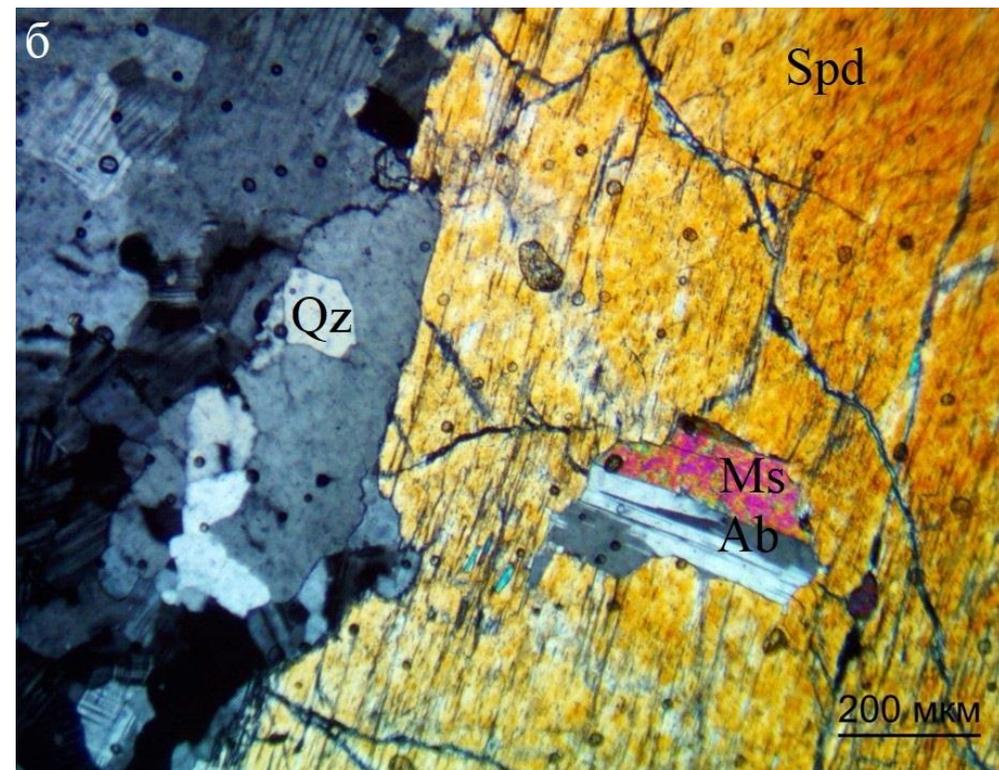
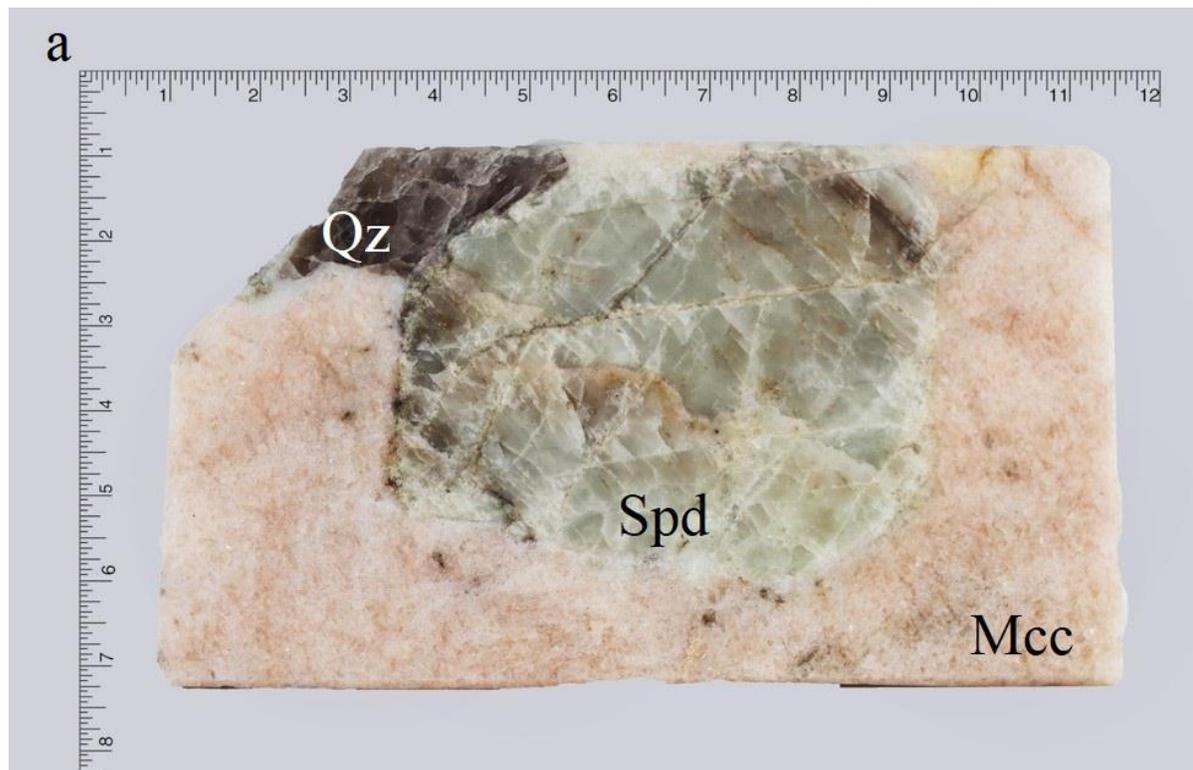


Геологические, геохимические и минералогические критерии поисков литиевых пегматитов  
(на примере Колмозерского месторождения)



**КОЛМОЗЕРСКОЕ ЛИТИЕВОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ.**

**Фото образца (а). Фото шлифа (б). ООО «Полярный литий»**

*Морозова Л. Н. – 1, 2, кандидат геолого-минералогических наук*

*1– ФГБУ «ВИМС», г. Москва; 2 – ФГБУ ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты*

*Москва, ВИМС - 2024*

**В докладе приведены опубликованные данные и новые результаты исследований по керну скважин, включая редкометалльные пегматиты и породы Патчемварекского массива.**

## Классификация редкометалльных пегматитов по (Černý P., Ercit T.S., 2005)

Класс	Семейство	Подкласс	Тип	Подтип	Геохимическая специализация
Редкометалльный	LCT	Редкометалльные -Li	Берилловый	Берилл-колумбитовый	Be, Nb <> Ta (±Sn, B)
				Берилл-колумбит-фосфатный	Be, Nb <> Ta, P (Li, F, ±Sn, B)
			Комплексный	Сподуменовый	Li, Rb, Cs, Be, Ta <> Nb (Sn, P, F, ±B)
				Петалитовый	Li, Rb, Cs, Be, Ta > Nb (Sn, Ga, P, F, ±B)
				Лепидолитовый	F, Li, Rb, Cs, Be, Ta > Nb (Sn, P, ±B)
				Эльбаитовый	Li, B, Rb, Sn, F (Be, Ta, Cs)
				Амблигонитовый	P, F, Li, Rb, Cs, Be, Ta > Nb (Sn, ±B)
			Альбит-сподуменовый	Li (Sn, Be, Ta <> Nb, ±B)	
			Альбитовый	Ta <> Nb, Be (Li, ±Sn, B)	

### Месторождения редкометалльных пегматитов



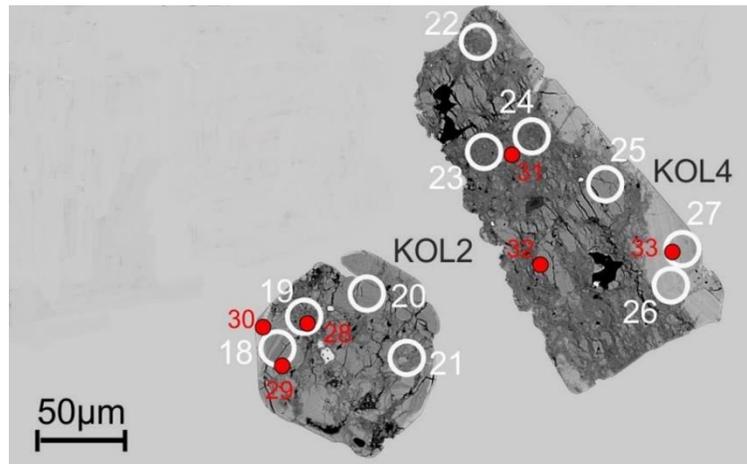
Среди месторождений редкометалльных пегматитов наиболее крупными являются Greenbushes (Австралия), Kings Mountain (США), Bikita (Зимбабве), Tanco (Канада), Volta Grande (Бразилия), Колмозерское (Россия).

Редкометалльные пегматиты семейства LCT (литий-цезий-тантал), по классификации (Černý, Ercit, 2005), включают определенную группу гранитных пегматитов. Среди пегматитов LCT семейства выделяются следующие типы: берилловый, комплексный, альбит-сподуменовый и альбитовый. Основными минералами LCT-пегматитов являются кварц, калиевый полевой шпат, альбит и мусковит. Основными минералами литиевой руды являются сподумен, петалит и лепидолит; цезий в основном концентрируется в поллуците; а тантал и ниобий – в минералах группы колумбита. В пегматитах LCT-типа основным минералом оловянной руды является касситерит, а бериллиевой руды - берилл. Типичные акцессорные минералы включают гранат, апатит, турмалин. Примерами крупных месторождений редкометалльных пегматитов альбит-сподуменового типа являются месторождения Кингс-Маутин (Северная Каролина, США;), Вольта-Гранде (Бразилия), Колмозерское (Кольский полуостров, Россия), Тастыгское (Тува, Россия), Завитинское (Восточное Забайкалье, Россия). К месторождениям редкометалльных пегматитов комплексного типа относятся месторождение Танко (Манитоба, США), Бикита (Зимбабве), Гринбушес (Австралия), Гольцовое (Восточные Саяны, Россия), Коктогай (Китай).

Около четверти мирового производства лития, большая часть производства тантала и все производство цезия приходится на пегматиты LCT-типа (Bradley et al., 2017). В связи с этим на сегодняшний день актуальными являются вопросы поисков редкометалльных пегматитов на основе геологических, геохимических и минералогических критериев.

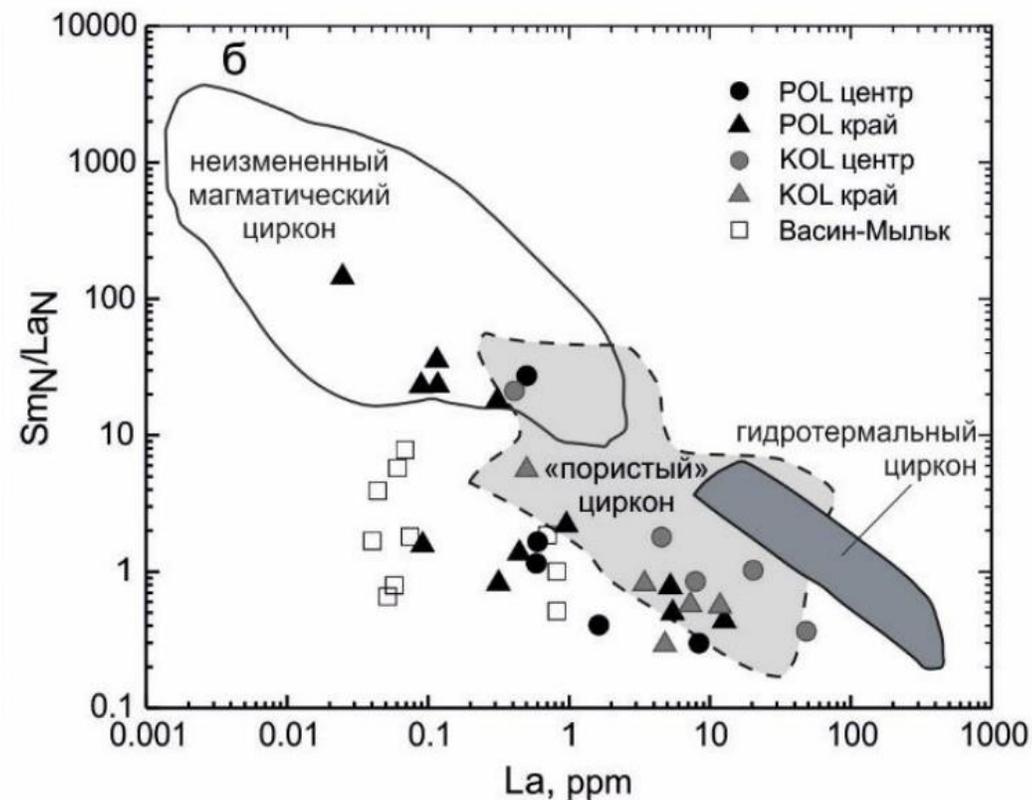
В России Колмозерское месторождение является наиболее изученным современными геохимическими и минералогическими методами и детально разведано геологическими методами. Это обусловлено тем, что в 2023 г. госкорпорация «Росатом» и ПАО «ГМК Норильский никель» получили лицензию на разработку Колмозерского месторождения. Колмозерское месторождение является месторождением мирового уровня, относится к альбит-сподуменовому типу и является эталоном для выделения геологических, геохимических и минералогических критериев на поиски литиевых пегматитов.

# ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ. ВОЗРАСТ РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ПЕГМАТИТОВ



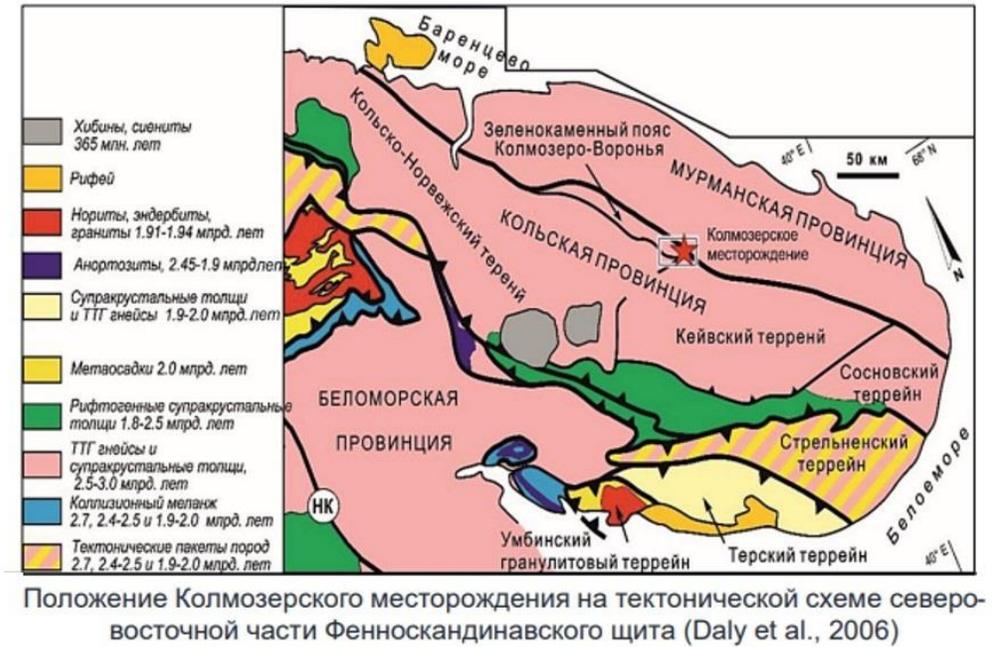
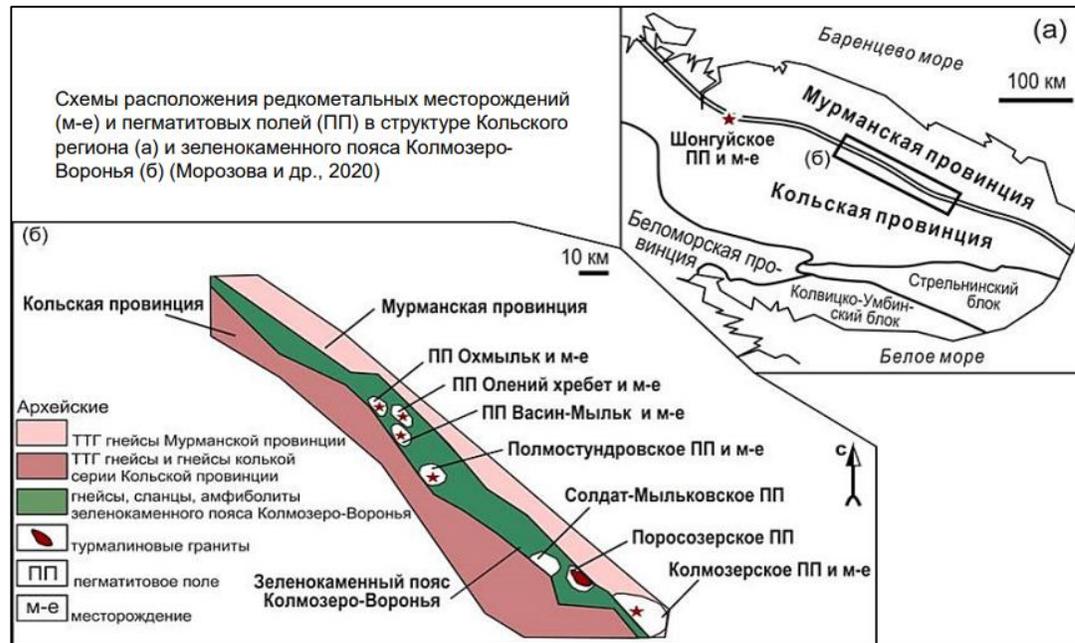
BSE-изображение цирконов из пегматитов Колмозерского месторождения по (Левашова и др., 2024)

Согласно (Dittrich et al., 2019; Ткачев, 2011), глобальные максимумы возрастного распределения месторождений LCT-пегматитов приходятся на 2650-2600 млн лет, 1900-1850 млн лет, 1000-950 млн лет, 300-250 млн лет, а второстепенные пики - на 2850-2800 млн лет, 2100-2050 млн лет, 1200-1160 млн лет и 550-500 млн лет и сходны с возрастом формирования орогенных гранитов (Condie et al., 2009). Возраст формирования колмозерских пегматитов является дискуссионным в связи со сложным строением его цирконов. На диаграмме  $La(ppm)-Sm/Nd_N$  все точки состава колмозерских цирконов образуют компактный кластер и полностью занимают положение измененного «пористого» циркона. Данная диаграмма призвана разделять циркон магматического и гидротермального генезиса [Hoskin, 2005], а также циркон, кристаллизовавшийся при участии флюидов, названный «пористый» из-за характерного внутреннего строения [Bouvier et al., 2012]. Цирконы из пегматитов Колмозерского месторождения отличаются: (1) наибольшим средним содержанием Li (в среднем 257 ppm), при максимально зафиксированном содержании – 386 ppm; (2) высоким содержанием  $HfO_2$  (21,75 мас.%); (3) высоким содержанием летучих компонентов  $H_2O$  (3,67 мас. %), F (1670 ppm) и Cl (1130 ppm). Полученные результаты указывают на редкометалльную специфику состава высокофракционированных пегматитовых расплавов из которых кристаллизовались колмозерские цирконы, и высокую степень их флюидонасыщенности (Левашова и др., 2024).



Дискриминационная диаграмма для определения генезиса цирконов из пегматитов Колмозерского месторождения по (Левашова и др., 2024). Поля составов цирконов приведены в соответствии с [Hoskin, 2005; Bouvier et al., 2012]. Для сравнения приведены составы цирконов из Полмостундровского месторождения (POL) и месторождения Васин-Мыльк.

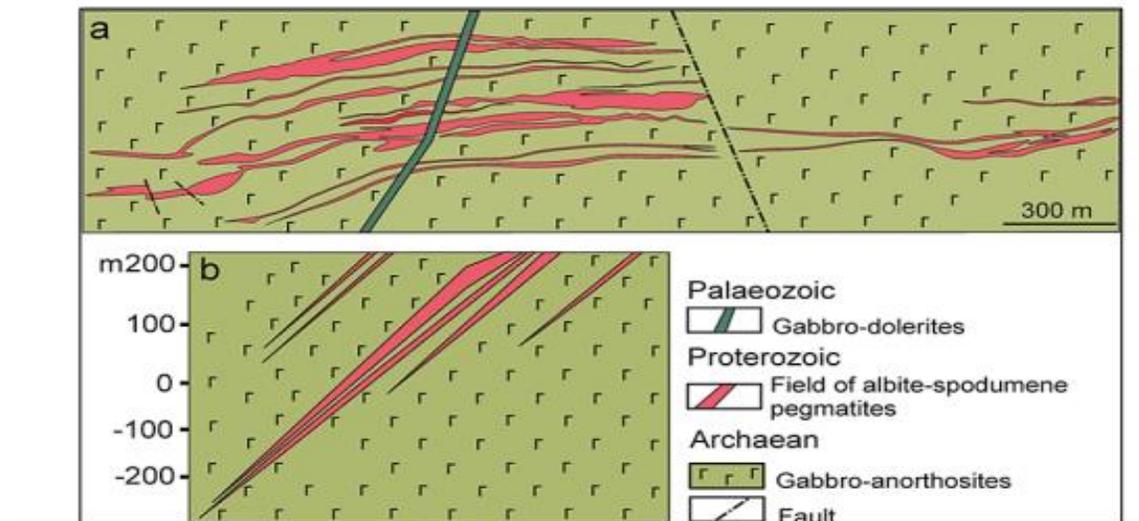
# ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ. ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ ПЕГМАТИТОВЫХ ПОЯСОВ



Большинство докембрийских пегматитовых полей и пегматитовых поясов приурочено к линейным рифтогенным троговым структурам, ограниченными глубинными разломами, или они унаследовано развиваются по более древним зеленокаменным поясам. Например, Кольский редкометалльный пегматитовый пояс, Восточно-Саянский пегматитовый пояс и т.д. Фанерозойские поля редкометалльных пегматитов приурочены к зонам коллизии. Например, кайнозойский Памир-Гиндукуш-Гималайский пегматитовый пояс сформирован в зоне коллизии Еразийской и Индийской плиты, а палеозойские пегматитовые поля в Монгольском Алтае - в зоне коллизии Джунгарской и Сибирской плиты (Загорский и др., 2014).

Колмозерское месторождение входит в состав Кольского редкометалльного пегматитового пояса (Морозова и др., 2020) северо-восточной части Фенноскандинавского щита и является частью Титовско-Поросозерской золото-молибден-редкометалльной металлогенической зоны (Государственная..., 2007). Месторождение приурочено к Патчемварекскому массиву метагббро-анортозитов, расположенному в зоне сочленения архейских структур регионального уровня - Мурманской и Кольской провинций. Эта зона долгое время рассматривалась как линейная мобильно-проницаемая зона (глубинный разлом) архейского возраста. Эта тектоническая структура с позиций современной геологии интерпретируется как архейский зеленокаменный пояс Колмозеро-Воронья или зона трансформации (transcrustal shear zones). Вследствие своей высокой проницаемости, зоны трансформации являлись каналами, по которым циркулировали рудоносные флюиды, при этом рудные компоненты осаждались не только внутри зон, но и в их бортах (Geological..., 1999).

# ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ. ВМЕЩАЮЩИЕ ПОРОДЫ



(a) схема строения Колмозерского литиевого месторождения.  
(b) геологический разрез через жилы альбит-сподуменовых пегматитов  
(по С.И. Эвенчику)

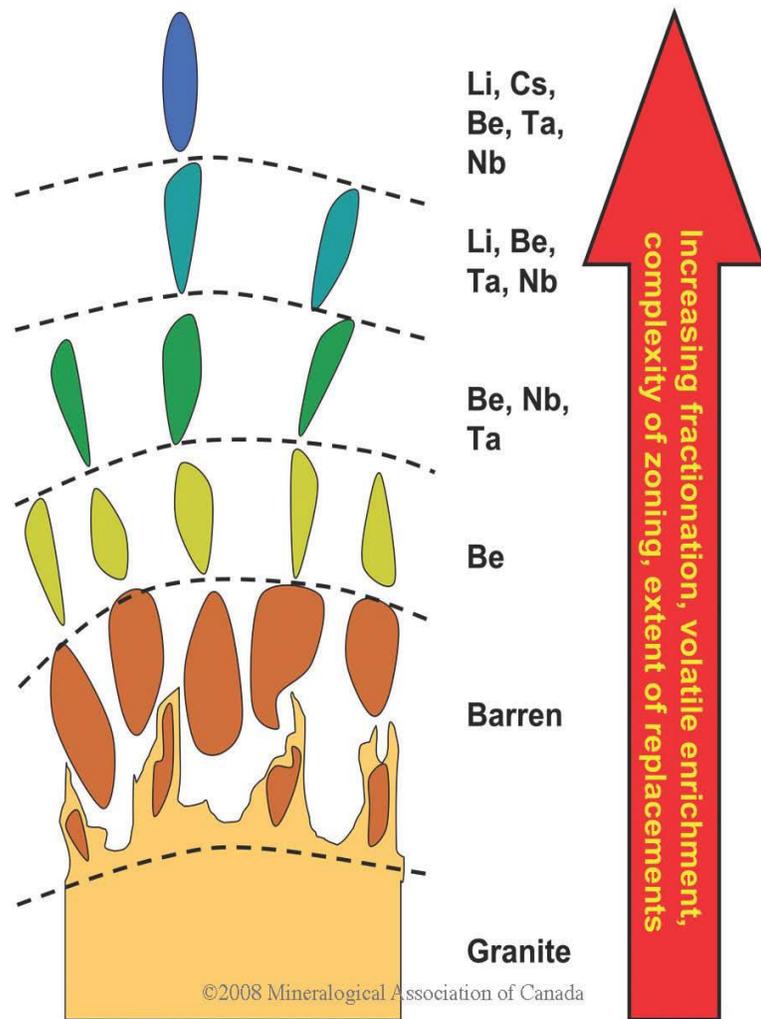


Схема геологического строения Колмозерского пегматитового поля  
по (Морозова, 2018)

Большинство пегматитов LCT-типа размещены в метаосадочных или метавулканических (супракрустальных) вмещающих породах, метаморфизованных в условиях зеленосланцевой или амфиболитовой фации метаморфизма. Реже тела редкометалльных пегматитов внедряются в граниты или метагаббро (Šterný, 1992). Тела LCT-пегматитов образуют зональные и незональные дайки (жилы) (Cameron и др., 1949).

Вмещающими породами для колмозерских пегматитов являются метагаббро Патчемварекского массива. На Колмозерском месторождении (1) морфологически редкометалльные пегматиты представляют собой плитообразные дайки (жилы) большой протяженности и мощности; (2) концентрическая зональность отсутствует; (3) дайки пегматитов группируются в пределах узких тектонических зон; (4) пегматитовые тела сближены друг с другом, имеют сходные элементы залегания и крутые или средние углы падения.

# ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИИ. ИСТОЧНИКИ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ ПЕГМАТИТОВ



Схематическое изображение эволюции LCT-пегматитов на расстоянии от «материнского» источника

Большинство исследователей рассматривает образование редкометалльных LCT-пегматитов в рамках модели кристаллизационной дифференциации гранитного источника. Альтернативная гипотеза основана на формировании LCT-пегматитов при частичном плавлении пород земной коры в присутствии флюидов. На практике многие редкометалльные пегматиты могут образовываться в результате сочетания процессов плавления земной коры и последующего фракционирования небольших магматических тел (Shaw et al, 2016 и ссылки там же).

Как правило, «материнскими» гранитами для LCT-пегматитов являются пералюминиевые граниты S-типа, однако имеются примеры «материнских» металоминиевых гранитов I-типа (Martin и De Vito, 2005). Нахождение «материнских» гранитов значительно уменьшает время поиска редкометалльных пегматитов. По Černý and Meintzer (1988) интрузии «материнских» гранитов неоднородны и могут включать: биотитовый гранит, двуслюдяной лейкогранит, мусковитовый лейкогранит, пегматитовый лейкогранит. «Материнские» граниты в отличие от простых гранитов богаты кварцем, пералюминиевые ( $A/CNK > 1$ ), содержат мусковит, гранат, турмалин, апатит. «Материнские» граниты деплетированы Fe, Mg, Ca. Содержание микроэлементов в «материнском» граните варьируют: 445- $< 1$  ppm Sr; 900-6 ppm Ba; 4300- $< 100$  ppm Ti; 77-  $< 1$  ppm Zr; 1-3540 ppm Li, 32-5775 ppm Rb, 3-51 ppm Cs, 1-604 ppm Be, 19-90 ppm Ga, 3-102 ppm Y (Černý, 1989). Пегматиты, как правило, расположено на площади 10-20 км<sup>2</sup> в 10 км от «материнского» гранита (Breaks and Tindle 1997). На расстоянии нескольких км (десятков км) от «материнского» гранитного источника в идеализированном виде можно проследить региональную зональность в расположении пегматитов. Непосредственно вблизи гранитного тела располагается зона безрудных пегматитов, которая сменяется пегматиты с Be минерализацией. Следующая зона представлена пегматитами, обогащенными Be, Nb, Ta, а затем следует зона пегматитов с повышенными концентрациями Li, Be, Nb, Ta. Наиболее удаленной является зона пегматитов с повышенными концентрациями Cs, Li, Be, Nb, Ta (Černý, 1989; London, 2008).

# КОЛМОЗЕРСКОЕ ПЕГМАТИТОВОЕ ПОЛЕ. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ

Поисковыми критериями редкометалльного оруденения могут служить данные о концентрации Li, Ba, Sr,  $\Sigma$ REE и величинах индексов фракционирования – Zr/Hf и Mg/Li, в пегматитах в пределах пегматитового поля.

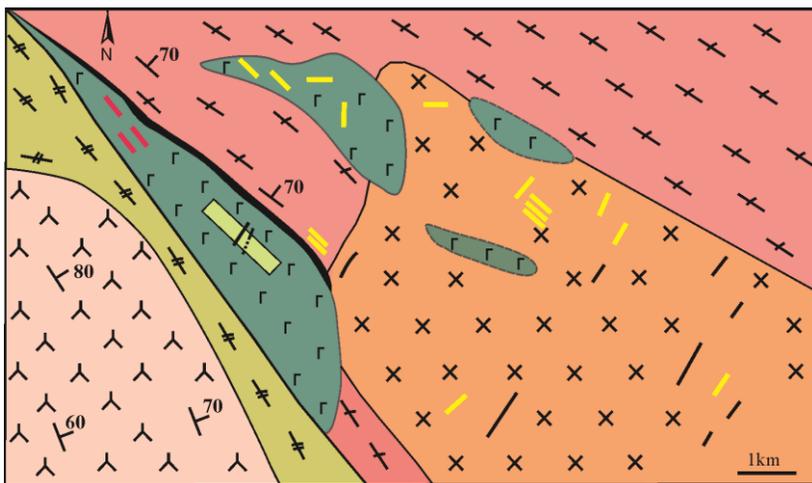
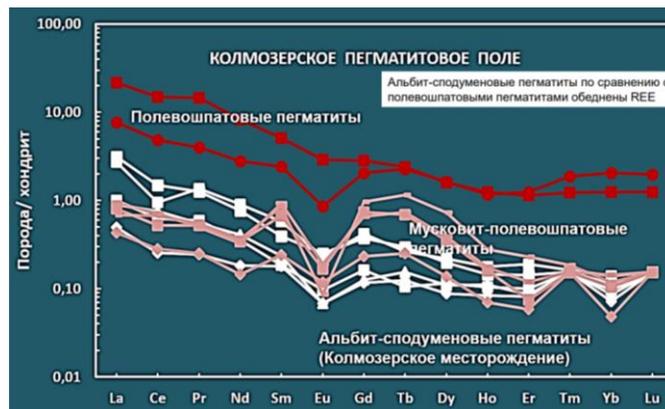


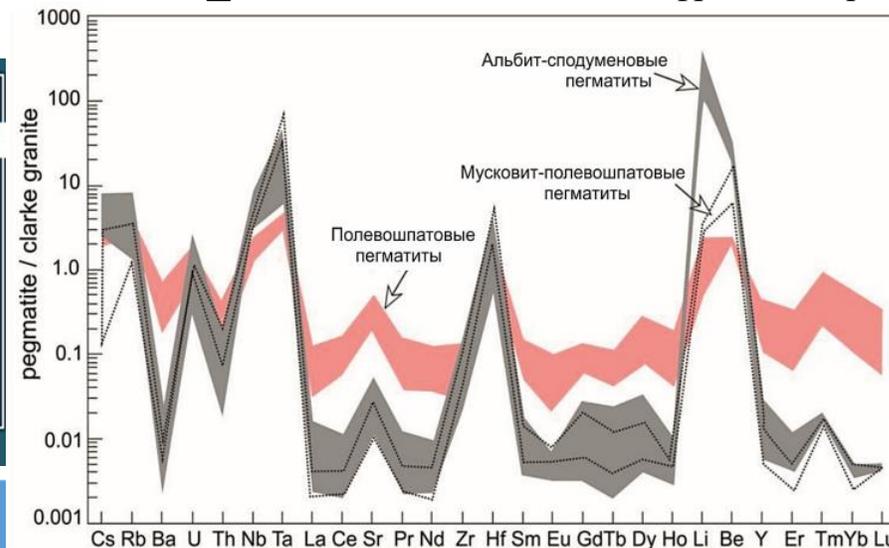
Схема геологического строения Колмозерского пегматитового поля по (Морозова, 2018)



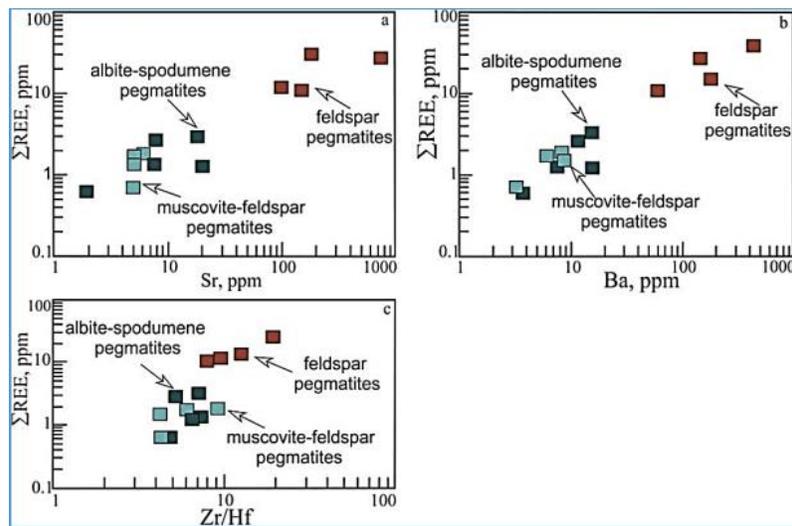
Элементы, отношения элементов	ПШ пегматиты	Ab-Spd пегматиты
	ppm, среднее	

Li	65	5899
Nb	30	81
Ta	9.3	59
Be	14	141
$\Sigma$ REE	20	1.8
Y	3	0.3
Ba	446	11
Sr	98	11
Zr/Hf	14.5	6.2
Mg/Li	10.8	0.04

Источник: Морозова, 2018 / Литосфера

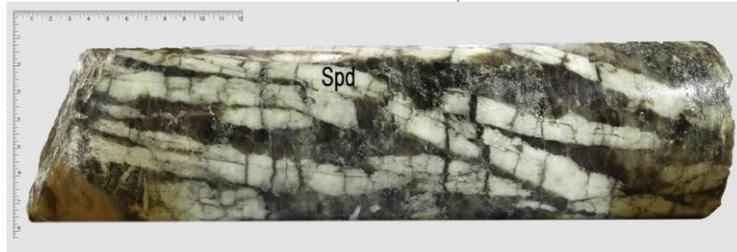


В пределах Колмозерского пегматитового поля «материнские» граниты не выходят на дневную поверхность, что может свидетельствовать об их расположении на глубине. В то же время в пределах Колмозерского пегматитового поля были выделены полевошпатовые пегматиты с Be-минерализацией, мусковит-полевошпатовые пегматиты с Be-Nb-Ta-минерализацией и альбит-сподуменовые пегматиты (Колмозерское месторождение) с Be-Nb-Ta-Li-минерализацией (Гордиенко, 1970; Морозова, 2018). Было установлено, что полевошпатовые пегматиты характеризуются повышенными содержаниями Sr (98 ppm), Ba (446 ppm), Y (3,3 ppm), REE (19,9 ppm), высокими величинами индексов фракционирования – Mg/Li (10,8) и Zr/Hf (14,49), и низкими концентрациями Li (65 ppm), Nb (30 ppm), Ta (9,3 ppm) по сравнению с мусковит-полевошпатовыми и альбит-сподуменовыми пегматитами. От полевошпатовых пегматитов к альбит-сподуменовым пегматитам отмечается уменьшение содержаний  $\Sigma$ REE, Ba, Sr и величины отношений (индексов фракционирования) - Zr/Hf и Mg/Li, и увеличение содержаний Li, Nb, Ta (Морозова, 2018).

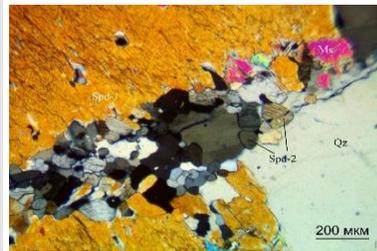


# КОЛМОЗЕРСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ. ТИПЫ РУД

## ФОТО ОБРАЗЦОВ

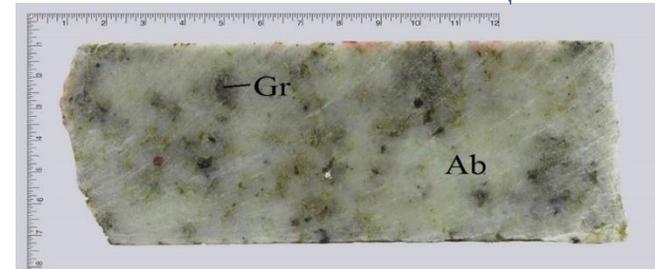


## ФОТО ШЛИФОВ

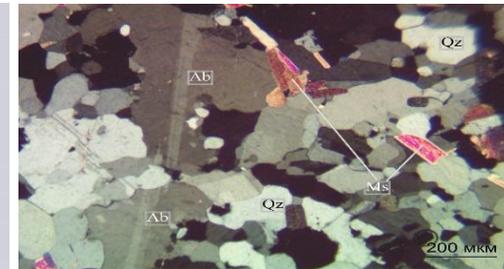


## СПОДУМЕНОВЫЙ ПЕГМАТИТ

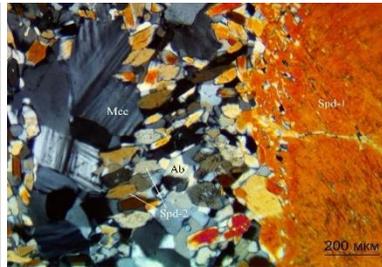
## ФОТО ОБРАЗЦОВ



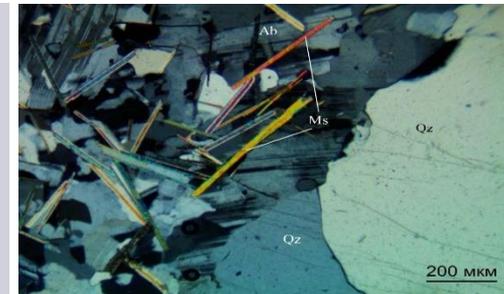
## ФОТО ШЛИФОВ



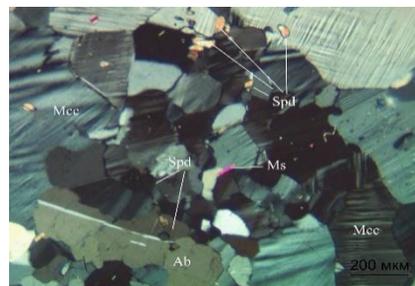
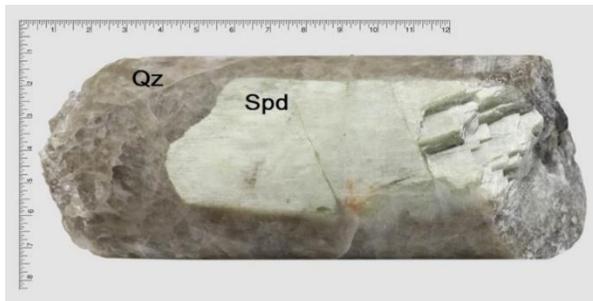
## АЛЬБИТОВЫЙ ПЕГМАТИТ



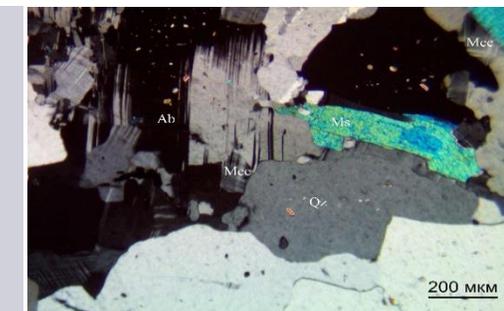
## СПОДУМЕН-ПОЛЕВОШПАТОВЫЙ ПЕГМАТИТ



## КВАРЦ-АЛЬБИТОВЫЙ ПЕГМАТИТ



## КВАРЦ-СПОДУМЕНОВЫЙ ПЕГМАТИТ



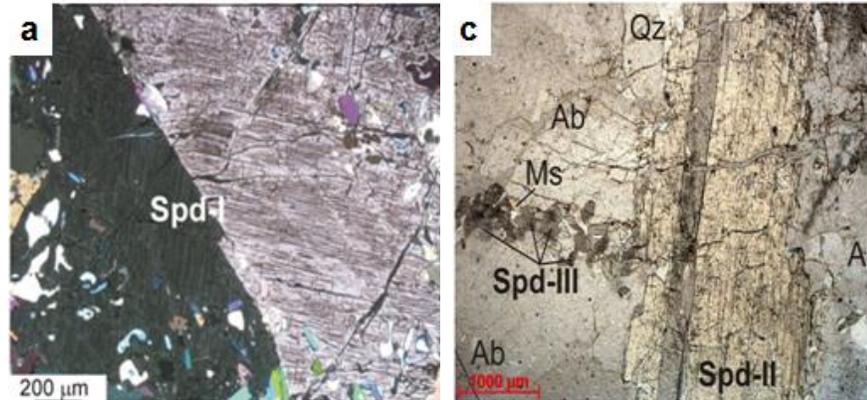
## КВАРЦ-ПОЛЕВОШПАТОВЫЙ ПЕГМАТИТ

Согласно ранее полученным результатам (Гордиенко, 1970) и новым данным, рудные тела колмозерских альбит-сподуменовых пегматитов включают следующие разновидности пород: сподуменовый пегматит; сподумен-полевошпатовый пегматит; кварц-сподуменовый пегматит; альбитовый пегматит; кварц-альбитовый пегматит; кварц-полевошпатовый пегматит. Из каждой разновидности пегматитов был изучен химический и редкоэлементный состав породообразующих минералов методом LA-ICP-MS и электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа.

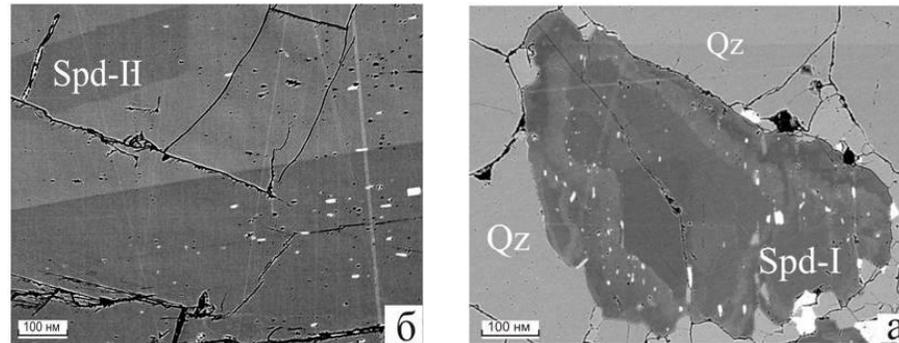
# КОЛМОЗЕРСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ. СПОДУМЕН

Химический состав колмозерского сподумена

Компонент	К1-ГХ-122	К1-ГХ-123	К1-11/2	К1-23/5	К1-ГХ-23	К1-ГХ-11	7
	1	2	3	4	5	6	
SiO <sub>2</sub>	64.40	64.10	64.12	64.68	64.76	64.12	64.36
TiO <sub>2</sub>	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.32	25.22	25.64	25.19	25.16	25.40	25.32
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.95	0.45	1.06	0.93	0.72	1.02	0.86
FeO	0.30	0.74	0.17	0.18	0.36	0.16	0.32
MnO	0.14	0.29	0.11	0.12	0.12	0.11	0.15
MgO	0.03	0.05	0.05	0.04	0.03	0.05	0.04
CaO	0.11	0.06	0.04	0.22	0.12	0.10	0.11
Na <sub>2</sub> O	0.49	0.63	0.54	0.35	0.39	0.54	0.49
K <sub>2</sub> O	0.16	0.26	0.24	0.13	0.13	0.23	0.19
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.09	0.06	0.06	0.04	0.11	0.03	0.07
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.24	0.20	0.47	0.08	0.25	0.27	0.25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.11	0.05	0.08	0.08	0.12	0.09
CO <sub>2</sub>	0.32	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	0.17	0.14
F	0.012	0.009	0.008	0.007	0.008	0.008	0.008
Cl	< 0.004	0.007	0.007	< 0.004	0.006	0.009	0.006
SrO	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Li <sub>2</sub> O	7.11	8.08	7.46	7.44	7.33	7.20	7.44
Rb <sub>2</sub> O	0.0071	0.0092	0.0098	0.0053	0.0056	0.0091	0.0077
Cs <sub>2</sub> O	0.00026	0.00032	0.00013	0.00022	0.00028	0.0012	0.0004
Сумма	99.81	100.28	100.03	99.49	99.57	99.55	99.89



Микрофотографии шлифов. Spd-I, Spd-II, Spd-III

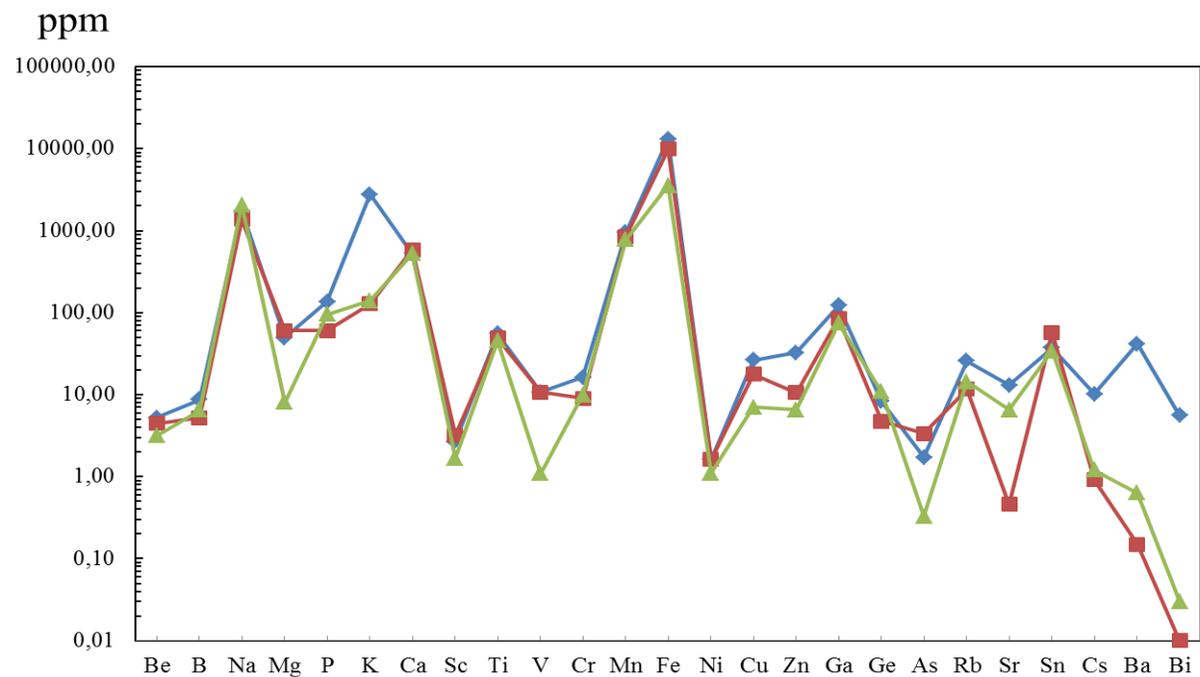


Внутрифазовая неоднородность в Spd-I (а) и Spd-II (б). BSE – изображения

В колмозерских пегматитах основным минералом лития и главным породообразующим минералом является сподумен. Среднее содержание Li<sub>2</sub>O в сподумене составляет 7.44 мас. %. Колмозерский сподумен имеет более высокие содержания Li<sub>2</sub>O, чем сподумен из Ташелгинского месторождения (Западная Сибирь; Анникова и др., 2013). Близкие значения Li<sub>2</sub>O имеет сподумен из пегматитов Урикского месторождения в Саянах (7.1–7.5 мас. %; Владимиров и др., 2012) и сподумен из пегматитов литиевого месторождения Вольта Гранде в Бразилии (7.15 мас. %; Lagache, 1997) Источник: Морозова, Базай, 2019.

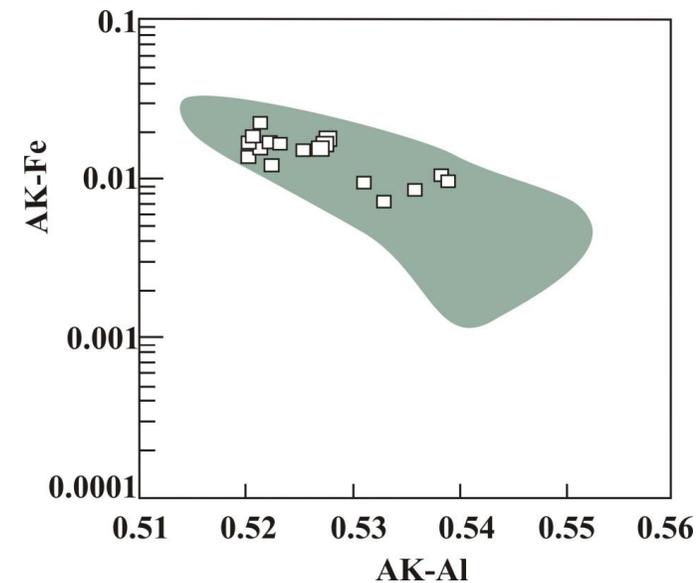
Сподумен сравнительно равномерно распределен по простиранию, падению и мощности рудных тел и представлен тремя морфотипами (генерациями). Сподумен непрозрачный, редко полупрозрачный, серовато-зеленоватого цвета, редко зеленого или с розовым оттенком цвета. Кристаллы уплощенно-призматического габитуса, варьирующего от коротко- до длиннопризматического. Минерал разбит поперечными трещинами отдельности, реже продольными трещинами, выполненными кварцем, альбитом и мусковитом. По трещинам отмечается смещение отдельных частей минерала относительно друг друга. Микроскопическими исследованиями выявлена неоднородность кристаллов колмозерского сподумена, представленная двумя типами – фазовой и внутрифазовой. К фазовой (минеральной) неоднородности относятся многочисленные включения, среди которых диагностированы: альбит, кварц, мусковит (наиболее часто встречаемые), минералы группы колумбита, апатит, гранат и касситерит. Исходя из морфологии включений, их расположения во вмещающем сподумене, можно предполагать прото- и сингенетичную природу большинства минеральных включений. Внутрифазовая неоднородность в сподумене проявлена наличием темно и светло-серых зон (участков) различной конфигурации, различающихся по химическому составу. Светло-серые зоны отличаются от темно-серых зон более высокой величиной отношения Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MnO (10.75–17.57 и 4.63–9.80, соответственно) (Морозова, Базай, 2019).

# КОЛМОЗЕРСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ. СПОДУМЕН



Распределение редких элементов в сподуменах из сподуменового пегматита (синяя линия) и сподумен-полевошпатового пегматита (красная линия и зеленая линии).

Среди элементов-примесей в сподумене преобладают Na, Mn и Fe при доминировании Fe. Высокое содержание Fe в колмозерских сподуменах связано с тем, что  $Fe^{3+}$  замещает Al в кристаллической решетке сподумена, а Li в небольшом количестве изоморфно замещается  $Fe^{2+}$ , Mn и Na. Доминирование Fe над другими элементами-примесями отмечается в сподуменах из редкометалльных пегматитов других регионов мира. В то же время во вторичном сподумене, который замещает петалит (месторождение Танко; Канада), доминирует Na.

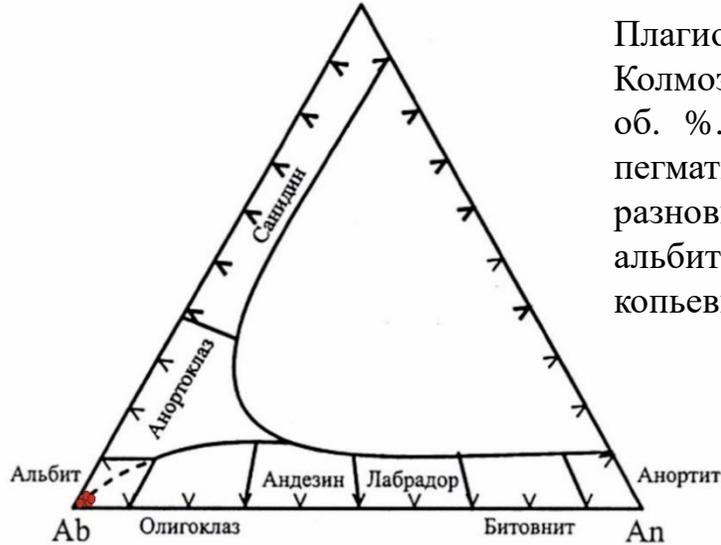


Составы колмозерских сподуменов (белые квадраты) смещаются в сторону высоко-железистых сподуменов. Зеленое поле – сподумены из других месторождений

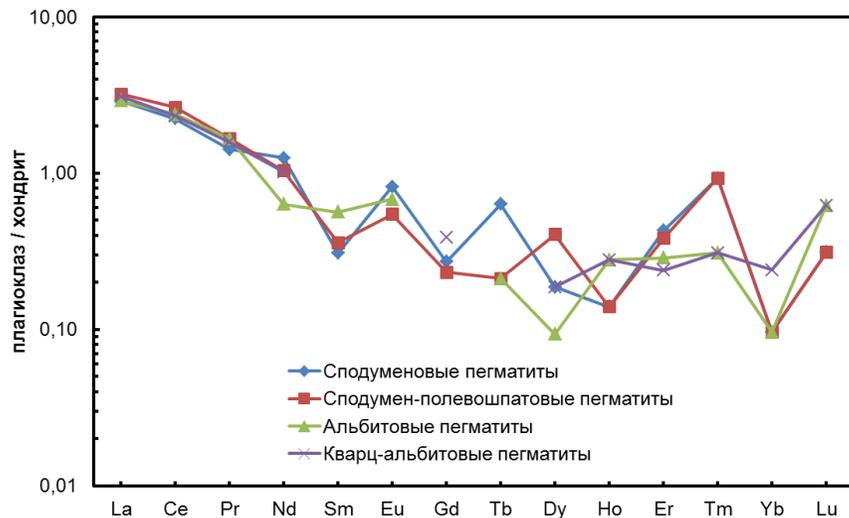
Источник: Морозова, Базай, 2019;  
Morozova et al., 2021, Морозова и др., 2024

# КОЛМОЗЕРСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ. ПЛАГИОКЛАЗ

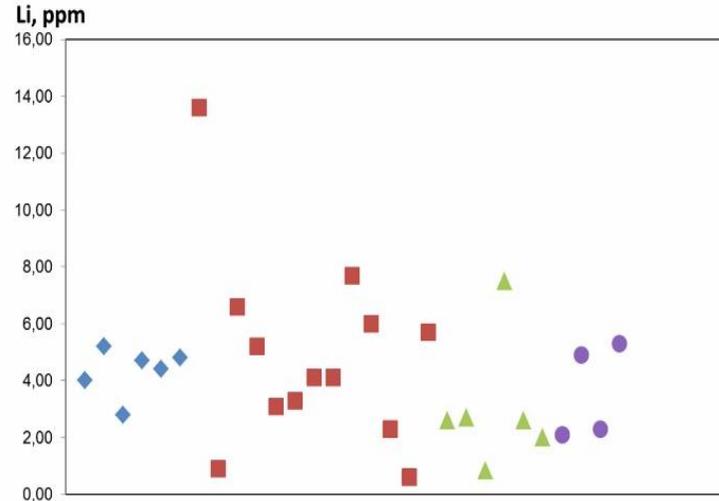
Плагиоклаз является породообразующим («сквозным») минералом альбит-сподуменовых пегматитов Колмозерского месторождения. Среднее содержание плагиоклаза в колмозерских пегматитах составляет 30–33 об. %. В ранних исследованиях было показано, что плагиоклаз в различных частях жил колмозерских пегматитов по химическому составу отвечает альбиту и представлен различными морфологическими разновидностями, включая: мелкозернистый альбит ( $An_{3-10}$ ), таблитчатый альбит ( $An_{0-10}$ ), мелкопластинчатый альбит ( $An_{0-3}$ ), крупнопластинчатый альбит ( $An_{0-3}$ ), клевеландит ( $An_{0-3}$ ), сахаровидный альбит ( $An_{0-4}$ ) и копьевидный альбит ( $An_0$ ) из каверн выщелачивания [Гордиенко, 1970].



Состав плагиоклаза (красные кружки) из колмозерских пегматитов на классификационной диаграмме Ab-An-Or.

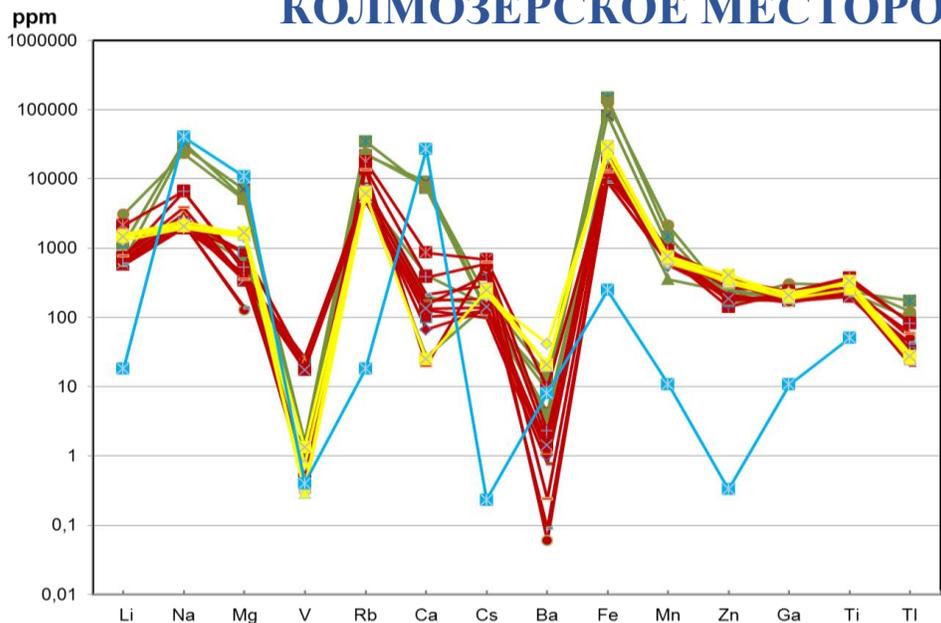


Графики распределения REE для плагиоклазов характеризуются дифференцированным спектром с положительной Eu-аномалией. Сумма REE варьирует от 3.73 до 4.40 ppm.

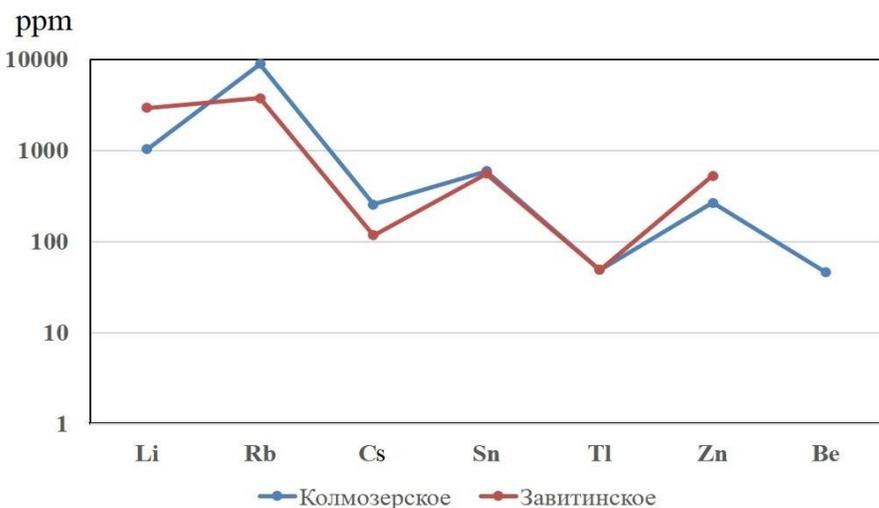


В плагиоклазах концентрации Rb варьируют от 8 до 46 ppm, для Sr — от 6 до 81 ppm, для Ba — от 4 до 88 ppm. Средние концентрации Li в альбитах из сподуменового пегматита составляют 4.3 ppm (синие ромбы), из сподумен-полевошпатового пегматита — 4.9 ppm (красные прямоугольники), из кварц-альбитового пегматита — 3.0 ppm (фиолетовые кружки) и из альбитового пегматита — 3.7 ppm (зеленые треугольники).

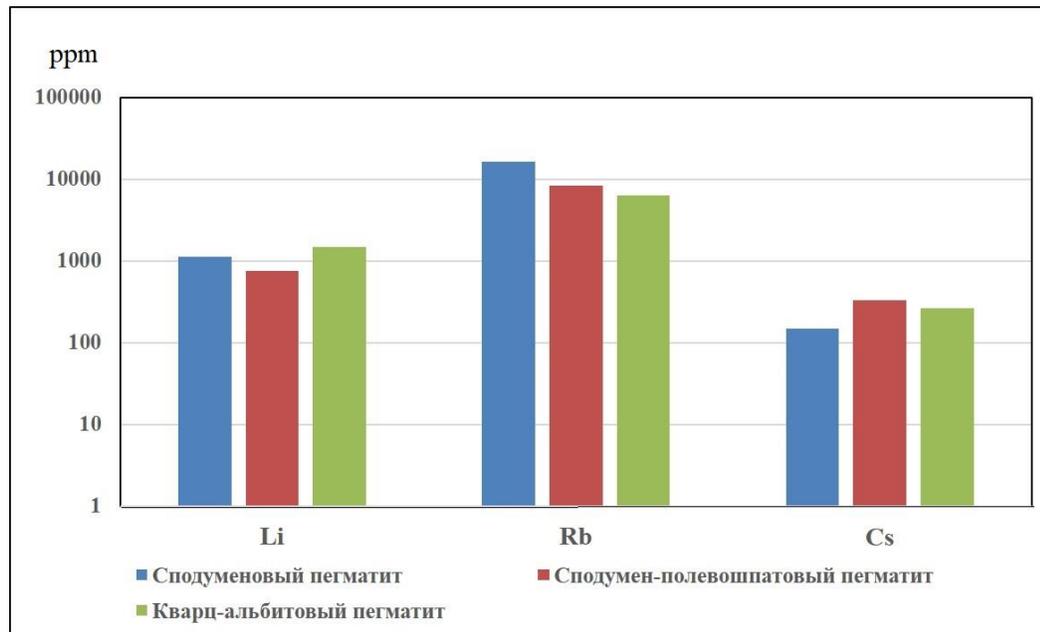
# КОЛМОЗЕРСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ. МУСКОВИТ, ОБОГАЩЕННЫЙ Li, Rb, Cs



Распределение редких элементов в мусковите из сподуменового (зеленые линии), сподумен-полевошпатового (красные линии), кварц-альбитового (желтые линии) и альбитового (голубая линия) пегматитов.



Распределение Li, Rb, Cs, Sn, Tl, Zn, Be в мусковитах из пегматитов Колмозерского и Завитинского месторождений



Распределение Li, Rb, Cs в мусковите из сподуменового, сподумен-полевошпатового и кварц-альбитового пегматитов.

В мусковите из сподуменового, сподумен-полевошпатового и кварц-альбитового пегматита концентрации Li составляют 1118, 765 и 1470 ppm, соответственно, Rb – 16256, 8379 и 6333 ppm, Cs – 150, 334 и 265 ppm. Наибольшее отличие по содержанию элементов-примесей показывает мусковит из альбитовых пегматитов, который обеднен Li, Rb, Cs, Fe, Mn, Zn, Ga, Ti, Tl и обогащен Ca, Na и Mg по сравнению с мусковитом из выше описанных разновидностей пегматитов.

Колмозерский мусковит по сравнению с мусковитом из пегматитов Завитинского месторождения, имеет более высокие концентрации Rb (среднее, 9922 и 3750 ppm, соответственно), Cs (274 и 118 ppm, соответственно) и Be (46 ppm и не определен, соответственно), более низкие концентрации Li (1000 и 2930 ppm, соответственно) и Zn (263 и 530 ppm, соответственно) и сопоставимые концентрации Tl (49 и 49 ppm, соответственно) и Sn (595 и 555 ppm, соответственно).

В колмозерских пегматитах на долю мусковита приходится 5–6 об. %. Мусковит равномерно распределен в породе, а на отдельных участках образует гнездовые скопления.

# КОЛМОЗЕРСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ. МИКРОКЛИН, ОБОГАЩЕННЫЙ Li, Rb, Cs

Элементы ppm	Полевошпатовые пегматиты		Альбит-сподуменовые пегматиты	
	Mc-I (n=5)	Mc-II (n=5)	Mc-I (n=5)	Mc-II (n=8)
Li	13.7	17.3	68	86
Rb	296	1205	4486	6720
Cs	7.2	25	92	146
Tl	1.6	6.2	28	34
Ba	4392	259.8	30	13
Sr	340	55	24	8.4
Nb	0.09	8.2	0.05	3.3
Ta	0.50	0.79	0.07	0.4
Be	-	1.8	4.9	3.0
K (мас. %)	15.7	16.1	15.9	15.9

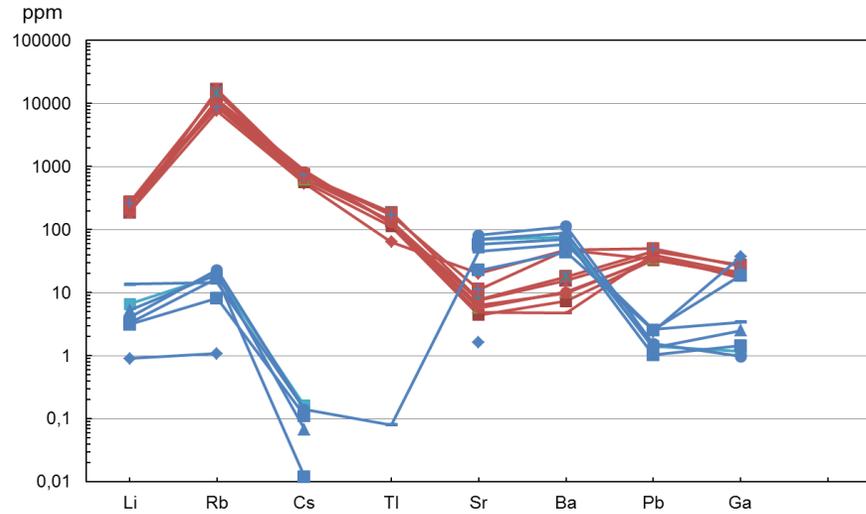
Источник: Morozova et al., 2022 / Minerals

Тип пегматитов / Индикаторные отношения	Полевошпатовые пегматиты		Альбит-сподуменовые пегматиты	
	Mc-I	Mc-II	Mc-I	Mc-II
	Среднее n = 5	Среднее n = 5	Среднее n = 5	Среднее n = 8
K/Rb	440	111	30	20
K/Cs	18 153	5 478	1 460	912
K/Tl	80 303	21 952	4 765	3 896
K/Li	10 429	7 844	2 019	1 619
K/Sr	382	2 939	5 758	21 988
K/Ba	30	525	4 854	10 323
Rb/Ba	0.07	4.5	163	525
Rb/Sr	0.87	22	190	799

Содержание редких элементов и их индикаторные отношения в КПШ из пегматитов Колмозерского пегматитового поля

Калиевый полевой шпат (микроклин) является породообразующим минералом колмозерских пегматитов, по данным В.В. Гордиенко [1970], на его долю приходится 10–25 об. % в объеме жил пегматитов. Было проведено сравнение состава микроклина из альбит-сподуменовых и полевошпатовых пегматитов Колмозерского пегматитового поля. Результаты исследований показали, что: (1) в альбит-сподуменовых пегматитах главными элементами-примесями в микроклине являются Rb, Cs, Li и Tl, которые входят в кристаллическую решетку минерала в следующем порядке:  $Rb \gg Cs > Li > Tl$ ; (2) от микроклинов из полевошпатовых пегматитов к микроклинам из альбит-сподуменовых пегматитов отмечается уменьшение величин отношений K/Rb, K/Tl, K/Cs, K/Li и увеличение величин отношений K/Ba, K/Sr, Rb/Sr, Rb/Ba. Полученные результаты позволяют произвести оценку отдельных пегматитовых тел в пределах пегматитового поля на редкометалльное оруденение [Morozova et al., 2022].

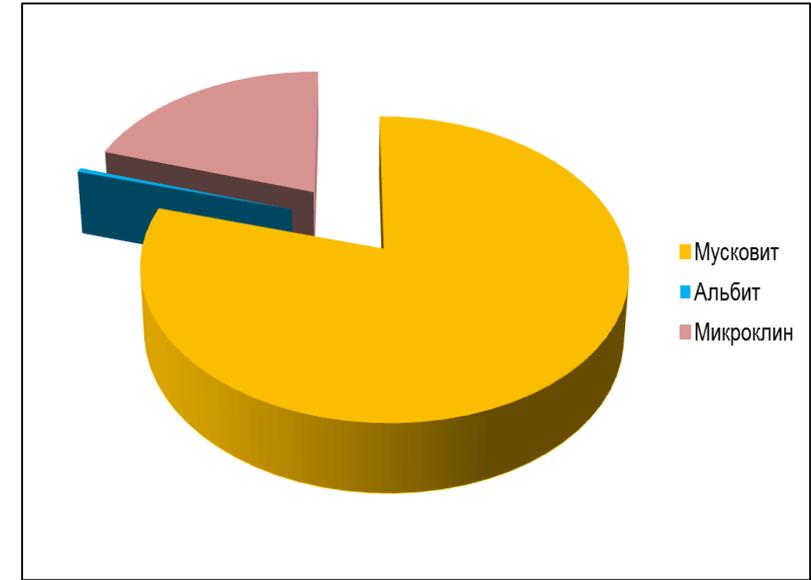
# КОЛМОЗЕРСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ. МИКРОКЛИН, ОБОГАЩЕННЫЙ Li, Rb, Cs



Результаты исследований также показали, что колмозерский блоковый микроклин из сподумен-полевошпатового пегматита обогащен Rb (среднее, 11087 ppm), Li (224 ppm), Cs (698 ppm), Tl (133 ppm) и обеднен Sr (8,5 ppm), Ba (20 ppm) и Pb (39 ppm).

Микроклин по сравнению с плагиоклазом обогащен Li (более, чем в 40 раз), Rb (в 765 раз), Cs (в 7750 раз), Tl (в 11640 раз) и Pb (в 20 раз), но имеет более низкие концентрации Sr и Ba. Следовательно, микроклин по сравнению с альбитом обогащен Li, Cs, Rb, Tl, Pb, Ga и обеднен Sr и Ba.

Распределение Li, Rb, Cs, Tl, Sr, Ba, Pb и Ga в микроклин (красные линии) и плагиоклазе (синие линии) из сподумен-полевошпатового пегматита



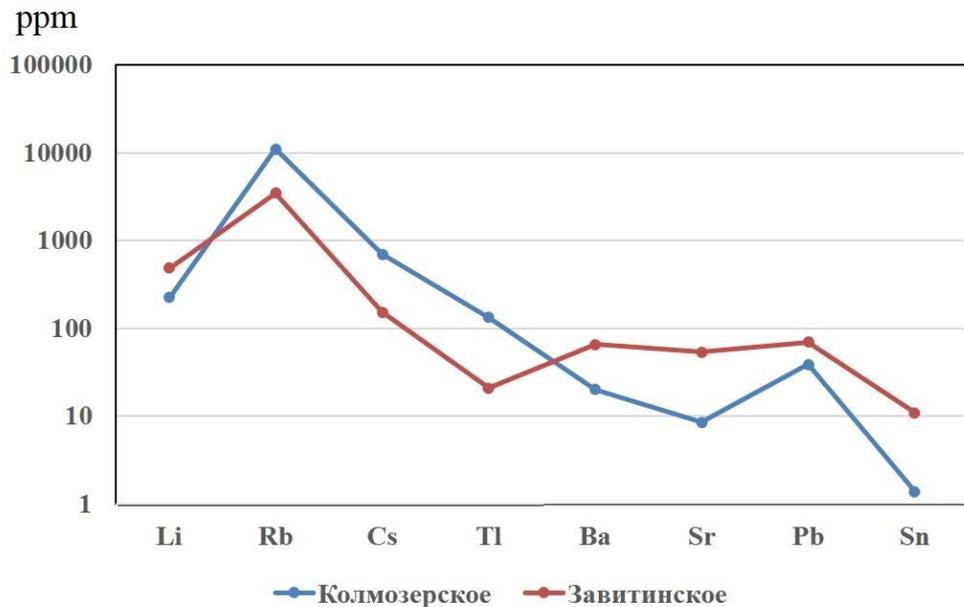
Концентрации Li (среднее) в мусковите (890 ppm), альбите (5,3 ppm) и микроклине (224 ppm) из сподумен-полевошпатового пегматита.

Изученные в одном шлифе сподумен-полевошпатового пегматита концентрации лития в мусковите (среднее 890 ppm), КПШ (224 ppm) и альбите (5,3 ppm) показывают, что литий в этих минералах распределяется по схеме:

$$Ms_{Li} \gg Mc_{Li} \gg Ab_{Li}$$

Распределение Li, Rb, Cs, Tl, Ba, Sr, Pb, Sn в КПШ из пегматитов Колмозерского и Завитинского месторождений,

Калиевый полевой шпат из пегматитов Колмозерского месторождения по сравнению с калиевым полевым шпатом из пегматитов Завитинского месторождения имеет более высокие концентрации Rb (среднее, 11088 и 3470 ppm, соответственно), Cs (698 и 153 ppm, соответственно), Tl (133 и 21 ppm, соответственно) и более низкие концентрации Li (224 и 486 ppm, соответственно), Ba (20 и 66 ppm, соответственно), Sr (8,5 и 54 ppm, соответственно), Pb (39 и 70 ppm, соответственно), Sn (1,4 и 11 ppm, соответственно).



## Патчемварекский массив. Околожилные изменения пород и их поисковое значение

Вмещающие породы на контакте с жилами пегматитами всегда изменены. Характер этих изменений и интенсивность их проявления меняются даже в пределах одного и того же месторождения и зависят от различных факторов: состава вмещающих пород, состава и степени обогащения пегматитовых расплавов летучими компонентами, глубины формирования пегматитов, тектонической обстановки, морфологии тел и других факторов.

При нахождении пегматитов в основных породах мощность зоны контактного ореола достигает 10-20 и даже 50 см, но влияние пегматитов в той или иной форме сказывается иногда на расстоянии до 5-10 м. Как правило, околожилные процессы наиболее интенсивно развиваются со стороны висячего бока рудных тел и в местах изгиба плоскости контакта (Гинзбург, 1959; Гордиенко, 1970, настоявшее исследование).

### Вмещающие породы

Граниты	Основные породы (габбро)	Известняки, мраморы	Песчано-сланцевые породы
Кристаллизация новых минералов			
Мусковит Турмалин Апатит Литиевый биотит Цинвальдит	Биотит Турмалин Апатит Холмквистит Гранат (альмандин-пироп) Минералы группы эпидота Флюорит	Флогопит Апатит Флюорит Гранат (андрадит) Скаполит Везувиан Волластонит Диопсид	Мусковит Турмалин Апатит Графит Топаз Литиевый мусковит Гранат (альмандин) Кианит, кордиерит, андалузит
Процессы			
Окварцевание Альбитизация Каолинизация	Хлоритизация		Окварцевание Альбитизация Серицитизация Хлоритизация

Околожилные изменения вокруг колмозерских пегматитов происходят за счет выноса во вмещающие породы щелочей лития, калия и в значительно меньшей степени натрия. Это приводит к появлению во вмещающих породах новообразованных минералов, таких как биотит, холмквистит, альбит в процессе литиевого, калиевого и в меньшей степени натриевого метасоматоза.

Вынос во вмещающие породы некоторых летучих элементов – F, P и B, приводит к кристаллизации минералов, не свойственных метагаббро. Бор в основном входит в химический состав турмалина, фосфор – в химический состав апатита. Также в метагаббро отмечается эпидот-клиноцоизит. Содержание новообразованных минералов варьирует в широких пределах – от аксессуарных до второстепенных и главных минералов.

# ХОЛМКВИСТИТ



Кристаллы холмквистита -  $\text{Li}_2(\text{Mg}_3\text{Al}_2)[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$  в образце метагаббро

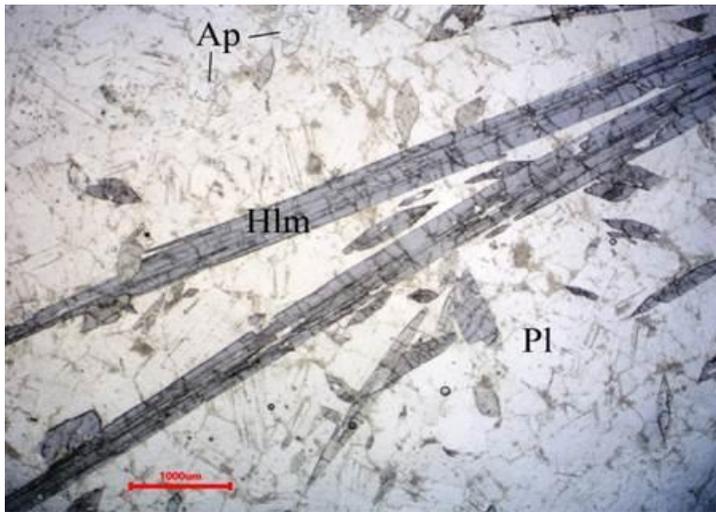
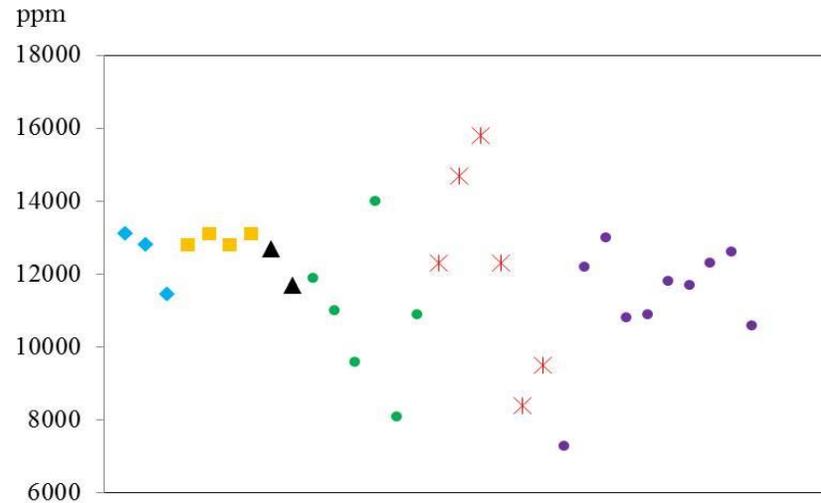
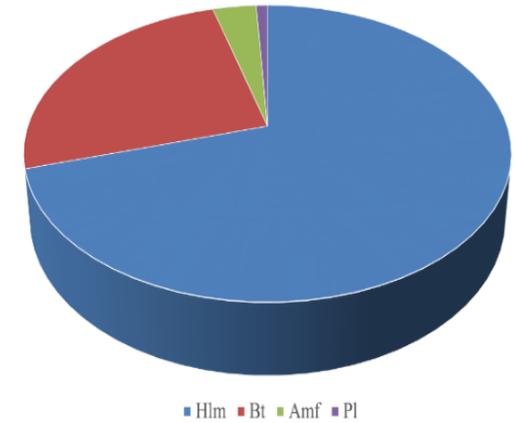


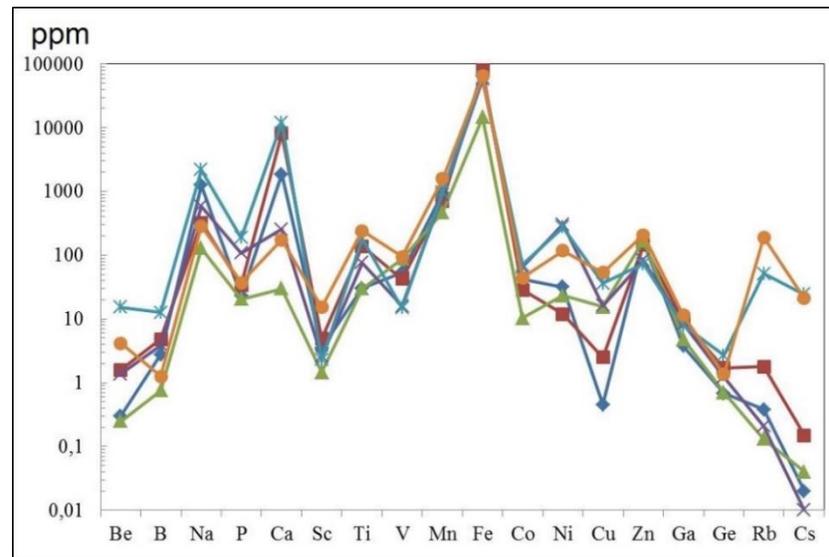
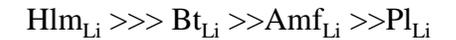
Фото шлифа. Тонко-призматические кристаллы холмквистита. Проходящий свет, николи параллельны. Ap – апатит, Hlm – холмквистит, Pl – плагиоклаз.



Среднее содержание лития в патчемварекском холмквистите составляет 12062 ppm, или 2,60 мас. % в пересчете на  $\text{Li}_2\text{O}$ .



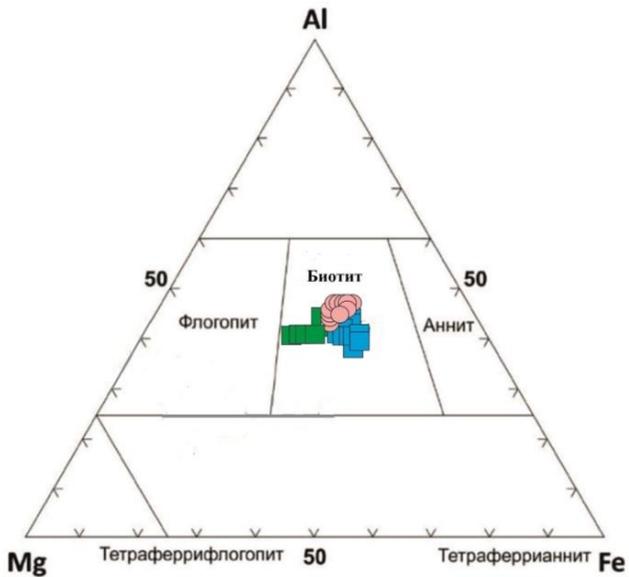
Изученные в одном шлифе метагаббро концентрации лития в плагиоклазе (среднее 159 ppm), амфиболе (609 ppm), биотите (4460 ppm) и холмквистите (12453 ppm), показывают, что литий в этих минералах распределяется по схеме:



Распределение Be, B, Na, P, Ca, Sc, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Rb и Cs в холмквистите

Наличие новообразованного минерала - **холмквистита**, во вмещающих породах является минералогическим критерием редкометалльного (литиевого) оруденения. Холмквистит образуется в процессе литиевого метасоматоза. Роговая обманка вмещающих пород замещается холмквиститом.

# БИОТИТ, ОБОГАЩЕННЫЙ Li, Rb, Cs



Составы биотитов на классификационной диаграмме Al–Mg–Fe (ф.к.). Зеленые квадраты – биотиты из метагаббро, синие квадраты – биотиты из метасоматитов по метагаббро, розовые кружочки – биотиты из зон контактов

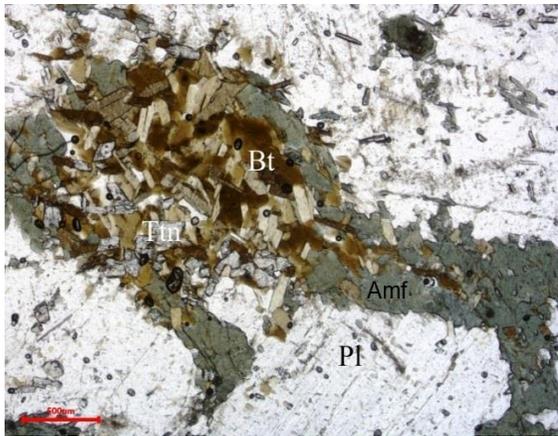
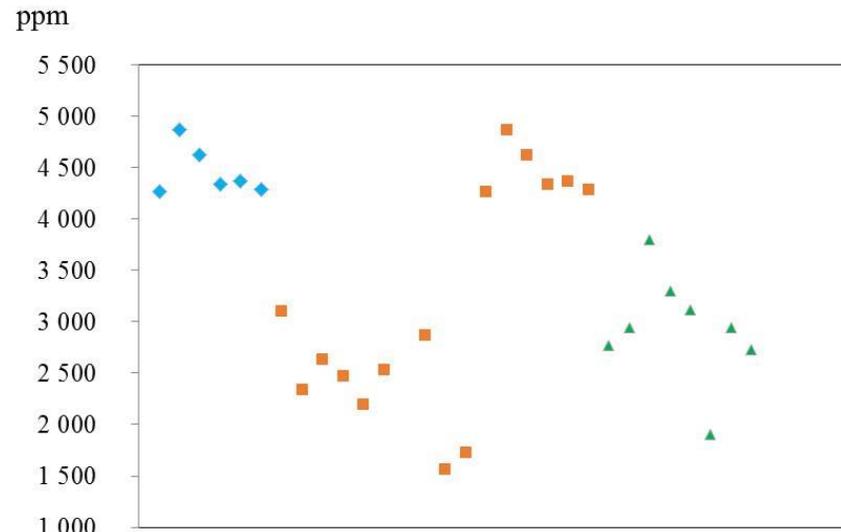
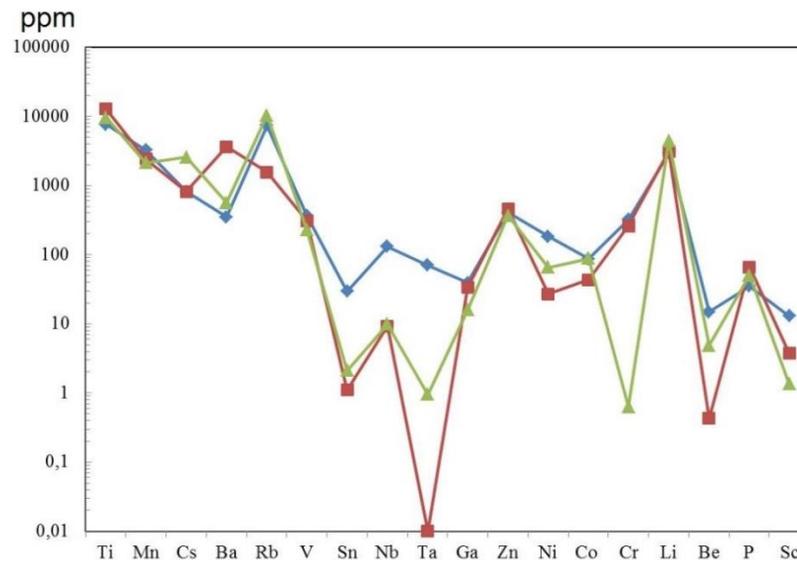


Фото шлифа. Биотит -  $K(Mg,Fe)_3[Si_3AlO_{10}][OH,F]_2$ , образует скопления в ассоциации с амфиболом



Распределение Li в биотите из вмещающих пород.

В биотите среднее содержание Li – 3382 ppm

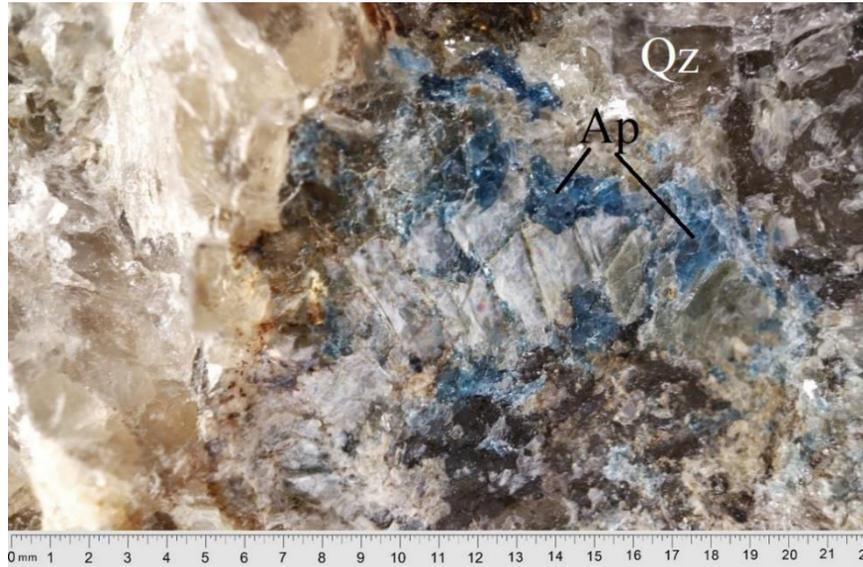


Биотиты обогащены Cs (1288 ppm), Rb (6023 ppm) и Li (3382 ppm)

Наличие новообразованного минерала – биотита, обогащенного Li, Cs и Rb, во вмещающих породах является минералогическим критерием редкометалльного (литиевого) оруденения. Литиевый биотит образуется в процессе калиевого метасоматоза. Роговая обманка вмещающих пород замещается литиевым биотитом.

	Биотит		
	Биотит из гранита	Литиевый биотит из гранита	Биотит из пород Патчемварекского массива
Cs <sub>2</sub> O	-	0,05	<b>1,37</b>
Rb <sub>2</sub> O	-	0,49	<b>0,66</b>
Li <sub>2</sub> O	<b>0,21</b>	<b>0,80</b>	<b>0,72</b>
TiO <sub>2</sub>	1,25	2,11	1,76
MnO	0,36	1,64	0,43

# ТУРМАЛИН, АПАТИТ, МИНЕРАЛЫ ГРУППЫ ЭПИДОТА



Кристаллы фторапатита (Ap) в кварц-альбитовом агрегате

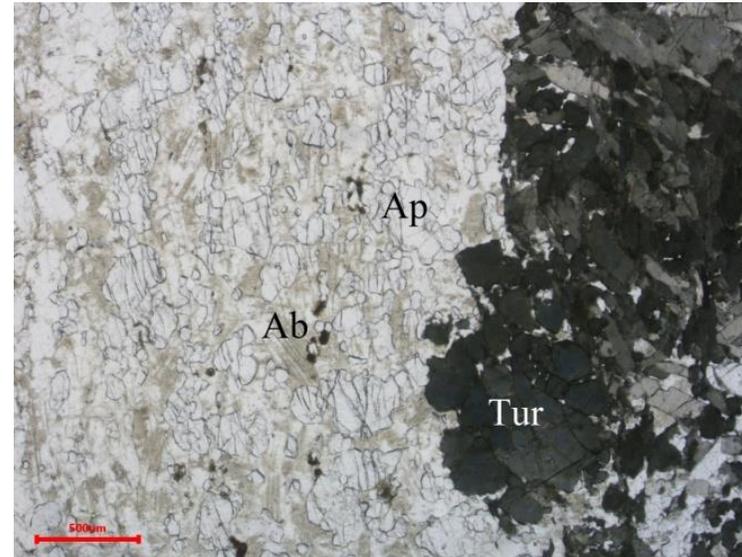
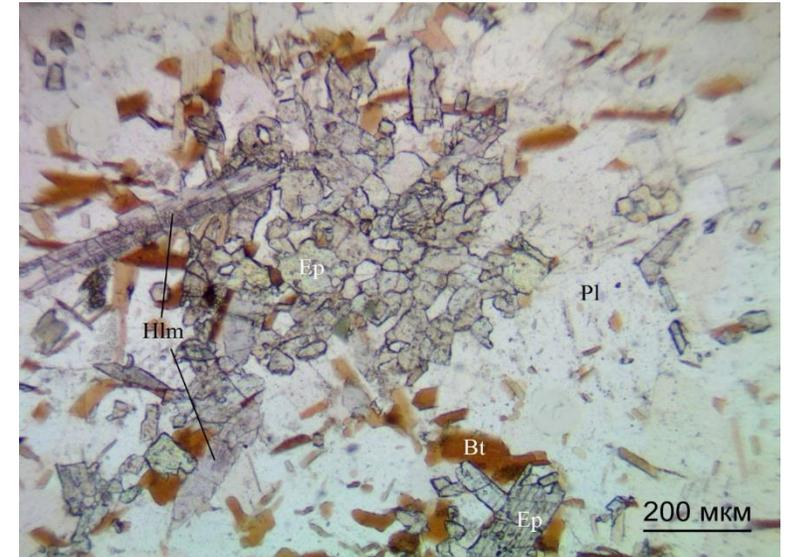
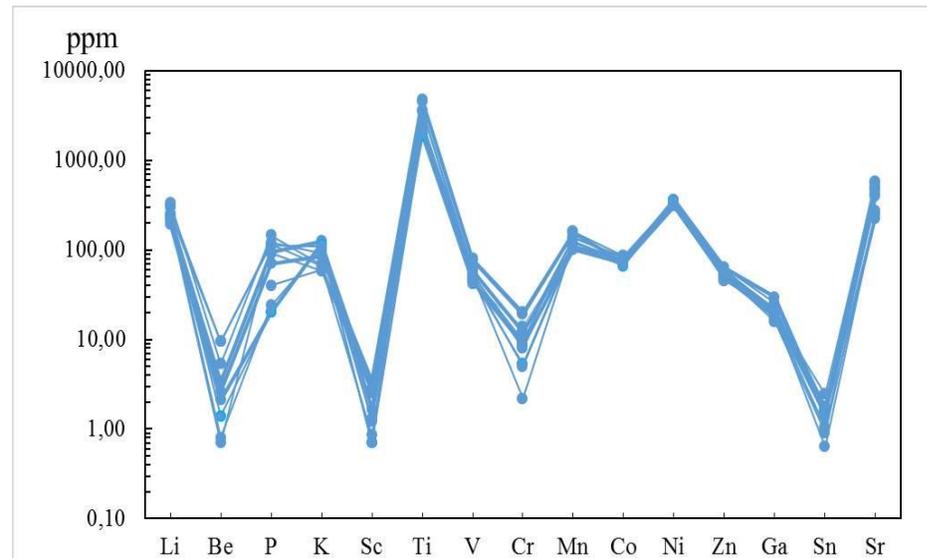


Фото шлифа. Скопление зерен апатита и турмалина в зоне контакта кварц-альбитового пегматита и амфиболита. Ap – апатит, Tur – турмалин, Ab – альбит.



Зерна эпидотизированного плагиоклаза, в интерстициях между которыми наблюдается холмквистит-плагиоклаз-биотит-эпидотовый агрегат



Распределение редких элементов в турмалине. Высокие концентрации характерны для Li (257ppm), Ti (среднее 2874 ppm), Sr (409,75 ppm), Mn (122,6 ppm).

Наличие **турмалина и фторапатита** в зонах контактов пегматитов с вмещающими породами является минералогическим критерием редкометалльного (литиевого) оруденения. Фторапатит отмечается в зоне контакта пегматитов с метагаббро и присутствует в жилах пегматитов.

# ВЫВОДЫ

- 1) Колмозерское месторождение приурочено к Патчемварекскому массиву метагаббро-анортозитов, расположенному в зоне сочленения архейских структур регионального уровня - Мурманской и Кольской провинций. Эта зона интерпретируется как архейский зеленокаменный пояс Колмозеро-Воронья или зона трансформационного сдвига.
  - 2) Морфологически тела пегматитов представляют собой плитообразные дайки (жилы) большой протяженности и мощности, сгруппированные в узких тектонических зонах, сближены друг с другом, имеют сходные элементы залегания и крутые или средние углы падения.
  - 3) Колмозерское месторождение располагается в одноименном пегматитовом поле, в котором кроме альбит-сподуменовых пегматитов (Колмозерское месторождение) с Be-Nb-Ta-Li-минерализацией присутствуют полевошпатовые пегматиты с Be-минерализацией и мусковит-полевошпатовые пегматиты с Be-Nb-Ta-минерализацией. От полевошпатовых пегматитов к альбит-сподуменным пегматитам отмечается уменьшение содержаний  $\sum REE$ , Ba, Sr и величины отношений (индексов фракционирования) - Zr/Hf и Mg/Li, и увеличение содержаний Li, Nb, Ta.
  - 4) В колмозерских пегматитах основным минералом лития и главным породообразующим минералом является сподумен. Среднее содержание  $Li_2O$  в сподумене составляет 7.44 мас. %. Среди элементов-примесей в сподумене преобладают Na, Mn и Fe при доминировании Fe.
  - 5) Мусковит и микроклин из колмозерских пегматитов обогащены Li, Rb и Cs.
  - 6) Во вмещающих породах Патчемварекского массива, а также в зонах контактов выявлены новообразованные минералы – холмквистит, биотит, турмалин, апатит, не свойственные вмещающим породам.
  - 7) Холмквистит является породообразующим и главным минералом лития в метасоматитах по метагаббро. Среднее содержание лития в холмквистите составляет 12062 ppm, или 2,60 мас. % в пересчете на  $Li_2O$ .
  - 8) Амфибол и плагиоклаз обогащены Li, а биотит обогащен Li, Rb и Cs в породах Патчемварекского массива, что указывает на влияние высокофракционированных пегматитовых расплавов с редкометалльной минерализацией на породы Патчемварекского массива.
- Полученные результаты могут быть использованы как геологические, геохимические и минералогические критерии для поисков редкометалльных пегматитов с литиевой минерализацией.

Описание шлифов, выполнили сотрудники ФГБУ ВИМС:

- ведущий научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук Сычева Н.А.,
- ведущий научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук Рундквист Т.В.,
- старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук Прозорова М.В.
- младший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук Барнышева Т.А.,
- ведущий специалист Жукова В.Е.,
- специалист Скорынин И.А.

Геологи:

- Чепчугов А.М.,
- Полбина К.А.,
- Русакова М.-А.,
- Прозоров В.А.,
- Бабинцева Е.И.,
- Акулов. Г.А.,
- младший научный сотрудник Абрамова В.Д. (метод LA-ICP-MS)
- ведущий инженер Чешкова П.В. (метод электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа)
- Фотографии образцов выполнила зам. начальника геолого-производственного отдела по геологии геологического отделения №2 Зеленская А.В.
- Ответственный исполнитель - кандидат геолого-минералогических наук Дорожко А.Л.

**Доклад согласован с ООО «Полярный Литий»**

**В докладе результаты исследований, составляющие коммерческую тайну,  
отсутствуют.**

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФ. Грант № 22-17-20002,  
<https://rscf.ru/project/22-17-20002/>*