) Mineralogical and geochemical characteristics of BERYL (AQUAMARINE) from the Erongo Volcanic Complex, Namibia. *Journal of African Earth Sciences*, 124, 104–125. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.09.006>
- Mashkoo R., Ahmadi H., Rahmani A.B., Pekkan E. (2022) Detecting Li-bearing pegmatites using geospatial technology: the case of SW Konar Province, Eastern Afghanistan. *Geocarto International*, 37, 14105–14126. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2086633>
- Mosazai A.M., Yousufi A., Ahmadi H. (2017) The geological characteristics and economical importance of pegmatite belt of Afghanistan. *Геология и охрана недр*, 65 (4), 26–33.
- Neiva A.M.R., Neiva J.M.C. (2005) Beryl from the granitic pegmatite at Namivo, AltoLigonha, Mozambique. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, 181, 173–182.
- Pauly C., Gysi A.P., Pfaff K., Merkel I. (2021) Beryl as indicator of metasomatic processes in the California Blue Mine topaz-beryl pegmatite and associated miarolitic pockets. *Lithos*, 404–405, 106485. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106485>
- Rakovan J., Reeder R.J. (1994) Differential incorporation of trace elements and dissymmetrization in apatite: The role of surface structure during growth. *American Mineralogist*, 79, 892–903.
- Rakovan J., Reeder R.J. (1996) Intracrystalline rare earth element distributions in apatite: Surface structural influences on incorporation during growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 4435–4445. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(96\)00244-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00244-X)
- Rakovan J., McDaniel D.K., Reeder R.J. (1997) Use of surface-controlled REE sectoral zoning in apatite from Llallagua, Bolivia, to determine a single-crystal Sm-Nd age. *Earth and Planetary Science Letters*, 146, 329–336. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(96\)00226-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(96)00226-9)
- Rossovskiy L.N., Chmyrev V.M. (1977) Distribution patterns of rare-metal pegmatites in the Hindu Kush (Afghanistan). *International Geology Review*, 19, 511–520. <https://doi.org/10.1080/00206817709471047>
- Sardi F.G., Heimann A. (2014) Pegmatitic beryl as indicator of melt evolution: example from the Velasco district, Pampeana pegmatite province, Argentina, and review of worldwide occurrences. *The Canadian Mineralogist*, 52, 809–836. <https://doi.org/10.3749/canmin.1400032>
- Scandale E., Lucchesi S. (2000) Growth and sector zoning in a beryl crystal. *European Journal of Mineralogy*, 12, 357–366. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2000/0001-0357>
- Staatz M.H., Griffiths W.R., Barnett P.R. (1965) Differences in the minor element compositions of beryl in various environments. *American Mineralogist*, 50, 1783–1795.
- Sunagawa I., Urano A. (1999) Beryl crystals from pegmatites: morphology and mechanism of crystal growth. *Journal of Gemmology*, 26, 521–533.
- Suo Q.Y., Shen P., Luo Y.Q., Li C.H., Feng H.X., Cao C., Pan H.D., Bai Y.X. (2022) Beryl mineralogy and fluid inclusion constraints on the Be enrichment in the Dakalasu No.1 pegmatite, Altai, NW China. *Minerals*, 12, 450. <https://doi.org/10.3390/min12040450>
- Taran M.N., Vyshnevskiy O.A. (2019) Be, Fe²⁺-substitution in natural beryl: an optical absorption spectroscopy study. *Physics and Chemistry of Minerals*, 46, 795–806. <https://doi.org/10.1007/s00269-019-01040-2>
- Uher P., Chudík P., Bačík P., Vaculovič T., Galiova M. (2010) Beryl composition and evolution trends: an example from granitic pegmatites of the beryl-columbite subtype, western Carpathians, Slovakia. *Journal of Geosciences*, 55, 69–80. <http://doi.org/10.3190/jgeosci.060>
- Wang R.C., Che X.D., Zhang W.L., Zhang A.C., Zhang H. (2009) Geochemical evolution and late re-equilibration of Na–Cs-rich beryl from the Koktokay# 3 pegmatite (Altai,

NW China). *European Journal of Mineralogy*, 21, 795–809. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2009/0021-1936>

Watson E.B. (1996) Surface enrichment and trace-element uptake during crystal growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 5013–5020. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(96\)00299-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00299-2)

Watson E.B., Liang Y. (1995) A simple model for sector zoning in slowly grown crystals: Implications for growth rate and lattice diffusion, with emphasis on accessory minerals in crustal rocks. *American Mineralogist*, 80, 1179–1187. <https://doi.org/10.2138/am-1995-11-1209>

REFERENCES

Alekseev V.I. (2023) Wodginite as an indicator mineral of tantalum-bearing pegmatites and granites. *Journal of Mining Institute*, 262, 495–508. DOI: 10.31897/PMI.2023.19

Andersson L.O. (2006) The positions of H⁺, Li⁺ and Na⁺ impurities in beryl. *Physics and Chemistry of Minerals*, 33, 403–416. <https://doi.org/10.1007/s00269-006-0086-x>

Aurischio C., Fioravanti G., Grubessi O., Zanazzi P.F. (1988) Reappraisal of the crystal chemistry of beryl. *American Mineralogist*, 73, 826–837.

Bačík P., Fridrichová J., Uher P., Vaculovič T., Bizovská V., Škoda R., Dekan J., Miglierini M., Malíčková I. (2021) Beryl crystal chemistry and trace elements: Indicators of pegmatite development and fractionation (Damara Belt, Namibia). *Lithos*, 404, 106441. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106441>

Černý P. (2002) Mineralogy of beryllium in granitic pegmatites. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 50, 405–444. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.50.10>

Černý P., Turnock A. (1975) Beryl from the granitic pegmatites at Greer Lake, Southeastern Manitoba. *The Canadian Mineralogist*, 13, 55–61.

Černý P., Anderson A.J., Tomascak P.B., Chapman R. (2003) Geochemical and morphological features of beryl from the Bikita granitic pegmatite, Zimbabwe. *The Canadian Mineralogist*, 49, 1003–1011. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.4.1003>

Doeblich J.L., Wahl R.R., Chirico P.G., Wandrey C.J., Bohannon R.G., Orris G.J., Bliss J.D., Wasy A., Younusi M.O. (2006) Geologic and mineral resource map of Afghanistan (No. 2006-1038). *Geological Survey (US)*. <https://pubs.usgs.gov/of/2006/1038/>

Dowty E. (1976) Crystal structure and crystal growth; II, Sector zoning in minerals. *American Mineralogist*, 61, 460–469.

Duan Z., Jiang S.Y., Su H.M., Salvi S., Monnier L., Zhu X., Lv X. (2024) Beryl as an indicator for elemental behavior during magmatic evolution and metasomatism in the large Shihuiyao Rb-Nb-Ta-Be deposit, Inner Mongolia, NE China. *Ore Geology Reviews*, 166, 105940. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.105940>

Fan Z.W., Xiong Y.Q., Shao Y.J., Wen C.H. (2022) Textural and chemical characteristics of beryl from the Baishawo Be-Li-Nb-Ta pegmatite deposit, Jiangnan Orogen: Implication for rare metal pegmatite genesis. *Ore Geology Reviews*, 149, 105094. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105094>

Giuliani G., Groat L.A., Marshall D., Fallick A.E., Branquet Y. (2019) Emerald deposits: A review and enhanced classification. *Minerals*, 9, 105. <https://doi.org/10.3390/min9020105>

Jiang S.Y., Wang W., Su H.M. (2023) Super-enrichment mechanisms of strategic critical metal deposits: current understanding and future perspectives. *Journal of Earth Sciences*, 34, 1295–1298. <https://doi.org/10.1007/s12583-023-2001-5>

Khaleal F.M., Saleh G.M., El Saeed R.L., Lentz D.R. (2022) Occurrences and genesis of emerald and others beryl mineralization in Egypt: A review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128, 103266. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103266>

Lei X.F., Jiang S.Y., Romer R.L., Su H.M., Cao M.Y., Zhao C.L. (2023) Petrogenesis of the Weiling beryl-bearing granitic pegmatite – A giant LCT-type pegmatite in the Northern Wuyi area, South China. *Ore Geology Reviews*, 160, 105572. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105572>

Levashova E.V., Popov V.A., Levashov D.S., Rumyantseva N.A. (2022) Distribution of trace elements controlled by sector and growth zonings in zircon from a miaskite pegmatite of the Vishnegorsky massif, the Southern Urals. *Journal of Mining Institute*, 254, 136–148. DOI: 10.31897/PMI.2022.29

Lum J.E., Viljoen F., Cairncross B., Frei D. (2016) Mineralogical and geochemical characteristics of BERYL (AQUAMARINE) from the Erongo Volcanic Complex, Namibia. *Journal of African Earth Sciences*, 124, 104–125. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.09.006>

Mashkoo R., Ahmadi H., Rahmani A.B., Pekkan E. (2022) Detecting Li-bearing pegmatites using geospatial technology: the case of SW Konar Province, Eastern Afghanistan. *Geocarto International*, 37, 14105–14126. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2086633>

Mosazai A.M., Yousufi A., Ahmadi H. (2017) The geological characteristics and economical importance of pegmatite belt of Afghanistan. *Геология и охрана недр*, 65 (4), 26–33.

Neiva A.M.R., Neiva J.M.C. (2005) Beryl from the granitic pegmatite at Namivo, AltoLigonha, Mozambique. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, 181, 173–182.

Pauly C., Gysi A.P., Pfaff K., Merkel I. (2021) Beryl as indicator of metasomatic processes in the California Blue Mine topaz-beryl pegmatite and associated miarolitic pockets. *Lithos*, 404–405, 106485. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106485>

Popov M.P. (2022) Peculiarities of rare-metal mineralization and genetic relationship of mineral

associations in the eastern rim of Murzinsko-Aduysky anticlinorium (the Ural Emerald Belt). *Journal of Mining Institute*, 255, 337–348. DOI: 10.31897/PMI.2022.19

Popov V.A. (2011) Practical genetic mineralogy. Yekaterinburg, UrO RAN, 167 p. (in Russian)

Rakovan J., Reeder R.J. (1994) Differential incorporation of trace elements and dissymmetrization in apatite: The role of surface structure during growth. *American Mineralogist*, 79, 892–903.

Rakovan J., Reeder R.J. (1996) Intracrystalline rare earth element distributions in apatite: Surface structural influences on incorporation during growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 4435–4445. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(96\)00244-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00244-X)

Rakovan J., McDaniel D.K., Reeder R.J. (1997) Use of surface-controlled REE sectoral zoning in apatite from Llallagua, Bolivia, to determine a single-crystal Sm-Nd age. *Earth and Planetary Science Letters*, 146, 329–336. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(96\)00226-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(96)00226-9)

Rossovskiy L.N., Chmyrev V.M. (1977) Distribution patterns of rare-metal pegmatites in the Hindu Kush (Afghanistan). *International Geology Review*, 19, 511–520. <https://doi.org/10.1080/00206817709471047>

Sardi F.G., Heimann A. (2014) Pegmatitic beryl as indicator of melt evolution: example from the Velasco district, Pampeana pegmatite province, Argentina, and review of worldwide occurrences. *The Canadian Mineralogist*, 52, 809–836. <https://doi.org/10.3749/canmin.1400032>

Scandale E., Lucchesi S. (2000) Growth and sector zoning in a beryl crystal. *European Journal of Mineralogy*, 12, 357–366. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2000/0001-0357>

Skublov S.G., Gavrilchik A.K., Berezin A.V. (2022) Geochemistry of beryl varieties: comparative analysis and visualization of analytical data by principal component analysis (PCA) and t-distributed stochastic neighbor embedding (t-SNE). *Journal of Mining Institute*, 255, 455–469. DOI: 10.31897/PMI.2022.40

Skublov S.G., Levashova E.V., Mamykina M.E., Gusev N.I., Gusev A.I. (2024) Polyphase Belokurikhinsky granite massif, Gorny Altai: isotope-geochemical study of zircon. *Journal of Mining Institute*, 1–23. EDN RGKCIJ

Staatz M.H., Griffiths W.R., Barnett P.R. (1965) Differences in the minor element compositions of beryl in various environments. *American Mineralogist*, 50, 1783–1795.

Sunagawa I., Urano A. (1999) Beryl crystals from pegmatites: morphology and mechanism of crystal growth. *Journal of Gemmology*, 26, 521–533.

Suo Q.Y., Shen P., Luo Y.Q., Li C.H., Feng H.X., Cao C., Pan H.D., Bai Y.X. (2022) Beryl mineralogy and fluid inclusion constraints on the Be enrichment in the Dakalasu No.1 pegmatite, Altai, NW China. *Minerals*, 12, 450. <https://doi.org/10.3390/min12040450>

Taran M.N., Vyshnevskiy O.A. (2019) Be, Fe²⁺-substitution in natural beryl: an optical absorption spectroscopy study. *Physics and Chemistry of Minerals*, 46, 795–806. <https://doi.org/10.1007/s00269-019-01040-2>

Uher P., Chudík P., Bačík P., Vaculovič T., Galiova M. (2010) Beryl composition and evolution trends: an example from granitic pegmatites of the beryl-columbite subtype, western Carpathians, Slovakia. *Journal of Geosciences*, 55, 69–80. <http://doi.org/10.3190/jgeosci.060>

Wang R.C., Che X.D., Zhang W.L., Zhang A.C., Zhang H. (2009) Geochemical evolution and late re-equilibration of Na–Cs-rich beryl from the Koktokay# 3 pegmatite (Altai, NW China). *European Journal of Mineralogy*, 21, 795–809. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2009/0021-1936>

Watson E.B. (1996) Surface enrichment and trace-element uptake during crystal growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 5013–5020. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(96\)00299-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00299-2)

Watson E.B., Liang Y. (1995) A simple model for sector zoning in slowly grown crystals: Implications for growth rate and lattice diffusion, with emphasis on accessory minerals in crustal rocks. *American Mineralogist*, 80, 1179–1187. <https://doi.org/10.2138/am-1995-11-1209>

Информация об авторах

Скублов Сергей Геннадьевич – главный научный сотрудник, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН; skublov@yandex.ru

Юсуфзай Атаулла – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II; ассистент, Кабульский Политехнический Университет, Кабул, Афганистан; s215138@stud.spmi.ru

Евдокимов Александр Николаевич – профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II; evdokimov_an@pers.spmi.ru

Гаврильчик Александра Константиновна – хранитель музейных предметов Горного музея, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II; gavrilchik_ak2@pers.spmi.ru

Information about the authors

Sergey G. Skublov – key researcher, Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS; skublov@yandex.ru

Ataullah Yosufzai – post-graduate student, Empress Catherine II St. Petersburg Mining University; assistant, Kabul Polytechnic University; s215138@stud.spmi.ru

Aleksander N. Evdokimov – professor, Empress Catherine II St. Petersburg Mining University; evdokimov_an@pers.spmi.ru

Aleksandra K. Gavrilchik – curator of museum items of the Mining Museum, Empress Catherine II St. Petersburg Mining University; gavrilchik_ak2@pers.spmi.ru