

Научно-практическая конференция «Актуальные проблемы поисковой геологии»  
ФГБУ ВИМС, Москва

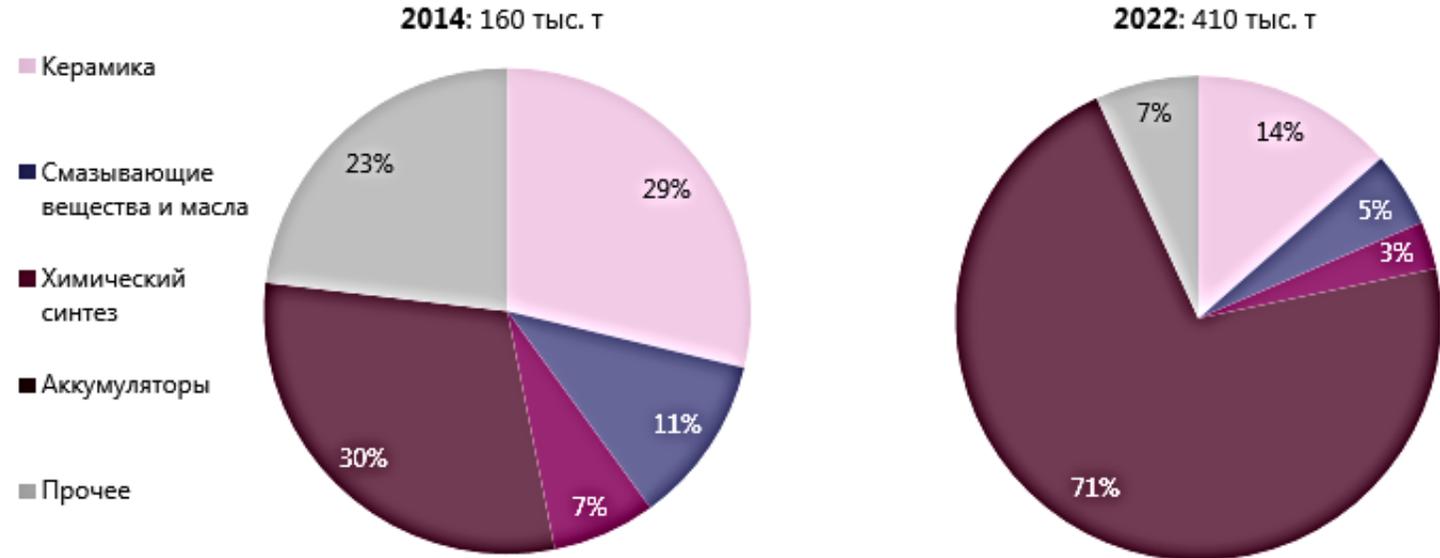
**Геохимические и минералого-геохимические критерии рудоносности литиевых пегматитов (на примере Колмозерского месторождения, Кольский полуостров, Россия)**



Морозова Л.Н.<sup>\*,\*\*</sup>, Базай А.В.<sup>\*\*</sup>  
ФГБУ ВИМС<sup>\*</sup>, г. Москва; ФГБУ ГИ КНЦ РАН<sup>\*\*</sup>, г. Апатиты

Москва, ВИМС - 2022

# Структура потребления лития в мире



Источники: Albemarle, прогнозы АКРА



С учетом прогнозируемого роста количества электромобилей - до 50–70 млн единиц к 2025 г., сегмент автомобильных аккумуляторов в общей структуре спроса на металлургическую продукцию с 2014 по 2022 г. увеличился с 30% до 71%.

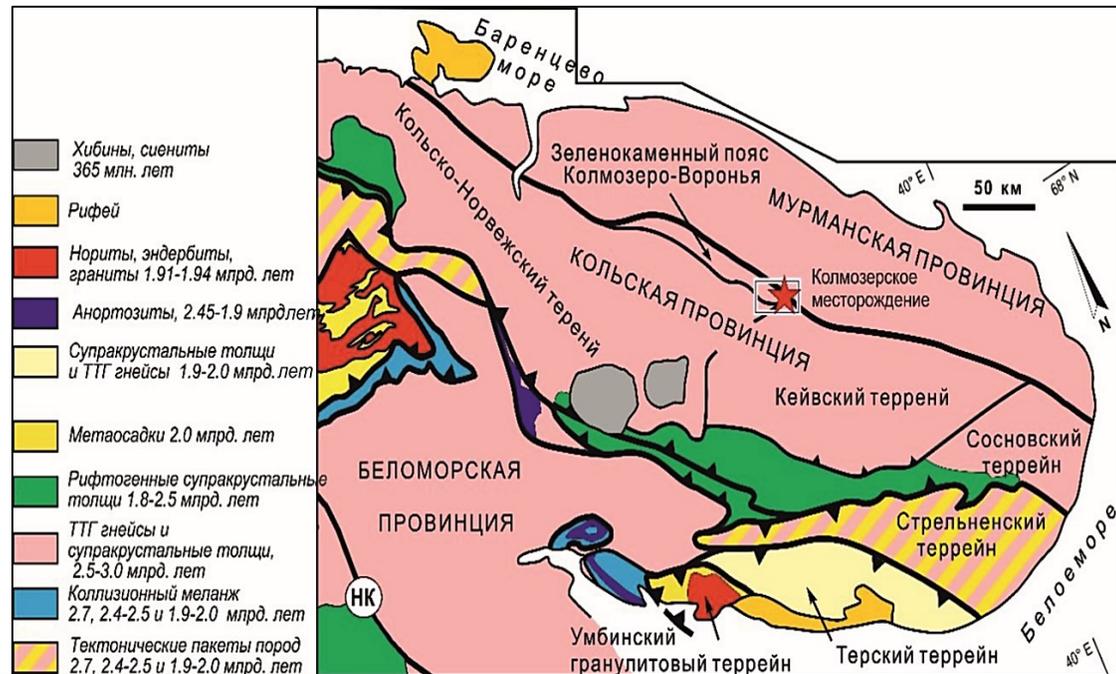


# Минерально-сырьевая база лития в мире и РФ

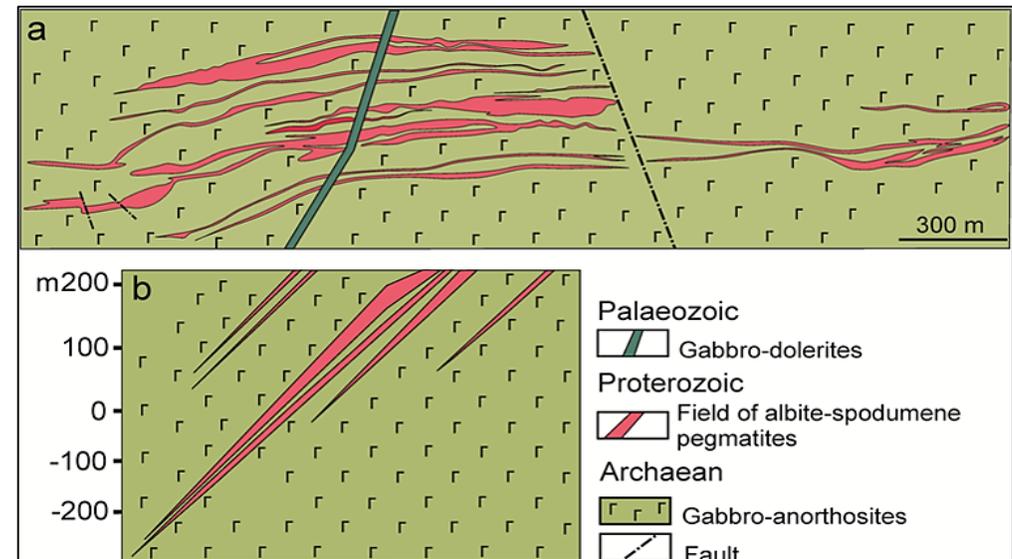


В РФ основные запасы лития сосредоточены в гранитных пегматитах Восточной Сибири (месторождения: Гольцовое, Белореченское, Урикское, Завитинское (отработано) и Мурманской области (месторождения: Колмозерское, Полмостундровское, Васин-Мыльк).

# Колмозерское месторождение лития



Положение Колмозерского месторождения на тектонической схеме северо-восточной части Фенноскандинавского щита (Daly et al., 2006)



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

Колмозерское месторождение приурочено к Потчеварекскому массиву метагаббро-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). Месторождение представлено 12 крупными и множеством мелких тел (жил) сподуменовых пегматитов, вмещающими породами для которых являются метагаббро-анортозиты Потчеварекского массива. Жилы пегматитов плитообразной формы, большой протяженности (до 1700 м), мощностью от 5 до 65 м, крутопадающие (Аз. пад ЮЗ, < до 75°), не зональные, секущие по отношению к метагаббро-анортозитам. Жилы пегматитов секутся дайкой габбро-долеритов. Крупный сброс разделяет месторождение на два участка – г. Малый и Большой Потчеварек и пересекает все породы, включая пегматитовые жилы.

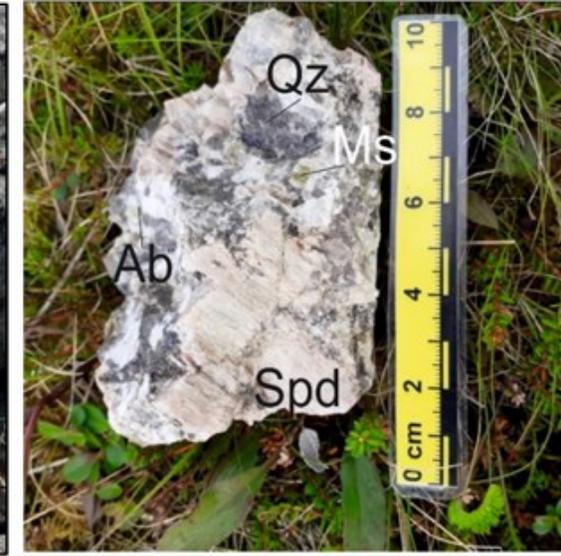
# Колмозерское месторождение. Строение пегматитовых жил



Qz-Ab-Spd пегматит



Сподумен



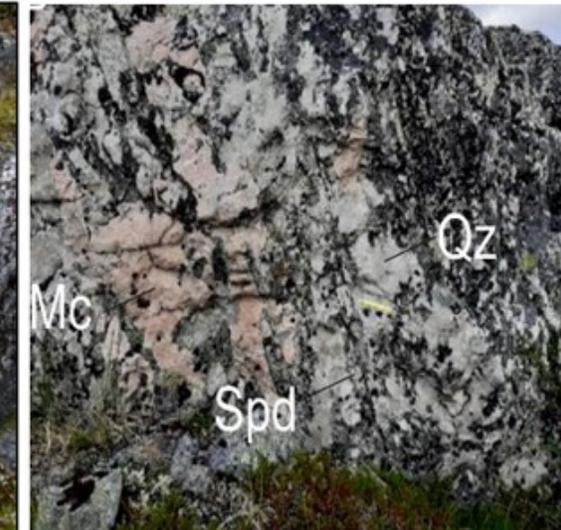
Сподумен



Qz-ПШ-Spd пегматит



Qz-ПШ-Spd пегматит



Qz-ПШ-Spd пегматит

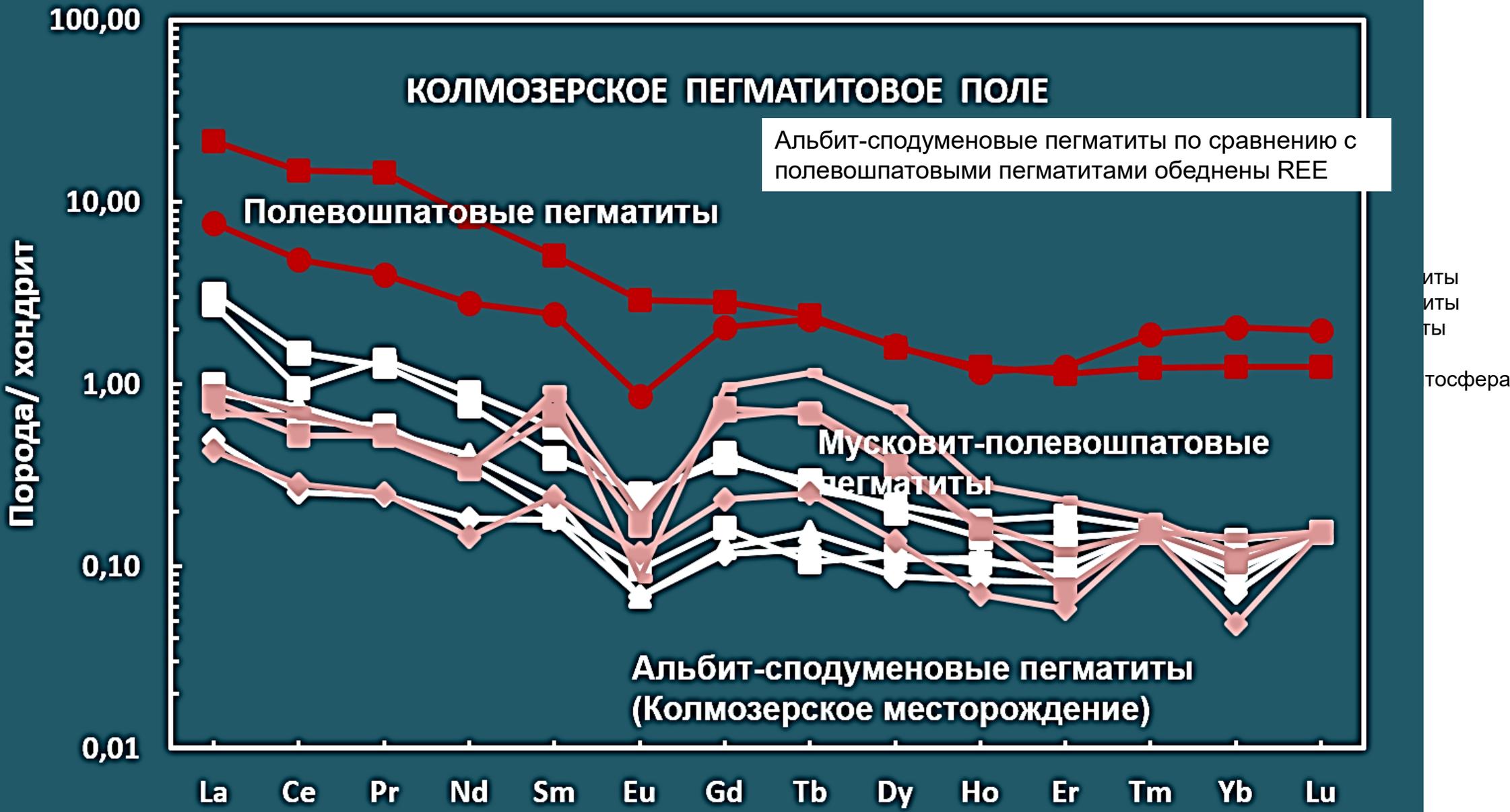
## Колмозерское месторождение. Минералогия

Основными минералами редкометалльных пегматитов Колмозерского месторождения являются: кварц (30–35%), альбит (30–35%), микроклин (10–25 %), сподумен, основной минерал лития, (~ 20 %) и мусковит (5-7%). Акцессорные бериллы и минералы группы колумбита могут представлять промышленный интерес как источники Be, Ta и Nb, соответственно. Другие акцессорные минералы включают спессартин и апатит, реже литиофилит ( $\text{LiMnPO}_4$ ), трифилит ( $\text{LiFePO}_4$ ) и турмалин. Всего в пегматитах Колмозерского месторождения установлено 64 минеральных вида (Гордиенко, 1970).

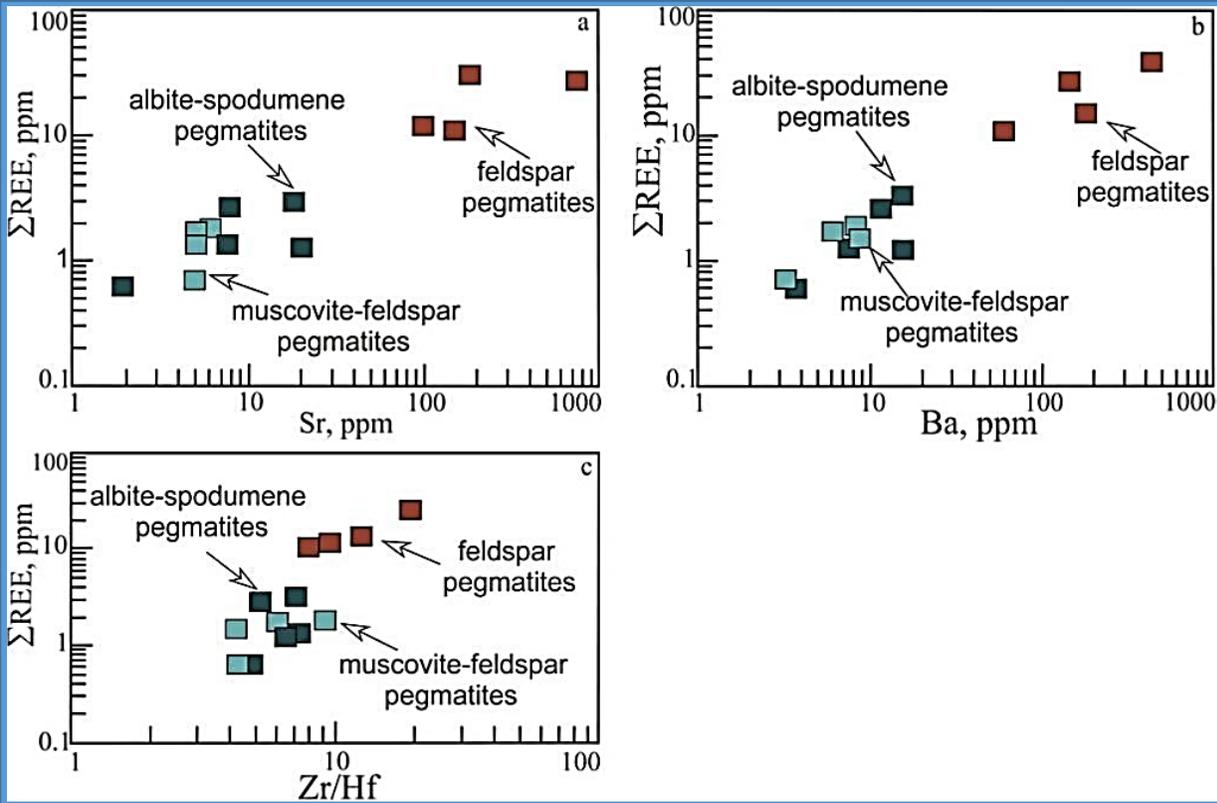
### Распределение $\text{Li}_2\text{O}$ в минералах Колмозерского месторождения

Минералы	Распределение $\text{Li}_2\text{O}$ в минералах от валового содержания в пегматитах (%)
Сподумен – $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	96.95
Альбит – $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	1.93
Мусковит – $\text{KA}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	0.45
Литиофилит – $\text{LiMnPO}_4$	0.31
Микроклин – $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	0.30
Кварц – $\text{SiO}_2$	0.03
Берилл – $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_{18})$	0.02
Сумма	99.99

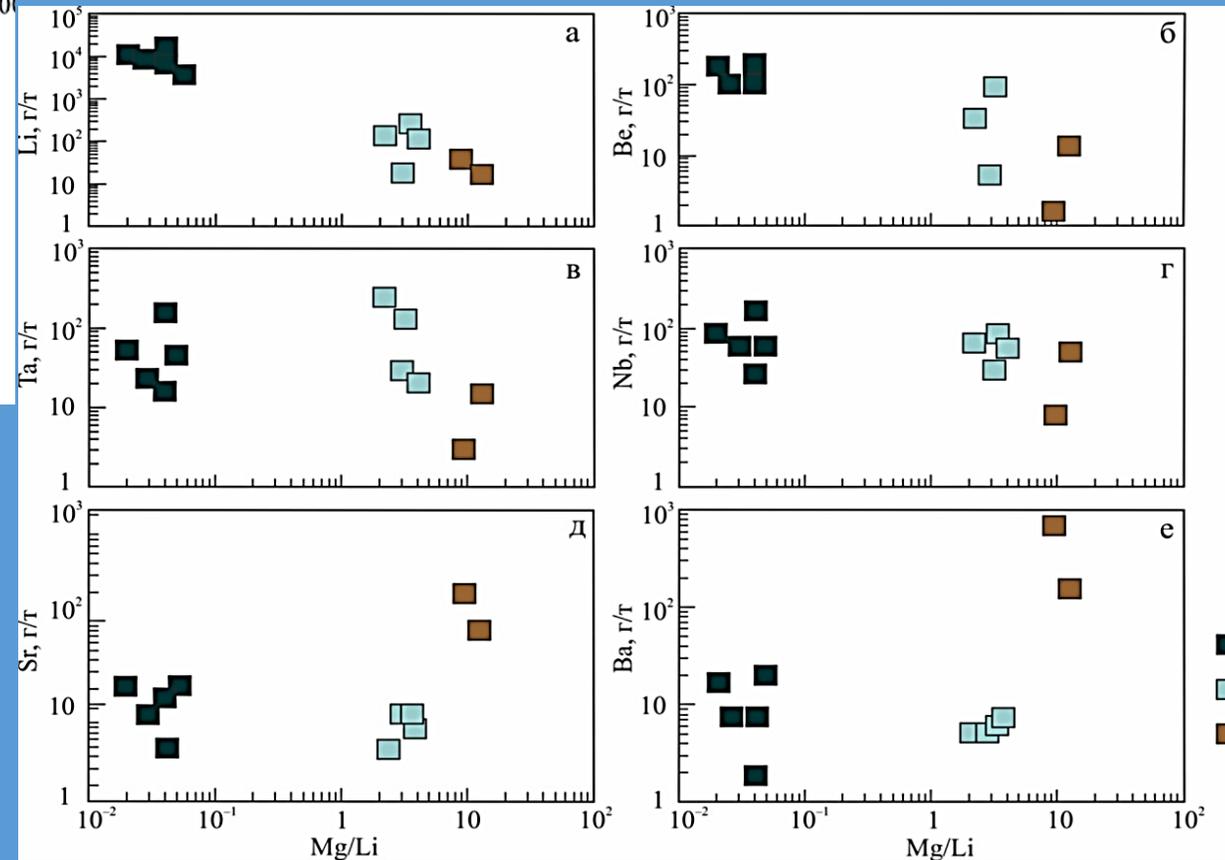
Источник: Гордиенко, 1970



# Колмозерское пегматитовое поле. Геохимические критерии редкометалльного оруденения

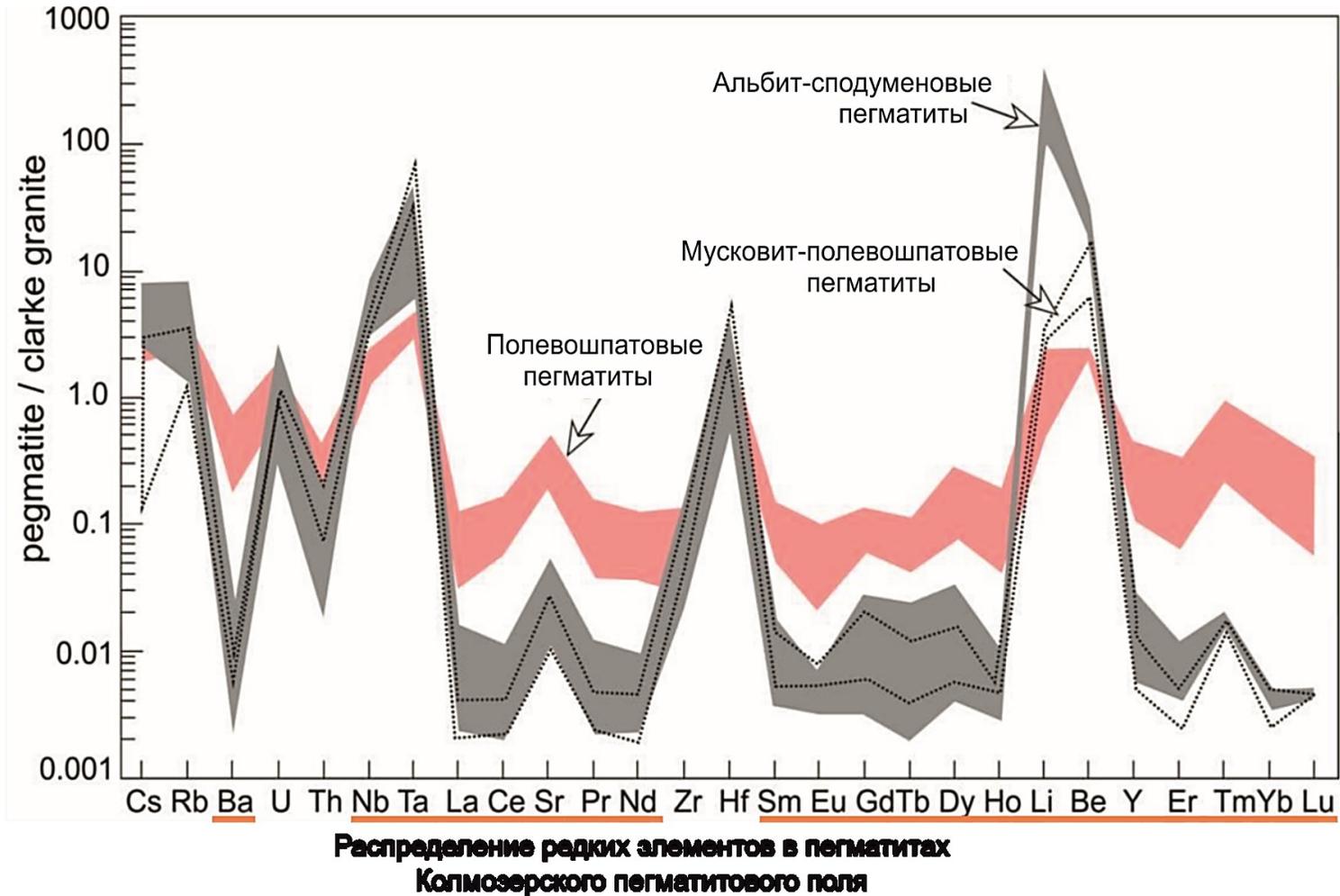


От полевошпатовых пегматитов к альбит-сподуменовым пегматитам отмечается уменьшение содержаний  $\Sigma\text{REE}$ , Ba, Sr и величин отношений (индексов фракционирования) - Zr/Hf и Mg/Li, и увеличение содержаний Li, Ta, Nb и Be.



ПШ пегматиты – красные квадраты  
 Мусковит-полевошпатовые пегматиты – голубые квадраты  
 Альбит-сподуменовые пегматиты – темно-зеленые квадраты

## Колмозерское пегматитовое поле. Геохимические критерии редкометалльного оруденения

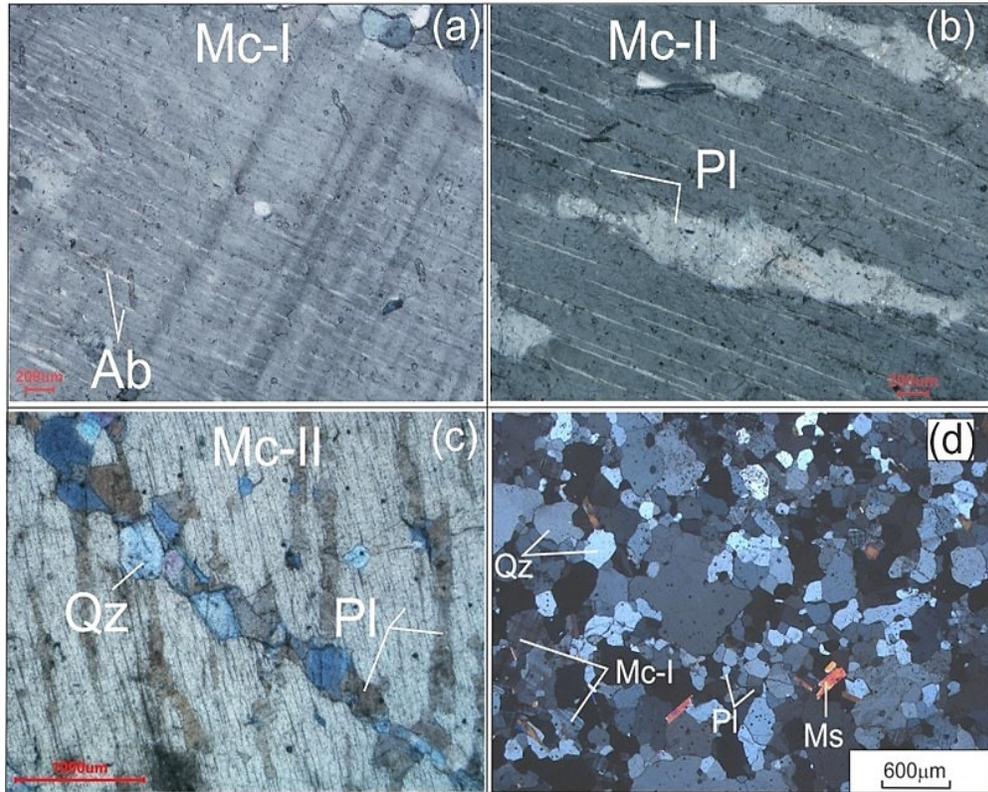


Элементы, отношения элементов	ПШ пегматиты	Ab-Spd пегматиты
	ppm, среднее	
Li	65	5899
Nb	30	81
Ta	9.3	59
Be	14	141
ΣREE	20	1.8
Y	3	0.3
Ba	446	11
Sr	98	11
Zr/Hf	14.5	6.2
Mg/Li	10.8	0.04

Источник: Морозова, 2018 / Литосфера

В альбит-сподуменовых пегматитах по сравнению с полевошпатовыми пегматитами содержание Ba ниже в 40 раз, Sr – в 9 раз, REE – в 11 раз. Значимые различия установлены по величинам отношений Zr/Hf и Mg/Li.

# Колмозерское пегматитовое поле. Минералого-геохимические критерии редкометалльного оруденения



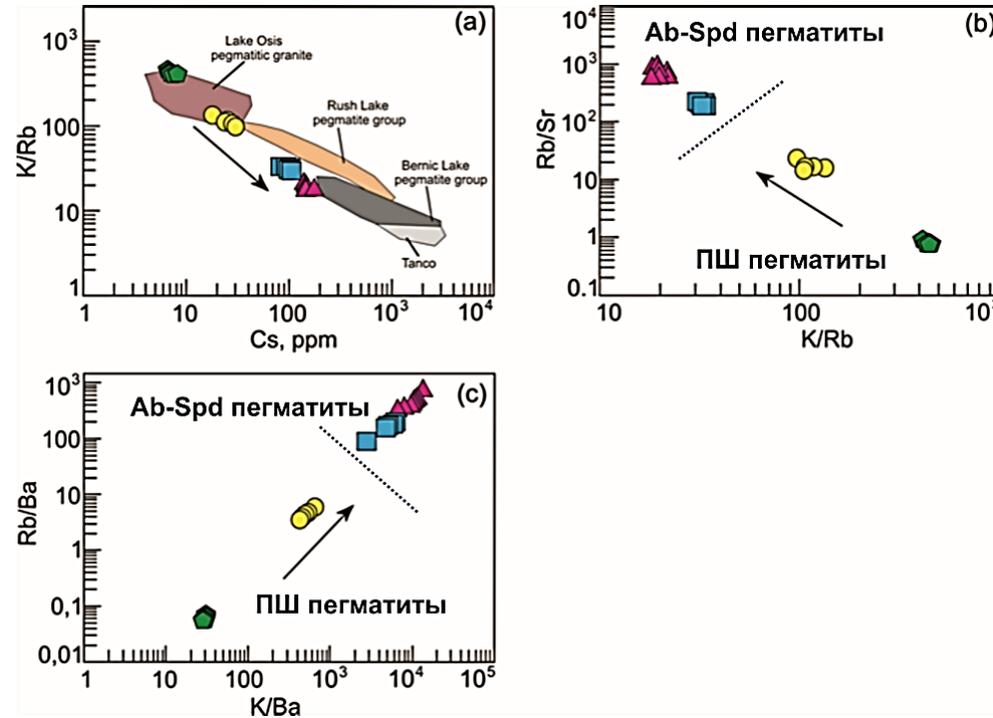
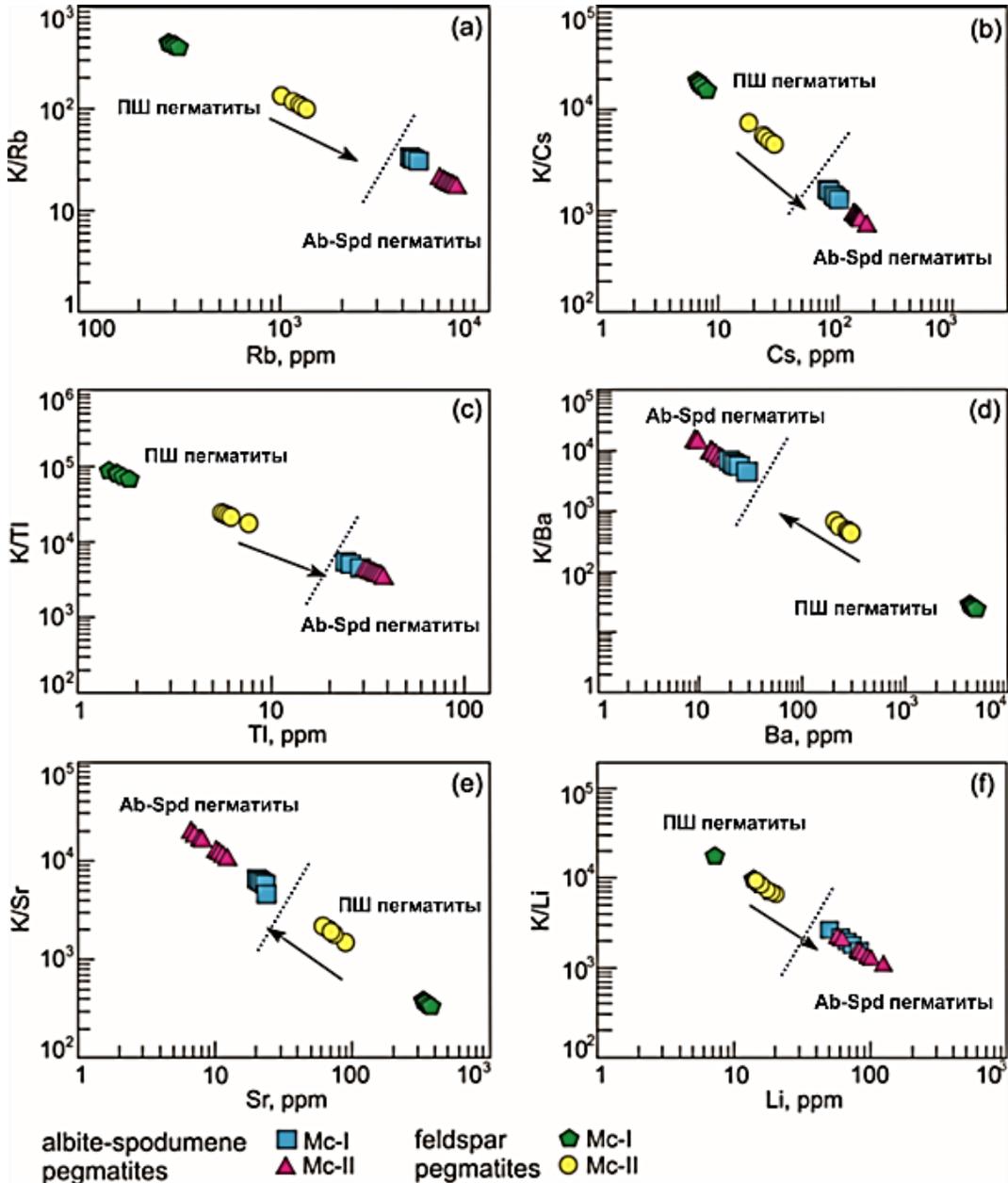
Фотографии шлифов. а-с – Mc-I и Mc-II из пегматитов Колмозерского месторождения; d – Mc-I из полевошпатовых пегматитов

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

В колмозерском калиевом полево шпате наиболее важными второстепенными элементами являются Rb, Cs, Li и Tl. В Mc-I и Mc-II типичные примесные элементы входят в кристаллическую решетку КПШ в следующем порядке: Rb >>Cs >Li >Tl. Однако Ba (Ba>>Sr >Rb) является преобладающим второстепенным элементом в микроклине-I из полевошпатовых пегматитов Колмозерского пегматитового поля. Но в микроклине-II из полевошпатовых пегматитов второстепенные элементы располагаются следующим образом: Rb>>Ba >Sr.

# Колмозерское пегматовое поле. Минералого-геохимические критерии редкометалльного оруденения



Микроклины из альбит-сподуменовых пегматитов по сравнению с микроклинами из полевошпатовых пегматитов обогащены Rb, Cs, Tl, Li и обеднены Ba и Sr. 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  $K/Ba$ ,  $K/Sr$ ,  $Rb/Sr$ ,  $Rb/Ba$ . Тенденции, наблюдаемые на Колмозерском месторождении, позволяют предположить следующую последовательность кристаллизации калиевого полевого шпата (от раннего к позднему): микроклин-I (полевошпатовый пегматит) → микроклин-II (полевошпатовый пегматит) ~/-> микроклин-I (сподумен пегматит) → микроклин-II (сподуменовый пегматит). Эти тренды указывают на возможную генетическую связь между полевошпатовыми и альбит-сподуменовыми пегматитами и решающую роль фракционной кристаллизации в эволюции колмозерской пегматовой системы

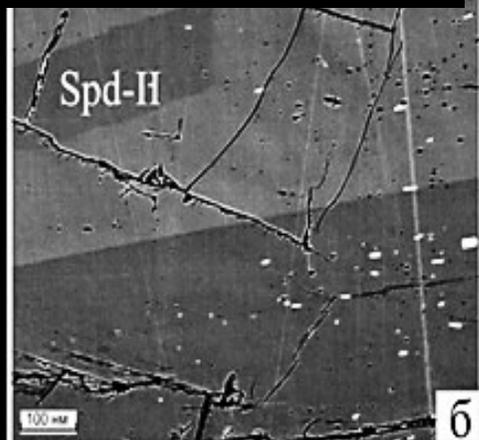
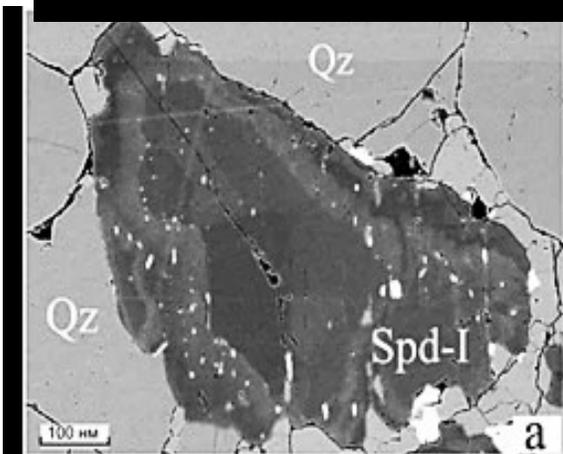
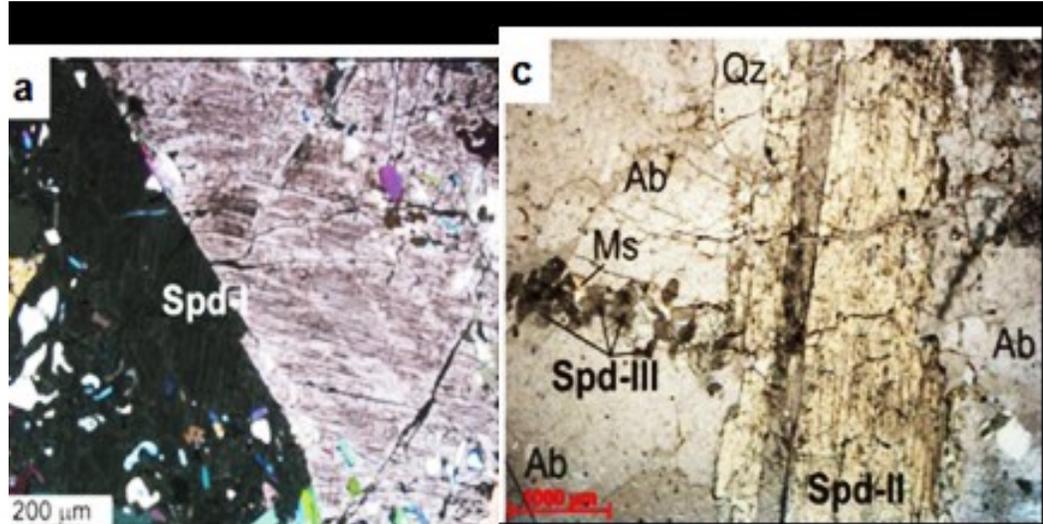
## Колмозерское пегматитовое поле. Минералого-геохимические критерии редкометалльного оруденения

Тип пегматитов / Индикаторные отношения	Полевошпатовые пегматиты		Альбит-сподуменовые пегматиты	
	Мс-I	Мс-II	Мс-I	Мс-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

Источник:  
Morozova et al., 2022 / Minerals

Индикаторные отношения могут быть использованы для определения временной эволюции колмозерской пегматитовой системы, а также в качестве эффективного инструмента при разведке полезных ископаемых на литий, так как калиевый полевой шпат повсеместно встречается в различных типах пегматитов.

# Состав колмозерского сподумена. Минералого-геохимические критерии редкометалльного оруденения



## 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

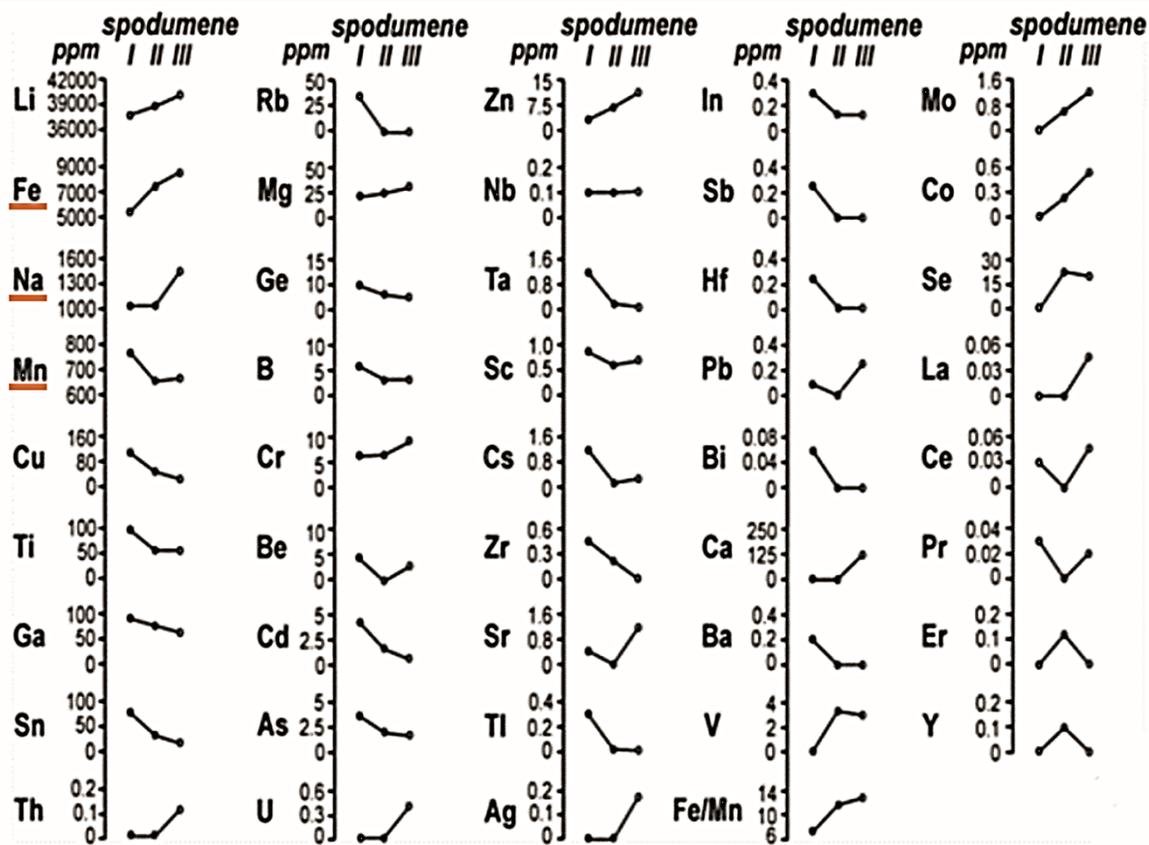
Основным минералом лития в колмозерских пегматитах является сподумен, встречающийся в трех генерациях, обозначенных как Spd-I, Spd-II и Spd-III. Среднее содержание Li<sub>2</sub>O в колмозерских сподуменах составляет 7.44 мас. %.

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)

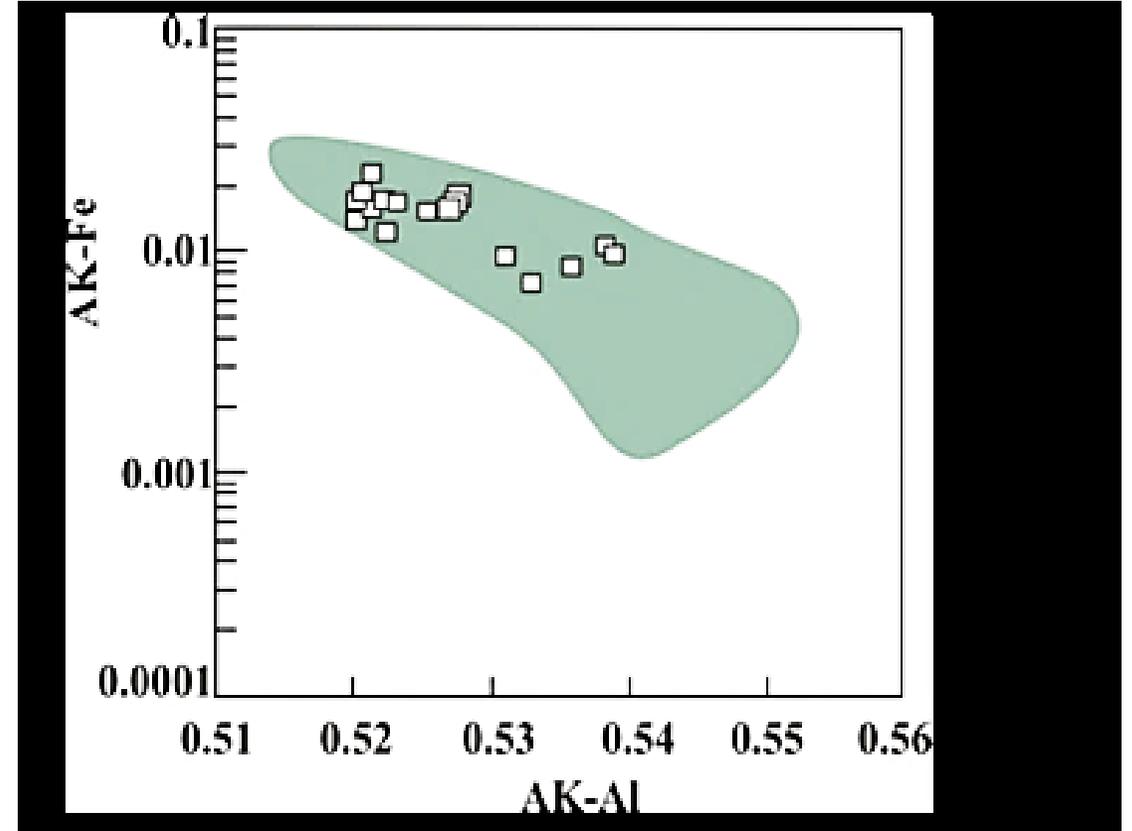
Источник: Морозова, Базай, 2019 / Записки Российского минералогического общества.

# Состав колмозерского сподумена. Минералого-геохимические критерии редкометалльного оруденения

## Редкоэлементный состав колмозерского сподумена



Генерации сподумена – I, II и III.

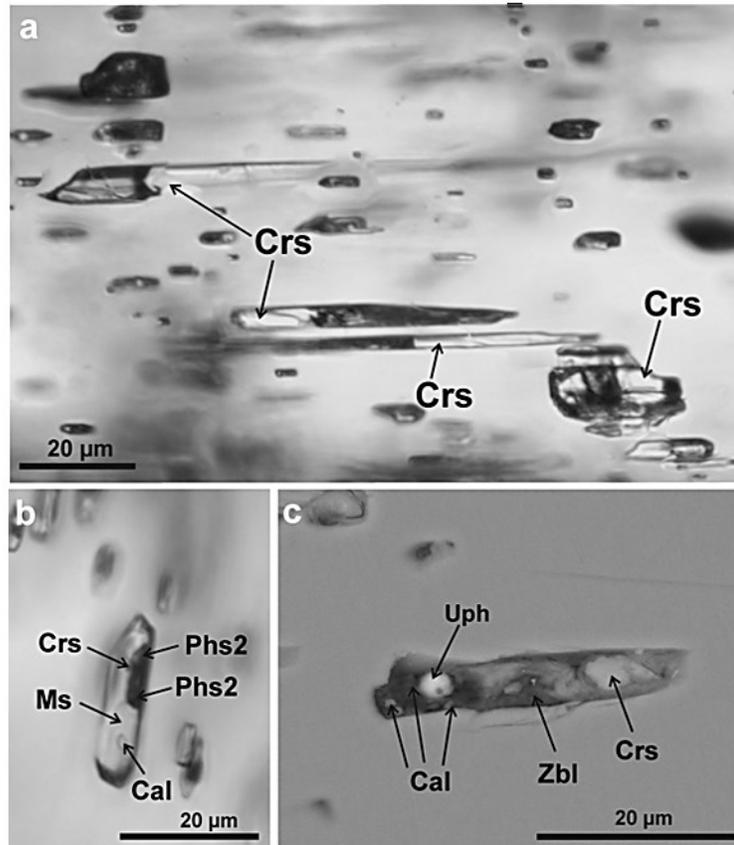


Состав колмозерского сподумена (белые квадраты) смещается в сторону высоко-железистых сподуменов

Типичные элементы-примеси в сподумене - Fe, Na и Mn при доминировании Fe.

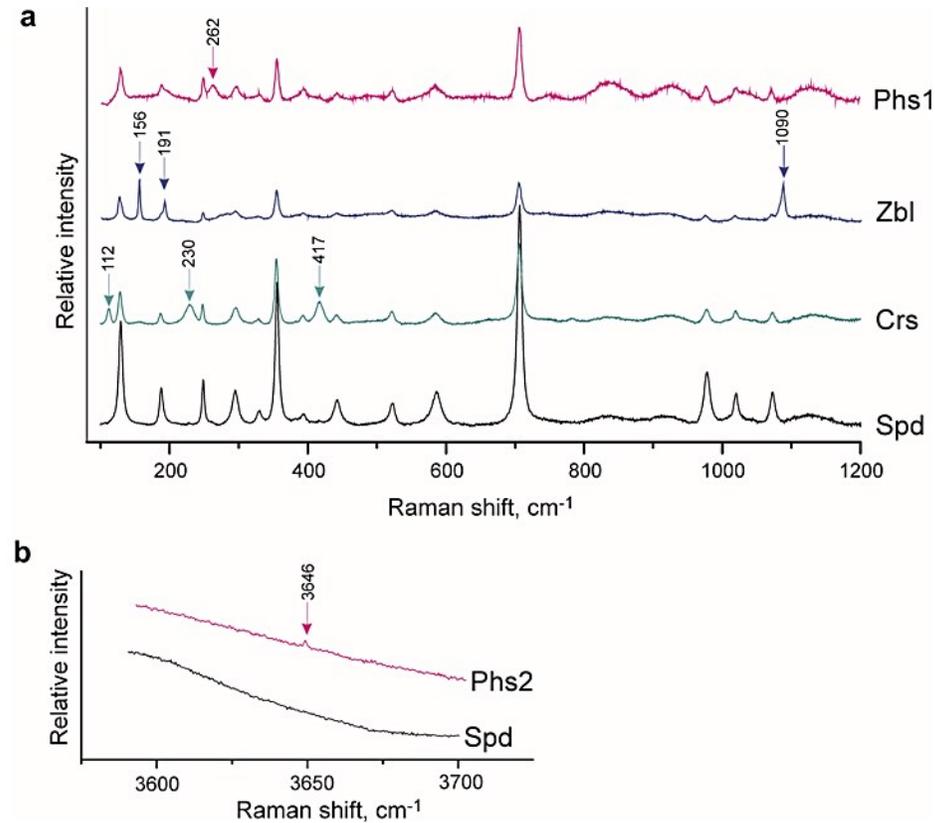
Источник: Morozova et al., 2020 / Mineralogical Magazine

# КРИСТАЛЛОФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В КОЛМОЗЕРСКОМ СПОДУМЕНЕ



Микрофотографии кристаллофлюидных включений в Spd-II

Crs – кристобалит ( $\text{SiO}_2$ ); Spd – сподумен; Phs1, Phs2 – неидентифицированный филлосиликат; Zbl ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) – забуелит; Cal – кальцит; Ms – слюда; UPh, неизвестная фаза (алюмосиликат Fe-Mg-K)



Рамановские спектры твердых фаз в кристаллофлюидных включениях в Spd-II

Минеральные фазы в кристаллофлюидных включениях в Spd-II включают: забуелит, кристобалит, кальцит, слюду и неидентифицированные филлосиликат и алюмосиликат. Забуелит и кристобалит ранее в колмозерских пегматитах не отмечались и интерпретируются как продукты реакции между захваченным флюидом и Spd-II. Предполагается, что исходный флюид, существовавший при кристаллизации сподумена (+ кварца), состоял из  $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$  + растворенные щелочные карбонаты/

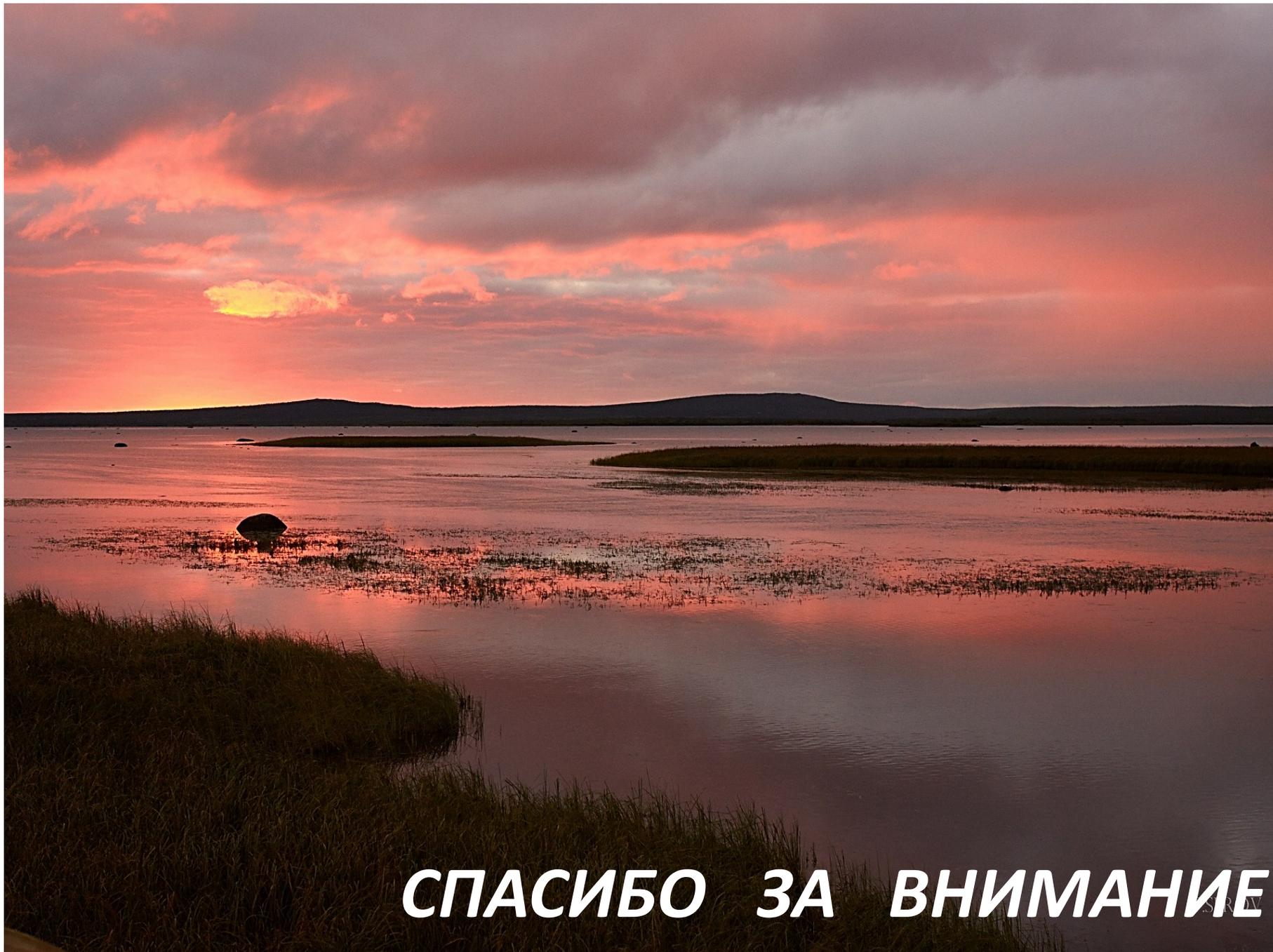
Источник: Morozova et al., 2020 / Mineralogical Magazine.

# ВЫВОДЫ

## Прогнозно-поисковые критерии редкометалльной (литиевой) минерализации на примере Колмозерского месторождения

Прогнозно-поисковый критерий /признак		Описание	
Минералогический и минералогический-геохимический	Рудные породообразующие минералы	Сподумен	Содержание сподумена в пегматитах – 20%. Среди второстепенных элементов в составе сподумена преобладают Fe, Mn, Na, при доминировании Fe. Содержание Li <sub>2</sub> O составляет 7.44 мас. %
	Породообразующие минералы	Микроклин	Главные элементы примеси: Rb >>Cs >Li >Tl Индикаторные отношения: K/Rb ≤ 30; K/Tl ≤ 5500; K/Cs ≤ 1600; K/Li ≤ 2700, K/Ba ≥ 2800, K/Sr ≥ 4200, Rb/Sr ≥ 150, Rb/Ba ≥ 90.
		Плагиоклаз	Плагиоклаз по составу отвечает альбиту
	Акцессорные минералы	Апатит	Голубой, синий, сине-зеленый марганец-содержащий апатит
	Вмещающие породы		Наличие во вмещающих метагаббро-анортозитах и амфиболитах холмквистита
Геохимический	Альбит-сподуменовые пегматиты	Высокие содержания Li на фоне низких содержаний (ppm) REE (1.8), Ba (11), Sr (11), Y (0.3) и низких величин индексов фракционирования – Mg/Li (0.4) и Zr/Hf (6.3)	
Структурно-морфологический		Жилы пегматитов плитообразной формы, большой протяженности (до 1700 м), крутопадающие (Аз. пад ЮЗ, < до 75°), не зональные. До 85-90% объема жил сложено Qz-ПШ-Spd пегматитом от средне- до гигантозернистой структуры. Отсутствуют миароловые пустоты и пегматиты графической структуры.	
Тектонический		Колмозерское месторождение приурочено к Потчемварекскому массиву метагаббро-анортозитов, расположенному в зоне сочленения архейских структур регионального уровня - Мурманской и Кольской провинций.	

**Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке  
гранта РФФ № 22-17-20002, <https://rscf.ru/project/22-17-20002/>**



***СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ***