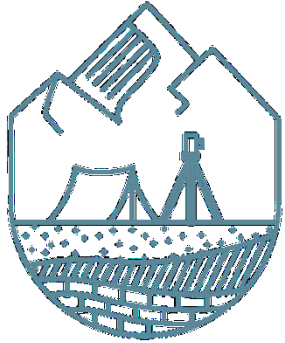


НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОИСКОВОЙ ГЕОЛОГИИ»

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](mailto: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

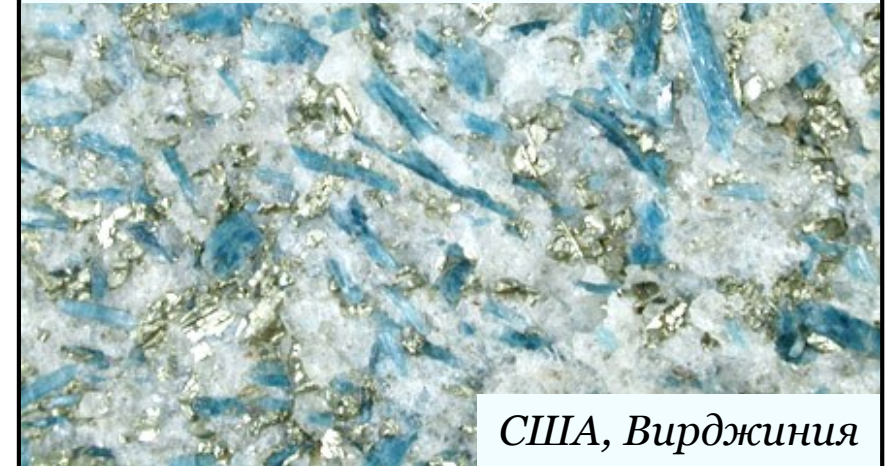
And, Ky, Sil ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ) теоретическое содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 62.9$  мас. %  
в России: запасы ~4 млрд т

Области применения  
полиморфов  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  →

огнеупоры  
керамика  
композитные материалы  
силумин и иные Al сплавы  
металлический Al

### Ку и/или Sil кварциты

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



США, Вирджиния

### Россыпи

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



Индия, Тамилнад

# Промышленные требования к концентратам $\text{Al}_2\text{SiO}_5$

## «Критические» свойства:

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

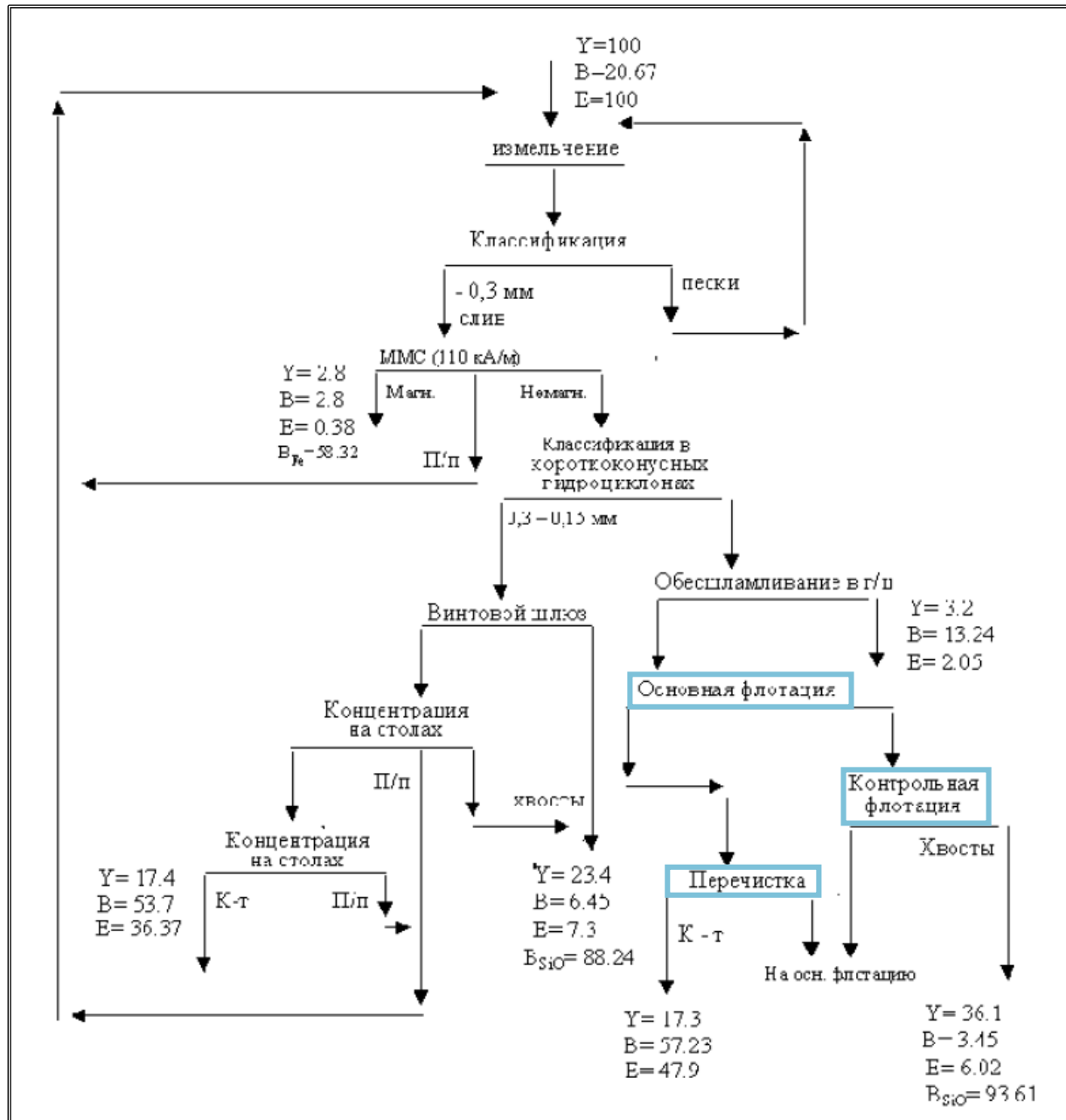
## **«Критические» примеси:**

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. %			
$\text{Al}_2\text{O}_3$	>57	>54	>57
$\text{SiO}_2$	<42	<43	<42
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ общ.	<1	<1.3	<1.5
$\text{TiO}_2$	<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]

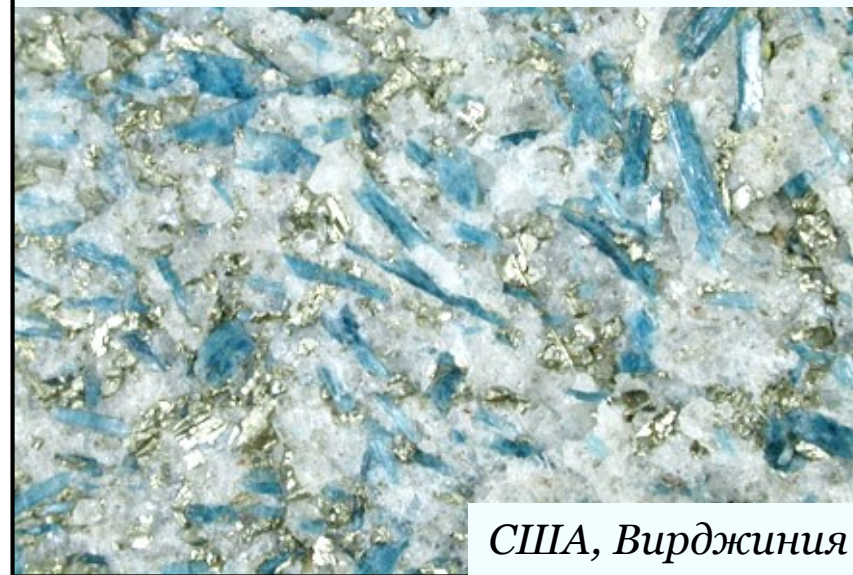
# Схемы обогащения $Al_2SiO_5$ руд



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



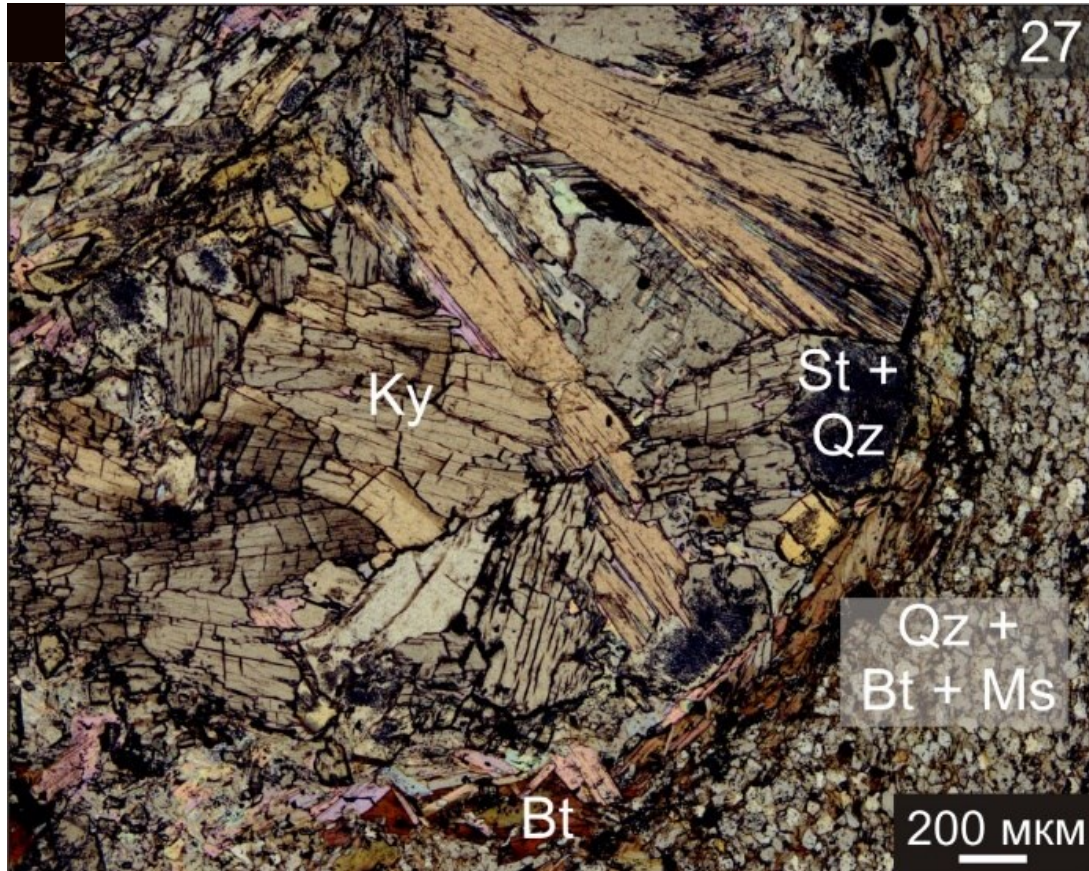
Вмещающие породы	Углеродистые метапелиты кординской свиты ( $R_2cord$ )
P-T-параметры метаморфизма	Эпидот-амфиболитовая фация
Ассоциация	<i>П.</i> : Qz + Ms + Chl + <b>And</b> ± Cld ± Pl ± Gr <i>М.</i> : Ms + Chl + Bt + Qz + <b>Ky</b> + St ± <b>And</b> ± Pl
Содержание $Al_2O_3$	<i>П.</i> : 19.1-21.2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



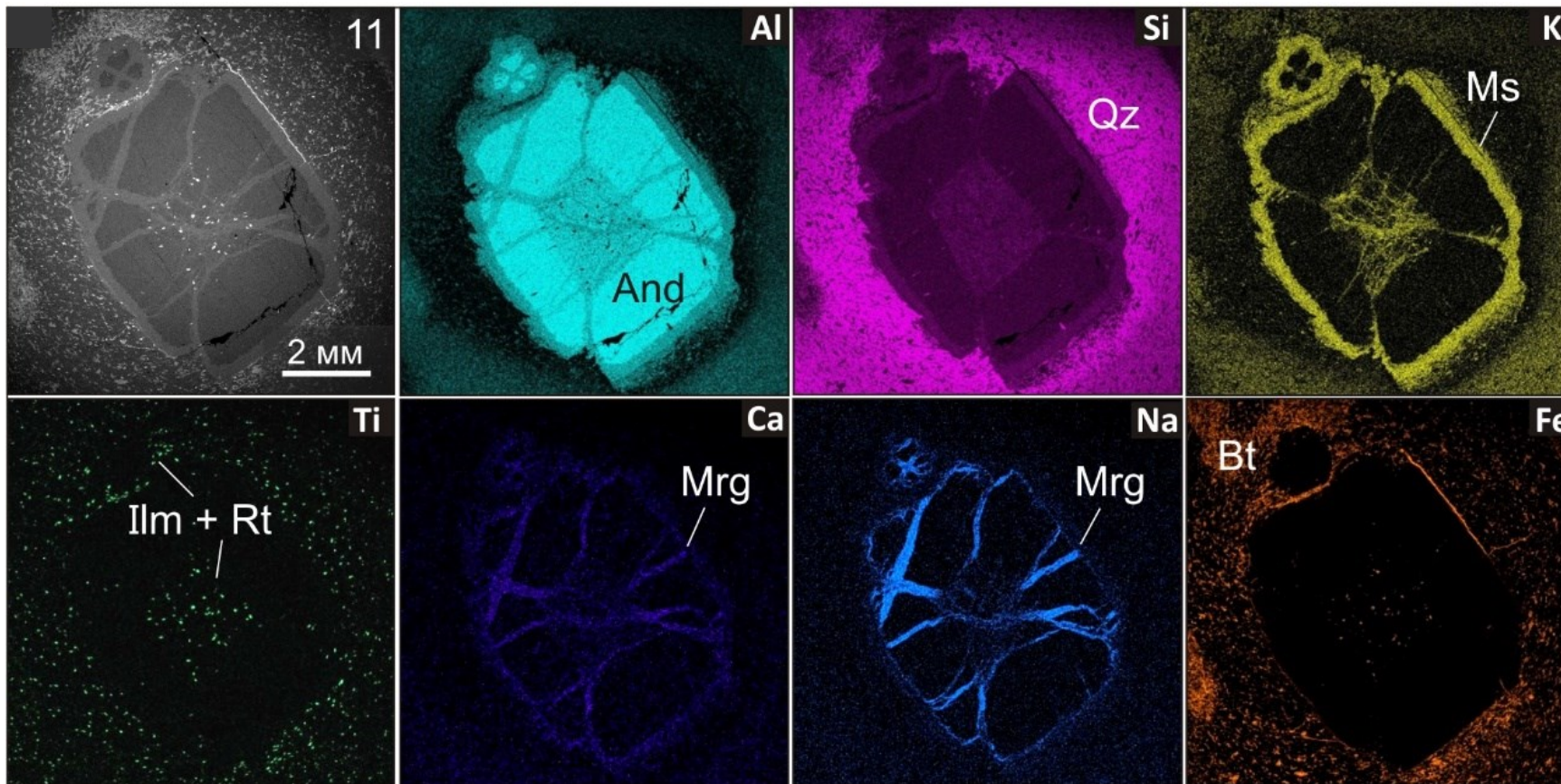
**Панимбинский участок: агрегат кианита и ставролита, окруженный мусковитовой каймой и замещающий крупные кристаллы андалузита. Оптическая фотография, николи скрещены.**

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

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

Минерал	Содержание, %
<b>Андалузит и/или кианит</b>	<b>3-29</b>
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

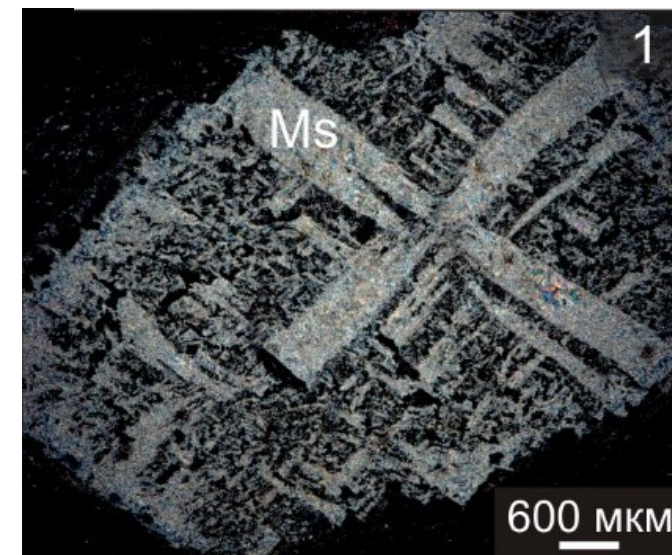


Панимбинский участок: хиастолит, замещенный маргаритом внутри и мусковитом снаружи. Изображение в обратно-рассеянных электронах и карты в характеристическом излучении Al, Si, Fe, K, Ti, Ca, Na и Fe

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

Средние содержания  
( $n = 30$ )

FeO – 0.25 мас. %

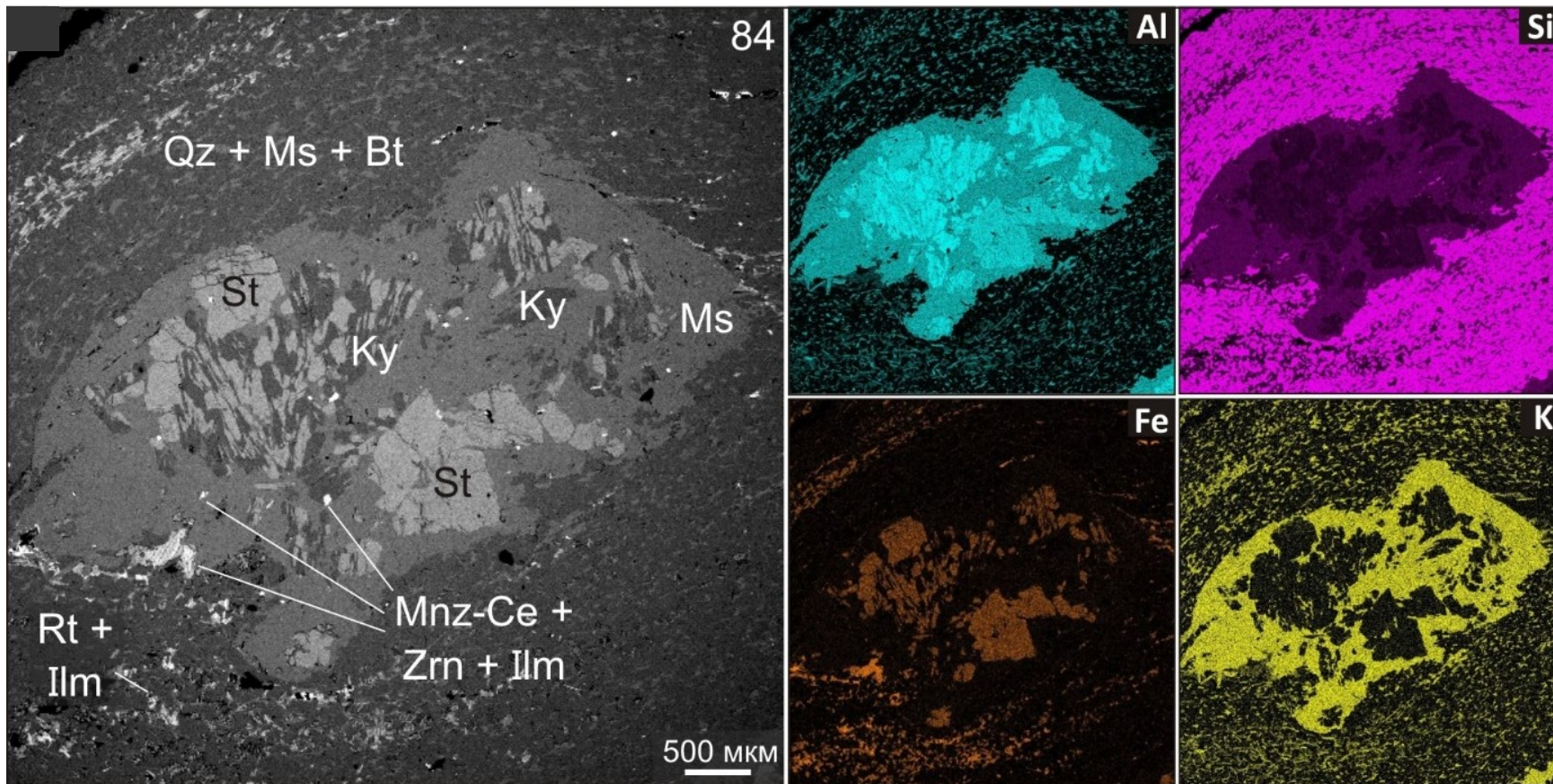


Полная псевдоморфоза мусковита по андалузиту. Оптическая фотография, николи скрещены

*Ms* – мусковит



# Кианит: морфология и состав

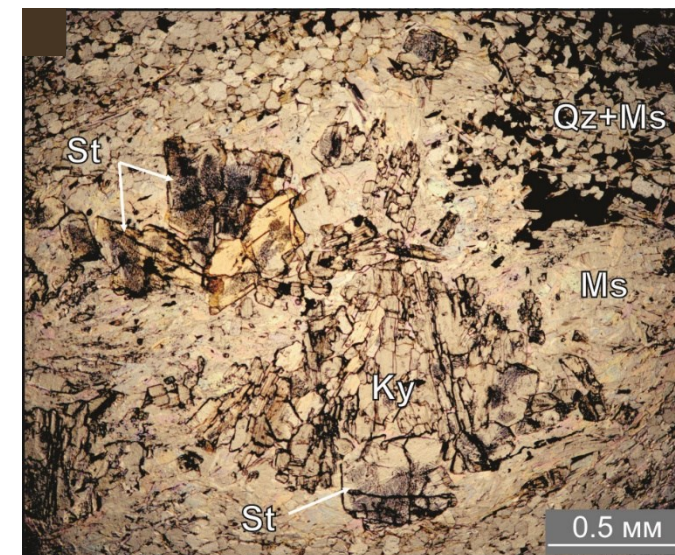


**Маяконский участок: агрегат кианита и ставролита, окруженный мусковитовой каймой и замещающий крупные кристаллы андалузита. Изображение в обратно-рассеянных электронах и карты в характеристическом излучении Al, Si, Fe Fe и K**

*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. %



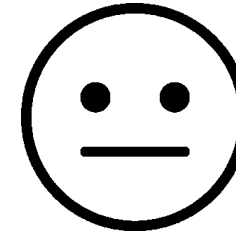
**Агрегат кианита и ставролита. Оптическая фотография, без анализатора.**

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

## Технологические особенности пород Тейского комплекса

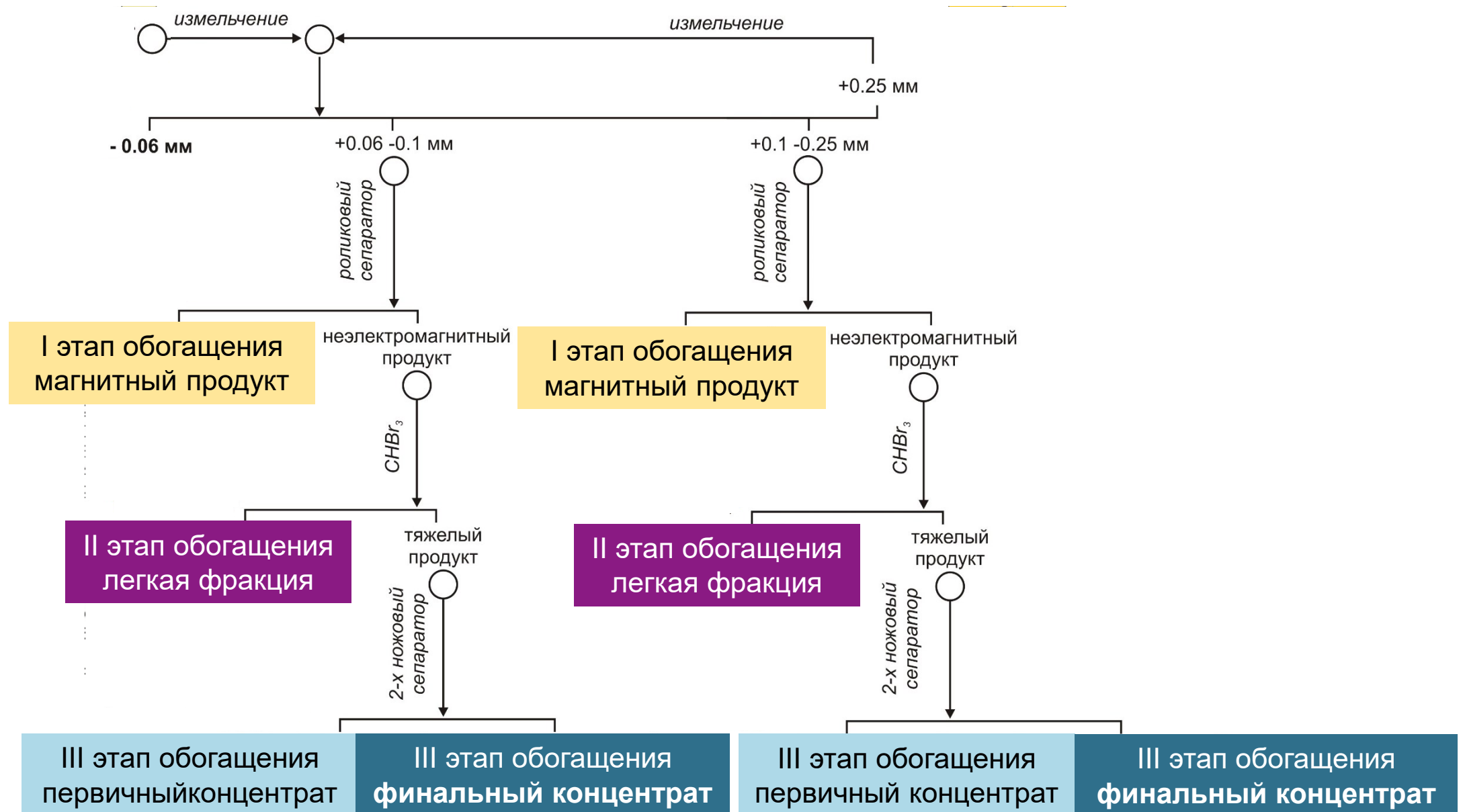


- крупная зернистость полиморфов  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$
- фактическое отсутствие в породах сульфидов
- низкая степень графитизации
- вхождение значительной доли Fe и Mg в ставролит, биотит, а Fe и Ti – в ильменит

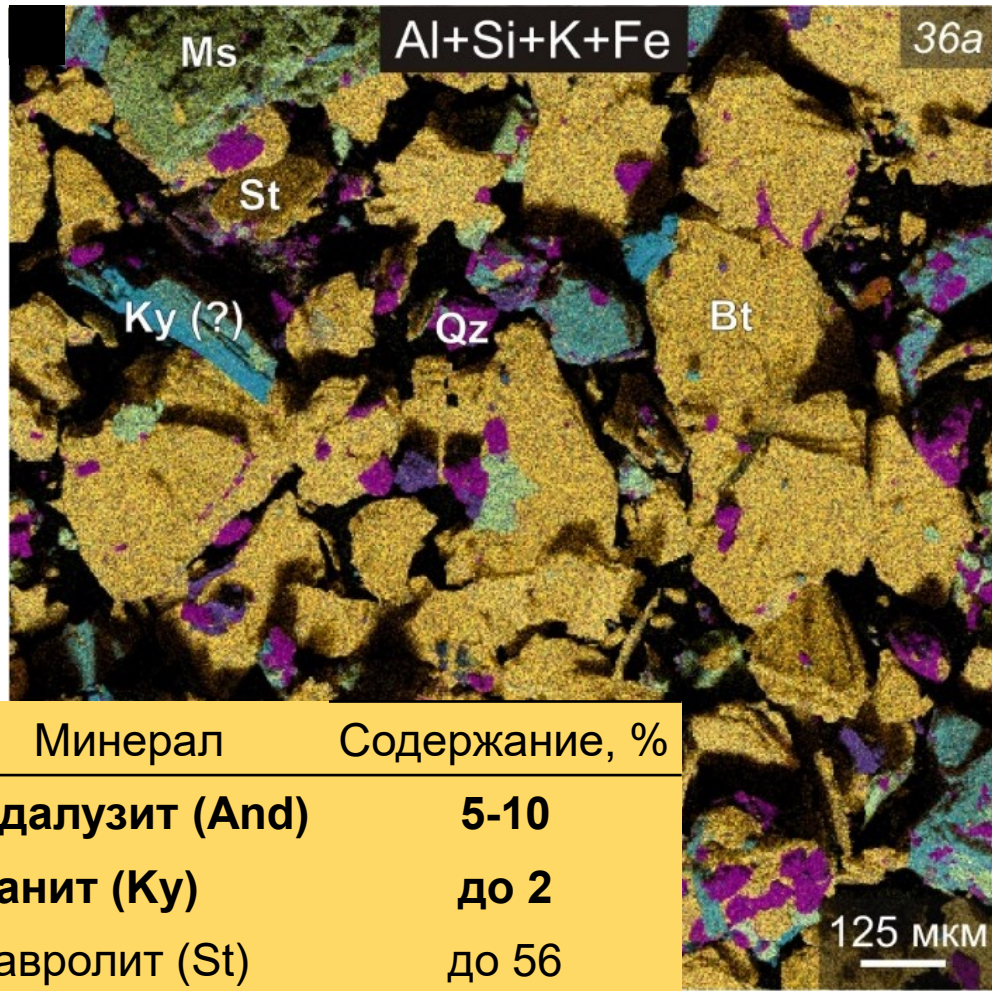


- сложный фазовый состав руд при умеренном содержании в них полиморфов  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$
- высокая степень вторичного замещения андалузита мусковитом и маргаритом

# Схема обогащения рядовых высокоглиноземистых пород Тейского комплекса

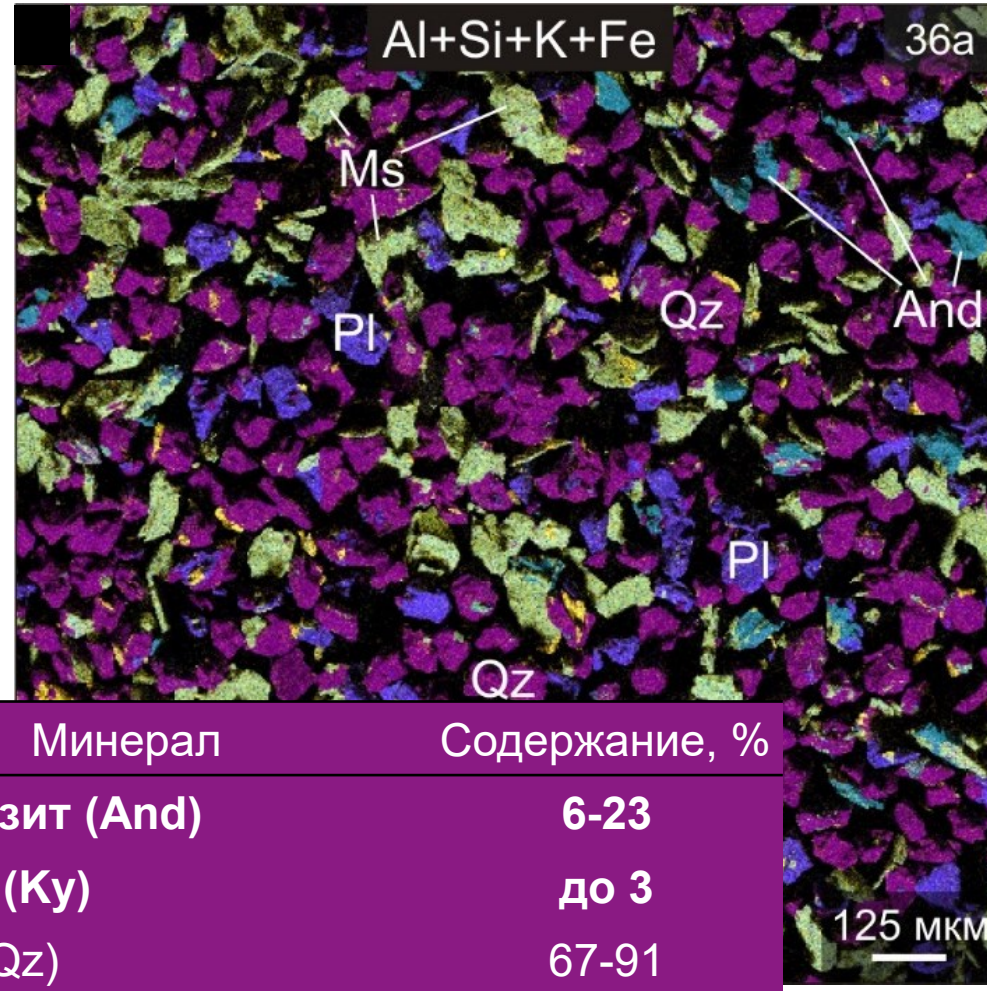


## I этап обогащения Магнитный продукт



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

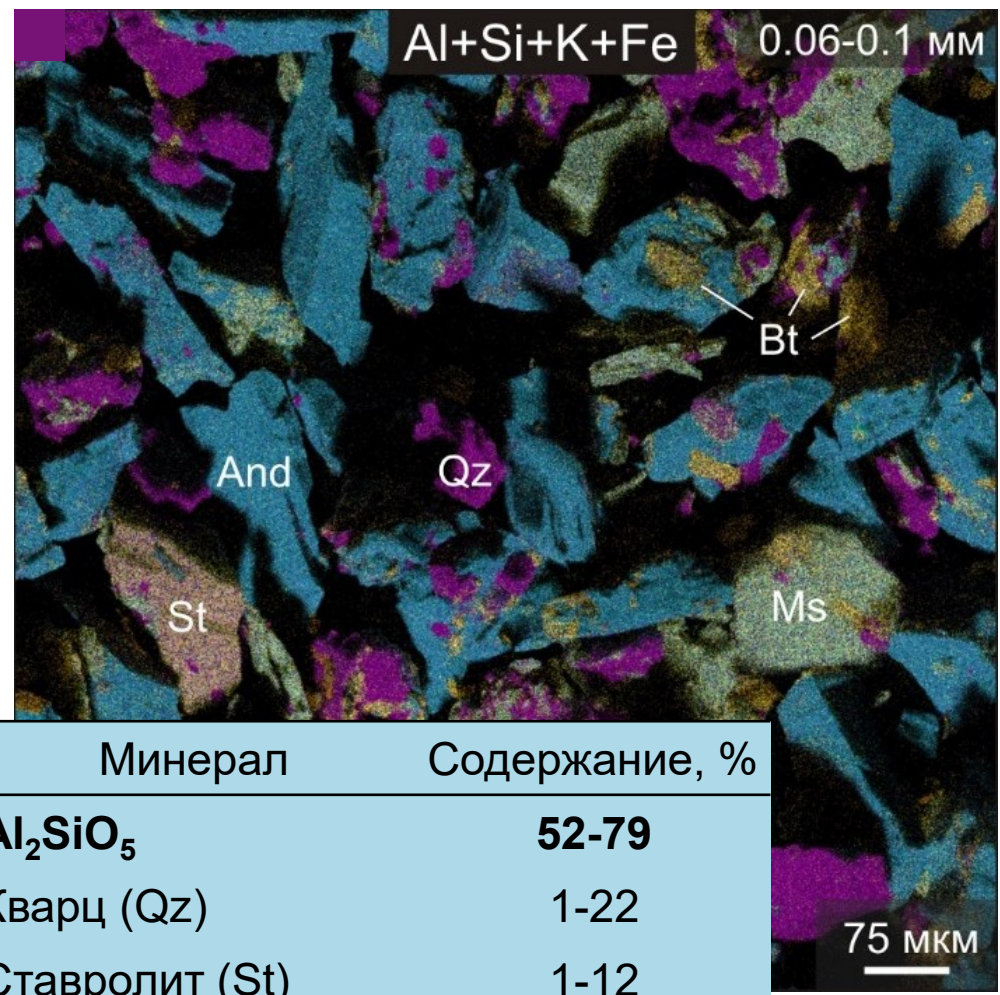
## II этап обогащения Легкая фракция



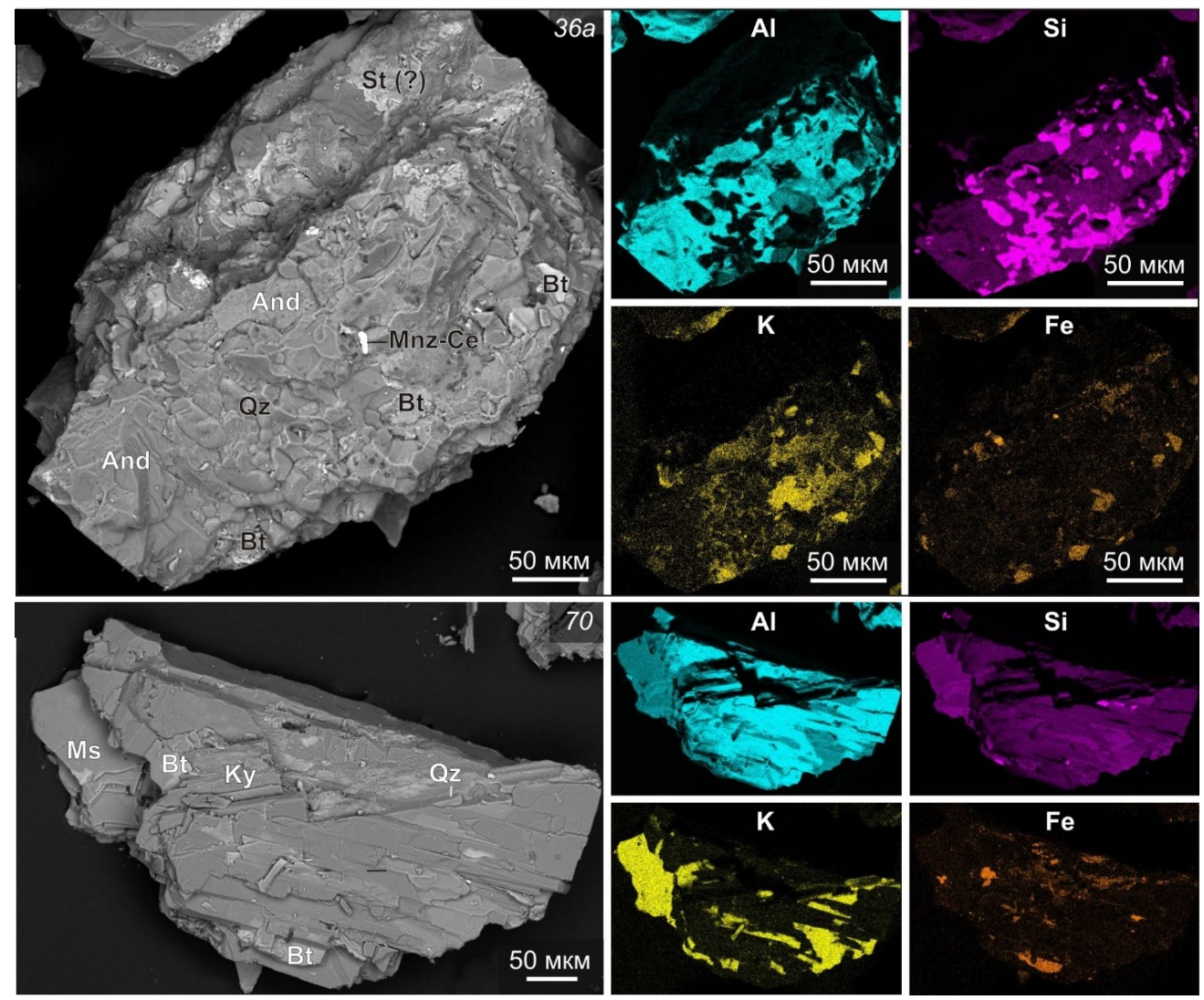
Минерал	Содержание, %
<b>Андалузит (And)</b>	<b>6-23</b>
<b>Кианит (Ky)</b>	<b>до 3</b>
Кварц (Qz)	67-91
Полевые шпаты (Pl + KFsp)	до 43
Мусковит (Ms)	5-14

# Соотношение минеральных фаз в продуктах обогащения

III этап обогащения  
Первичный концентрат

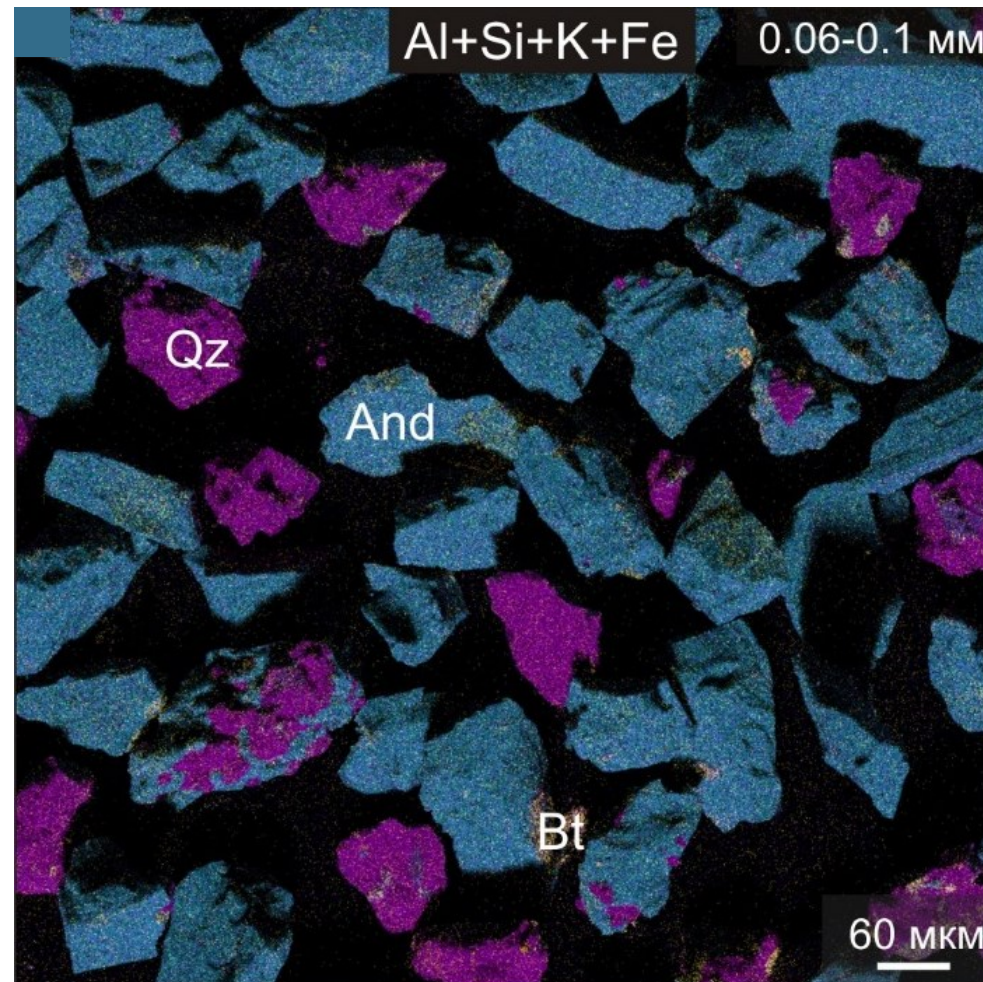
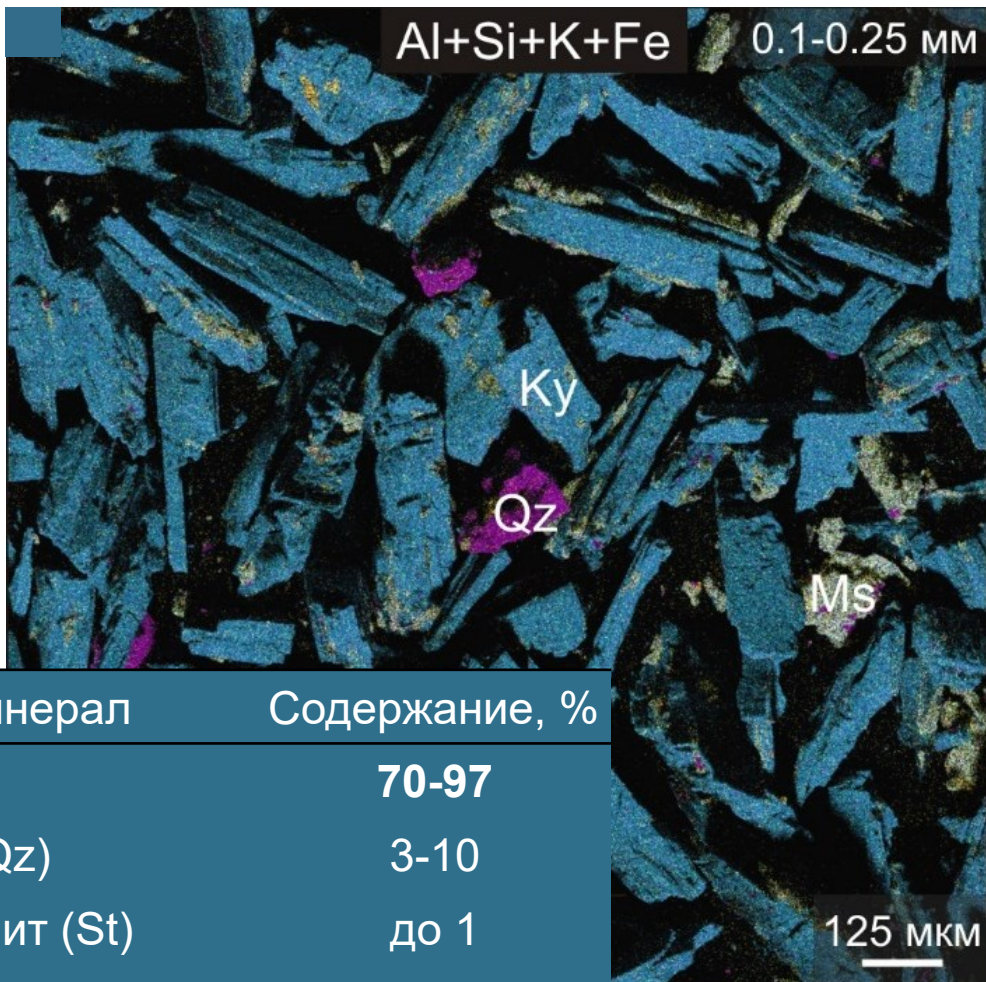


Минерал	Содержание, %
$Al_2SiO_5$	52-79
Кварц (Qz)	1-22
Ставролит (St)	1-12
Слоистые силикаты (Ms + Bt + Chl)	2-23



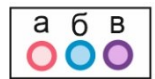
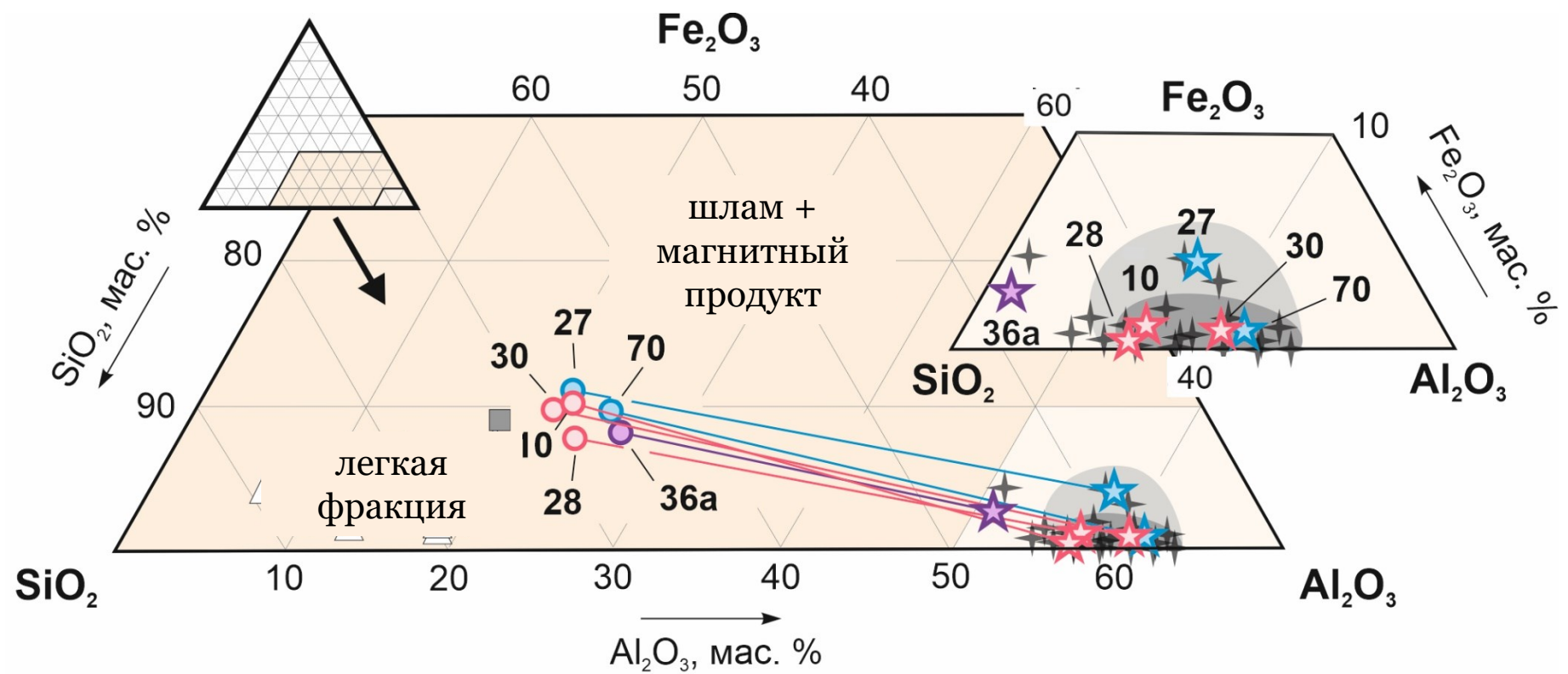
**Нераскрытые сростки андалузита, кианита, кварца, мусковита и биотита. Первичный концентрат, размерность 0.1-0.25 мм**  
*And – андалузит, Bt – биотит, Mnz-Ce – монацит-(Ce), Qz – кварц*

## III этап обогащения Финальный концентрат



Минерал	Содержание, %
$\text{Al}_2\text{SiO}_5$	70-97
Кварц (Qz)	3-10
Ставролит (St)	до 1
Слоистые силикаты (Ms + Bt + Chl)	2-30

# Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> концентраты: химический состав



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



коммерческие Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> продукты XX вв.



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



современные коммерческие Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> продукты



составы опытных Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> концентратов, полученных из высокоглиноземистых метаморфических пород

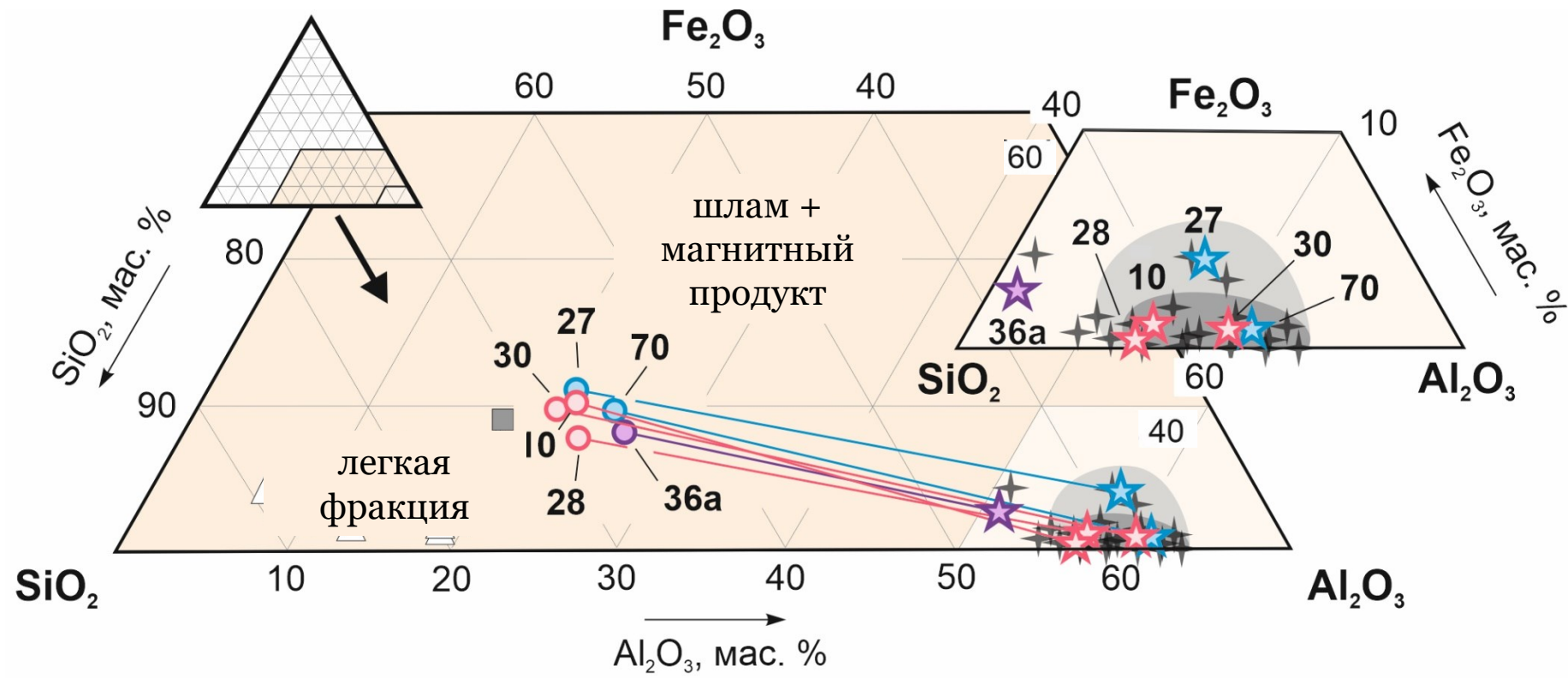
## Показатели обогащения рядовых пород Тейского комплекса

Размерность, мм	Продукт	Выход, %	$\text{Al}_2\text{SiO}_5$ , %
$0.06 \leq x < 0.1$	<b>Финальный концентрат</b>	<b>0.1 – 0.6</b>	73 – 97
$0.1 \leq x < 0.25$	<b>Финальный концентрат</b>	<b>0.7 – 6</b>	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 Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> продукты XX вв.
- a
б
в
концентраты: And (a), Ку (б), смешанные (в)
- современные коммерческие Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> продукты
- ★
составы опытных Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> концентратов, полученных из высокоглиноземистых метаморфических пород



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

**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 <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> , %
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
	<b>Финальный концентрат</b>	<b>0.1 – 0.6</b>	<b>73 – 97</b>
0.1 ≤ x < 0.25	Магнитный концентрат	26 – 41	до 9
	Легкая фракция	3 – 25	до 8
	Первичный концентрат	1 – 5	51 – 79
	<b>Финальный концентрат</b>	<b>0.7 – 6</b>	<b>70 – 95</b>

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

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