ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геология*

Геохимия сподумена из пегматитов гранитоидного комплекса Лагман, Афганистан

А.Н.Евдокимов[1], **А.Юсуфзай**[1,2]✉
[1] *Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Кабульский политехнический университет, Кабул, Афганистан*

Как цитировать эту статью: Евдокимов А.Н., Юсуфзай А. Геохимия сподумена из пегматитов гранитоидного комплекса Лагман, Афганистан // Записки Горного института. 2025. Т. 274. № 16469. С. 45-62. EDN SANBMI

Аннотация
Приведены первые данные о содержаниях редких элементов в составах сподумена из пегматитов гранитоидного комплекса Лагман в Восточном Афганистане, месторождений Колатан, Дигал, Гульсалак и Цамгал. Анализы были выполнены методом SIMS. Установлены парагенетические особенности сподумена, который в количестве 10-35 % присутствует в сподумен-микроклин-альбитовых, сподумен-альбитовых и сподумен-лепидолит-клевеландитовых пегматитах. Размер кристаллов от нескольких миллиметров до 1,5-2 м, иногда до 3 м в длину. Форма кристаллов призматическая, досковидная, прямоугольная. Содержания малых и редких элементов в сподумене значительно изменяются от центра к краю кристаллов. Увеличение содержаний Li (36571-51040), Na (378-1542), Mn (103-2877), Ga (24,4-90,1), Sn (5,52-382), Ti (1,3-79,5), Zn (0,37-38,4) ppm сопровождается уменьшением концентраций K (3,86-147), Ca (1,39-105), Mg (0,26-276), B (1,69-57,3), Cr (2,75-15,1), Cu (0,65-11,6), Cs (0,0-8,75), Be (0,03-9,54), Ta (0,03-2,09), Sr (0,03-3,09), V (0,07-3,11), Rb (0,02-1,56), Ba (0,03-3,17), Zr (0,01-1,6) ppm. Количество Fe уменьшается от центра к краю, а Mn и Sn увеличивается от центра к краю во всех кристаллах. В розовато-фиолетовой зоне кристалла содержание Mn значительно выше, чем Cr и Fe. Наблюдается положительная корреляция Li с Na, Mn, Fe, Ga, Sn, B, Cr, Ti, Be и отрицательная – с K, Cs, Ta и Nb. Сподумен из месторождения Дарай Печ содержит больше галлия, чем из месторождений Колатан и Цамгал, что имеет практическое значение. Резкие границы между зонами роста говорят о скорости диффузии, которая была меньше скорости роста кристаллов, происходившего в условиях кристаллизации пегматитового расплава. В результате обмена с остаточным расплавом осуществлялась незначительная посткристаллизационная диффузия и восстановление равновесия между кристаллом и окружающей средой.

Ключевые слова
редкометалльные пегматиты; сподумен; зональность; парагенезис; редкие элементы; метод SIMS; Восточный Афганистан

Поступила: 25.04.2024 ***Принята: 28.01.2025*** ***Онлайн: 18.06.2025*** ***Опубликована: 25.08.2025***

Введение

Сподумен $LiAlSi_2O_6$ – основной минерал лития, который обычно ассоциирует с кварцем, альбитом, микроклином, слюдой, бериллом и второстепенными акцессорными минералами в гранитных пегматитах. Он, как правило, в среднем составе содержит SiO_2 – 64,5 %, Al_2O_3 – 27,4 % и Li_2O – 8,4 % [1, 2] и используется как источник высокочистого лития. Потребность современной промышленности в литии возрастает в связи с его особыми физико-химическими свойствами. 43-65 % добываемого лития используется в аккумуляторах для электромобилей [3-5], участвуя в «зеленых технологиях» [6-8], 28 % лития используется в производстве керамики и специального стекла [9-11], 7 % применяется для производства высокотемпературной смазки [12], полимеров [4], литейного флюса [5], алюминиевых сплавов [13] и фармацевтических препаратов [3].

Сподумен имеет три основные модификации – α, β и γ. Они отличаются друг от друга кристаллической структурой и стабильностью к внешнему воздействию. Устойчивой низкотемпературной разновидностью является α-сподумен, он кристаллизуется в моноклинной сингонии [14, 15];

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

β-сподумен имеет тетрагональную кристаллическую решетку, является продуктом перекристаллизации при нагревании α-сподумена до t = 900-1100 °С; γ-сподумен кристаллизуется в гексагональной сингонии, неустойчив в природных условиях, образуется в процессе превращения α-сподумена в β-сподумен при нагревании α-сподумена до t = 700-900 °С [1, 16, 17]. В пегматитах Афганистана распространен α-сподумен (рудообразующий), он включает разновидности ювелирного качества: кунцит, гидденит и трифан. Ювелирные сподумены встречаются в восточной части страны, в административных провинциях Нуристан, Лагман, Кунар и Нангархар.

Изучаемая территория считается одной из самых крупных редкометалльных минерагенических провинций мира [18-20]. В 1977 г. Л.Н.Россовский и В.М.Чмырев обнаружили двадцать четыре месторождения редкометалльных пегматитов [18]. Двадцать одно – в провинциях Нуристан, Кунар, Лагман, Нангархар и Бадахшан и три – в Центральном Афганистане [20, 21].

В статье представлены результаты определений содержаний малых и редких элементов методом SIMS в четырнадцати кристаллах сподумена из месторождений Восточного Афганистана: Колатан, Дигал, Гульсалак и Цамгал. Цель исследования заключается в установлении закономерностей изменения составов кристаллов в разных зонах роста в зависимости от условий кристаллизации при пегматитообразовании.

Окраска сподумена зависит от примесей малых и редких элементов [22, 23]. Изучение распределения этих элементов в сподумене позволяет установить закономерности их распределения в структуре минерала и ответить на давние фундаментальные вопросы о причинах и особенностях зональности кристаллов в гранитных пегматитах в связи с переходом от магматического этапа к гидротермальному [24-26]. При этом смена физико-химических условий роста кристалла может способствовать образованию отличающихся по кристаллографическим параметрам разновидностей изучаемого минерала, нарастанию зон микроструктурных деформаций, как это происходит на контакте между кварцами гексагональной и тригональной сингоний.

Детальные исследования микроэлементного состава сподумена из Афганистана методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS-метод) выполнены впервые. В большинстве публикаций по составам сподуменов из различных регионов мира минерал изучался с использованием различных методов [27-29], таких как спектральная или катодолюминесцентная микроскопия, SEM, EMPA, LA-ICP-MS, но ни в одном из исследований не использовался весьма точный метод – SIMS. Таким образом, данная работа представляет собой первые результаты определений редких элементов в сподуменах из редкометалльных пегматитов гранитоидного комплекса Лагман методом SIMS. Полученные данные планируется использовать для выявления геохимических зависимостей между составами минерала и вмещающих пегматитов.

Преимуществом используемого метода анализа SIMS является его большая точность – миллиграмм на тонну, в отличие от других, где точность не превышает одного грамма на тонну. Для сподумена это важно при определении содержаний микрокомпонентов и лития, как основного элемента зонах роста кристаллов. Благодаря методу SIMS впервые получена информация по примесному составу и зональности сподумена из месторождений Восточного Афганистана.

Геологическая характеристика и полевые исследования пегматитов

Тектоническая зона Нуристан расположена на территории Восточного Афганистана и является рудоконтролирующей для редкометалльных пегматитов страны. Она простирается вдоль горных хребтов Гиндукуша – Памира в пределах Нуристанской горной системы. Тектоническая зона ориентирована в субмеридиональном и северо-восточном направлениях. Ее протяженность – 400 км, максимальная ширина на юго-западе – 130 км. Тектоническая зона проходит через выходы древнего докембрийского основания [19, 20], а также частично через комплекс палеозойско-мезозойских отложений. Докембрийский комплекс основания представлен гнейсами, мраморами, амфиболитами, кварцитами, кристаллическими сланцами, амфиболитовой фацией метаморфизма [30]. Дислоцированный осадочный чехол сложен каменноугольно-пермскими мраморизованными известняками, кварцитами, слюдяными сланцами [31]. Триасовая толща представлена кварц-слюдистыми, гранат-ставролитовыми и темно-серыми филлитовидными сланцами с небольшим количеством известняков и кварцитов [21].

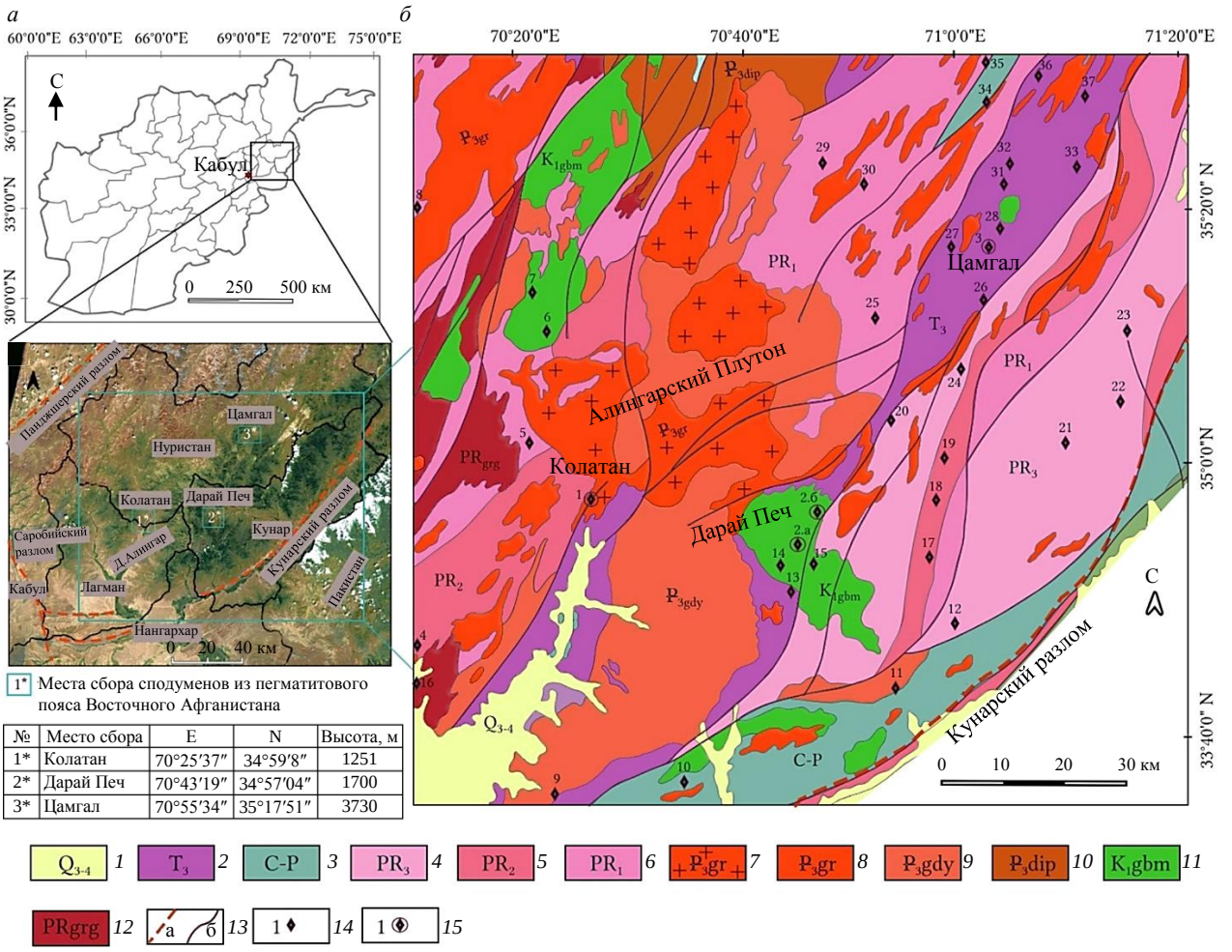
Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 274. С. 45-62
© А.Н.Евдокимов, А.Юсуфзай, 2025

Крупные разрывные нарушения имеют в основном северо-восточное простирание (рис.1). Крутопадающие глубинные разломы Панджшер на северо-западе, Кунар на юго-востоке, Сароби на юго-западе ограничивают зону Нуристан с трех сторон. Простирание первых двух разломов северо-восточное, третьего – субмеридиональное.

В зоне Нуристан весьма широко развиты интрузии мезо-кайнозойских тектономагматических этапов магматизма. Выделяются раннемеловые породы габбро-монцонит-диоритовой формации (комплекс Нилау) и олигоценовые гранитоиды батолитовой формации (комплекс Лагман).

Олигоценовые гранитоиды комплекса Лагман[1] имеют весьма широкое развитие в зоне Нуристан. Они слагают несколько крупных и множество мелких массивов, развитых среди метаморфических толщ серии Нуристан и верхнетриасовых сланцев (рис.1).



№	Место сбора	E	N	Высота, м
1*	Колатан	70°25′37″	34°59′8″	1251
2*	Дарай Печ	70°43′19″	34°57′04″	1700
3*	Цамгал	70°55′34″	35°17′51″	3730

Рис.1. Размещение редкометалльных пегматитов гранитоидного комплекса Лагман: *а* – расположение пегматитового пояса зоны Нуристан в Афганистане (со спутниковым снимком, где прямоугольником показан район исследования и месторождения); *б* – геологическая карта центральной части пегматитового пояса, составленная по материалам [19, 20, 31]

1 – аллювий, гравий, пески и глины; *2* – филлитовидные сланцы, алевролиты и песчаники; *3* – песчаники, андезиты, базальты; *4* – гнейсы, сланцы, кварциты, амфиболиты; *5* – мраморы, гнейсы, амфиболиты, кварциты; *6* – гнейсы, кварциты, амфиболиты; магматические образования, олигоценовый комплекс Лагман: *7* – Алингарский плутон, граниты-III; *8* – мелкие массивы, линзовидные и штокообразные тела, граниты-III; *9* – гранодиорит и граносиениты-II; *10* – диориты и плагиограниты-I; *11* – комплекс Нилау, габбро, монцониты, гранодиориты и диориты; *12* – комплекс Панджшер, гранитогнейсы; *13* – крупные разломы (а), отделяющие зону Нуристан от других зон, и мелкие разломы (б); *14* – пегматитовые месторождения: 1 – Колатан, 2 – Дарай Печ: Дигал (а), Гульсалак (б), 3 – Цамгал, 4 – Алишанг, 5 – Кургал, 6 – Мави, 7 – Нилау-Кулам, 8 – Мандул, 9 – Чарбаг, 10 – Дарай Нур, 11 – Чаукай, 12 – Бадел, 13 – Дурахи, 14 – Аваргал, 15 – Варадеш, 16 – Шамакат, 17 – Гарангал, 18 – Нангалам, 19 – Манугай, 20 – Вайгал, 21 – Деваз, 22 – Шигал, 23 – Маред, 24 – Бони, 25 – Вама, 26 – Иншахар, 27 – Пашки, 28 – Друмгал, 29 – Кантива, 30 – Яригал, 31 – Пасгушта, 32 – Джаманак, 33 – Прамгал, 34 – Вазгал, 35 – Пачиграм, 36 – Папрук, 37 – Камдеш; *15* – место сбора образцов

[1] *Cocker M.D.* Summary for the Mineral Information Package for the Nuristan Rare-Metal Pegmatite Area of Interest // Summaries of Important Areas for Mineral Investment and Production Opportunities of Nonfuel Minerals in Afghanistan: Open-File Report 2011 – 1204. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2011. P. 1630-1653.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Форма интрузивов комплекса Лагман преимущественно овальная и вытянутая в северо-восточном направлении, реже близкая к изометричной. Длинные оси массивов параллельны друг другу и согласно ориентированы с простиранием основных структур района. Крупнейшим из интрузивов является Алингарский Плутон, прослеживающийся на расстоянии около 400 км.

Массивы комплекса Лагман трехфазные [18, 19]. Первая фаза представлена диоритами и кварцевыми диоритами, вторая – порфировидными гранитами и гранодиоритами, третья – биотитовыми, двуслюдяными и аплитовидными гранитами. Характерной особенностью комплекса Лагман является наличие многочисленных жил редкометалльных пегматитов, пространственно связанных с гранитоидами третьей фазы [18-20]. Редкометалльные пегматиты образуют пегматитовые поля, которые группируются в крупные пояса. С батолитом Алингар связаны Нуристанский и Гиндукушский пегматитовые пояса [32].

Жилы редкометалльных пегматитов залегают в породах кровли гранитных массивов комплекса Лагман [33, 34], в области экзоконтакта, но не в самих гранитах, а в позднетриасовой толще черносланцевой формации: в кварц-хлорит-мусковитовых и филлитовидных кварц-биотит-гранат-ставролитовых сланцах амфиболитовой фации метаморфизма. Фрагментарно вмещающими являются раннемеловые массивы габбро-диоритов и кварцевых диоритов комплекса Нилау, где два пегматитовых поля – Дарай Печ и Нилау-Кулам. Небольшое число жил заключено в массивах диоритов и гранодиоритов первой фазы комплекса Лагман. Пегматиты редко встречаются в позднепротерозойских темно-серых силлиманит-гранат-биотитовых гнейсах. Но самые крупные и интенсивно минерализованные тела локализуются в филлитовидных сланцах позднетриасового возраста [21, 35].

По составу главных породообразующих и типоморфных минералов пегматиты района делятся на следующие основные типы [19, 20, 32]:

- олигоклаз-микроклиновые с биотитом, мусковитом, шерлом и редким бериллом (безрудные);
- шерлово-мусковит-микроклиновые с рудообразующим бериллом;
- слабоальбитизированные микроклиновые с крупнокристаллическим бериллом;
- альбитовые пегматиты со сподуменом, полихромным турмалином, кунцитом, поллуцитом и танталит-колумбитом;
- сподумен-микроклин-альбитовые и сподумен-альбитовые с полихромным турмалином, кунцитом и поллуцитом;
- сподумен-лепидолит-клевеландитовые с касситеритом, поллуцитом, танталитом-колумбитом и ювелирными камнями.

Редкометалльные пегматиты в тектонической зоне Нуристан распространены в пределах трех гипсометрических уровней:

- абсолютная высота 1200-2000 м – месторождения Шамакат, Колатан, Калагуш, Нангалам, Татанг и др.;
- абсолютная высота 2000-3400 м – месторождения Дарай Печ (Дигал и Гульсалак), Цамгал, Нилау и др.;
- абсолютная высота 3400-4500 м – месторождения Друмгал, Джаманак, Цамгал, Пашки, Пасгушта, Яригал в пегматитовом поле Парун [33, 34].

В пределах одних и тех же пегматитовых полей отдельные жилы пегматитов залегают на разных гипсометрических уровнях.

Для определения различия в составах литиевых минералов из пегматитов разных гипсометрических уровней авторы проанализировали сподумены из трех пегматитовых месторождений: Колатан, Дарай Печ (Дигал и Гульсалак) и Цамгал на востоке Афганистана (рис.1).

Сподумен из всех редкометалльных минералов наиболее широко распространен в пегматитовом поясе Восточного Афганистана. Он образует большое количество разновидностей, встречается в разных типах пегматитов и в различных минеральных ассоциациях – сподумен-микроклин-альбитовой, сподумен-альбитовой и сподумен-лепидолит-клевеландитовой.

Месторождение Колатан расположено в нижней части долины Титин, в левом притоке р. Алингар, в 8 км к северо-востоку от округа Нангарач. Координаты точек сбора образцов из месторождения Колатан: 34°59'8" с.ш. 70°25'37" в.д. Рельеф участка скалистый, в диапазоне абсолютных превышений над уровнем моря от 1251 до 1600 м. Широко развиты олигоценовые граниты

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 274. С. 45-62
© А.Н.Евдокимов, А.Юсуфзай, 2025

комплекса Лагман, с которыми связаны пегматитовые жилы. Они занимают около 70 % площади района. Вмещающие породы пегматитовых жил, темно-серые тонкослоистые кварц-хлорит-биотит-мусковитовые сланцы с гранатом и ставролитом, жилы редкометалльных пегматитов приурочены к системе трещин северо-восточного и субширотного простираний.

Месторождения Дигал и Гульсалак расположены в центральной части поля Дарай Печ, в 40 км западу от города Асад Абад провинции Кунар. Широко развиты мезо-кайнозойские интрузии, с которыми связаны сподуменовые жилы. Интрузивные породы занимают около 50 % площади района, выделяются раннемеловые габбро-монцонит-диориты комплекса Нилау и олигоценовые граниты комплекса Лагман. Интрузивные породы комплекса Нилау являются вмещающими для пегматитовых жил. На ближайшем расстоянии или в контакте с материнской породой находятся плагиоклаз-микроклиновые жилы. Гипсометрически выше них расположены альбитизированные микроклиновые пегматиты с крупнокристаллическим бериллом. Жилы сподуменовых пегматитов в пределах поля занимают наиболее высокое гипсометрическое положение по сравнению с пегматитами других типов. Форма пегматитовой жилы плитообразная. Внутреннее строение жил массивное и участково-зональное. Рельеф района скалистый, абсолютные высоты колеблются от 1500 до 2400 м.

Месторождение Цамгал расположено в области восточного экзоконтакта Алингарского гранитного массива, в центральной части провинции Нуристан, в 15 км к северу от города Парун. Рельеф площади поля сильно расчлененный, альпийского типа, абсолютные высоты колеблются от 2600 до 4400 м. Месторождение Цамгал является пластообразной сподуменовой жилой, вскрытой эрозией по падению на глубину больше 500 м. При этом сподумен-микроклин-альбитовый пегматит слагает нижнюю часть жилы. Выше по гипсометрическому уровню располагается более богатое литием сподумен-альбитовое месторождение Пасгушта.

Внутреннее строение и вертикальная зональность сподуменовых пегматитов. Кристаллы сподумена имеют длиннопризматические формы, нередко расположены перпендикулярно к контактам пегматитовых жил, иногда замещаются циматолитом и редко встречаются в кварц-сподуменовых псевдоморфозах по петалиту.

Пегматитовые тела региона образуют две группы по характеру и параметрам залегания жильных тел:

• крутопадающие жилы, залегающие в основном среди филлитовых сланцев, имеющие симметричную зональную структуру, в краевой зоне проявлены относительно мелкокристаллические минералы, а в ядре постепенно сменяются среднезернистыми и крупнозернистыми. Среднее содержание лития в сподумене центральной части кристалла значительно выше (42146 г/т), чем в краевых зонах (39640 г/т) (рис.2, *в*). Такие жилы редко встречаются среди интрузивных пород габбро-диоритов комплекса Нилау;

• пологопадающие жилы, которые имеют асимметрично зональную структуру, в лежачем боку залегают относительно мелкокристаллические, а в висячем они постепенно сменяются крупнозернистыми.

Среднее содержание лития увеличивается от лежачего фланга (39474 г/т) к висячему (46410 г/т) (рис.2, *б*). Основная масса пологозалегающих пегматитов располагается среди габбро-диоритов комплекса Нилау. Здесь известны месторождения самоцветов Дарай Печ и Нилау-Кулам. Вторая разновидность пегматитов редко встречается в гнейсах и очень редко в сланцах.

Одна из изученных сподуменовых жил вскрыта эрозией по простиранию на 500 м. Она сложена альбитом 37 %, кварцем 34 %, микроклином 15 %, сподуменом 12 %. Также встречаются (1-5 %) мусковит, турмалин, гранат, берилл, танталит-колумбит, касситерит и поллуцит. Средний размер кристаллов сподумена длиннопризматического облика варьирует от 5 до 30 см в длину. Цвет кристаллов разнообразный: белый, грязновато-серый, бело-розовый, фиолетовый и полихромный.

Крупнозернистый беловато-розовый сподумен встречается в блоковом микроклин-кварцевом ядре, а белый сподумен – преимущественно в висячем боку, в мусковит-клевеландитовых агрегатах. Вокруг гнезд слюды наблюдается концентрация мелких пластинок колумбита-танталита. В таких жилах сподумен ориентирован большей частью субперпендикулярно зальбандам жил, но в целом его ориентировка не строгая (рис.2, *а*).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© А.Н.Евдокимов, А.Юсуфзай, 2025

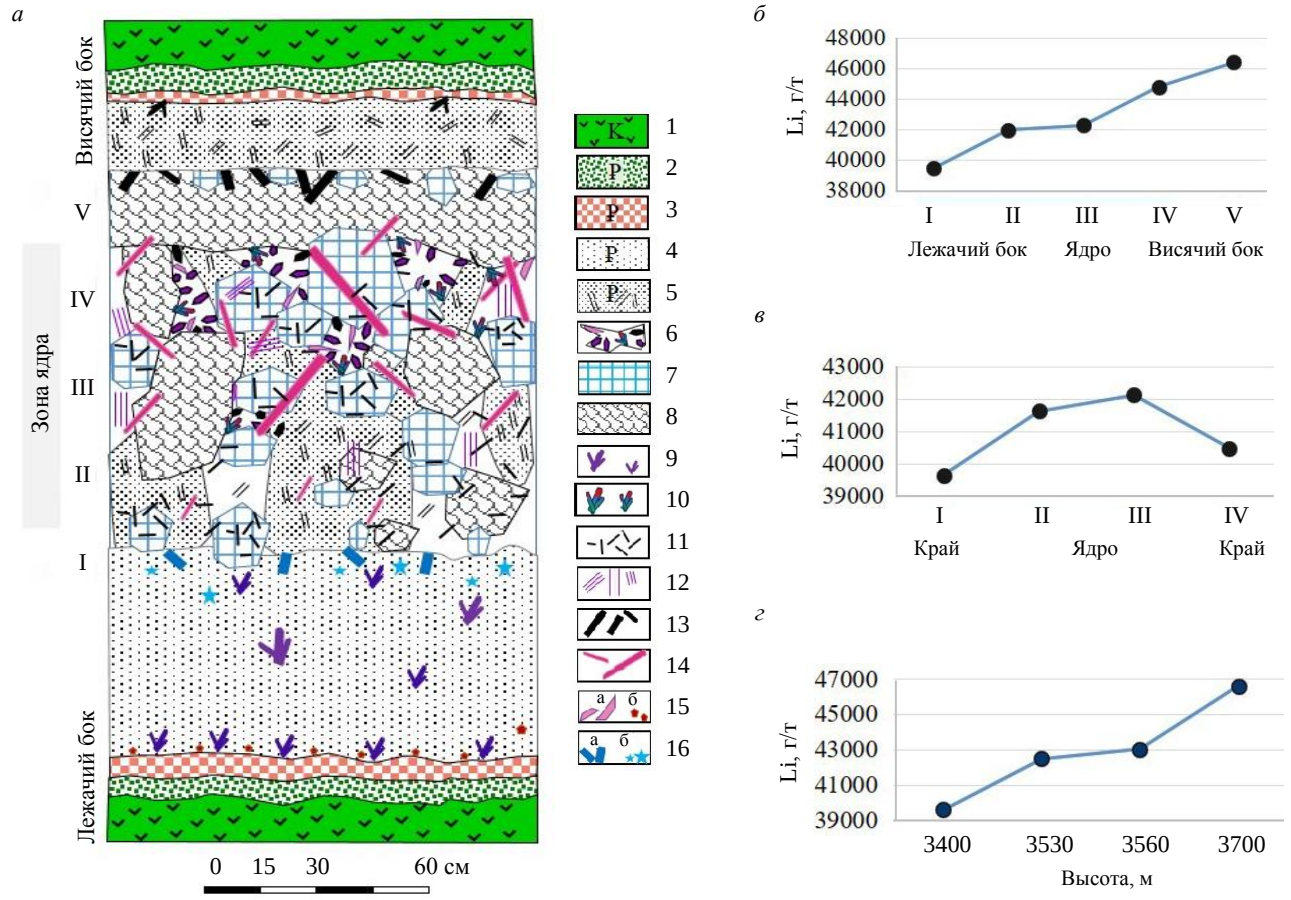


Рис.2. Внутреннее строение и текстурно-парагенетические типы пегматитовых жил сподумен-микроклин-альбитового пегматита (*а*) с белым и розовым сподуменом, кунцитом, лепидолитом и полихромным турмалином месторождения Дигал поля Дарай Печ (Восточный Афганистан) и диаграммы распределения средних содержаний лития в сподуменах из пологопадающей пегматитовой жилы (*б*) (номера зон соответствуют номерам зон в разрезе); из крутопадающей жилы ассиметричного строения, месторождение Колатан (*в*): I – край аплитовой зоны; II – центр блоковой зоны; III – кварцевое ядро; IV – край графической зоны; из залегающих жил на различных гипсометрических уровнях по мере удаления от гранитного массива, месторождение Цамгал (*г*)

1 – биотит-амфиболовые диориты, кварцевые диориты и габбродиориты вмещающих пород комплекса Нилау-Кулам; 2 – зона измененного диорита; 3 – зона аплита; 4 – зона среднезернистого, сахаровидного и мелкопластинчатого альбита с кварцем, мусковитом, шерлом, касситеритом, танталит-колумбитом, бериллом, амблигонитом, апатитом и гранатом; 5 – зона крупнозернистого мусковит-кварц-альбитового пегматита; 6 – пустоты и друзы с лепидолитом, горным хрусталем, кунцитом, эльбаитом, зеленым и полихромным турмалином; 7 – кристаллы блокового микроклина; 8 – блоковый кварц; 9 – шерл; 10 – эльбаит, зеленый и полихромный турмалин; 11 – клевеландит; 12 – лепидолит; 13 – белый и серовато-белый сподумен; 14 – бело-розовые крупные кристаллы сподумена, проросшие зеленым турмалином; 15 – ювелирный сподумен (кунцит) (а), гранат (б); 16 – берилл (а), апатит (б)

Содержание промышленно значимого для пегматитов Восточного Афганистана элемента – лития – в сподуменах распределяется неравномерно, наблюдается дифференциация в полого залегающих жилах в висячем и лежачем зальбандах (рис.2, *б*) – минимальная концентрация лития в лежачем фланге жилы и максимальное содержание в висячем. Такое распределение рудного компонента дает возможность селективной отработки богатой в отношении лития сподуменовой руды из верхних горизонтов пологопадающих пегматитов.

Методика и материалы исследования

Проанализировано четыре кристалла сподумена (Sp1, Sp2, Sp3 и Sp4) из месторождения Колатан; шесть кристаллов (Sp6, Sp7, Sp8, Sp10, Sp11 и Sp12) из месторождений Дигал и Гульсалак; четыре кристалла (Sp5, Sp13, Sp14 и Sp15) из месторождения Цамгал. В таблице, а также на рис.3, 4 отчетливо проявляется зональность распределения содержаний малых и редких элементов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© А.Н.Евдокимов, А.Юсуфзай, 2025

Редкоэлементный состав сподумена из месторождений Колатан, Дигал, Гульсалак и Цамгал редкометалльных пегматитов гранитоидного комплекса Лагман, г/т

Элемент	Колатан								Дигал, Гульсалак												Цамгал							
	Sp1-1	Sp1-2	Sp2-3	Sp2-4	Sp3-5	Sp3-6	Sp4-7	Sp4-8	Sp6-11	Sp6-12	Sp7-13	Sp7-14	Sp8-15	Sp8-16	Sp10-19	Sp10-20	Sp11-21	Sp11-22	Sp12-23	Sp12-24	Sp5-9	Sp5-10	Sp13-25	Sp13-26	Sp14-27	Sp14-28	Sp15-29	Sp15-30
	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1
Li	38941	42017	42063	41211	39003	40277	43962	40331	51040	41779	47557	42084	40529	38420	41595	42394	40754	43851	43432	36571	43221	42905	48099	45154	40514	44555	41935	37305
Na	950	912	985	977	639	706	1034	896	1542	1082	1328	842	559	450	857	824	1205	1281	378	707	884	762	1184	1324	729	945	969	828
Mn	634	650	1071	980	363	329	834	427	767	679	1278	870	331	189	790	424	2417	2877	103	234	468	226	379	358	319	285	664	588
Fe	134	152	472	444	507	821	279	79,8	948	961	1433	1233	1202	948	3219	2925	2415	2762	53,73	4,48	272	239	2412	1723	65,1	9,88	67,3	50,7
K	43,4	100	13,4	134	9,53	99,4	77,5	14,8	6,11	62,2	5,25	19,6	4,22	147	83,9	28,7	5,50	3,86	6,99	7,10	11,0	9,95	5,71	9,64	42,1	4,36	8,75	5,62
Ga	45,0	37,3	49,9	49,4	46,4	48,2	41,1	24,4	81,4	86,0	85,1	67,4	72,8	77,2	75,5	73,4	78,3	90,0	37,8	50,2	34,6	37,4	54,2	46,3	39,6	34,8	47,1	53,1
Ca	11,4	105	6,65	80,4	7,93	105	29,6	9,46	5,30	84,5	4,93	14,8	2,81	258*	27,1	3,99	6,75	3,38	3,82	14,9	5,50	4,96	5,89	7,95	6,24	1,39	5,16	3,20
Sn	13,2	10,6	44,4	39,8	21,2	25,4	107	7,80	325	251	76,2	65,1	5,52	21,5	30,2	17,2	223	270	6,12	11,7	20,3	10,2	12,2	62,6	373	381	40,0	34,5
B	7,69	9,96	7,99	6,51	5,08	57,3	10,1	9,46	12,6	21,8	10,3	6,76	1,69	6,77	18,3	20,3	3,18	3,89	1,72	7,0	10,5	18,2	2,30	3,09	35,4	26,3	14,7	12,5
Cr	5,62	2,83	3,22	6,58	2,75	6,25	5,34	6,57	5,74	5,62	4,48	4,46	3,19	5,48	9,17	4,11	5,57	3,0	12,3	15,1	11,1	12,1	8,54	9,78	8,42	5,32	9,3	5,52
Ti	9,25	10,4	15,9	17,1	6,42	9,52	48,4	2,27	8,04	10,1	7,91	7,82	8,38	11,2	7,74	5,38	63,2	79,5	1,30	1,69	6,06	3,57	38,1	34,0	7,69	7,83	2,20	2,07
Mg	1,13	155	2,50	136	1,20	89	3,38	1,78	4,93	136	0,80	2,95	0,29	276	96,2	0,65	2,87	2,68	0,26	0,89	0,98	0,70	5,05	4,28	1,25	0,65	0,44	0,31
Zn	1,56	5,43	6,07	9,39	1,82	8,37	7,15	1,13	15,7	11,7	13,2	10,6	3,09	5,17	9,41	2,17	33,4	38,4	0,81	0,37	9,94	5,28	9,93	20,6	4,99	4,50	4,13	0,52
Cu	0,75	5,15	1,52	4,50	2,58	6,88	2,83	2,04	3,18	4,57	3,79	4,28	3,24	9,04	11,60	6,88	4,34	3,98	2,39	0,94	3,10	2,59	4,20	4,76	3,01	1,22	0,65	1,31
Cs	2,79	2,37	0,29	3,54	0,38	0,89	1,33	0,09	0,20	1,48	0,07	0,15	b.d.l	3,57	8,75	1,62	0,16	0,10	b.d.l	b.d.l	0,26	1,34	0,04	0,03	2,44	0,72	0,25	0,05
Be	0,61	0,64	1,87	1,63	0,61	9,54	2,10	0,49	3,43	2,86	1,82	1,31	0,13	0,74	1,89	1,32	3,13	3,65	0,03	0,33	0,40	0,23	0,53	1,72	1,96	2,03	0,60	0,49
V	0,26	0,38	0,83	0,98	0,26	0,37	0,87	0,75	0,13	0,31	0,18	0,18	0,14	0,53	0,23	0,11	3,11	2,74	0,07	0,07	0,14	0,14	0,13	0,47	0,15	0,09	0,10	0,13
Rb	0,20	0,35	0,14	0,58	0,15	0,31	0,08	0,07	0,22	0,46	0,17	0,18	0,14	1,56	0,65	0,57	0,36	0,45	0,05	0,02	0,11	0,17	0,34	0,32	0,10	0,08	0,08	0,06
Ba	0,23	0,66	0,20	0,50	0,12	0,63	0,26	0,07	0,20	0,86	0,03	0,17	0,08	3,17	0,63	0,05	0,13	0,11	0,03	0,04	0,13	0,07	0,03	0,05	0,11	0,06	0,07	0,05
Ta	0,86	0,48	0,05	0,14	1,20	0,87	0,46	0,43	0,11	0,31	0,10	0,15	0,03	0,90	0,12	2,09	0,41	0,64	0,10	0,13	0,11	1,07	0,03	0,09	0,50	0,21	0,12	0,05
Nb	0,12	0,10	0,04	0,17	0,52	0,27	0,11	0,10	0,04	0,02	0,06	0,05	0,02	0,12	0,07	0,20	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,60	0,02	0,04	0,20	0,02	0,01	0,03
Sr	0,12	0,98	0,15	0,84	0,13	0,88	0,14	0,11	0,11	0,67	0,12	0,18	0,04	3,09	0,40	0,05	0,08	0,03	0,06	0,05	0,10	0,07	0,09	0,06	0,09	0,04	0,03	0,06
Zr	0,05	0,04	0,10	0,11	0,07	0,10	0,13	0,10	0,15	0,17	0,14	0,09	0,01	0,12	0,04	0,06	1,31	1,60	0,03	0,03	0,10	0,07	0,09	0,27	0,13	0,12	0,06	0,10
Fe/Mn	0,21	0,23	0,44	0,45	1,40	2,49	0,33	0,19	1,24	1,42	1,12	1,42	3,63	5,02	4,07	6,90	1,00	0,96	0,52	0,02	0,58	1,06	6,36	4,81	0,20	0,03	0,10	0,09

Примечания: 1 – краевая часть кристалла; 2 – центральная часть кристалла; b.d.l. – содержание не определено; звездочкой отмечено содержание Ca в кристалле с захваченным микровключением.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

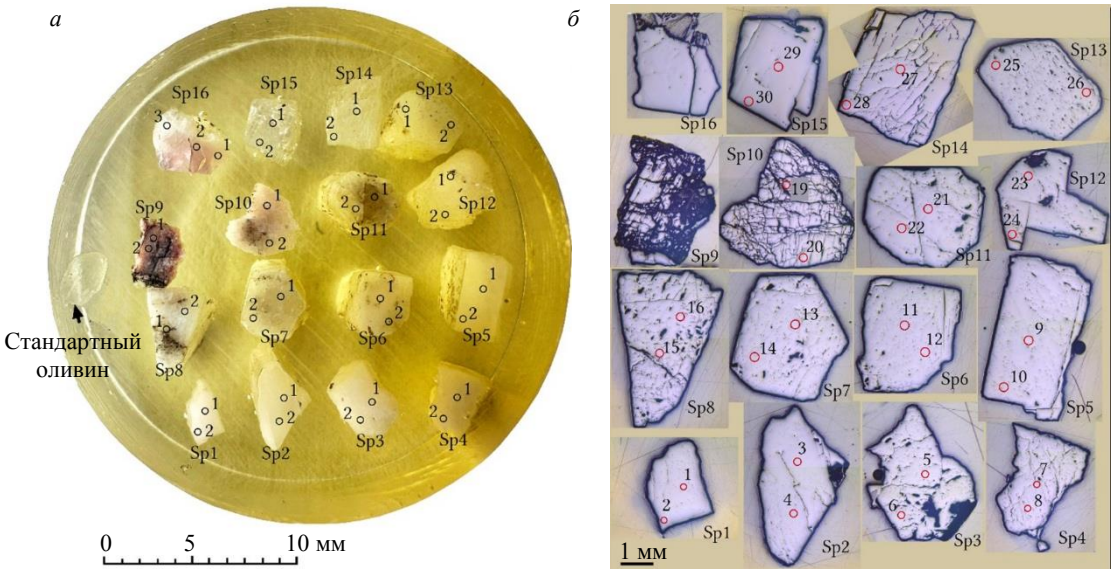


Рис.3. Макрофотографии (*а*) и микрофотографии в отраженном цвете (*б*) образцов сподумена из месторождений Колатан, Дарай Печ и Цамгал с указанием положения аналитических точек

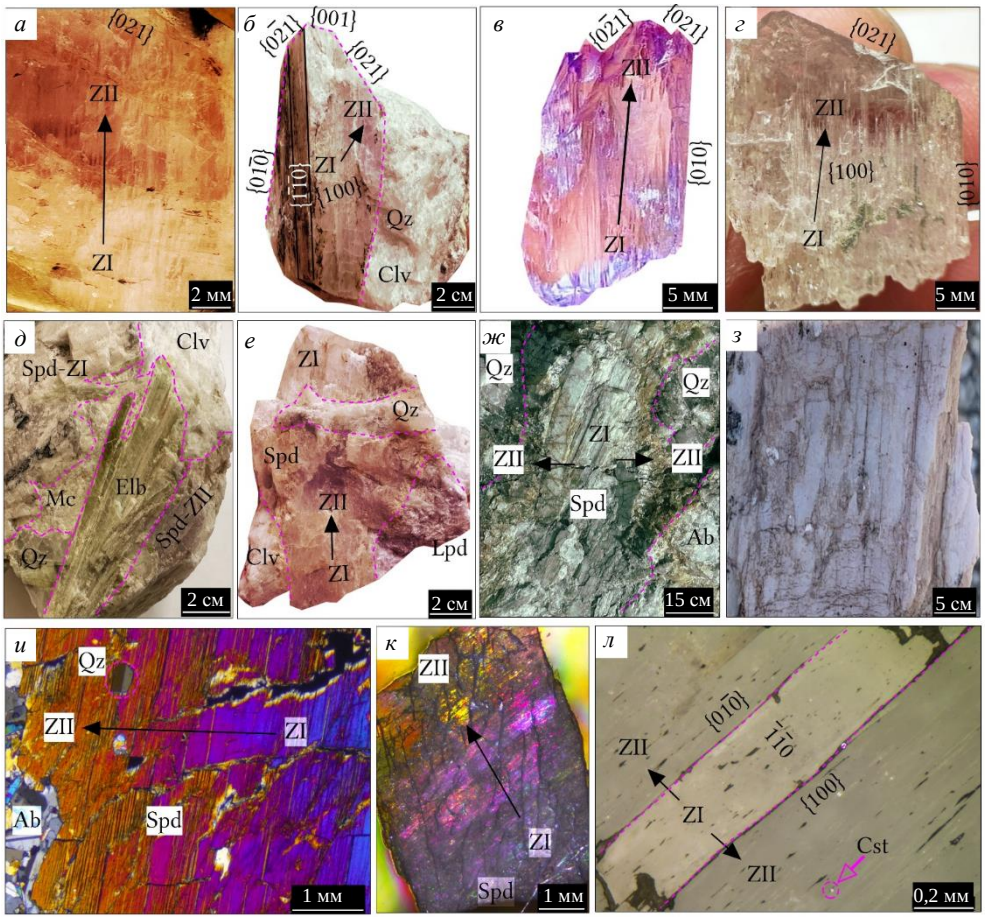


Рис.4. Структурно-текстурные особенности и зональность сподумена из месторождений Колатан (*б*, *д*, *е*, *к*), Дарай Печ (*а*, *в*, *и*, *л*) и Цамгал (*г*, *ж*, *з*) на макрофотографиях (*а-з*) и микрофотографиях (*и-л*). Постепенное изменение окраски сподумена от центра (ZI) к краю (ZII) кристалла: полихромные (от белого до фиолетового) со стеклянным блеском (*а*, *б*); розовато-фиолетовый с вертикальной штриховкой (*в*); бесцветный с вертикальной штриховкой (*г*); светло-серый (*д*); белый (*е*); грязновато-серо-зеленый (*ж*); розовато-белые призматические кристаллы сподумена в проходящем (*и*) и отраженном свете (*к*, *л*)

Ab – альбит; Clv – клевеландит; Cst – касситерит; Elb – эльбаит; Mc – микроклин; Qz – кварц; Spd – сподумен; Ta-Nb –танталит-колумбит; Lpd – лепидолит

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 274. С. 45-62
© А.Н.Евдокимов, А.Юсуфзай, 2025

Особенности строения кристаллов сподумена изучались с прменением микроскопа Leica DM 2500M в проходящем и отраженном свете [36-38]. Диагностика включений в сподумене выполнена с применением рамановской спектроскопии при помощи рамановского спектрометра Renishaw InVia [22, 39] в Санкт-Петербургском горном университете.

Содержания редких и малых элементов были определены методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) с использованием ионного зонда Cameca IMS-4f в Ярославском филиале Физико-технологического института им. К.А.Валиева РАН. Условия съемки: первичный пучок ионов $16O_2^-$, диаметр которого составляет примерно 20 мкм; ток ионов 5-7 нА; ускоряющее напряжение первичного пучка 15 кэВ. Каждое измерение состояло из трех циклов, что позволяло оценить индивидуальную погрешность измерения. Общее время анализа одной точки в среднем составляло 30-40 мин. Погрешность измерения редких элементов до 10 % для концентраций выше 1 ppm и до 20 % для диапазона концентраций 0,1-1 ppm; порог обнаружения для различных элементов варьирует в пределах 5-10 ppb. Методика измерения содержания малых и редких элементов подробно изложена в работах [40-42]. При изготовлении препарата кристаллы сподумена были разрезаны перпендикулярно граням призмы {001} и граням пинакоида, параллельно осям {100} и {010}. В задачи исследования входило изучение ростовой зональности и секториальности сподумена от центра к краю кристалла в плоскости, параллельной базопинакоиду. Фрагменты кристаллов сподумена были помещены в стандартные шайбы вместе с зернами оливина, необходимого для оценки фона при анализе содержания летучих компонентов.

Результаты

На основе геохимических, макро- и микроскопических исследований с учетом особенностей морфологии минералов и их приуроченности к определенным минеральным ассоциациям выделены три разновидности сподумена в изучаемом районе: непрозрачный сподумен ранней и поздней генерации – главный промышленный минерал литиевых руд в сподумен-микроклин-альбитовых и сподумен-альбитовых пегматитах, рудообразующий; мелкокристаллический игольчатый сподумен – главный породообразующий минерал афанитовых даек; прозрачный сподумен ювелирного качества в миароловых пустотах кварцевого ядра в сподумен-микроклин-альбитовых и сподумен-лепидолит-клевеландитовых пегматитах.

Размер кристаллов непрозрачного сподумена первой разновидности в длину колеблется от 5 до 25 см. Наиболее крупные кристаллы в центральных участках блоковых пегматитов достигают 1-1,5 м, иногда до 2 м в длину. Форма кристаллов призматическая, досковидная, пластинчатая, короткостолбчатая. Нередко встречаются головки кристаллов. Наиболее крупный досковидный кристалл размером 10×30×150 см найден в месторождении Колатан. Кварц-сподуменовые псевдоморфозы по петалиту обычно наблюдаются в парагенезисе с микроклином и мелкопластинчатым альбитом в ассоциациях, где кроме них присутствуют клевеландит, мусковит, цветной турмалин, минералы группы танталит – колумбит. Цвета кристалов – белый, розовый, фиолетовый, серый, грязно-зеленый, серо-зеленый. Преобладает длиннопризматический сподумен грязно-зеленого и зеленого цветов.

Агрегаты игольчатого сподумена под микроскопом обнаруживают метелковидную, войлокоподобную структуру и в виде сплошной массы замещают петалит, ранний сподумен, псевдоморфозы сподумена и кварца по петалиту и даже альбитовые агрегаты. Мелкокристаллический игольчатый сподумен был определен только при микроскопических исследованиях в шлифах. Он имеет ограниченное распространение в долинах Алингар, Дарай Печ и Парун, широко распространен в месторождении долины Алишанг. Размер кристаллов варьирует от 0,01 до 0,5 мм, форма изометричная и вытянутая, цвет белый с зеленоватым оттенком.

Ювелирный сподумен в исследуемом районе представлен различными по свойствам и составам разновидностями: кунцит – от розового до фиолетового цветов, зеленый гидденит и трифан – от бесцветного до желтого, отличающимися сильным плеохроизмом [14, 43, 44].

Кунцит встречается главным образом в жилах альбит-сподумен-микроклиновых пегматитов в парагенезисе с лепидолитом, голубым клевеландитом, горным хрусталем, воробьевитом, полихромным турмалином, иногда с поллуцитом (рис.4). Кристаллы тонкопластинчатой, досковидной,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

толстотаблитчатой и призматической форм. Часто встречаются головки кристаллов, у большинства кристаллов хорошо развита вертикальная штриховка (рис.4, *в*, *г*). Прозрачный и фиолетовой кунцит имеет Ng 1,675, Nm 1,662, Np 1,658 и Ng-Np 0,017, +2V 56°. Размер кристаллов изменяется от 3×8×12 мм до 2,5×12×25 см, реже – более крупные. Цвет ювелирных сподуменов разнообразен: бесцветный, розово- и красновато-фиолетовый, малиновый, зеленый, синевато- и голубовато-зеленый, желтый и голубой. Иногда в одном кристалле можно увидеть сочетание нескольких окрасок.

Сподумен из месторождения Колатан. В месторождении Колатан сподумен (Sp1, Sp2, Sp3, Sp4) встречается в сподумен-микроклин-альбитовых и сподумен-лепидолит-клевеландитовых жилах с поллуцитом, амблигонитом, танталит-колумбитом (минералами Ta и Nb), касситеритом и полихромным турмалином. Он широко распространен в кварц-сподуменовых зонах. Содержание сподумена в жилах варьирует от 15 до 30 %. Сподумен длиннопризматический и пластинчатый, белый, серовато-белый и бело-розовый, фиолетовый и полихромный. Длина кристаллов в среднем составляет от 10-30 до 15-70 см, иногда досковидные кристаллы сподумена достигают 130-150 см.

Результаты анализов показали, что составы сподуменов резко меняются – увеличиваются от центра к периферии кристаллов, как по макро-, так и по микроэлементам (Li, Na, Mn, Ga, Sn, Ti, Zn) и уменьшаются от центра к краю кристаллов (Fe, K, Ca, B, Cr, Mg, Cu, Cs, Be). Наиболее значительные диапазоны изменений содержаний отмечаются для Li (38941-43962), Na (639-1034), Mn (329-1071), Fe (79,8-821), K (9,53-134), Ga (24,4-49,9), Ca (6,65-105), Sn (7,8-106), Mg (1,13-155,4), B (5,08-57,3), Ti (2,27-48,4) ppm. Более низкие вариации содержаний имеют Cr (2,75-6,58), Zn (1,13-9,39), Cu (0,75-6,88), Cs (0,09-3,54), Be (0,49-9,54), Ta (0,05-1,2), Sr (0,11-0,98) ppm. Концентрации V, Rb, Ba, Nb, Zr составляют менее 0,5 ppm.

Сподумен из месторождений Дигал и Гульсалак. Образцы сподумена Sp6 и Sp7 собраны из месторождения Гульсалак, координаты центра участка: 34°57'56" с.ш. 70° 44' 16" в.д. Кристаллы сподумена Sp8, Sp10, Sp11, Sp12 собраны из месторождения Дигал, координаты центра участка: 34°57'04" с.ш. 70°43'19" в.д.

Анализ распределения макро- и микроэлементов показывает, что в сподумене месторождений Дигал и Гульсалак их содержания в краевых зонах и центре кристаллов носят контрастный характер так же, как и в месторождении Колатан: наиболее высокие значения колебаний увеличиваются от центра к краю кристаллов (Li, Na, Fe, Mn, Ga, Sn, Ti, Zn, Be) и уменьшаются от центра к краю (K, Ca, B, Cr, Mg, Cu, Cs) – характерны для Li (36571-51039), Na (378-1542), Mn (103-2877), Fe (53,7-3219), K (3,86-146), Ga (37,8-90,0), Ca (2,81-257), Sn (5,52-325), Mg (0,26-275), B (1,69-21,8), Ti (1,3-79,5) ppm. Более низкие изменения содержаний имеют Cr (3,0-15,0), Zn (0,37-38,43), Cu (0,94-11,6), Cs (0,01-8,75), Be (0,03-3,65), Ta (0,03-2,09), V (0,07-3,11), Sr (0,03-3,09), Rb (0,02-1,56), Ba (0,03-3,17), Zr (0,011,60) ppm. Содержание Nb составляет менее 1 ppm.

Количество V колеблется от 0,07 до 0,98 г/т во всех сподуменах, кроме Sp11, где оно значительно увеличивается до 2,73-3,1 г/т. Кроме того, содержание Zr и Mg заметно выше – Zr 1,3-1,6, Mg 2417-2876 г/т. В остальных сподуменах наблюдаются низкие содержания Zr 0,01-0,27, Mg 103-1278 г/т. В краевой части образца Sp8 содержания Sr 0,04, Ba 0,08, Rb 0,14, Mg 0,29 и K 4,22 г/т заметно ниже, чем в центральной части SP8: Sr 3,09, Ba 3,17, Rb 1,56, Mg 276 и K 147 г/т. В остальных образцах содержания данных элементов изменяются в диапазонах: Sr 0,03-0,88, Ba 0,03-0,65, Rb 0,02-0,65, Mg 0,16-26, Ca 1,05-1,38, K 3,85-134 г/т.

Сподумен из месторождения Цамгал. Пегматитовые тела, из которых собраны образцы кристаллов сподумена, имеют следующие координаты: Sp5 – 35°15'31 с.ш. 70°55'28.4" в.д.; Sp12, Sp13, Sp14, Sp15 – 35° 17' 25" с.ш. 70° 59' 46" в.д. Сподумен из месторождения Цамгал зеленовато-серого, серовато-зеленого, грязно-зеленого цветов. Облик кристаллов длиннопризматический. Длина кристаллов в среднем варьирует от 5 до 25 см. Сподумен встречается в парагенезисе с микроклином в альбитизированных участках пегматитовых жил. Содержание сподумена в жиле 10-30 %. Кристаллы сподумена четко ориентированы перпендикулярно контактам жил.

Определения макро- и микроэлементного составов сподуменов в разных точках опробования показало сходную с аналогичными месторождениями картину. Наиболее высокие колебания содержаний – увеличение от центра к краю кристаллов (Li, Na, Fe, Mn, Mg, Ga, Ti) и уменьшение от центра к краю (K, Ca, B, Cr, Cu, Sn, Zn, Be) – отмечаются для Li (37304-48098), Na (729-1324),

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 274. С. 45-62
© А.Н.Евдокимов, А.Юсуфзай, 2025

Mn (226-664), Fe (9,88-2412), K (4,36-42,1), Ga (34,5-54,1), Ca (1,39-7,95), Sn (10,1-381), Mg (0,31-5,05), B (2,30-35,4), Ti (2,07-38,1) ppm. Относительно низкие вариации содержаний имеют Cr (5,32-12,1), Zn (0,52-20,8), Cu (0,65-4,76), Cs (0,03-2,44), Be (0,23-2,03), Ta (0,03-1,07) ppm. Содержания Sr, V, Rb, Ba, Nb, Zr составляют менее 1 ppm.

Обсуждение результатов

На корреляционных диаграммах (рис.5) показаны соотношения содержаний Li и редких элементов в сподуменах. Содержания лития в сподуменах обнаруживают положительную корреляцию с Na, Mn, Fe, Ga, Sn, B, Ti, Zn, Cu, Be и отрицательную – с K, Cs, Ta, Nb, Cr. По сравнению со всеми остальными элементами натрий имеет сильную положительную корреляцию с содержанием лития в сподумене, в то время как остальные элементы такой зависимости не имеют, либо она очень слабая.

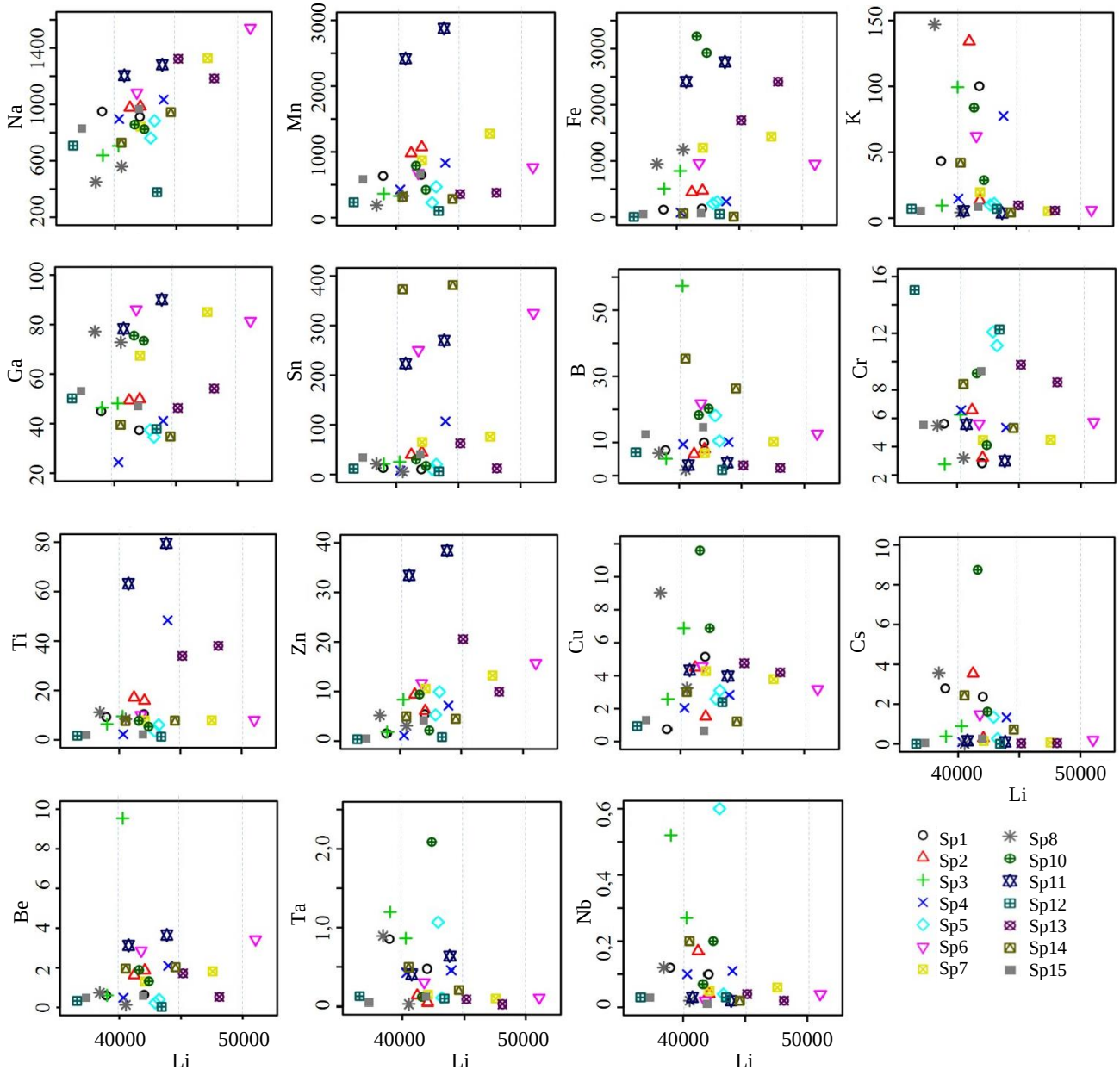


Рис.5. Корреляционные диаграммы соотношения содержания малых и редких элементов и Li в сподуменах месторождений Колатан (Sp1, Sp2, Sp3 и Sp4), Дарай Печ (Sp6, Sp7, Sp8, Sp10, Sp11 и Sp12) и Цамгал (Sp5, Sp13, Sp14 и Sp15) зоны Нуристан, г/т

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Кристаллы сподумена в пегматитах Восточного Афганистана имеют различную окраску, иногда отчетливо зональную. Это связано с изменением количества примесей в разных зонах кристаллов. В изученных образцах сподумена, отобранного в районе Дарай Печ, распределение магния выглядит контрастно: количество Mg в краевой части составляет 0,25-4,93 г/т, в центре кристалла увеличиваясь до 276 г/т. В сподумене месторождения Колатан заметного изменения от краевых частей к центру не происходит: 1,2-155 г/т в краевой части и 1,13-137 г/т в центральной части. Так же и в зернах месторождения Цамгал – в краевой зоне зерна сподумена 0,31-5 г/т, в центральной 0,44-4,28 г/т. Здесь же наблюдается отрицательная корреляция между Na и Mg и резко положительная между Mg и Ca, что объясняется изоморфизмом указанных элементов.

Содержание Ga в сподумене из месторождения Колатан варьирует в пределах 24-49 г/т, в среднем 43 г/т; Дарай Печ – от 39-90 г/т, в среднем 73 г/т; Цамгал – 35-54 г/т, в среднем 43 г/т. Ga – единственный редкий элемент в сподумене, который не демонстрирует относительно стабильные содержания в краевых центральных зонах кристаллов. Содержание Ga в сподумене из микроклин-сподумен-альбитовых жил месторождения Дарай Печ заметно выше по сравнению со сподуменами из лепидолит-клевеландит-сподуменовых жил месторождений Колатан и Цамгал (рис.6).

Для сподуменов из литиевых пегматитов Афганистана зональность, обусловленная изменением количества примесей малых и редких элементов, весьма характерна по сравнению со сподуменами других стран. Это роднит афганские сподумены с минералами китайских месторождений. Например, распределение переходных элементов в сподумене из месторождения Лхожаг (Китай) показывает аналогичную изменчивость в содержании Sn, Mg, Fe и Ti [29, 45, 46]. Напротив, в сподуменах из Колмозерского месторождения России зональность не проявлена [45].

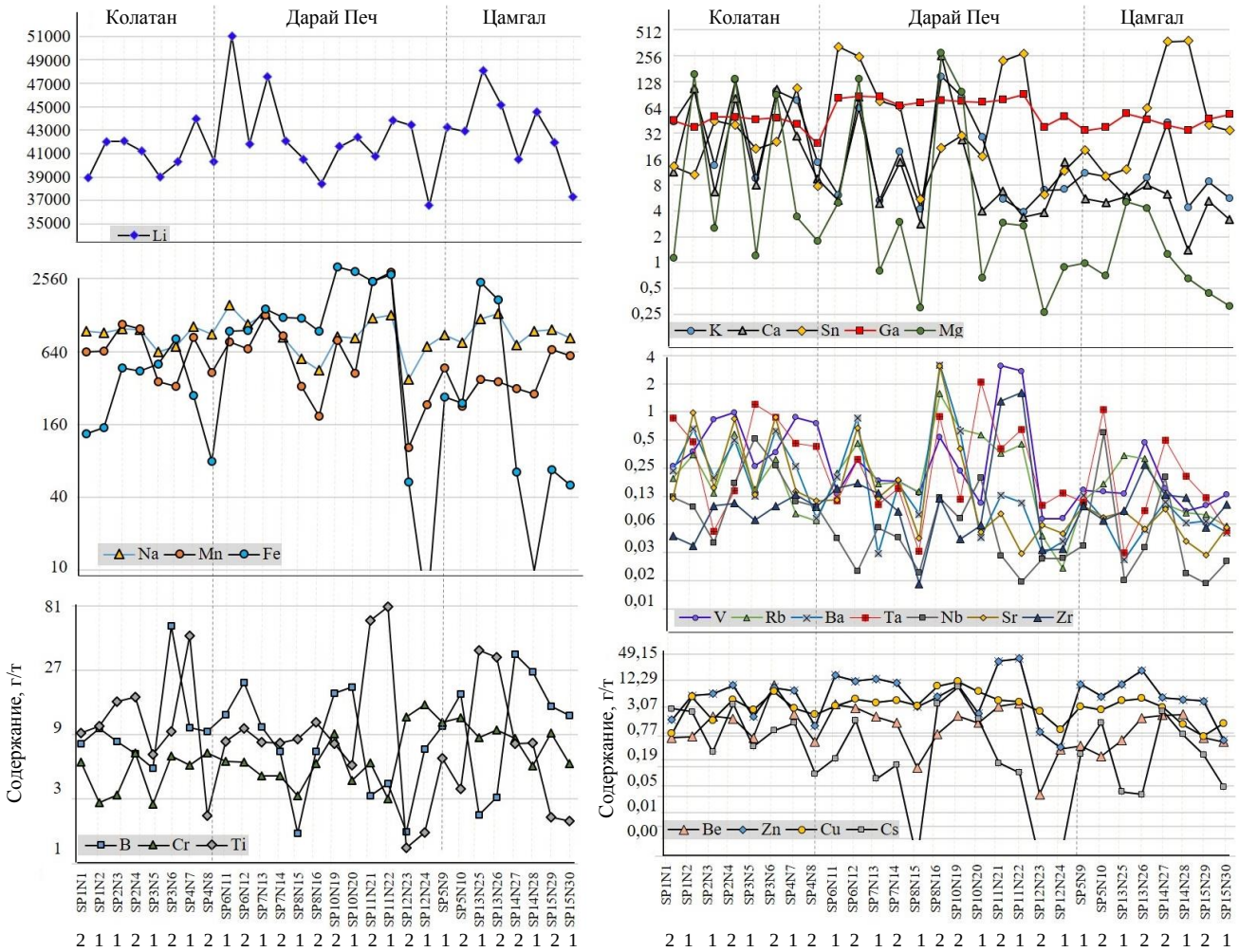


Рис.6. Распределение лития, малых и редких элементов в краевой (1) и центральной (2) частях, кристаллов сподумена с указанием положения аналитических точек

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 274. С. 45-62
© А.Н.Евдокимов, А.Юсуфзай, 2025

Количество Mn в сподуменах изучаемых объектов значительно выше, чем в сподуменовых месторождениях России, Казахстана и других стран. Напротив, количество Fe в сподумене Колмозерского месторождения выше, чем в сподуменах Афганистана. Корреляция Fe/Mg сподумена Колмозерского месторождения соответствует зеленовато-серому сподумену из месторождения Цамгал. Корреляционные связи Sn соответствуют таковым розового сподумена месторождения Колатан и серого сподумена месторождения Дарай Печ.

Сподумен имеет два неэквивалентных катиона металла M1 и M2 в одной кристаллографической плоскости [23]. Al и Li могут быть замещены ионами переходных Mn, Fe, Cr металлов в различных соотношениях, поэтому окраски сподумена, связанные с примесями, могут быть весьма разнообразными (рис.4, 7) [14]. Mn^{2+} находится в основном в участках, обогащенных литием, а не алюминием, и дает широкую эмиссию с центром при 600 нм [23]. В кристаллах, богатых Cr, наблюдается только одна линия R1, а эмиссия Cr^{3+} заметна при комнатной температуре.

Некоторые исследователи [42] предполагают, что Mn^{3+} занимает позицию M2 моноклинной симметрии, тогда как другие [44] предполагают, что он может занимать позицию M1, если введен в решетку сподумена во время роста кристаллов.

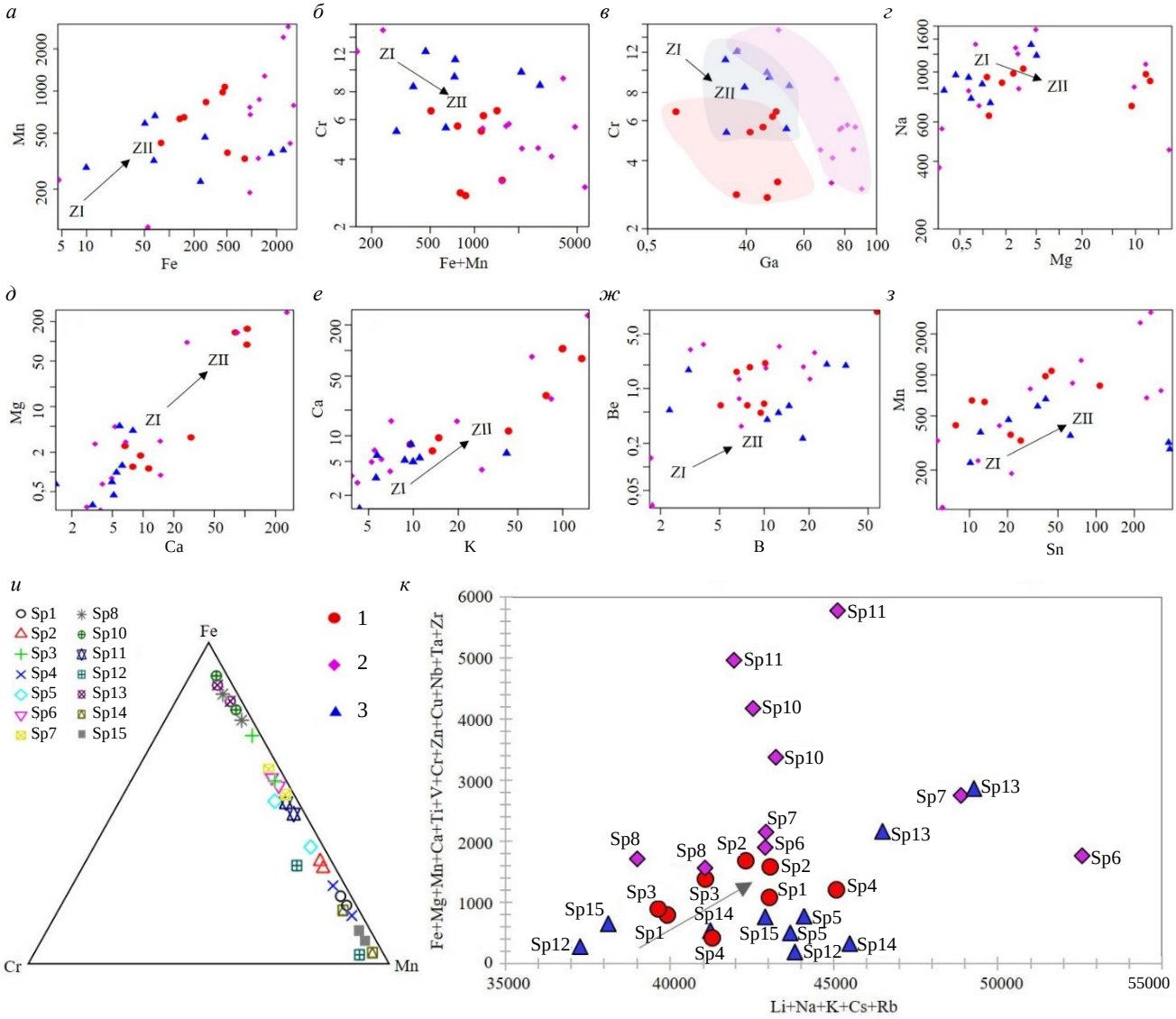


Рис.7. Соотношения малых и редких элементов, щелочных и переходных элементов сподумена на бинарных и тройных диаграммах, г/т: Mn/Fe (*а*), Cr/Fe+Mn (*б*), Cr/Ga (*в*), Na/Mg (*г*), Mg/Ca (*д*), Ca/K (*е*), Be/B (*ж*), Mn/Sn (*з*) и Fe/Cr/Mn (*и*) в центре (ZI) и краевой зоне (ZII) кристаллов сподумена из месторождений Колатан (1), Дарай Печ (2) и Цамгал (3); соотношение щелочных и переходных элементов (*к*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

По данным [14], на основе изучения химического состава и оптических свойств можно говорить о двух разновидностях ювелирных сподуменов: хромовом сподумене зеленого цвета (характерен для месторождений Северной Каролины, США) и сподумене, не содержащем хром (бесцветном, желтом, розовом, фиолетовом или зеленом – природном или синтетическом). Исследования показывают, что основными хромофорами сподумена являются Mn, Fe, Cr, V и иногда Co [23, 42, 47]. На рис.7 рассмотрены связи Fe–Mn–Cr, Cr–Cu–Fe/Mn, Ti и Ga сподумена месторождений Колатан, Дарай Печ и Цамгал.

Среднее содержание Fe в сподумене месторождения Колатан составляет 361 г/т, Дарай Печ – 1805 г/т; Цамгал – 605 г/т. Распределение Fe в краевой зоне изменяется не так резко по сравнению с Mn. Корреляция между Mn/Fe положительная (рис.7, *а*). Более светлые зоны по сравнению с темными характеризуются более высокой величиной отношения Fe/Mn – 0,03-6,9 г/т. Отмечается также положительная корреляция между Mn и Sn (рис.7, *з*). В розовато-фиолетовых зонах кристалла содержание Mn значительно выше, чем содержание Fe.

Сиреневый цвет сподумена проявляется при более высоком отношении Mn/Fe – от 1 г/т [23, 48]. В таком случае сподумен (кунцит) приобретает розовато-сиреневый оттенок, имеющий более высокую ювелирную ценность. Отношение Mn/Fe в сподуменах месторождения Колатан колеблется от 2,2-5,35 г/т, кроме Sp3 – 0,4-0,72 г/т. Значения отношений Mn/Fe в сподуменах Дарай Печ (Sp6, Sp7, Sp8 и Sp10) колеблются от 0,14 до 0,89 г/т, в Sp11 – 1,0-1,04 г/т, а в Sp12 значительно увеличивается до 1,92-52,3 г/т. Этот кристалл обладает резко зональной окраской от белой до розовато-фиолетовой. Отношение Mn/Fe в сподуменах Цамгала разнообразное: в Sp5 – 0,95-1,72, Sp13 – 0,16-0,21, Sp14 – 4,9-28,8, Sp15 – 9,88-11,6 г/т.

Среднее содержание Cr в сподуменах месторождения Колатан составляет 4,9 г/т, Дарай Печ – 6,5 г/т, Цамгал – 8,8 г/т (грязновато-зеленый) (см. рис.4, *ж*). Корреляции между Cr/Fe, Cr/Mn и Cr/Ga отрицательные (рис.7, *б*, *в*). В целом сподумен обеднен хромом (рис.7, *и*), а изменение окраски связано с изменениями содержаний, главным образом марганца и железа. Корреляции между Ca/K, Be/B Mn/Fe, Mn/Sn и Mg/Ca положительные (рис.7).

Содержание Ta во всех сподуменах колеблется 0,05-1,2 г/т, в краевой части Sp2 увеличивается до 2 г/т. Высокое содержание Be в центральной части Sp3 составляет 9,54 г/т и снижается к краевой части до 0,61 г/т. В остальных образцах сподуменов содержания Be в краевой части составляет от 0,13-3,65 г/т и 0,03-3,13 г/т – в центральной.

В распределении содержаний Mn, Sn, Ti устанавливается тенденция значительного повышения от центральной к краевой части кристаллов. Напротив, содержания Cr, Fe, Mg, K, Ca, Cu, B от центральной к краевой части кристаллов значительно снижаются.

В сподуменах месторождения Колатан наблюдается отчетливое резкое увеличение содержания Mn (в среднем 729 г/т в краевой части (ZII) и 593 г/т в центральной (ZI), Fe (352 и 370 г/т), Cr (3,53 и 6,25 г/т), K (50,1 и 72,9 г/т), Sn (45,7 и 21,5 г/т), Ca (37,4 и 51,4 г/т), Ti (20,2 и 9,54 г/т), Mg (40,6 и 57,1 г/т), B (8,29 и 20,2 г/т), Ga (43,7 и 41,7 г/т) и Be (1,3 и 3,07 г/т). Наиболее контрастно смена характера распределения проявлена по содержаниям: Mn, Fe, Cr, K, Sn, Ca, Ti, Mg, B и Be на условной границе двух простых форм (пинакоида в центральной части сечения, перпендикулярного оси удлинения кристалла, и призмы – в краевой части).

В сподуменах месторождения Дарай Печ (Дигал и Гульсалак) наблюдается отчетливое резкое увеличение содержаний: Mn (в среднем 985 г/т для краевой части (ZII) и 841 г/т для центральной части (ZII)), Fe (1546 и 1472 г/т соответственно), Cr (5,93 и 7,09 г/т), K (9,21 и 54,1 г/т), Na (1040 и 802 г/т), Sn (117 и 99 г/т), Ca (5,88 и 65,8 г/т), Ti (18,5 и 16,9 г/т), Mg (1,71 и 85,7 г/т), Ga (75,5 и 70,4 г/т), Cs (0,33 и 2,35 г/т) и Cu (3,67 и 6,04 г/т). На условной границе пинакоида (в центре) и призмы (в краевой части) заметно изменяются содержания Mn, Fe, Cr, K, Na, Sn, Ca, Ti, Mg, Ga, Cs и Cu.

В кристаллах сподумена из месторождения Цамгал наблюдается резкое увеличение содержаний от края к центру таких элементов: Mn (в среднем от 392 до 430 г/т), Fe (от 524 до 686 г/т), Cr (от 7,63 до 9,9 г/т), K (от 6,68 до 17,6 г/т), Sn (от 112 до 121 г/т), Ca (от 3,99 до 6,08 г/т), Ti (от 11,9 до 13,5 г/т), Ga (от 42,6 до 44,1 г/т), B (от 12,9 до 17,9 г/т) и Zn (от 6,22 до 8,74 г/т). Наиболее контрастно смена характера распределения проявлена по Mn, Fe, Cr, K, Sn, Ca, Ti, Ga, B, Cs и Zn.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 274. С. 45-62
© А.Н.Евдокимов, А.Юсуфзай, 2025

Содержания щелочных элементов (Li, Cs, K, Rb, Na) в сподумене месторождения Колатан составляют 39652-45075 г/т, в среднем 41926 г/т; месторождения Дарай Печ – 37286-52289 г/т, в среднем 43455 г/т; месторождения Цамгал – 38139-49289 г/т, в среднем 43927 г/т. Содержания переходных элементов (Fe, Mg, Mn, Ca, Ti, V, Cr, Zn, Cu, Nb, Ta, Zr) в сподумене месторождения Колатан – от 531 до 1681 г/т, в среднем 1145 г/т; в сподумене месторождения Дарай Печ – от 177 до 5775 г/т, в среднем 2544 г/т; в сподумене месторождения Цамгал – от 316 до 2863 г/т, в среднем 1055 г/т (рис.7, *к*).

Диаграмма бинарной корреляции между щелочным и переходными элементами показывает положительную корреляционную тенденцию в сподумене от серовато-белого центра к розово-фиолетовому краю (рис.7).

Следует отметить, что положительная зависимость между щелочными и переходными элементами в сподумене коррелируется с величиной расстояния от материнской интрузии (рис.7, *к*). Очевидно, следствием движения расплава снизу вверх по разрезу явилась дифференциация и фракционирование флюида по мере его удаления от материнской интрузии. Зональность отчетливо проявлена и внутри пегматитовых жил. Так, сподумены, в которых отмечены низкие содержания щелочных и переходных элементов, встречаются в лежачем боку, крупные кристаллы прозрачного розовато-фиолетового цвета с высокими содержаниями щелочных и переходных элементов – в кварцевом ядре и в миароловых пустотах (см. рис.2, 4).

Распределение лития в крутопадающих телах отличается повышенной концентрацией в сподуменах центральной зоны, в отличие от зальбандов (см. рис.2, *в*). Эта закономерность также может быть использована при освоении литиевых пегматитов региона [49]. Здесь селективная отработка богатых рудных залежей будет ориентирована на субвертикальные зоны центральных частей пегматитовых жил.

Важным является закономерное размещение богатых литием сподуменов в гипсометрической последовательности возрастания высот (см. рис.2, *г*), на которых залегают сподуменовые пегматиты. Концентрация его в наиболее удаленных от гранитной интрузии телах обусловлена высокой миграционной способностью лития.

Внутреннее строение пегматитовых тел определяется условиями их формирования, характером залегания и типом пегматита. Образование крупных, хорошо минерализованных пустот с разноцветным ювелирным сподуменом происходило в альбит-микроклиновых и альбитовых жилах, залегающих только среди габбро-диоритов комплекса Нилау. Богатые ювелирными разновидностями минерала пегматиты встречаются в месторождениях Дарай Печ и Нилау-Кулам (см. рис.2).

Заключение

При изучении сподуменов из месторождений Колатан, Дарай Печ и Цамгал была выявлена внутрифазовая неоднородность, проявленная в зональной окраске как прозрачных, так и непрозрачных кристаллов, которая связана с изменением содержаний редких элементов. Было установлено, что светлоокрашенные зоны характеризуются более высоким отношением Fe/Mn, чем ярко-окрашенные (0,03 и 6,9 г/т соответственно).

Содержание Sn в сподуменах, отобранных на большом удалении от материнских пород, значительно выше по сравнению с расположенными вблизи. Например, среднее содержание Sn в сподуменах месторождения Колатан составляет 33,6 г/т, тогда как в сподуменах месторождений Дигал, Гульсалак и Цамгал 117-128 г/т. Следует отметить положительную корреляцию между Sn и Na. Для зонального сподумена из месторождений Колатан, Дарай Печ и Цамгал установлены положительные корреляция Na, Ti, V, Cr, Mn, Sn, Ga и Zn. Рост содержаний этих элементов отмечен в прозрачных розовато-фиолетовых кристаллах сподумена, т.е. благодаря увеличению содержаний малых и редких элементов минерал приобретает свойства ювелирного камня. Во всех анализируемых сподуменах повышение содержаний марганца приводит к улучшению ювелирных качеств – появлению розовато-фиолетовой окраски и повышению прозрачности. В зоне серовато-белой окраски, а также в центре кристаллов содержание Fe выше, чем содержание Mn. В изученных кристаллах сподумена прозрачность и насыщенность окраски увеличиваются от центра к краю, окраска – от серовато-белой до розовато-фиолетовой. Отмечено изменение интенсивности окраски в зависимости от кристаллографических направлений, при этом наиболее глубокие цвета наблюдаются вдоль оси удлинения, где повышаются содержания редких элементов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Сингенетическая внутрифазовая неоднородность сподумена из трех изученных месторождений является результатом изменения физико-химических условий минералообразования в процессе эволюции пегматитового процесса и обусловлена изоморфным замещением Li и Al такими элементами-примесями, как Fe, Mn, Cr и др.

Непрозрачный белый сподумен имеет преимущественное распространение в висячем боку, а крупнозернистый светло-розовый и розовато-фиолетовый встречается в блоковой зоне и в кварцевом ядре.

Мелкокристаллический игольчатый сподумен в афанитовой дайке образуется в агрегатах мелкопластинчатого сахаровидного альбита в результате растворения раннего сподумена в процессе альбитизации и переотложения лития.

Среди редких элементов содержание Ga в сподуменах в микроклин-сподумен-альбитовых жилах месторождения Дарай Печ стабильно выше, чем в сподуменах из лепидолит-клевеландит-сподуменовых жил месторождений Колатан и Цамгал. Это связано с различием в составах вмещающих пород на этих месторождениях. Пегматитовые жилы месторождений Колатан и Цамгал находятся среди слабометаморфизованных филлитовидных сланцев. Пегматитовые жилы на месторождении Дарай Печ залегают среди гранодиоритов. Прозрачные сподумены ювелирного качества, в которых отмечаются высокие содержания галлия, находятся в пегматитовых телах, залегающих среди биотит-амфиболовых диоритов и габбро-диоритов комплекса Нилау, месторождений Дарай Печ и Нилау-Кулам. Они кристаллизовались в относительно спокойной тектонически стабильной обстановке.

В общем случае пегматитовые тела, залегающие в массивах габбро-диоритов комплекса Нилау, имеют по сравнению с телами пегматитов из филлитовидных сланцев при прочих равных условиях (степень минерализации расплавов и характер залегания пегматитовых жил) более отчетливую зональность и больший размер зерен и блоков отдельных минералов, что связано с морфологией пегматитовых тел и более стабильными условиями кристаллизации пегматитовых расплавов.

Наблюдается отчетливая дифференциация содержаний лития в пегматитах, залегающих на разных гипсометрических уровнях и в различной степени удаления от гранитоидного массива. Наиболее удаленные и вышезалегающие из них содержат сподумены с максимальными концентрациями лития, что, возможно, обусловлено его повышенной миграционной способностью в остаточном пегматитовом расплаве.

Геохимические критерии разделения магматического и гидротермального сподумена основываются на анализе однородности и неоднородности составов в различных зонах кристаллов сподумена. В центральной части всех анализируемых образцов наблюдается в сравнении с периферическими зонами однородный состав, образованный исходным стабильным по составу расплавом. Сподуменовый пегматитобразующий расплав образовался в результате многостадийной фракционной кристаллизации литийсодержащей лейкогранитной магмы фазы III комплекса Лагман. Отчетливая зональность кристаллов сподумена связана с изменениями состава флюида во время роста кристаллов при магматическом фракционировании и переходе к гидротермальному этапу. Периферические зоны кристаллов обозначены разными отдельными зонами роста, обусловленных сменой флюидов, подвижность которых предполагает изменчивость их составов.

Авторы глубоко признательны за помощь в выполнении аналитических работ методом SIMS и редактирование рукописи профессорам С.Г.Скублову, А.В.Козлову и доценту Н.И.Воронцовой и выражают огромную благодарность профессорам А.М.Мусазай, Н.Сахак, Х.Ваизи и А.Б.Канет за помощь и руководство в проведении полевых работ и отбор проб на территории месторождения Дарай Печ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Криволапова О.Н., Фуреев И.Л.* Применение микроволнового излучения для декрипитации сподумена Колмозерского месторождения // Известия вузов. Цветная металлургия. 2023. Т. 29. № 6. С. 5-12. DOI: 10.17073/0021-3438-2023-6-5-12

2. *Gabriel A., Slavin M., Carl H.F.* Minor constituents in spodumene // Economic Geology. 1942. Vol. 37. Iss. 2. P. 116-125. DOI: 10.2113/gsecongeo.37.2.116

3. *Bibienne T., Magnan J.-F., Rupp A., Laroche N.* From Mine to Mind and Mobiles: Society's Increasing Dependence on Lithium // Elements. 2020. Vol. 16. № 4. P. 265-270. DOI: 10.2138/gselements.16.4.265

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

4. *Resentera A.C., Rosales G.D., Esquivel M.R., Rodriguez M.H.* Thermal and structural analysis of the reaction pathways of α-spodumene with NH_4HF_2 // Thermochimica Acta. 2020. Vol. 689. № 178609. DOI: 10.1016/j.tca.2020.178609

5. *Singh Y.* Lithium Potential of the Indian Granitic Pegmatites // Journal of the Geological Society of India. 2022. Vol. 98. № 7. P. 917-925. DOI: 10.1007/s12594-022-2095-x

6. *Gourcerol B., Gloaguen E., Melleton J. et al.* Re-assessing the European lithium resource potential – A review of hard-rock resources and metallogeny // Ore Geology Reviews. 2019. Vol. 109. P. 494-519. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.04.015

7. *Li Chen, Nannan Zhang, Tongyang Zhao et al.* Lithium-Bearing Pegmatite Identification, Based on Spectral Analysis and Machine Learning: A Case Study of the Dahongliutan Area, NW China // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 2. № 493. DOI: 10.3390/rs15020493

8. *Müller A., Reimer W., Wall F. et al.* GREENPEG – exploration for pegmatite minerals to feed the energy transition: first steps towards the Green Stone Age // Geological Society, London, Special Publications. 2023. Vol. 526. P. 193-218. DOI: 10.1144/SP526-2021-189

9. *Nuernberg R.B., Faller C.A., Montedo O.R.K.* Crystallization kinetic and thermal and electrical properties of β-spodumeness/cordierite glass-ceramics // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2017. Vol. 127. Iss. 1. P. 355-362. DOI: 10.1007/s10973-016-5397-7

10. *Peng Xing, Chengyan Wang, Lei Zeng et al.* Lithium Extraction and Hydroxysodalite Zeolite Synthesis by Hydrothermal Conversion of α-Spodumene // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2019. Vol. 7. Iss. 10. P. 9498-9505. DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b00923

11. *Ferraz R.F., Sousa J.F., Lima H.R.B.R., Oliveira R.A.P.* Structural and Morphological Characterization of the Chromium-doped β-Spodumene to Ceramic Pigment // Brazilian Journal of Radiation Sciences. 2022. Vol. 10. № 2A. 15 p. DOI: 10.15392/bjrs.v10i2A.1772

12. *Kavanagh L., Keohane J., Garcia Cabellos G. et al.* Global Lithium Sources – Industrial Use and Future in the Electric Vehicle Industry: A Review // Resources. 2018. Vol. 7. Iss. 3. № 57. DOI: 10.3390/resources7030057

13. *Dessemond C., Lajoie-Leroux F., Soucy G. et al.* Spodumene: The Lithium Market, Resources and Processes // Minerals. 2019. Vol. 9. Iss. 6. № 334. DOI: 10.3390/min9060334

14. *Claffy E.W.* Composition, tenebrescence and luminescence of spodumene minerals // American Mineralogist. 1953. Vol. 38. № 11-12. P. 919-931.

15. *Abdullah A.A., Oskierski H.C., Altarawneh M. et al.* Phase transformation mechanism of spodumene during its calcination // Minerals Engineering. 2019. Vol. 140. № 105883. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105883

16. *Dessemond C., Soucy G., Harvey J.P., Ouzilleau P.* Phase Transitions in the α-γ-β Spodumene Thermodynamic System and Impact of γ-Spodumene on the Efficiency of Lithium Extraction by Acid Leaching // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 6. № 519. DOI: 10.3390/min10060519

17. *Salakjani N.Kh., Singh P., Nikoloski A.N.* Mineralogical transformations of spodumene concentrate from Greenbushes, Western Australia. Part 1: Conventional heating // Minerals Engineering. 2016. Vol. 98. P. 71-79. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.07.018

18. *Mashkoor R., Ahmadi H., Rahmani A.B., Pekkan E.* Detecting Li-bearing pegmatites using geospatial technology: the case of SW Konar Province, Eastern Afghanistan // Geocarto International. 2022. Vol. 37. Iss. 26. P. 14105-14126. DOI: 10.1080/10106049.2022.2086633

19. *Евдокимов А.Н., Юсуфзай А.* Геологическая позиция редкометалльных пегматитов гранитоидного комплекса Лагман, Афганистан // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Т. 25. № 1. № ES1002. DOI: 10.2205/2025ES000998

20. *Rossovskiy L.N., Chmyrev V.M.* Distribution patterns of rare-metal pegmatites in the Hindu Kush (Afghanistan) // International Geology Review. 1977. Vol. 19. Iss. 5. P. 511-520. DOI: 10.1080/00206817709471047

21. *Rossovskiy L.N., Konovalenko S.I.* Features of the formation of the rare-metal pegmatites under conditions of compression and tension (as exemplified by the Hindu Kush region) // International Geology Review. 1979. Vol. 21. Iss. 7. P. 755-764. DOI: 10.1080/00206818209467116

22. *Wesełucha-Birczyńska A., Słowakiewicz M., Natkaniec-Nowak L., Proniewicz L.M.* Raman microspectroscopy of organic inclusions in spodumenes from Nilaw (Nuristan, Afghanistan) // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2011. Vol. 79. Iss. 4. P. 789-796. DOI: 10.1016/j.saa.2010.08.054

23. *Rehman H.U., Martens G., Ying Lai Tsai et al.* An X-ray Absorption Near-Edge Structure (XANES) Study on the Oxidation State of Chromophores in Natural Kunzite Samples from Nuristan, Afghanistan // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 5. № 463. DOI: 10.3390/min10050463

24. *London D.* The origin of primary textures in granitic pegmatites // The Canadian Mineralogist. 2009. Vol. 47. № 4. P. 697-724. DOI: 10.3749/canmin.47.4.697

25. *Sirbescu M.-L.C., Schmidt C., Veksler I.V. et al.* Experimental Crystallization of Undercooled Felsic Liquids: Generation of Pegmatitic Texture // Journal of Petrology. 2017. Vol. 58. Iss. 3. P. 539-568. DOI: 10.1093/petrology/egx027

26. *Phelps P.R., Lee C.T.A., Morton D.M.* Episodes of fast crystal growth in pegmatites // Nature Communications. 2020. Vol. 11. № 4986. DOI: 10.1038/s41467-020-18806-w

27. *Sirbescu M.-L.C., Doran K., Konieczka V.A. et al.* Trace element geochemistry of spodumene megacrystals: A combined portable-XRF and micro-XRF study // Chemical Geology. 2023. Vol. 621. № 121371. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2023.121371

28. *Anderson A.J.* Microthermometric behavior of crystal-rich inclusions in spodumene under confining pressure // The Canadian Mineralogist. 2019. Vol. 57. № 6. P. 853-865. DOI: 10.3749/canmin.1900013

29. *Морозова Л.Н., Базай А.В.* Сподумен из редкометалльных пегматитов Колмозерского литиевого месторождения (Кольский полуостров) // Записки Российского минералогического общества. 2019. Т. 148. № 1. Р. 65-78. DOI: 10.30695/zrmo/2019.1481.06

30. *Акбарпуран Хайяти С.А., Гульбин Ю.Л., Сироткин А.Н., Гембицкая И.М.* Эволюция состава акцессорных минералов REE и Ti в метаморфических сланцах серии Атомфьелла, Западный Ню Фрисланд, Шпицберген и ее петрогенетическое значение // Записки Российского минералогического общества. 2020. Т. 149. № 5. С. 1-28. DOI: 10.31857/S0869605520050020

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

31. *Скублов С.Г., Юсуфзай А., Евдокимов А.Н., Гаврильчик А.К.* Редкоэлементный состав берилла из месторождений сподуменовых пегматитов провинции Кунар, Афганистан // Минералогия. 2024. Т. 10. № 2. С. 58-77. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-2-4

32. *Rossovskiy L.N., Chmyrev V.M., Salakh A.S.* New fields and belts of rare-metal pegmatites in the Hindu Kush (Eastern Afghanistan) // International Geology Review. 1976. Vol. 18. Iss. 11. P. 1339-1342. DOI: 10.1080/00206817609471351

33. *Skublov S.G., Hamdard N., Ivanov M.A., Stativko V.S.* Trace element zoning of colorless beryl from spodumene pegmatites of Pashki deposit (Nuristan province, Afghanistan) // Frontiers in Earth Science. 2024. Vol. 12. № 1432222. DOI: 10.3389/feart.2024.1432222

34. *Левашова Е.В., Скублов С.Г., Хамдард Н. и др.* Геохимия циркона из пегматитоносных лейкогранитов комплекса Лагман, провинция Нуристан, Афганистан // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Т. 24. № 2. № ES2011. DOI: 10.2205/2024ES000916

35. *Бескин С.М., Марин Ю.Б.* Особенности гранитовых систем с редкометалльными пегматитами // Записки Российского минералогического общества. 2019. Т. 148. № 4. С. 1-16. DOI: 10.30695/zrmo/2019.1484.00

36. *Alekseev V.I., Alekseev I.V.* The Presence of Wodginite in Lithium–Fluorine Granites as an Indicator of Tantalum and Tin Mineralization: A Study of Abu Dabbab and Nuweibi Massifs (Egypt) // Minerals. 2023. Vol. 13. Iss. 11. № 1447. DOI: 10.3390/min13111447

37. *Захарова А.А., Войтеховский Ю.Л., Компанченко А.А., Нерадовский Ю.Н.* Методика определения петрографических структур с использованием прибора МИУ-5М // Вестник МГТУ. 2022. Т. 25. № 1. С. 5-11. DOI: 10.21443/1560-9278-2022-5-11

38. *Войтеховский Ю.Л., Захарова А.А.* Петрографические структуры: ийолиты и уртиты Хибин // Вестник МГТУ. 2021. Т. 24. № 2. С. 160-167. DOI: 10.21443/1560-9278-2021-24-2-160-167

39. *Thomas R., Davidson P., Beurlen H.* Tantalite-(Mn) from the Borborema Pegmatite Province, northeastern Brazil: conditions of formation and melt- and fluid-inclusion constraints on experimental studies // Mineralium Deposita. 2011. Vol. 46. Iss. 7. P. 749-759. DOI: 10.1007/s00126-011-0344-9

40. *Скублов С.Г., Гаврильчик 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

41. *Скублов С.Г., Левашова Е.В., Мамыкина М.Е. и др.* Полифазный Белокурихинский массив гранитов, Горный Алтай: изотопно-геохимическое исследование циркона // Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 552-575.

42. *Skublov S.G., Petrov D.A., Galankina O.L. et al.* Th-Rich Zircon from a Pegmatite Vein Hosted in the Wiborg Rapakivi Granite Massif // Geosciences. 2023. Vol. 13. Iss. 12. № 362. DOI: 10.3390/geosciences13120362

43. *Czaja M., Lisiecki R., Kądziołka-Gaweł M., Winiarski A.* Some Complementary Data about the Spectroscopic Properties of Manganese Ions in Spodumene Crystals // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 6. № 554. DOI: 10.3390/min10060554

44. *Duan Yonghua, Ma Lishi, Li Ping, Cao Yong.* First-principles calculations of electronic structures and optical, phononic, and thermodynamic properties of monoclinic α-spodumene // Ceramics International. 2017. Vol. 43. Iss. 8. P. 6312-6321. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.02.038

45. *Morozova L.N., Sokolova E.N., Smirnov S.Z. et al.* Spodumene from rare-metal pegmatites of the Kolmozero lithium world-class deposit on the Fennoscandian shield: trace elements and crystal-rich fluid inclusions // Mineralogical Magazine. 2021. Vol. 85. Iss. 2. P. 149-160. DOI: 10.1180/mgm.2020.104

46. *Jia-Min Wang, Kang-Shi Hou, Lei Yang et al.* Mineralogy, petrology and P-T conditions of the spodumene pegmatites and surrounding meta-sediments in Lhozhag, eastern Himalaya // Lithos. 2023. Vol. 456-457. № 107295. DOI: 10.1016/j.lithos.2023.107295

47. *Гинзбург А.И.* Сподумен и процессы его изменения // Труды Минералогического музея. 1959. Вып. 9. С. 19-52.

48. *Ito A.S., Isotani S.* Heating effects on the optical absorption spectra of irradiated, natural spodumene // Radiation Effects and Defects in Solids. 1991. Vol. 116. Iss. 4. P. 307-314. DOI: 10.1080/10420159108220737

49. *Алексеев В.И., Марин Ю.Б.* Акцессорный касситерит – индикатор редкометалльного петро- и рудогенеза // Записки Российского минералогического общества. 2021. Т. 150. № 4. С. 1-37. DOI: 10.31857/S0869605521040031

Авторы: **Александр Николаевич Евдокимов,** *д-р геол.-минерал. наук, профессор, https://orcid.org/0000-0002-8121-0426* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Атаулла Юсуфзай,** *аспирант, ассистент, ata.yosufzai@kpu.edu.af, https://orcid.org/0000-0001-6549-4409* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*; *Кабульский политехнический университет, Кабул, Афганистан*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0