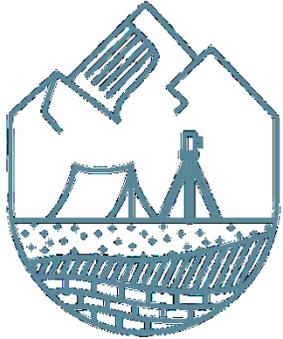


НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОИСКОВОЙ ГЕОЛОГИИ»

22–24 ноября 2022 г., г. Москва



ФГБУ «ВИМС»



ИНСТИТУТ
ГЕОЛОГИИ И
МИНЕРАЛОГИИ
имени В.С. Соболева СО РАН

Характеристики кианитовых и андалузитовых концентратов из
высокоглиноземистых метаморфических пород Заангарья Енисейского края

Некипелова А.В., Сокол Э.В., Лиханов И.И., Кох С.Н., Козлов П.С., Хворов П.В.

Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

nekipelova@igm.nsc.ru

Андалузит (And), кианит (Ky), силлиманит (Sil): небокситовые источники высокоглиноземистого сырья

Высокоглиноземистое сырье:

Бокситы

Высокосортные бокситы: $\text{Al}_2\text{O}_3 > 53$ мас. %
в России: средне- и низкосортные, запасы до 1.4 млрд т

Нефелиновые сиениты

Нефелин: теоретическое содержание $\text{Al}_2\text{O}_3 = 34.9$ мас. %
в России: запасы до 7 млрд т

Метаморфические And-Ky-Sil породы

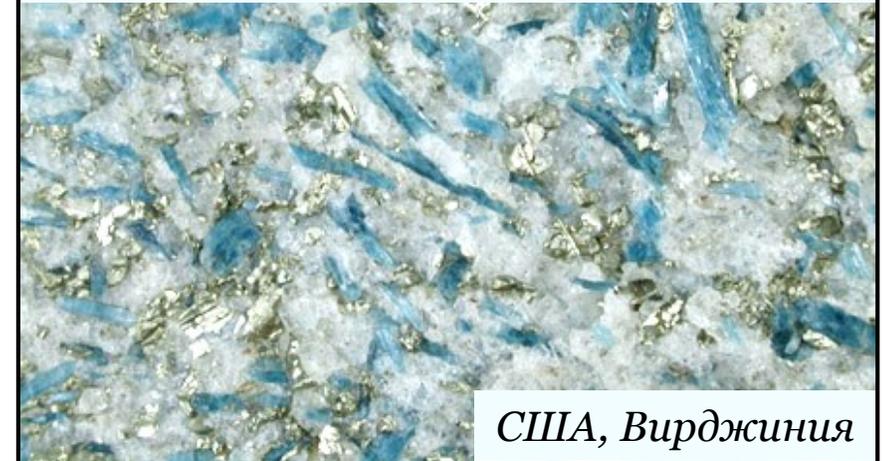
And, Ky, Sil (Al_2SiO_5) теоретическое содержание $\text{Al}_2\text{O}_3 = 62.9$ мас. %
в России: запасы ~4 млрд т

Области применения
полиморфов Al_2SiO_5 →

огнеупоры
керамика
композитные материалы
силумин и иные Al сплавы
металлический Al

Ку и/или Sil кварциты

Разработка при запасах 1 млн т
и содержании $\text{Al}_2\text{SiO}_5 \geq 10-13$ %



Россыпи

Разработка при запасах 1 млн т
и содержании $\text{Al}_2\text{SiO}_5 \approx 1-2$ %



Индия, Тамилнад

Промышленные требования к концентратам Al_2SiO_5

«Критические» свойства:

Огнеупорность
 Малое увеличение в объемах при повторном нагреве
 Стойкость к кислотной коррозии
 Стойкость к термоудару

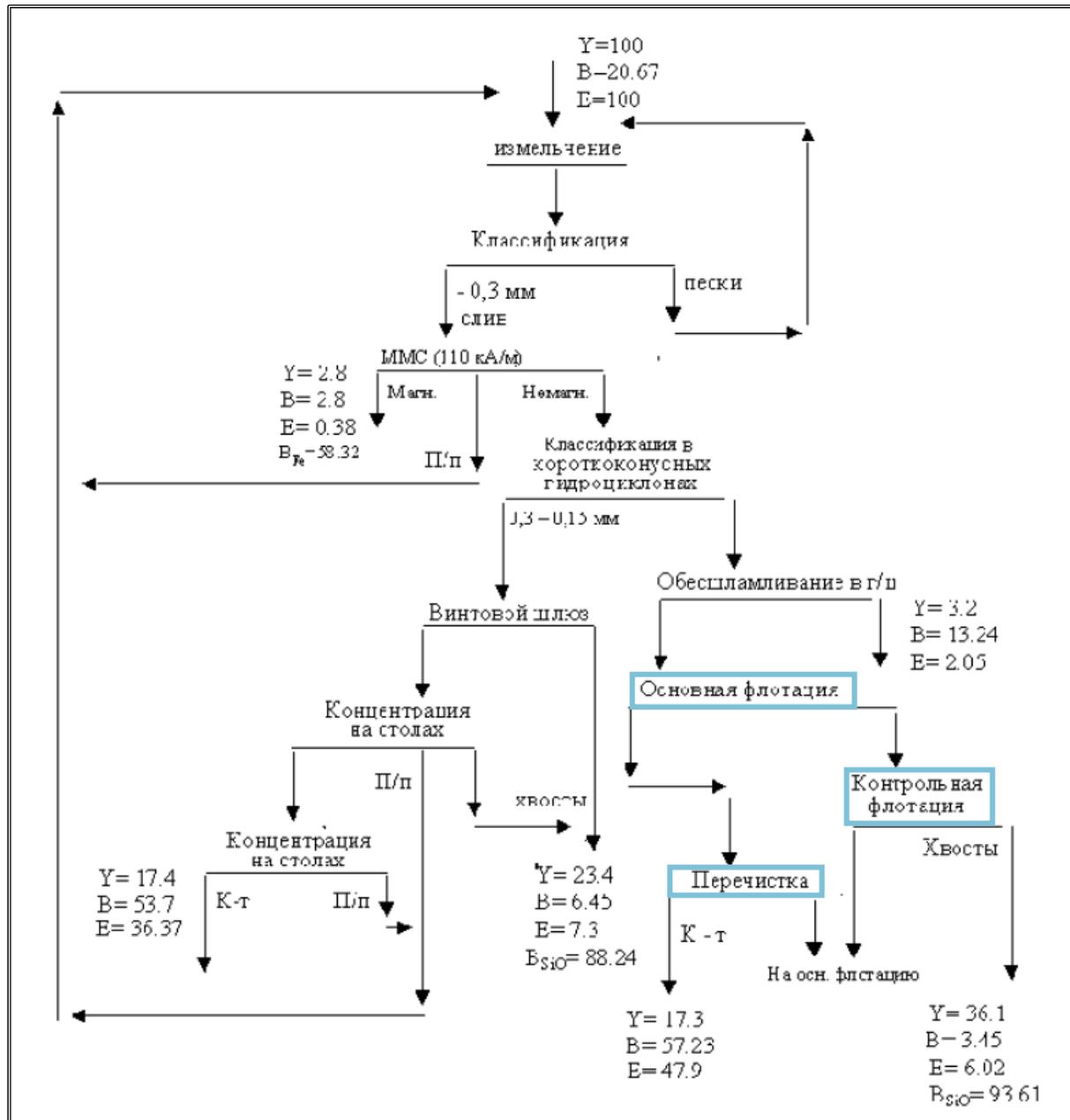
«Критические» примеси:

Fe, S
 Ti
 K
 Na

	Огнеупоры	Керамика	Al-Si сплавы
	And (предпочтительный) Sil, смесь Sil и Ky, обожженный Ky	And / Sil / Ky (в зависимости от типа конечного продукта)	And, Sil, Ky и их смеси
Химический состав, мас. %			
Al_2O_3	>57	>54	>57
SiO_2	<42	<43	<42
Fe_2O_3 общ.	<1	<1.3	<1.5
TiO_2	<1.5	<2	<0.8
$\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$	<1	—	<0.5
CaO	<0.3	<0.1	<0.2
MgO	<0.3	<0.1	<0.4

по данным [Лепезин, Семин, 1989; Roskill, 1990; Каменева и др., 2003; Niu et al., 2012; Guo et al., 2016; Фрулли, 2017; Ding et al., 2019; Indian Minerals Yearbook 2019]

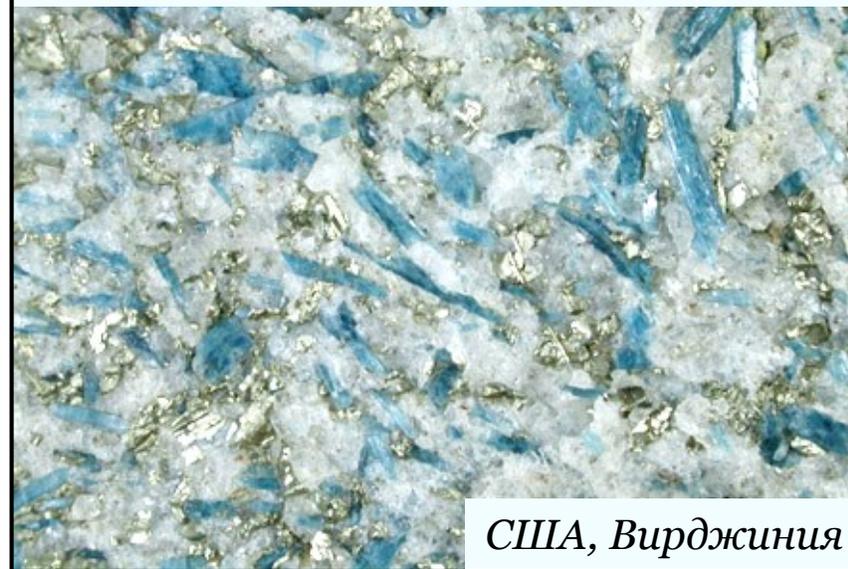
Схемы обогащения Al_2SiO_5 руд



Эффективность обогащения Al_2SiO_5 определяется:

- вещественным составом руд
- типами сростков Al_2SiO_5
- крупностью минералов
- индивидуальными свойствами Al_2SiO_5 фаз

Ку кварцит



← Схема обогащения кварц-кианитовой руды Карабашского месторождения [Гришин, 2003]

Al_2SiO_5 : основные месторождения

добываются		ресурсы	
Sil	▲	▲	△
And	●	●	○
Ky	■	■	□

добывались



Al_2SiO_5 сырьё Енисейского края



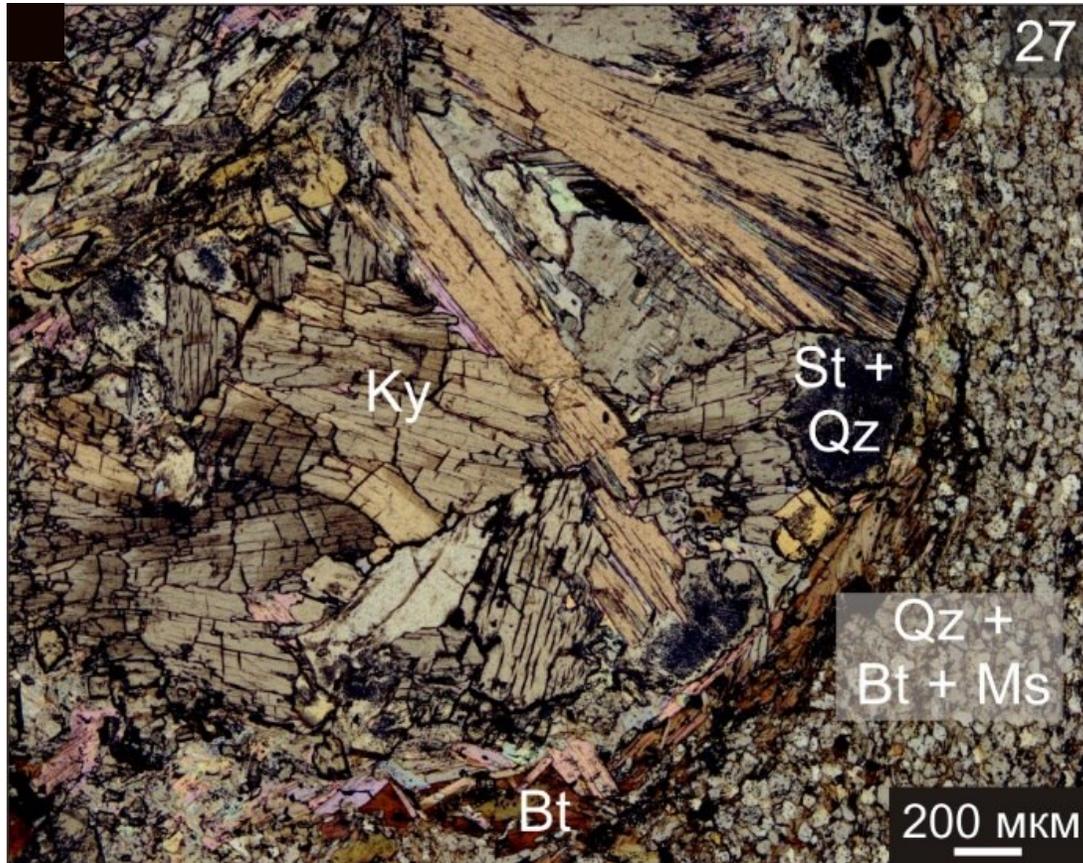
Вмещающие породы	Углеродистые метапелиты кординской свиты (R_2cord)
P-T-параметры метаморфизма	Эпидот-амфиболитовая фация
Ассоциация	<i>П.</i> : Qz + Ms + Chl + And ± Cld ± Pl ± Gr <i>М.</i> : Ms + Chl + Bt + Qz + Ky + St ± And ± Pl
Содержание Al_2O_3	<i>П.</i> : 19.1-21.2 мас. % <i>М.</i> : 20.3 мас. %

Тейский метаморфический комплекс: П. – Панимбинское, М. – Маяконское рудопроявления

And – андалузит, Bt – биотит, Chl – хлорит, Cld – хлоритоид, Gr – графит, Ky – кианит, Ms – мусковит, Pl – плагиоклаз, Qz – кварц, St – ставролит

← **Схема размещения метаморфогенных рудопроявлений андалузита, кианита и силлиманита в пределах Заангарской части Енисейского края [Козлов, 2018]**

Породы Тейского метаморфического комплекса



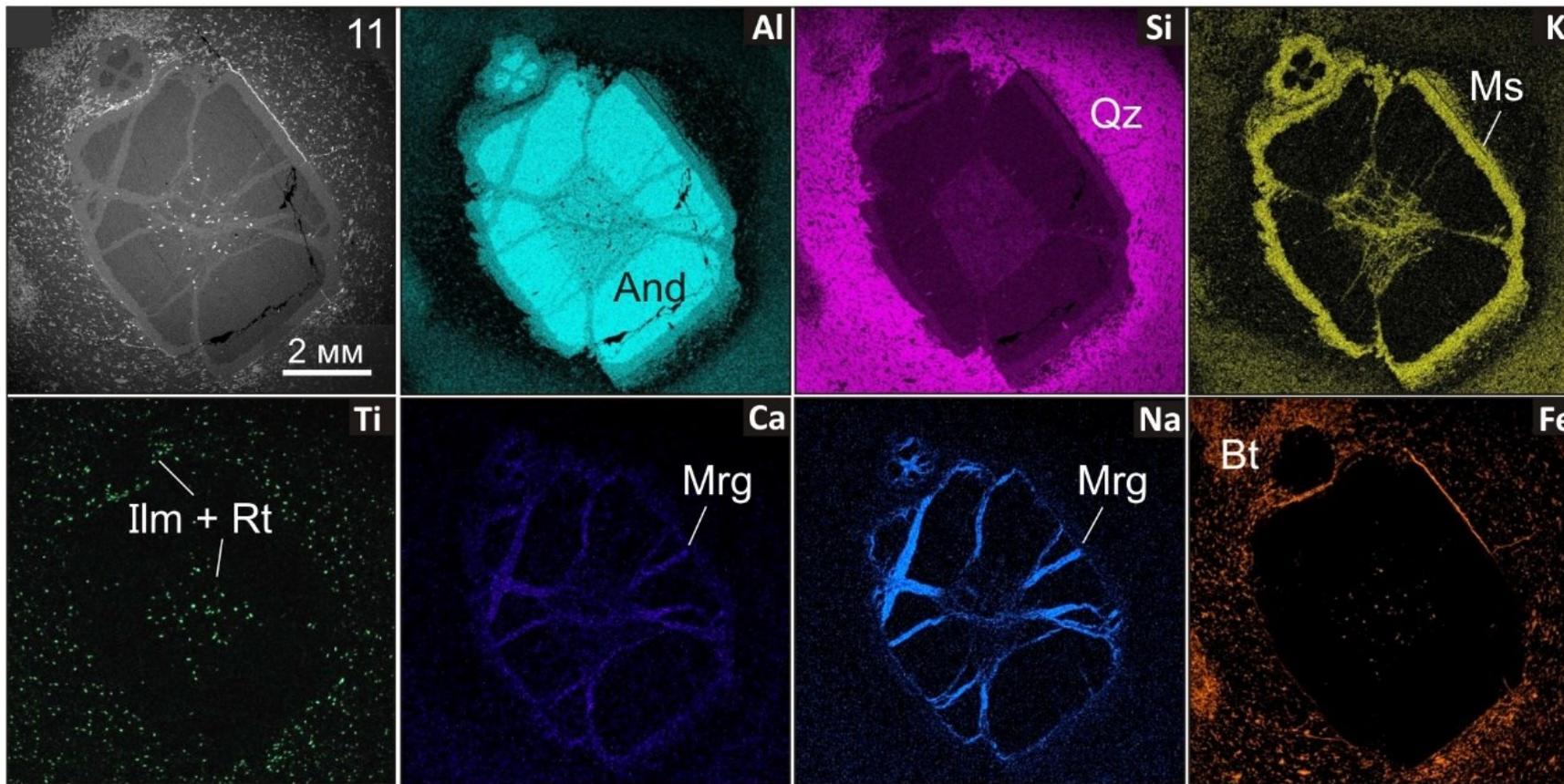
Панимбинский участок: агрегат кианита и ставролита, окруженный мусковитовой каймой и замещающий крупные кристаллы андалузита. Оптическая фотография, николи скрещены.

Bt – биотит, Ky – кианит, Ms – мусковит, Qz – кварц, St – ставролит

Фазовый состав рядовых пород Тейского комплекса. Данные количественного рентгенфазового анализа.

Минерал	Содержание, %
Андалузит и/или кианит	3-29
Ставролит	до 15
Кварц	7-63
Слюды (мусковит + биотит ± маргарит)	8-49
Хлорит	до 20
Плагиоклаз	до 29
Гранат	до 9
Цеолиты	до 1

Андалузит: морфология и состав

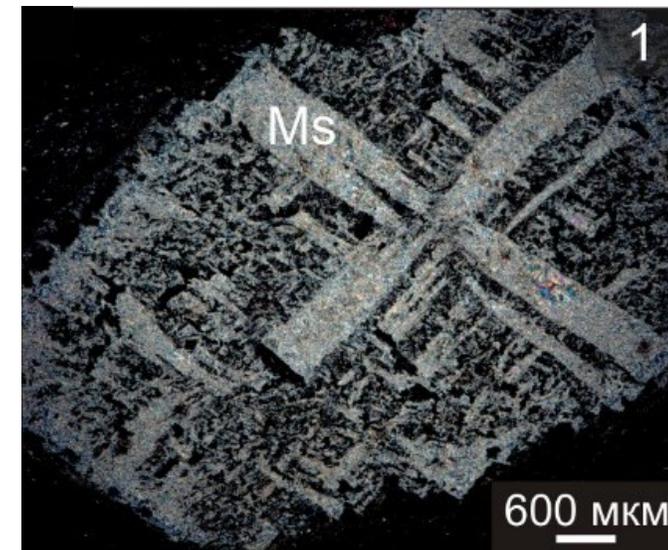


Панимбинский участок: хиастолит, замещенный маргаритом внутри и мусковитом снаружи. Изображение в обратно-рассеянных электронах и карты в характеристическом излучении Al, Si, Fe, K, Ti, Ca, Na и Fe

And – андалузит, *Bt* – биотит, *Ilm* – ильменит, *Ms* – мусковит, *Mrg* – маргарит, *Rt* – рутил,
Qz – кварц

Средние содержания
($n = 30$)

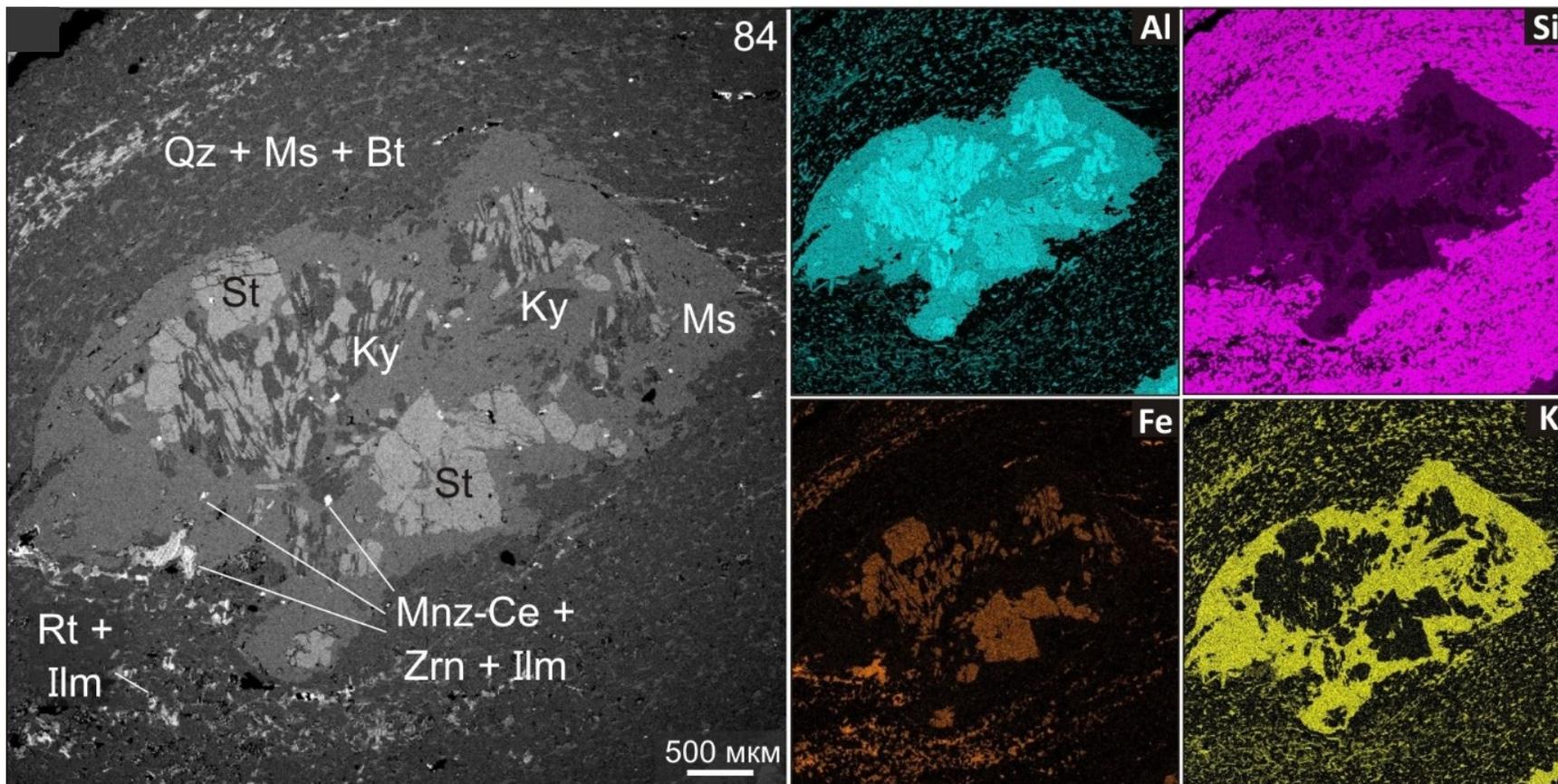
FeO – 0.25 мас. %



Полная псевдоморфоза мусковита по андалузиту. Оптическая фотография, николи скрещены

Ms – мусковит

Кианит: морфология и состав

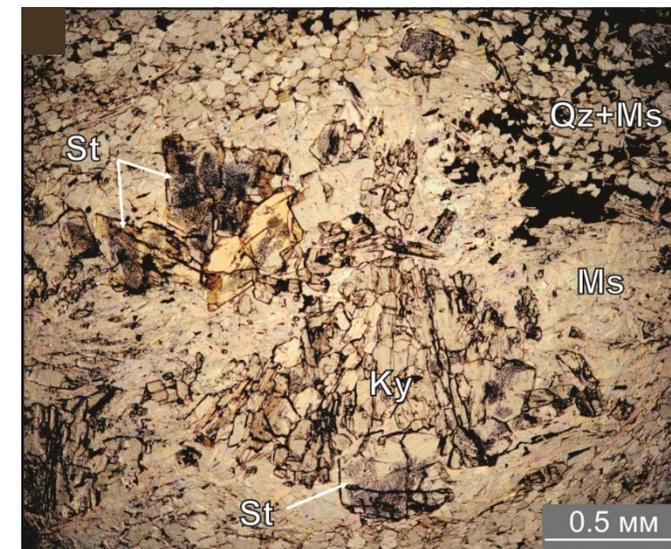


Маяконский участок: агрегат кианита и ставролита, окруженный мусковитовой каймой и замещающий крупные кристаллы андалузита. Изображение в обратно-рассеянных электронах и карты в характеристическом излучении Al, Si, Fe Fe и K

Bt – биотит, Ilm – ильменит, Ky – кианит, Mnz-Ce – монацит-(Ce), Ms – мусковит, Qz – кварц, Rt – рутил, St – ставролит

Средние содержания
(n = 14)

FeO – 0.32 мас. %



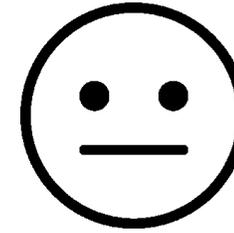
Агрегат кианита и ставролита. Оптическая фотография, без анализатора.

Ky – кианит, Ms – мусковит, Qz – кварц, St – ставролит

Технологические особенности пород Тейского комплекса

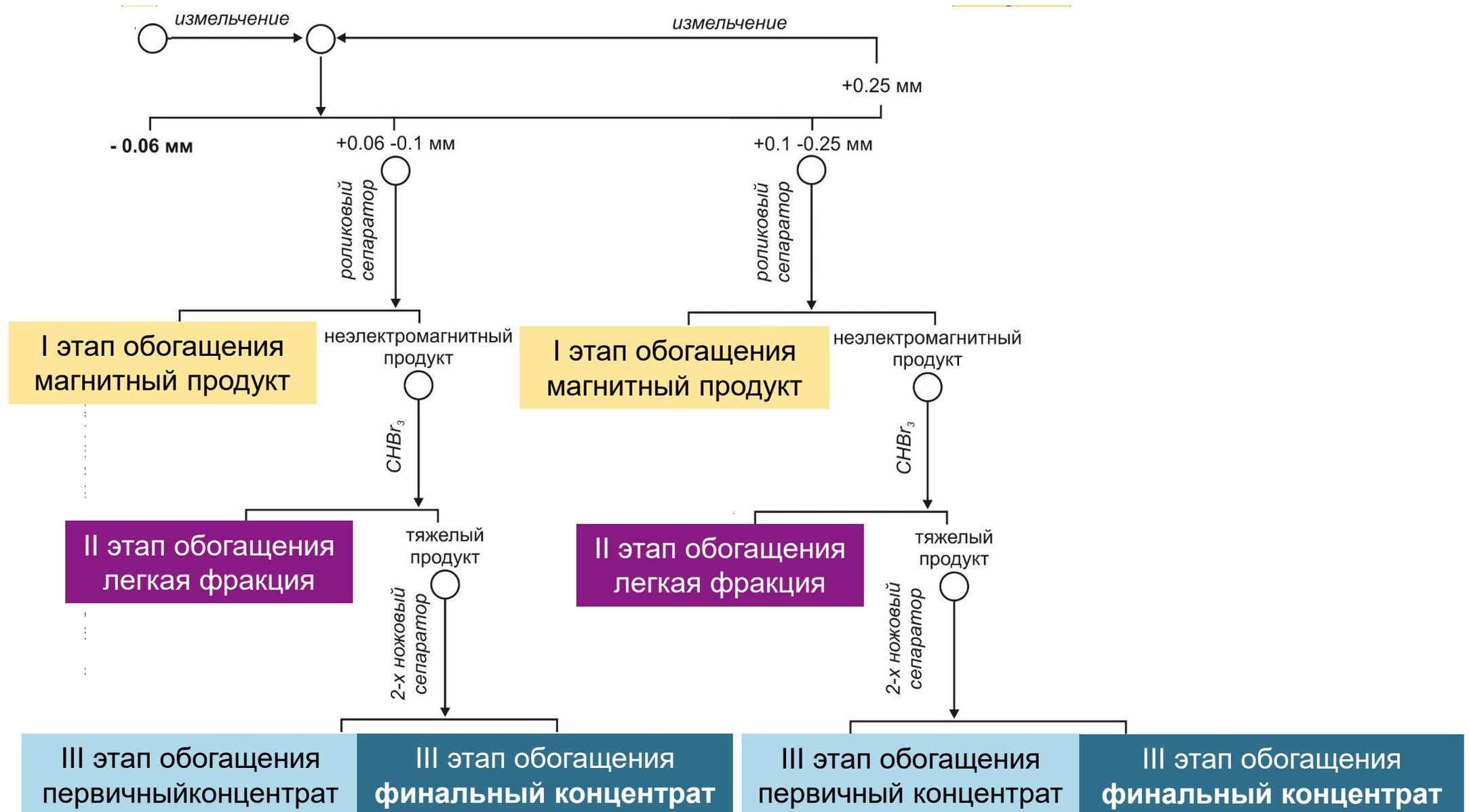


- крупная зернистость полиморфов Al_2SiO_5
- фактическое отсутствие в породах сульфидов
- низкая степень графитизации
- вхождение значительной доли Fe и Mg в ставролит, биотит, а Fe и Ti – в ильменит

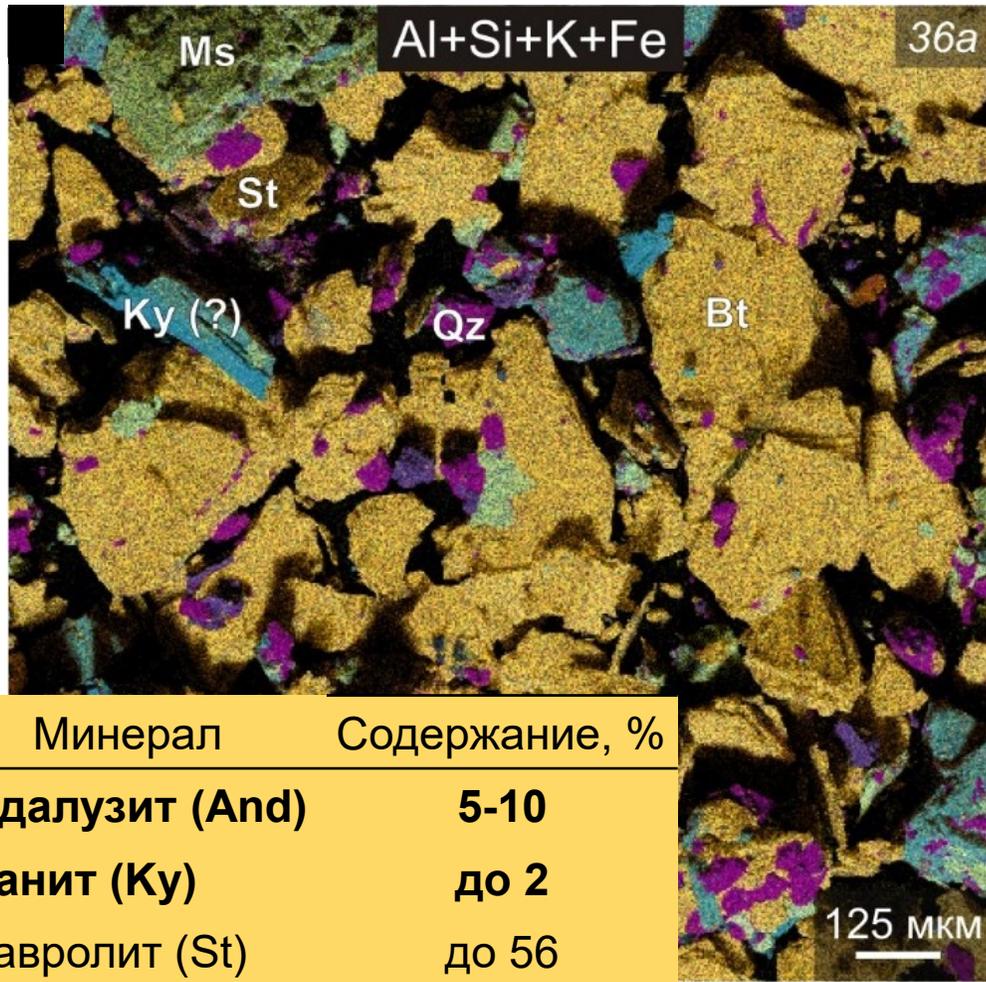


- сложный фазовый состав руд при умеренном содержании в них полиморфов Al_2SiO_5
- высокая степень вторичного замещения андалузита мусковитом и маргаритом

Схема обогащения рядовых высокоглиноземистых пород Тейского комплекса

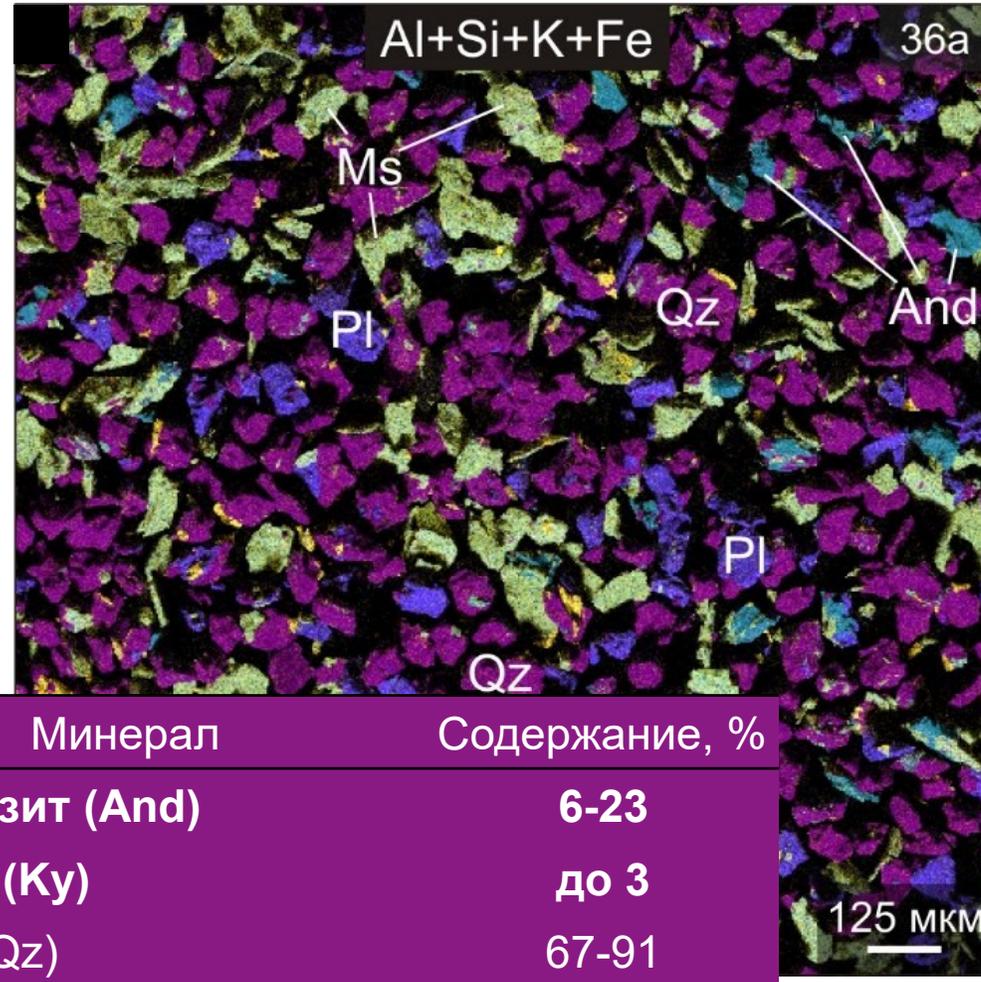


I этап обогащения Магнитный продукт



Минерал	Содержание, %
Андалузит (And)	5-10
Кианит (Ky)	до 2
Ставролит (St)	до 56
Биотит (Bt)	до 43
Хлорит (Chl)	до 18

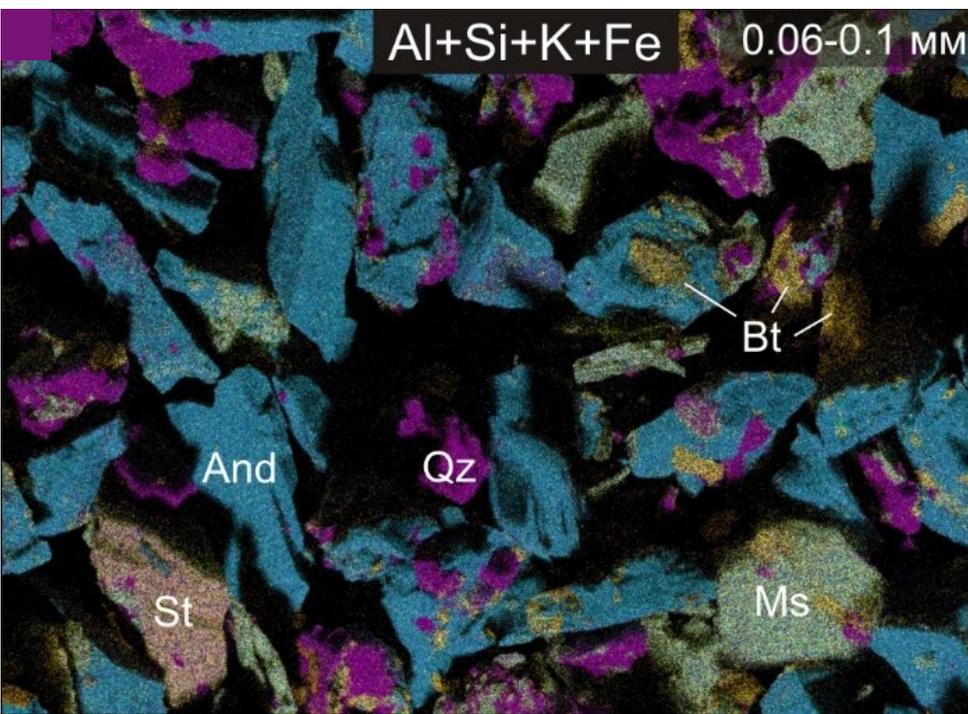
II этап обогащения Легкая фракция



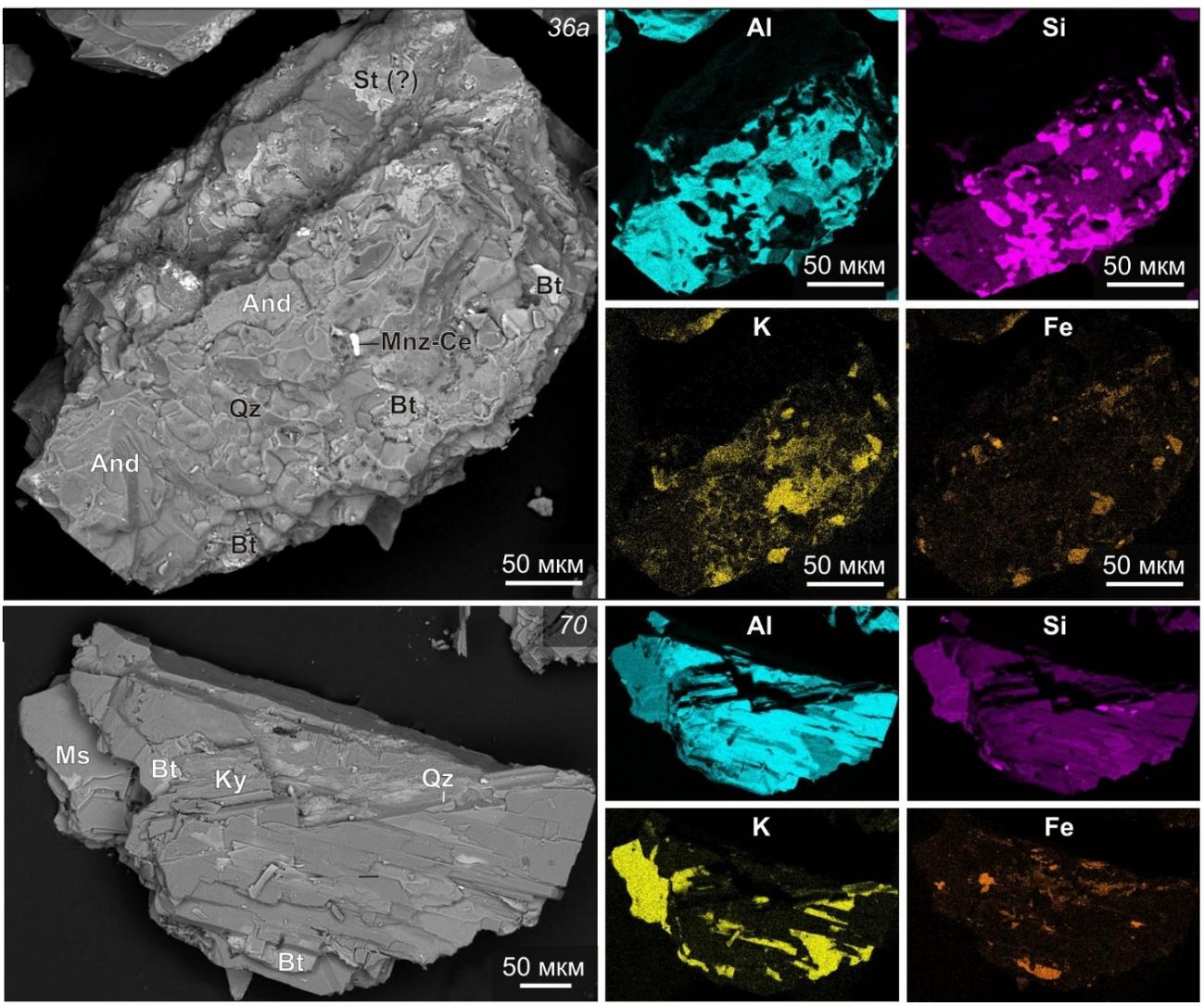
Минерал	Содержание, %
Андалузит (And)	6-23
Кианит (Ky)	до 3
Кварц (Qz)	67-91
Полевые шпаты (Pl + KFsp)	до 43
Мусковит (Ms)	5-14

Соотношение минеральных фаз в продуктах обогащения

III этап обогащения
Первичный концентрат



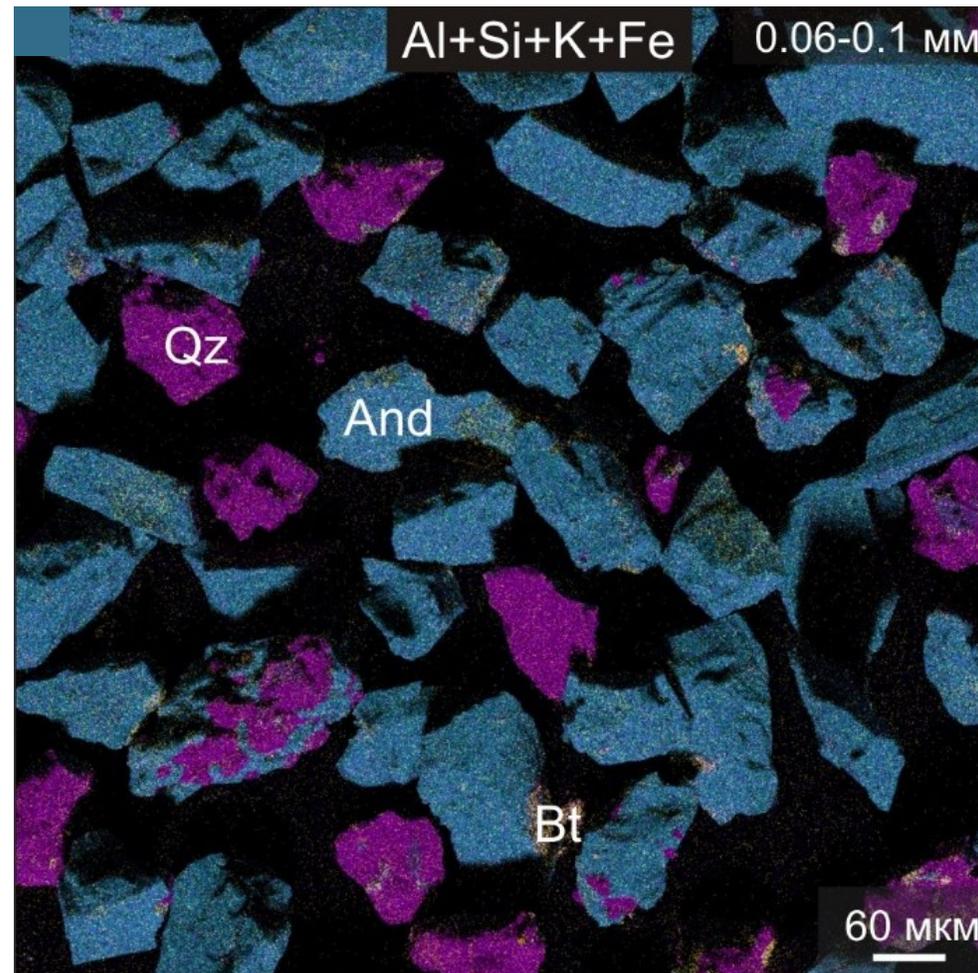
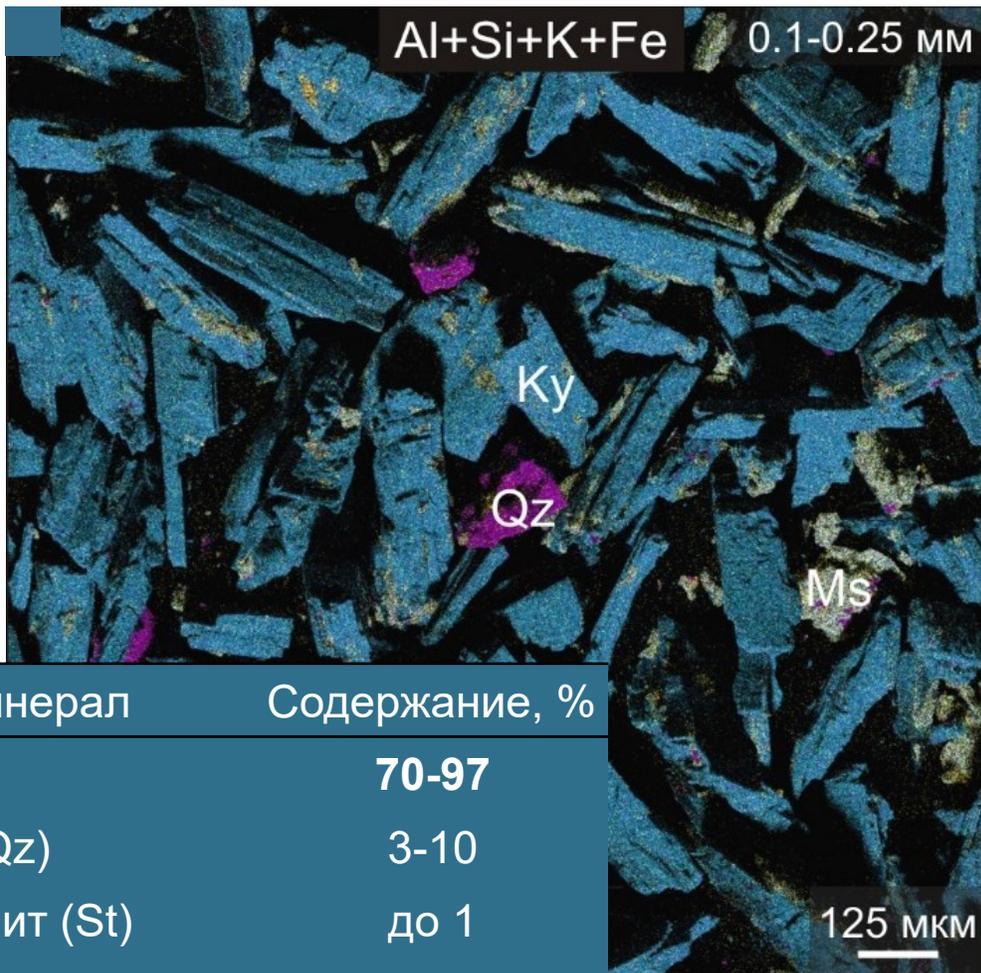
Минерал	Содержание, %
Al_2SiO_5	52-79
Кварц (Qz)	1-22
Ставролит (St)	1-12
Слоистые силикаты (Ms + Bt + Chl)	2-23



Нераскрытые сростки андалузита, кианита, кварца, мусковита и биотита. Первичный концентрат, размерность 0.1-0.25 мм

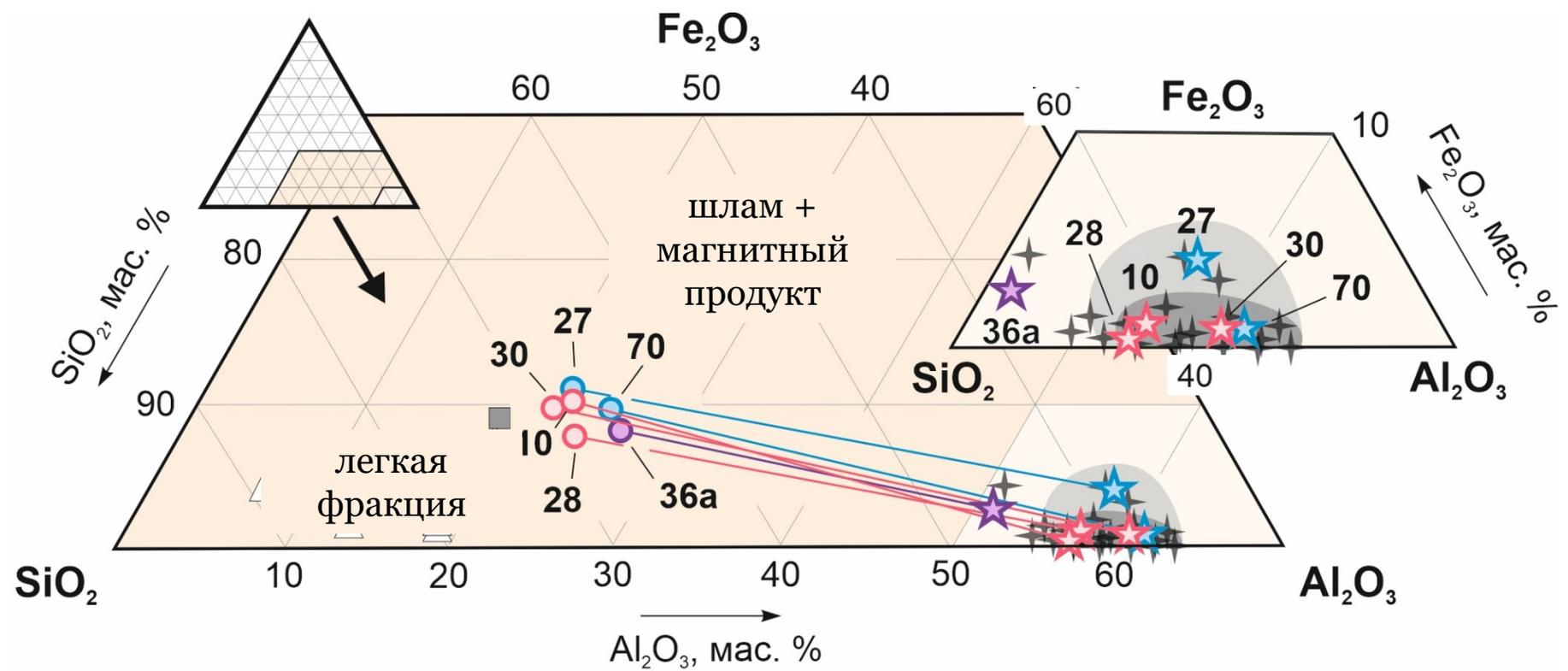
And – андалузит, Bt – биотит, Mnz-Ce – монацит-(Ce), Qz – кварц

III этап обогащения Финальный концентрат



Минерал	Содержание, %
Al_2SiO_5	70-97
Кварц (Qz)	3-10
Ставролит (St)	до 1
Слоистые силикаты (Ms + Bt + Chl)	2-30

Al₂SiO₅ концентраты: химический состав



валовые пробы руд: And (а), Ку (б), смешанных (в)



коммерческие Al₂SiO₅ продукты XX вв.



концентраты: And (а), Ку (б), смешанные (в)



современные коммерческие Al₂SiO₅ продукты



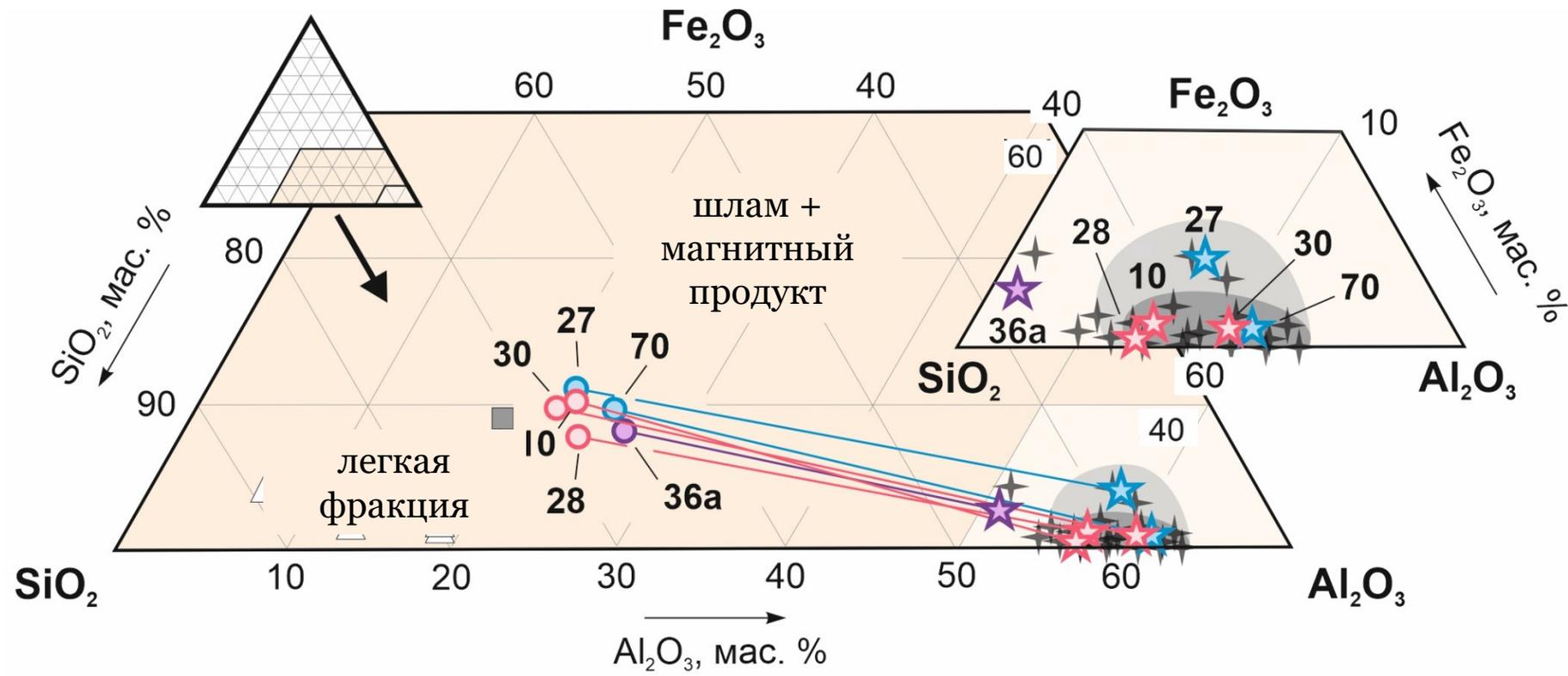
составы опытных Al₂SiO₅ концентратов, полученных из высокоглиноземистых метаморфических пород

Показатели обогащения рядовых пород Тейского комплекса

Размерность, мм	Продукт	Выход, %	Al_2SiO_5 , %
$0.06 \leq x < 0.1$	Финальный концентрат	0.1 – 0.6	73 – 97
$0.1 \leq x < 0.25$	Финальный концентрат	0.7 – 6	70 – 95

Показатели флотационного обогащения Ку кварцитов

Месторождения	Выход, %
хизоваарская и кейвская группы, Карелия и Кольский п-ов [Огородников и др., 2013а]	2-13
Ганьсу , Китай [Zhao et al., 2017]	7.2



- a
б
в
валовые пробы руд: And (a), Ку (б), смешанных (в)

коммерческие Al₂SiO₅ продукты XX вв.
- a
б
в
концентраты: And (a), Ку (б), смешанные (в)

современные коммерческие Al₂SiO₅ продукты
- ★
составы опытных Al₂SiO₅ концентратов, полученных из высокоглиноземистых метаморфических пород

Химический состав, мас. %							
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ общ.	CaO	MgO	Na ₂ O + K ₂ O	SO ₃

Панимбинское рудопроявление (And)

Электромагнитная и гравитационная сепарация, наши данные

38.6 – 39.8 **0.02 – 0.1** **56.6 – 58.0** **1.1 – 1.5** 0.1 – 0.2 ~0.1 **0.6 – 0.7** < 0.03

Панимбинское рудопроявление (And)

Флотационное обогащение, Ленинградский Институт огнеупоров

36.5 **1.6** **57.1** **2.2** — — — —

Огнеупоры

<42 **<1.5** **>57** **<1** <0.3 <0.3 **<1** —

Керамика

<43 **<2** **>54** **<1.3** <0.1 <0.1 — —

Al-Si сплавы

<42 **<0.8** **>57** **<1.5** <0.2 <0.4 **<0.5** —

**Показатели обогащения рядовых
высокоглиноземистых пород Тейского комплекса**

Размерность, мм	Продукт	Показатели обогащения	
		Выход, %	Al ₂ SiO ₅ , %
0.06≤x<0.1	Магнитный концентрат	4 – 8	до 10
	Легкая фракция	3 – 9	до 23
	Первичный концентрат	0.1 – 0.5	55 – 90
	Финальный концентрат	0.1 – 0.6	73 – 97
0.1≤x<0.25	Магнитный концентрат	26 – 41	до 9
	Легкая фракция	3 – 25	до 8
	Первичный концентрат	1 – 5	51 – 79
	Финальный концентрат	0.7 – 6	70 – 95

**Показатели флотационного обогащения
Ку месторождений/рудопроявлений мира**

Месторождения/рудопроявления	Выход, %
хизоваарская и кейвская группы (Ку), Карелия и Кольский п-ов [Огородников и др., 2013а]	2-13
Ганьсу (Ку), Китай [Zhao et al., 2017]	7.2