

УДК 553.615

DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-3-447-465

Высокоглиноземистые породы Панимбинской и Маяконской площадей Енисейского кряжа: вещественный состав и перспективы получения андалузитовых и кианитовых концентратов

А. В. Некипелова¹, Э. В. Сокол¹, С. Н. Кох¹, И. И. Лиханов¹, П. В. Хворов²

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, e-mail: nekipelova@igm.nsc.ru

²Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии, 456317, Челябинская обл., г. Миасс, Ильменский заповедник

Поступила в редакцию 23.12.2022 г., принята к печати 13.03.2023 г.

Объект исследования. Андалузит- и кианитсодержащие (13–19 мас. % Al_2SiO_5) породы Тейского метаморфического комплекса (Маяконский и Панимбинский участки), Енисейский кряж. **Цель исследования.** Изучение вещественного состава и обогатимости высокоглиноземистых пород Панимбинской и Маяконской площадей. **Материалы и методы.** Лабораторные эксперименты по обогащению метаморфических пород Тейского комплекса методами электромагнитной и гравитационной сепарации выполнены в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Концентраты получены из представительных проб андалузитовых, кианитовых и андалузит-кианитовых метапелитовых пород. Породы дробили, измельчали и классифицировали на фракции <0.06 , $0.06 \leq x < 0.1$ и $0.1 \leq x < 0.25$ мм. Выделение концентратов производили из размерных фракций ≥ 0.06 мм. Методами количественного рентгенофазового анализа, РФА, МС-ИСП и СЭМ охарактеризованы фазовый состав, петро- и геохимические особенности исходных пород и продуктов их обогащения. **Результаты.** На первом этапе обогащения с применением электромагнитной сепарации получен магнитный продукт, в котором сконцентрированы ставролит, биотит, хлорит, ильменит, пирротин и пирит. На втором этапе из немагнитных продуктов на центробежном концентраторе с использованием СНВг₃ выделены легкие продукты, в которых сконцентрированы кварц, полевые шпаты и мусковит. На последнем этапе с помощью двухножевого сепаратора тяжелый продукт предыдущего этапа обогащения поделен на “магнитный” первичный (52–92 мас. % Al_2SiO_5) и “немагнитный” финальный (70–97 мас. % Al_2SiO_5) концентраты. Андалузит-кианитовые концентраты с содержанием до 97 мас. % Al_2SiO_5 удалось получить с использованием наиболее дешевых и простых методов магнитной и гравитационной сепарации. Выходы андалузит-кианитовых концентратов невысокие (0.7–6%), однако сопоставимы с показателями обогащения кианитовых руд Карелии и Кольского полуострова и провинции Ганьсу, Китай. **Выводы.** Доказана возможность извлечения андалузитового и/или кианитового концентратов высокой чистоты из высокоглиноземистых метапелитов Тейского метаморфического комплекса.

Ключевые слова: высокоглиноземистое сырье, кианит, андалузит, концентраты, обогащение, Енисейский кряж

Источник финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 21-77-20018

High-alumina rocks from the Panimba and Mayakon areas (Yenisei Ridge): Composition and industrial perspectives

Anna V. Nekipelova¹, Ella V. Sokol¹, Svetlana N. Kokh¹, Igor I. Likhanov¹, Pavel V. Khvorov²

¹V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, 3 Academician Koptyug av., Novosibirsk 630090, Russia, e-mail: nekipelova@igm.nsc.ru

²South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology, UB RAS, Institute of Mineralogy, Ilmeny Reserve Area, Miass, Chelyabinsk region 456317, Russia

Received 23.12.2022, accepted 13.03.2023

Для цитирования: Некипелова А.В., Сокол Э.В., Кох С.Н., Лиханов И.И., Хворов П.В. (2023) Высокоглиноземистые породы Панимбинской и Маяконской площадей Енисейского кряжа: вещественный состав и перспективы получения андалузитовых и кианитовых концентратов. *Литосфера*, **23**(3), 447–465. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-3-447-465>

For citation: Nekipelova A.V., Sokol E.V., Kokh S.N., Likhanov I.I., Khvorov P.V. (2023) High-alumina rocks from the Panimba and Mayakon areas (Yenisei Ridge): Composition and industrial perspectives. *Lithosphere (Russia)*, **23**(3), 447–465. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-3-447-465>

© А.В. Некипелова, Э.В. Сокол, С.Н. Кох, И.И. Лиханов, П.В. Хворов, 2023

Research subject. Andalusite- and kyanite-bearing (13–19 wt % Al_2SiO_5) rocks of the Teya metamorphic complex (Mayakon and Panimba areas), Yenisei Ridge. **Aim.** To study the composition and mineral content of high-alumina rocks from the Panimba and Mayakon areas. **Materials and methods.** Laboratory mineral processing was employed to estimate the mineral content of metamorphic rocks of the Teya complex using a magnetic and gravity separation at the Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk). The concentrates were obtained from typical samples of andalusite, kyanite, and andalusite-kyanite metapelites. After crushing and grinding, the rock samples were separated into size fractions <0.06 , $0.06 \leq x < 0.1$ and $0.1 \leq x < 0.25$ mm. The concentrates were recovered from size fractions ≥ 0.06 mm. Phase, bulk rock, and trace element composition of the rock samples, mineral concentrates, and other fractions were analyzed using XRD, XRF, ICP-MS, and SEM. **Results.** The magnetic product obtained at the first stage of mineral processing using magnetic separation accumulated staurolite, biotite, chlorite, ilmenite, pyrrhotite, and pyrite. At the second stage, light products containing quartz, feldspars, and muscovite were separated from non-magnetic products with CHBr_3 using a centrifugal concentrator. At the last stage, using a double-knife separator, the heavy product from the previous beneficiation stage was separated into a “magnetic” raw concentrate (52–92 wt % Al_2SiO_5) and a “non-magnetic” final (70–97 wt % Al_2SiO_5) concentrate. The andalusite-kyanite concentrates (up to 97 wt % Al_2SiO_5) were obtained by the combination of cheapest and simplest methods of magnetic and gravity separation. The concentrates containing andalusite and kyanite with low recovery (0.7–6%) are comparable to the grade of kyanite-bearing ores of Karelia, the Kola Peninsula, and Gansu Province, China. **Conclusions.** The study shows that high-quality andalusite and/or kyanite concentrates can be recovered from high-alumina metapelites of the Teya metamorphic complex.

Keywords: high-alumina raw materials, kyanite, andalusite, concentrates, beneficiation, Yenisei Ridge

Funding information

This research was funded by Russian Science Foundation (RSF), grant No. 21-77-20018

Acknowledgements

We would like to thank Dr. P.S. Kozlov (IGG UB RAS, Ekaterinburg) for collecting a representative samples and consulting, as well as I.Yu. Vaskova and Yu.V. Demina (IGM SB RAS, Novosibirsk) for laboratory experiments on beneficiation of high-alumina rocks. The manuscript profited from valuable suggestions and criticism by anonymous reviewers.

ВВЕДЕНИЕ

Минералы группы силлиманита (силлиманит (*Sil*), кианит (*Ky*), андалузит (*And*)), обладающие исключительными огнеупорными свойствами, являются востребованным сырьем для производства огнеупоров с рабочими температурами до 1800–1900 °С, спецкерамики, противопожарных покрытий, различных литейных форм, композитных материалов и пр. (Лепезин, Горюнов, 1988; Огородников и др., 2013а; Фрулли, 2017; Niu et al., 2012). В перспективе из этого вида сырья возможна организация производства силумина, иных Al сплавов и металлического алюминия (Лепезин и др., 2010; Войтеховский и др., 2011; Лепезин, 2016а, б).

В настоящее время извлечение Al_2SiO_5 -концентратов осуществляется преимущественно из богатых руд простого фазового состава – кианитовых и/или силлиманитовых кварцитов, которые являются продуктами метасоматической переработки полиминеральных метаморфических субстратов, а также из россыпей. Добыча ведется из месторождений с запасами сырья в 1×10^6 т при

содержании Al_2SiO_5 фаз ≥ 10 –13% для метаморфических пород и 1–2% для россыпей (Лепезин и др., 2010; Огородников и др., 2013а; Лепезин, 2016а, б).

Эффективность процессов обогащения Al_2SiO_5 -руд определяется их вещественным составом, типами сростков, крупностью минералов и их индивидуальными свойствами. Анализ исследовательских работ и опыта промышленного обогащения метаморфогенно-метасоматических пород и материала россыпей показывает, что наиболее эффективным методом извлечения Al_2SiO_5 фаз является флотация в сочетании с методами гравитационной и/или магнитной сепарации и ультразвуковой обработки (Огородников и др., 2013а; Лепезин, 2016а, б; Zhao et al., 2017). Методы, дополняющие флотацию, используют для отделения кварца, алюмосиликатов, REE+Y-содержащих минералов, а также фаз-концентраторов Fe, Ti и S – ставролита, ильменита, сульфидов. На этом этапе получают низкосортный Al_2SiO_5 -концентрат, кондиции которого повышают, используя несколько циклов флотации. Поскольку флотационный метод обогащения Al_2SiO_5 руд очень дорог, постоянно предпринимаются попыт-

ки разработки принципиально иных схем обогащения метаморфических глиноземистых пород, преимущественно основанных на сочетании процедур гравитационной и магнитной сепарации (Mitchell, Harrison, 1997; Gogou et al., 2021).

На территории Енисейского кряжа выявлены несколько крупных площадей развития высокоглиноземистых метаморфических пород, которые в перспективе могут рассматриваться как региональная ресурсная база небокситовых источников глинозема (Козлов, 2018) (рис. 1). Слагающие их метапелиты содержат минералы группы силлиманита, ставролит и хлоритоид. Основные площади их развития сосредоточены в пределах Тейского метаморфического комплекса и включают в себя Тейское (*Sil*), Панимбинское (*And*), Маяконское и Чиримбинское (*And-Ky*), Кийское (*And-Ky-Sil*) и другие рудопроявления (Козлов, Лепезин, 1995; Козлов, 2018). Указанные площади расположены на правом берегу Енисея в таежной местности, удалены от Красноярска на 660 км, а от Енисейска – на 300 км и труднодоступны для автомобильного транспорта из-за отсутствия дорог с твердым покрытием и нестабильной работы паромной переправы через р. Енисей.

Нами выполнены лабораторные эксперименты по обогащению метаморфических пород Тейского комплекса, обладающих сложным фазовым составом. В настоящей статье приводится комплекс минералого-геохимических характеристик Al_2SiO_5 -концентратов и дается общая оценка потенциальной обогатимости железисто-глиноземистых метапелитов Маяконского и Панимбинского участков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Лабораторные эксперименты по обогащению метаморфических пород Тейского комплекса методами электромагнитной и гравитационной сепарации выполнены в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Фазовый состав и петро- и геохимические особенности как валовых проб, так и всех продуктов обогащения рядовых кианит-андалузитовых метапелитов Тейского комплекса охарактеризованы комплексом методов высокого разрешения. Петрографические наблюдения и диагностика минералов выполнены методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на сканирующем электронном микроскопе MIRA3-LMU (TESCAN ORSAY Holding) с системой микроанализа AZtec Energy Xmax-50+. СЭМ явилась базовым методом, позволяющим осуществлять диагностику минералов, определять химический состав фаз и контролировать раскрытие минеральных сростков. Содержание петрогенных элементов было определено методом атомной эмиссии на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой IRIS Advantage. Эти ис-



Рис. 1. Схема расположения метаморфогенных рудопроявлений андалузита, кианита и силлиманита (небокситовых источников высокоглиноземистого сырья) в пределах Заангарской части Енисейского кряжа (Козлов, 2018).

Fig. 1. Sketch of the Trans-Angara part of the Yenisei Ridge showing locations of occurrences of metamorphic non-bauxite Al-rich rocks (andalusite, kyanite, and sillimanite), modified after (Kozlov, 2018).

следования проводились в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ИГМ, г. Новосибирск). Микроэлементный состав проб определен методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре NexION 300S в ЦКП “Геоаналитик” (ИГиГ УрО РАН, г. Екатеринбург). В ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс) выполнен рентгенофазовый анализ пород на дифрактометре SHIMADZU XRD-6000 с использованием Си-анода и графитового монохроматора. Расчет количества кристаллических фаз проведен методом Ритвельда с использованием программного пакета SIROQUANT V4 без учета содержания рентгеноаморфной составляющей. Сокращения названий минералов даны по (Warr, 2021).

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РУДОПРОЯВЛЕНИЯХ

Панимбинское рудопроявление приурочено к мезопротерозойским углеродистым метапелитам (черным сланцам) кординской свиты среднерифей-

ского возраста (1350–1030 млн лет), метаморфизованным при *P-T* параметрах эпидот-амфиболитовой фации. Линзовидные рудные тела вытянуты в субмеридиональном направлении в соответствии с генеральным трендом простирания пород. Выделены северное и южное тела с геометрическими параметрами $1200 \times (50-750)$ и 650×40 м соответственно. Минеральная ассоциация метапелитов: $Qz + Ms + Chl + And \pm Cld \pm Pl \pm Gr$. Содержание Al_2O_3 в этих породах составляет 19.1–21.2 мас. %; прогнозные ресурсы в пересчете на андалузит при его содержании 10–12 мас. % на глубину 100 м оцениваются в 140×10^6 т (Козлов, Лепезин, 1995; Козлов, 2021).

Маяконское рудопроявление расположено севернее Панимбинского и сходно с последним по возрасту (средний рифей, 1350–1250 млн лет), набору и валовому химическому составу пород (табл. 1, 2). Его формирование связывают с локальным дислокационным метаморфизмом уровня кианит-силлиманитовой фации, наложенным на андалузит-

содержащие породы. Линзовидные рудные тела прослежены на расстояние до 1 км при мощности до 80 м. Типичный парагенезис метапелитов: $Ms + Chl + Bt + Qz + Ky + St \pm And \pm Pl$. Содержание Al_2O_3 в этих рудах достигает 23.9 мас. % при среднем содержании 20.3 мас. %, по данным (Козлов, Лепезин, 1995; Козлов, 2021), и 19.9 мас. %, по нашим данным. Прогнозные ресурсы, рассчитанные на глубину 50 м при среднем суммарном содержании $Al_2SiO_5 \approx 15\%$, оцениваются в 2.5×10^3 т (Козлов, 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика фазового, химического и микроэлементного состава высокоглиноземистых пород

Высокоглиноземистые метапелиты Тейского комплекса обладают сложным фазовым составом. В породах Панимбинского и Маяконского участков

Таблица 1. Содержания макро- (мас. %) и микрокомпонентов (г/т) в высокоглиноземистых породах Тейского комплекса
Table 1. Major (wt %) and trace element compositions (ICP MS data, ppm) of Al-rich rocks of the Teya metamorphic complex

Компонент	Панимбинское рудопроявление				Маяконское рудопроявление		Породы Тейского комплекса X_{cp} , n = 71
	Обр. 10	Обр. 27	Обр. 28	Обр. 30	Обр. 36а	Обр. 70	
SiO ₂	61.56	60.36	63.29	62.46	60.41	56.82	60.73
TiO ₂	1.04	1.07	0.91	0.97	0.96	0.99	0.96
Al ₂ O ₃	18.77	19.62	20.01	19.40	23.29	22.99	19.98
Fe ₂ O ₃	9.49	9.74	6.92	8.61	7.60	8.35	7.80
MnO	0.06	0.07	0.06	0.06	0.04	0.07	0.09
MgO	3.01	3.09	2.23	2.40	1.37	2.25	2.05
CaO	0.19	0.30	0.17	0.08	0.28	0.16	0.83
Na ₂ O	0.16	0.26	0.25	0.12	1.01	0.43	0.62
K ₂ O	4.00	3.41	4.10	3.42	3.45	3.52	3.33
P ₂ O ₅	0.08	0.10	0.07	0.07	0.11	0.08	0.12
BaO	0.07	0.06	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06
П.п.п.	1.92	1.89	1.92	2.56	1.48	3.60	3.19
Сумма	100.37	100.02	100.03	100.24	100.09	99.34	—
Li	29	40	18	28	30	50	37
Co	17	21	9.0	8.0	10	11	10
Ga	19	15	18	18	22	21	17
Zr	140	110	110	1130	110	120	130
Nb	12	11	11	11	10	13	12
Th	4.6	2.9	2.9	9.0	5.0	3.1	3.8
U	2.1	1.2	1.6	1.9	1.5	2.4	1.7
ΣREE	50.3	16.4	22.1	108	65.4	11.6	38

Примечание. X_{cp} – средние содержания, рассчитанные для пород обоих участков.

Note. X_{cp} – average contents were calculated for both Panimba and Mayakon localities.

Таблица 2. Фазовый состав высокоглиноземистых пород Тейского комплекса и продуктов их обогащения по данным количественного рентгенофазового анализа, мас. %

Table 2. Mineral composition of Al-rich rocks of the Teya metamorphic complex and their beneficiation products according to the data of quantitative X-ray phase analysis, wt %

Фаза	Размерность, мм									
	–	<0.06	0.06 ≤ x < 0.1				0.1 ≤ x < 0.25			
	Исходная проба	Шлам	Магнитный концентрат	Легкая фракция	Первичный концентрат	Финальный концентрат	Магнитный концентрат	Легкая фракция	Первичный концентрат	Финальный концентрат
Обр. 10										
<i>And</i>	15	6	3	23	67	73	5	8	78	86
<i>Qz</i>	49	68	44	72	22	23	52	82	14	10
<i>Ms+Bt</i>	29	20	44	5	8	3	32	7	7	4
<i>Chl</i>	7	6	8	<1	2	<1	6	2	<1	<1
<i>Zeo</i>	<1	<1	1	<1	<1	<1	5	1	1	<1
Обр. 27										
<i>Ky</i>	20	≤3	≤3	≤3	92	94	≤3	≤3	52	82
<i>And</i>	<1	3	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
<i>Qz</i>	45	66	42	91	4	3	39	78	9	4
<i>St</i>	14	15	16	<1	2	<1	16	<1	10	<1
<i>Ms+Bt</i>	21	16	37	9	2	3	45	18	6	6
<i>Chl</i>	<1	<1	3	<1	<1	<1	<1	4	23	8
<i>Zeo</i>	<1	<1	2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Обр. 28										
<i>And</i>	17	11	7	21	69	76	5	6	79	92
<i>Qz</i>	49	60	56	72	25	21	62	70	11	6
<i>KFsp</i>	4	<1	<1	<1	<1	<1	<1	12	<1	<1
<i>St</i>	5	5	5	<1	<1	<1	6	<1	<1	<1
<i>Ms+Bt</i>	24	19	31	7	6	3	25	12	10	2
<i>Chl</i>	1	3	1	<1	<1	<1	2	<1	<1	<1
<i>Zeo</i>	<1	2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Обр. 30										
<i>And</i>	14	8	10	19	60	92	8	7	87	95
<i>Ky</i>	<2	≤3	≤3	≤3	17	≤3	≤3	≤3	≤3	≤3
<i>Qz</i>	55	63	35	71	15	5	41	75	8	3
<i>St</i>	5	5	9	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
<i>Ms+Bt</i>	21	17	38	10	8	3	42	15	5	2
<i>Chl</i>	5	7	8	<1	<1	<1	9	3	<1	<1
Обр. 36а										
<i>Ky</i>	13	≤3	≤3	≤3	55	57	≤3	≤3	29	36
<i>And</i>	5	6	<1	3	13	23	<1	3	22	39
<i>Qz</i>	50	50	23	67	12	9	27	61	16	6
<i>Pl</i>	8	14	<1	15	<1	<1	<1	21	<1	<1
<i>Ms+Bt</i>	9	10	36	<1	11	3	30	<1	12	4
<i>Chl</i>	15	20	41	12	9	7	43	12	19	12
<i>Zeo</i>	<1	<1	<1	2	<1	<1	<1	3	2	3
Обр. 70										
<i>Ky</i>	13	≤3	≤3	≤3	90	97	≤3	≤3	75	70
<i>Qz</i>	45	55	20	86	2	2	22	73	1	<1
<i>St</i>	8	7	56	<1	4	<1	43	<1	1	<1
<i>Ms+Bt</i>	24	27	13	13	4	1	17	21	19	30
<i>Chl</i>	10	11	11	1	<1	<1	18	6	4	<1

Примечание. *And* – андалузит, *Bt* – биотит, *Chl* – хлорит, *KFsp* – калиевый полевой шпат, *Ky* – кианит, *Ms* – мусковит, *Pl* – плагиоклаз, *Qz* – кварц, *St* – ставролит, *Zeo* – цеолит.

Note. *And* – andalusite; *Bt* – biotite, *Chl* – chlorite, *KFsp* – potassium feldspar, *Ky* – kyanite, *Ms* – muscovite, *Pl* – plagioclase, *Qz* – quartz, *St* – staurolite, *Zeo* – zeolite.

количественно преобладают кварц (7–63 мас. %) и слюды (мусковит + биотит ± маргарит – 8–49 мас. %), часто присутствует хлорит (до 20 мас. %), иногда – плагиоклаз (до 29 мас. %), гранаты (до 9 мас. %) и цеолиты (до 1 мас. %). Алюминий распределен между пятью минералами-носителями: андалузит и/или кианит (62–63 мас. % Al_2O_3) и развивающиеся по ним маргарит (48–51 мас. % Al_2O_3) и мусковит (38–39 мас. % Al_2O_3), а также ставролит (53–55 мас. % Al_2O_3). Породы Панимбинского участка преимущественно содержат андалузит (3–17 мас. %), в единичных пробах – кианит (до 29%); в половине проб также обнаружен ставролит (2–15 мас. %). Породы Маяконского участка содержат до 20 мас. % кианита. Ставролит присутствует практически во всех пробах (1–13 мас. %), тогда как андалузит (3–24 мас. %) обнаружен только в 1/3 проб.

В микрозернистом матриксе метапелитов кординской свиты Тейского комплекса андалузит образует крупные (до 2 см) хаотично распределенные идиоморфные порфиобласты (часто хиастолиты) (рис. 2). Состав минерала близок к стехиометрическому, характерная для этого минерала примесь FeO присутствует постоянно, но в малых количествах (0.22–0.37 мас. %; $X_{cp} = 0.25$ мас. %, $n = 30$). В метапелитах Панимбинского участка большинство индивидов андалузита замещено агрегатом мусковита, образующим толстые каймы (см. рис. 2б, г, д), а в предельных случаях – полные псевдоморфозы (см. рис. 2в). По трещинам, секущим центральные части индивидов андалузита, часто развивается маргарит (см. рис. 2д, 5з). В породах Маяконского участка крупные пойкилокристаллы андалузита отличаются лучшей сохранностью, однако содержат включения кварца и биотита.

Радиально-лучистый кианит псевдоморфно замещает ранний андалузит и часто образует сростки со ставролитом (рис. 3). Эти скопления окружены массой из биотитовых и мусковитовых чешуи и мелких зерен кварца (см. рис. 3а–в). Кианит, как правило, свежий, единственной характерной примесью в нем является FeO (0.24–0.57 мас. %; $X_{cp} = 0.32$ мас. %, $n = 14$).

Ставролит образует свежие идиоморфные порфиобласты (до 1 мм). В минерале регулярны обильные мельчайшие включения кварца, которые сосредоточены в центре индивидов или расположены по секторам роста; на периферии зерен количество включений обычно резко падает (рис. 4). Ставролит в среднем содержит 14 мас. % FeO и постоянную примесь магния (0.65–1.84 мас. % MgO; $X_{cp} = 1.29$, $n = 60$), реже отмечаются титан (0.28–0.73 мас. % TiO_2) и марганец (0.19–0.44 мас. % MnO). В породах Маяконского участка ставролит в единичных случаях содержит примесь цинка (0.34–0.81 мас. % ZnO).

Среди аксессуарных минералов в породах Панимбинского и Маяконского участков доминиру-

ет ильменит, регулярно отмечается монацит, реже встречаются рутил, ксенотим, циркон и фторапатит (см. рис. 2г, д; 3в, г; 5). Породы Панимбинского участка отличаются разнообразием аксессуарных фаз: помимо перечисленных выше минералов в них регулярно встречаются пирит, пирротин и иногда халькопирит и барит, присутствуют единичные выделения цинкита, торианита, галенита, молибденита, кубанита, сульфидов Ag и сульфотеллуридов Bi. Аксессуары, как правило, образуют скопления мелких зерен, стяжения неправильной формы, сложные многофазные сростки (см. рис. 5а–е). В кианите количество включений минимально. Для андалузита, напротив, характерно их обилие. Ядра хиастолитов часто наполнены мелкими (20–70 мкм) включениями ильменита, рутила и реже циркона (до 10 мкм) (см. рис. 2д). На границе порфиобластов андалузита и вмещающей их породы иногда сосредоточены зерна ильменита и Th-содержащего монацита (см. рис. 5ж).

Уровни содержаний макро- и микрокомпонентов в метапелитах Тейского комплекса иллюстрирует табл. 1. На Панимбинском и Маяконском рудопроявлениях они обладают сходным макрокомпонентным составом. Эти породы следует классифицировать как высокоглиноземистые ($X_{cp} \approx 20$ мас. % Al_2O_3) метапелиты с умеренным содержанием K_2O ($X_{cp} = 3.44$ мас. %) и низким – CaO ($X_{cp} = 0.74$ мас. %, $n = 71$). В 80% проб концентрация Al_2O_3 имеет диапазон 16–22 мас. %, достигая 24–33 мас. % в единичных образцах. Концентрации $Fe_2O_3_{общ}$ ($X_{cp} = 7.91$ мас. %, $X_{max} = 11.93$ мас. %), MgO ($X_{cp} = 2.12$ мас. %) достаточно высоки, титана – умеренные ($TiO_2 = 0.96$ мас. %) ($n = 71$), содержания MnO ($X_{cp} = 0.09$ мас. %), P_2O_5 ($X_{cp} = 0.12$ мас. %) и Na_2O ($X_{cp} = 0.64$ мас. %) низкие.

Количество V, Cu, Ga и Nb в метапелитах Тейского комплекса сопоставимо со средними их содержаниями с верхней континентальной коре (UCC) (Rudnick, Gao, 2003), а концентрации Rb, Y, Zr, ΣREE , Th и U понижены. В целом распределение микроэлементов в породах Тейского комплекса сходно с таковым в породах кейвской серии. Относительно последних породы Тейского комплекса в среднем в 2–5 раз беднее REE (179 и 38 г/т соответственно), Th (11.9 и 3.78 г/т), Y (12.3 и 4.64 г/т), Rb (53.3 и 21.3 г/т) и Co (23.5 и 9.75 г/т) (Огородников и др., 2013б).

Технологически благоприятными параметрами изученных руд Енисейского кряжа являются: 1) крупная зернистость Al_2SiO_5 фаз; 2) фактическое отсутствие в породах сульфидов и плагиоклазов и низкие содержания в них S, Ca, Mn, P; 3) низкая степень графитизации; 4) особенности фаз-концентраторов Fe, Mg и Ti (ставролита, биотита и ильменита), которые могут быть эффективно удалены из концентрата Al_2SiO_5 посредством магнитной сепарации; 5) минимальное количество

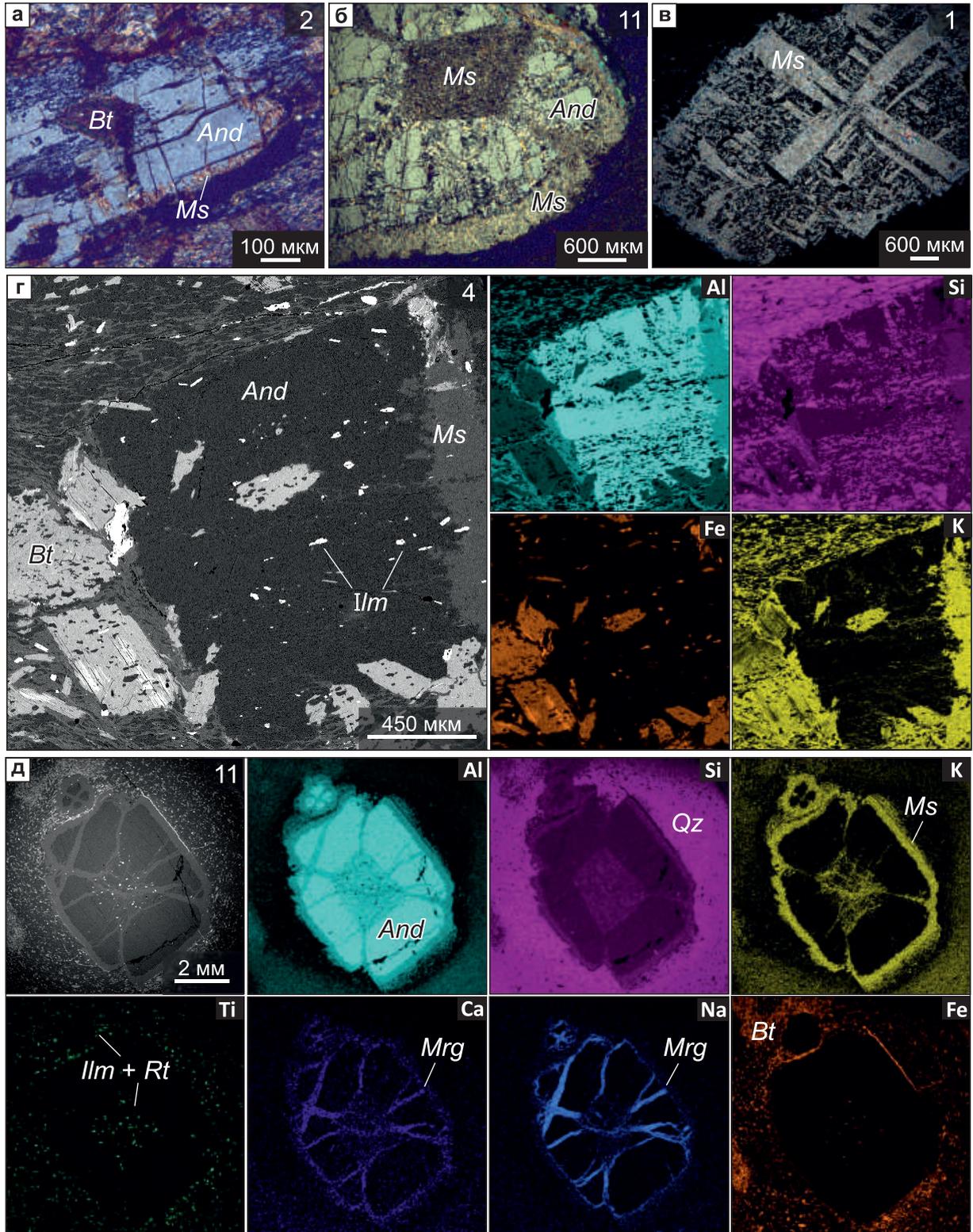


Рис. 2. Морфология андалузита из высокоглиноземистых пород Тейского комплекса (Панимбинский участок).

Оптические фотографии, николи скрещены: а – порфиробласт андалузита с тонкой мусковитовой каймой; б – индивид андалузита (хиастолит), частично замещенный мусковитом; в – полная псевдоморфоза мусковита по андалузиту. Изображения в обратнорассеянных электронах и карты в характеристическом излучении Al, Si, K, Ca, Na, Fe и Ti: г – крупный индивид андалузита, насыщенный включениями ильменита; д – хиастолит, замещенный маргаритом внутри и мусковитом снаружи. *And* – андалузит, *Bt* – биотит, *Ilm* – ильменит, *Mrg* – маргарит, *Ms* – мусковит, *Rt* – рутил, *Qz* – кварц.

Fig. 2. Optical and BSE images showing morphology and inner texture of andalusite from high-Al rocks of the Teya metamorphic complex (Panimba area).

Optical images, cross polarized light. a – Andalusite's porphyroblast rimmed by muscovite; б – andalusite (chiastolite) partially replaced by muscovite; в – andalusite totally replaced by muscovite. BSE images and elemental maps (Al, Si, K, Ca, Na, Fe and Ti) for andalusite: г – large andalusite grain stuffed with ilmenite; д – chiastolite, replaced by margarite (inside) and muscovite (outer rim). *And* – andalusite, *Bt* – biotite, *Ilm* – ilmenite, *Mrg* – margarite, *Ms* – muscovite, *Rt* – rutile, *Qz* – quartz.

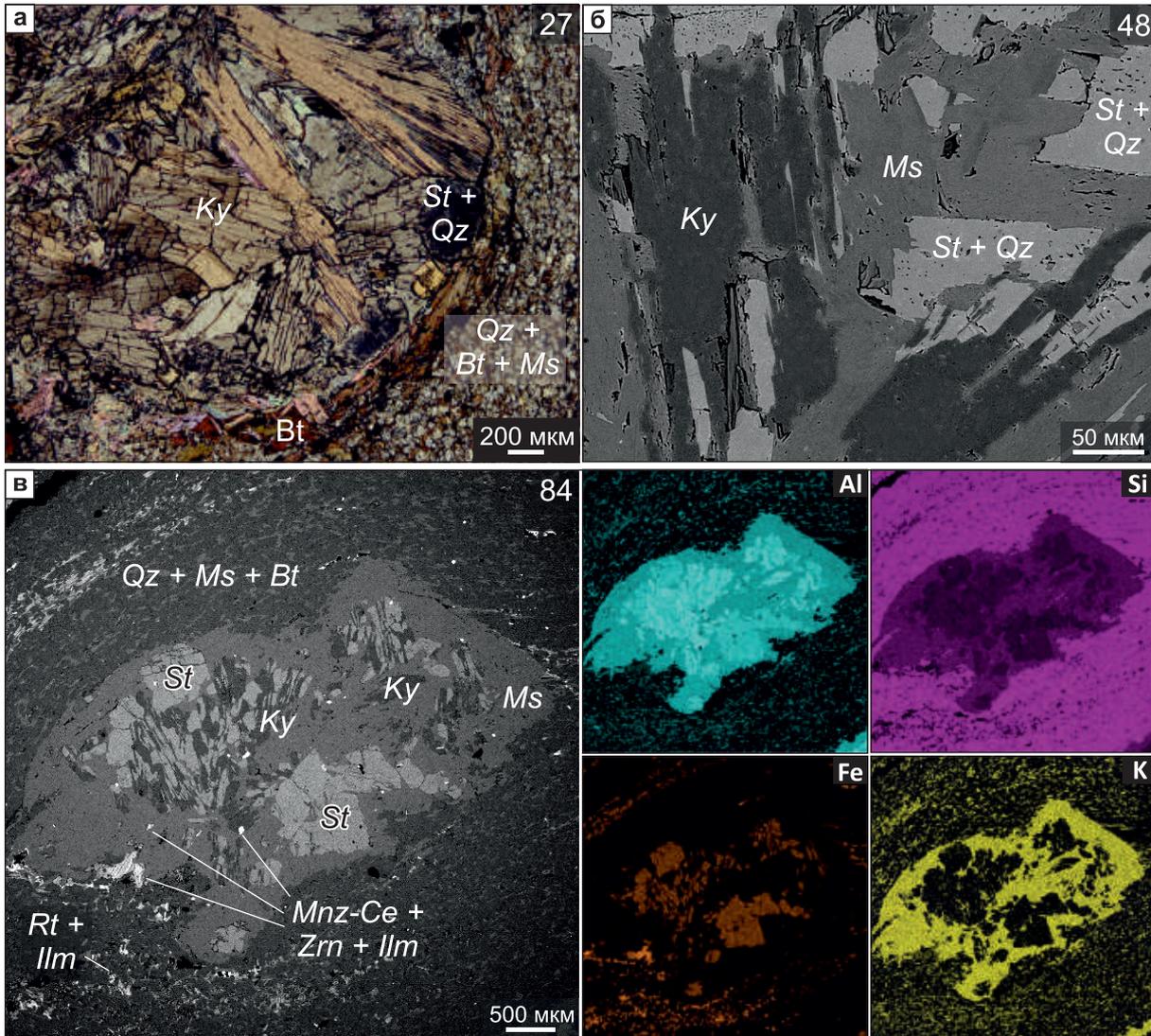


Рис. 3. Морфология кyanита из высокоглиноземистых пород Тейского комплекса (Маяконский участок).

Оптическая фотография, без анализатора (а) изображения в обратнорассеянных электронах (б, в) и карты в характеристическом излучении Al, Si, Fe и K (г). а, в – агрегат кyanита и ставролита, окруженный мусковитовой каймой и замещающий крупные кристаллы андалузита; монацит, циркон и ильменит в кyanит-ставролитовом агрегате (в); б – сложные сростки кyanита, ставролита и кварца. *Ilm* – ильменит, *Ky* – кyanит, *Ms* – мусковит, *Pl* – плагиоклаз, *Qz* – кварц, *Rt* – рутил, *St* – ставролит, *Mnz-Ce* – монацит-(Ce), *Zrn* – циркон.

Fig. 3. Optical and BSE images showing morphology and inner texture of kyanite from high-Al rocks of the Teya metamorphic complex (Mayakon area).

Optical images, plan polarized light (a), BSE images (б, в) and elemental maps (Al, Si, Fe and K) for kyanite (г). а, в – kyanite and staurolite intergrowth formed after large andalusite crystals and rimmed by muscovite; monazite, zircon, and ilmenite in a kyanite-staurolite aggregate (в). б – complex intergrowths of kyanite, staurolite and quartz. *Ilm* – ilmenite, *Ky* – kyanite, *Ms* – muscovite, *Pl* – plagioclase, *Qz* – quartz, *Rt* – rutile, *St* – staurolite, *Mnz-Ce* – monazite-(Ce), *Zrn* – zircon.

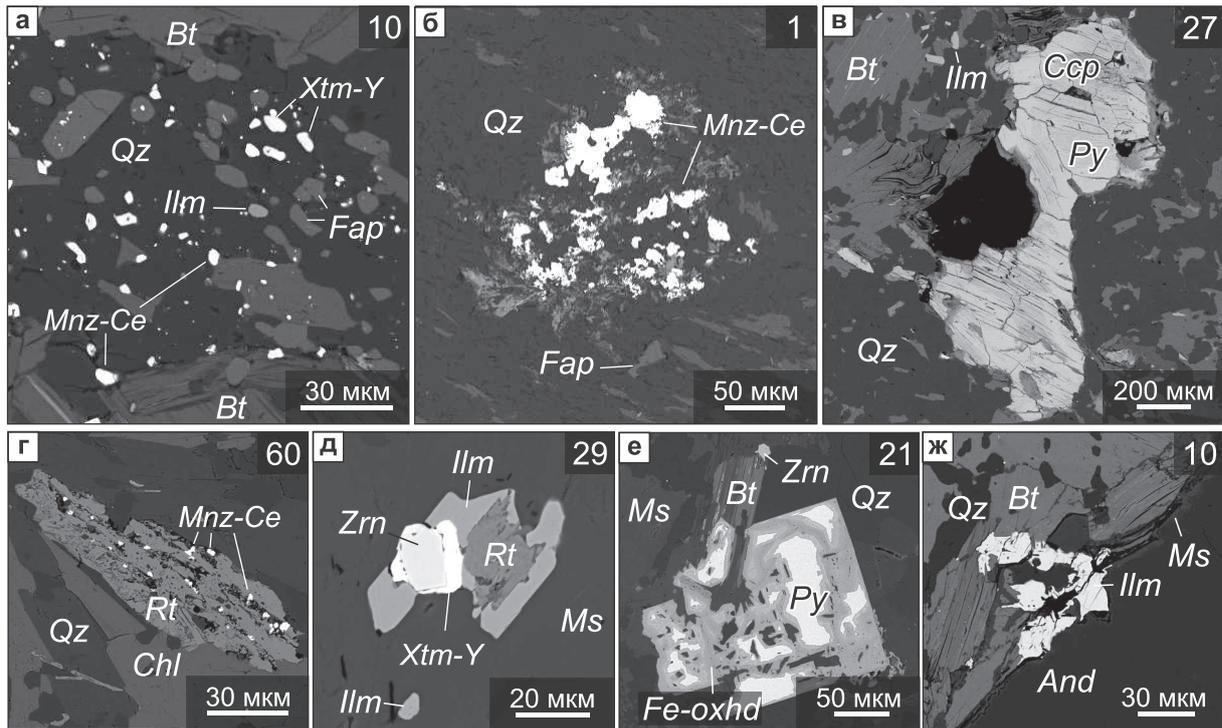


Рис. 4. Морфология, разнообразие и взаимоотношения аксессуарных фаз из высокоглиноземистых пород Тейского комплекса (Панимбинский (а–в, д–ж) и Маяконский (г) участки). Изображения в обратнорассеянных электронах.

а – скопление мелких зерен фосфатов Ca, Ce и Y в кварце; б – стяжение монацита неправильной формы; в – ксеноморфное зерно пирита в кварц-биотитовом матриксе; г, д – сложные сростки рутила, монацита, ксенотима, ильменита и циркона в кварц-хлорит-мусковитовом матриксе; е – частично окисленный пойкилокристалл пирита в кварц-слюдистом матриксе; ж – зерна ильменита на границе андалузита и окружающей массы. *And* – андалузит, *Bt* – биотит, *Ccp* – халькопирит, *Chl* – хлорит, *Fap* – фтор-апатит, *Fe-oxhd* – Fe-(окси)гидроксиды, *Ilm* – ильменит, *Mnz-Ce* – монацит-(Ce), *Ms* – мусковит, *Py* – пирит, *Qz* – кварц, *Rt* – рутил, *Xtm* – ксенотим, *Zrn* – циркон.

Fig. 4. Back-scattered images showing diversity, morphology, and relationship of accessories in Al-rich rocks of the Teya metamorphic complex (Panimba (a–v, d–j) and Mayakon (g) areas).

a – segregation of tiny grains of Ca, Ce, and Y phosphates in quartz; б – irregular monazite grains; в – anhydrous pyrite grain buried in quartz-biotite matrix; г, д – complex intergrowths of rutile, monazite, xenotime, ilmenite, and zircon in a quartz-chlorite-muscovite matrix; е – partially oxidized pyrite poikilocrystal in quartz-muscovite matrix; ж – grains of ilmenite localized at the border of andalusite and the surrounding mass. *And* – andalusite, *Bt* – biotite, *Ccp* – chalcopyrite, *Chl* – chlorite, *Fap* – fluoroapatite, *Fe-oxhd* – Fe-(oxy)hydroxides, *Ilm* – ilmenite, *Mnz-Ce* – monazite-(Ce), *Ms* – muscovite, *Py* – pyrite, *Qz* – quartz, *Rt* – rutile, *Xtm* – xenotime, *Zrn* – zircon.

изоморфной примеси железа в полиморфных модификациях Al_2SiO_5 (≈ 0.3 мас. % FeO). Особенности, способными отрицательно сказаться на эффективности выделения Al_2SiO_5 -концентратов и их качестве, являются: 1) сложный фазовый состав руд при умеренном содержании в них полиморфов Al_2SiO_5 , 2) высокая степень вторичного замещения андалузита мусковитом и маргаритом.

Характеристика полученных концентратов

В лабораторных условиях методами гравитационной и магнитной сепарации без использования флотации из типичных высокоглиноземи-

стых метаморфических пород Тейского комплекса получены концентраты андалузита и кианита. Концентраты извлекались из андалузитовых (Панимбинское рудопроявление – обр. 10, 28, 30), кианитовых (Маяконское рудопроявление – обр. 70) и андалузит-кианитовых (Маяконское рудопроявление – обр. 36а) метапелитовых пород (см. табл. 2). Содержания полезного компонента в преимущественно андалузитовых породах Маяконского и Панимбинского рудопроявлений составляли 14–17 мас. % *And* и до 2 мас. % *Ky*, в кианитовых – 20–13 мас. % *Ky* и до 5 мас. % *And*. Содержания прочих фаз в этих породах, %: кварц – 45–55, слюды (мусковит + биотит ± маргарит) –

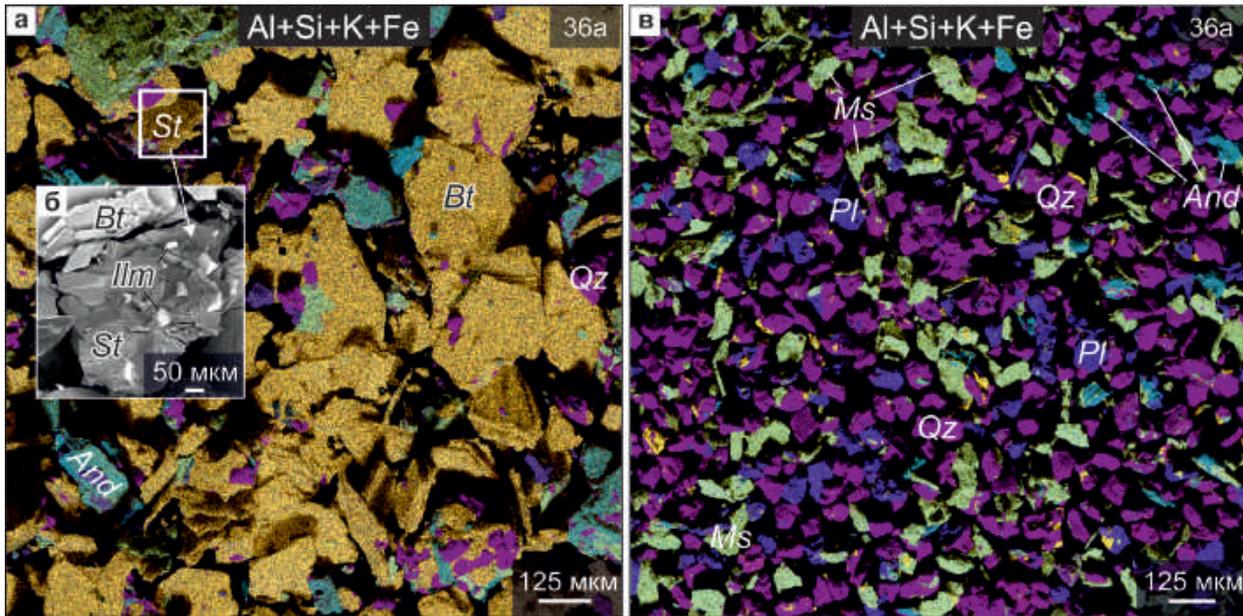


Рис. 5. Соотношение и разнообразие минералов в магнитном (а, б) и легком (в) продуктах обогащения высокоглиноземистых пород Тейского комплекса (Маяковский участок).

Многоэлементные карты в характеристическом излучении Al, Si, K, Fe (а, в) и изображение в обратнорассеянных электронах (б). В магнитных продуктах абсолютно преобладает биотит и существенно концентрируются ставролит, ильменит и сульфиды; в легкой фракции сосредоточены кварц, мусковит и полевые шпаты. *And* – андалузит, *Bt* – биотит, *Ky* – кyanит, *Pl* – плагиоклаз, *Qz* – кварц, *St* – ставролит.

Fig. 5. Mineralogy and the ratio of phases in the magnetic (a, в) and light (б) products extracted from Al-rich rocks of the Teya metamorphic complex (Mayakon area).

Multi-element maps (Al, Si, K, and Fe) (а, в) and BSE image (б). Biotite is mainly concentrated in the magnetic products, and staurolite, ilmenite, and sulfides are present in subordinated amounts; the light fraction contains quartz, muscovite and feldspars. *And* – andalusite, *Bt* – biotite, *Ky* – kyanite, *Pl* – plagioclase, *Qz* – quartz, *St* – staurolite.

9–29, ставролит – до 14, хлорит – до 15, полевые шпаты – до 8, цеолиты – <1.

Породы дробили, измельчали и классифицировали на фракции <0.06 , $0.06 \leq x < 0.1$ и $0.1 \leq x < 0.25$ мм. Пылевая фракция (<0.06 мм) концентрирует (%): кварц (50–68), слюды (16–27) и ставролит (5–15). Содержание в ней полиморфов Al_2SiO_5 и хлорита достигает 11, плагиоклазов – 14, цеолитов – 2 мас. % (табл. 2). За счет концентрирования микрозерен (≤ 10 мкм) аксессуарных минералов эта фракция слабо обогащена Zr (до 150 г/т), Th (до 16 г/т), U (до 3 г/т), ΣREE (до 252 г/т) (табл. 3). Выход пылевой фракции высокий – 32–38% (табл. 4). В дальнейший цикл обогащения она не включалась.

Выделение концентратов производили из фракций ≥ 0.06 мм. На первом этапе осуществлялась электромагнитная сепарация на роликовом сепараторе 138Т-СЭМ. В магнитном продукте оказались сконцентрированы минералы Fe (%): ставролит (до 56), биотит (до 43), хлорит (до 18), ильменит и сульфиды (см. табл. 2, 3). Средние содержания в нем Fe_2O_3 (≈ 15 мас. %) и TiO_2 (≈ 1.6 мас. %), Li и Co (≈ 30 г/т), Nb (≈ 20) возраста-

ют в 1.5–2 раза относительно исходной породы. Ставролит, ильменит и кварц образуют сложные сростки, тогда как индивиды биотита, пирротина и халькопирита освобождены целиком (рис. 6а, б). Выход магнитного продукта составил: 4–8 и 26–41% (для фракций 0.06–0.1 и 0.1–0.25 мм соответственно). В андалузитовых породах из-за неполного раскрытия сростков *And-Bt-St* в магнитную фракцию уходит 5–10% Al_2SiO_5 . Индивиды кyanита вскрываются лучше, и его потери не превышают 2% (см. табл. 4).

На втором этапе из немагнитных продуктов на центробежном концентраторе с использованием $CHBr_3$ ($\rho \approx 2.9$ г/см³) выделены гравитационные концентраты. Полученный таким образом легкий продукт обогащен кварцем (67–91 мас. %), полевыми шпатами (до 33 мас. %) и мусковитом (5–14 мас. %) с преобладанием их отдельных индивидов (см. табл. 2, рис. 6в). Для андалузитовых проб выход легкого продукта составил 3–11%; содержание *And* во фракциях 0.1–0.25 мм невелико (6–8%). При этом во фракцию 0.06–0.1 мм уходит 19–23% полезного компонента. Для кyanитовых пород вы-

Таблица 3. Средние (n = 6) содержания макро- (мас. %) и микрокомпонентов (г/т) в продуктах обогащения высокоглиноземистых пород Тейского комплекса

Table 3. Average content of major (wt %) and trace elements (ppm) in the beneficiation products of Al-rich rocks of the Teya metamorphic complex

Компо- нент	Размерность, мм								
	<0.06	0.06 ≤ x < 0.1				0.1 ≤ x < 0.25			
	Шлам	Магнитный концентрат	Легкая фракция	Первичный концентрат	Финальный концентрат	Магнитный концентрат	Легкая фракция	Первичный концентрат	Финальный концентрат
SiO ₂	67.11	48.23	77.62	42.06	38.57	50.15	74.51	41.48	39.76
TiO ₂	0.82	1.64	0.19	0.23	0.02	1.57	0.30	0.49	0.06
Al ₂ O ₃	17.06	22.31	14.18	50.95	58.06	20.78	14.59	50.35	56.55
Fe ₂ O ₃	6.52	15.39	3.51	2.84	1.06	15.18	3.23	3.39	1.52
MnO	0.05	0.10	0.03	0.03	0.02	0.10	0.03	0.03	0.02
MgO	1.78	4.20	0.33	0.46	0.08	4.10	0.52	0.59	0.11
CaO	0.24	0.17	0.18	0.21	0.14	0.18	0.21	0.16	0.16
Na ₂ O	0.45	0.19	0.41	0.17	0.07	0.21	0.61	0.16	0.08
K ₂ O	3.17	4.60	1.97	1.34	0.51	4.68	3.21	1.56	0.51
P ₂ O ₅	0.10	0.06	0.05	0.04	0.02	0.07	0.07	0.05	0.05
П.п.п.	2.17	2.60	1.01	1.12	0.60	2.58	2.14	1.23	0.59
Сумма	99.46	99.5	99.46	99.45	99.15	99.60	99.42	99.48	99.40
Li	18.2	29.4	6.75	23.4	25.7	29.5	6.00	20.9	21.5
Co	14.2	32.3	3.97	8.14	1.10	33.3	4.53	8.30	3.55
Ga	21.7	38.0	14.7	36.2	41.0	36.0	16.8	38.6	33.3
Nb	9.33	19.6	2.60	2.38	0.52	19.5	4.23	4.87	1.07
Zr	112	87.0	80.2	71.4	59.7	100	98.0	67.4	40.9
Th	9.50	6.79	5.17	5.32	3.70	8.36	7.23	3.49	2.47
U	2.37	1.83	1.28	1.54	1.00	2.01	1.62	1.26	0.72
ΣREE	145	110	86.5	90.1	42.4	152	130	63.0	42.1

ход легкого продукта составил 6–9% (0.06–0.1 мм) и 7–25% (0.1–0.25 мм) при незначительных (≤ 3%) потерях Ку (см. табл. 4).

На последнем этапе с помощью электромагнитного сепаратора УЭМ-1Г тяжелый продукт предыдущего этапа обогащения был поделен на магнитный первичный и немагнитный финальный концентраты. Первичный концентрат содержал частично вскрытые сростки нерудных минералов (%): кварца (1–22), слюд (2–19), ставролита (1–12) и хлорита (до 4) (см. табл. 2). В этом продукте андалузит часто присутствует в виде нераскрытых сростков (размером до 60–80 мкм), тогда как кианит преимущественно представлен целиком вскрытыми пластинками. Максимальный выход (≤ 5%) первичных концентратов при содержании Al₂SiO₅ 52–79 мас. % получен из фракции 0.1–0.25 мм. Выход этого продукта из фракции 0.06–0.1 мм не превышает 0.5% при варьирующемся содержании And и/или Ку 67–92 мас. % (см. табл. 4).

Финальные концентраты содержали 70–95 мас. % (фракция 0.1–0.25 мм) и 73–97% (0.06–0.1 мм) Al₂SiO₅, их выход составил 0.7–4.1 и 0.1–0.6% соответственно (см. табл. 4). Эти продукты удалось практически целиком очистить от ставролита, ильменита, рутила и пирротина (см. табл. 3). В финальных концентратах остается минимальное количество вскрытых фрагментов кварца (X_{ср} = 8%) и алюмосиликатов (X_{ср} = 6%). Детальное изучение первичного и финального рудных концентратов методом СЭМ показало, что большинство индивидов андалузита содержат минеральные включения размером от ≤10 до 80 мкм. Типичны вросстки слюд, ильменита, монацита, реже встречаются циркон, ксенотим, спорадически присутствуют фторapatит и ставролит. Кианит содержит минимальное количество включений: обычен мусковит, реже встречаются биотит и ильменит, в единичных случаях – циркон и пирротин. Наиболее эффективно сростки Al₂SiO₅ рас-

Таблица 4. Технологические показатели обогащения высокоглиноземистых пород Тейского комплекса**Table 4.** Technological indicators of beneficiation of Al-rich rocks of the Teya metamorphic complex

Размерность, мм	Продукт	Обр. 10		Обр. 27		Обр. 28		Обр. 30			Обр. 36а			Обр. 70	
		γ	And	γ	Ky	γ	And	γ	And	Ky	γ	And	Ky	γ	Ky
–	Исходная проба	–	15	–	14	–	17	–	14	<2	–	5	13	–	13
<0.06	Шлам	38.0	6	44.3	3	37.0	11	39.5	8	≤3	32.0	6	<1	36.0	<1
0.06 ≤ x < 0.1	Магнитный концентрат	7.7	6	6.0	<1	4.8	7	5.9	10	≤3	4.3	<1	<1	4.7	<1
	Легкая фракция	2.8	23	6.0	<1	5.2	21	5.6	19	≤3	8.3	<1	3	9.2	<1
	Первичный концентрат	0.4	67	0.4	92	0.5	69	0.1	60	17	0.1	13	55	0.1	90
	Финальный концентрат	0.1	73	0.3	93	0.6	76	0.4	92	≤3	0.2	23	57	0.1	97
0.1 ≤ x < 0.25	Магнитный концентрат	41.4	9	32.4	<1	32.4	5	29.9	7	≤3	25.8	<1	<1	29.0	<1
	Легкая фракция	3.4	8	6.5	<1	11.8	6	9.7	8	≤3	25.4	<1	3	19.0	<1
	Первичный концентрат	5.4	78	1.9	52	3.7	79	2.9	78	≤3	2.0	22	29	1.2	75
	Финальный концентрат	0.7	86	2.2	82	4.1	92	6.0	95	≤3	1.9	39	36	0.7	70
Сумма		100.0		100.0		100.0		100.0			100.0			100.0	

Примечание. γ – выход фракций, %. Содержание андалузита и кианита – по данным количественного рентгенофазового анализа, мас. %. And – андалузит, Ky – кианит.

Note. γ – fractions yield, %. Content of andalusite and kyanite was estimated by Rietveld X-ray diffraction analysis, wt %. And – andalusite, Ky – kyanite.

кряваются в финальных концентратах размерностью 0.06–0.1 мм.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Особенности высокоглиноземистого сырья Енисейского кряжа

Заангарье Енисейского кряжа традиционно рассматривается как один из перспективных районов Сибири, где в ходе геологических съемок второй половины XX в. были обнаружены обширные площади распространения небокситового сырья – высокоглиноземистых метаморфических пород с уровнями содержаний Al_2O_3 , отвечающими промышленным кондициям ($X_{cp} \approx 20$ мас. %, см. табл. 1). В их число входит около 40 объектов кианит-силлиманит-андалузитовой минерализации, а также поля развития верхнерифейских пород тунгусикской и осянкой серий, содержащих хлоритоид $((Fe^{2+}, Mg, Mn^{2+})Al_2(SiO_4)O(OH)_2)$; до 20–30%). Работы (Лепезин и др., 1979; Козлов, Лепезин, 1995; Лиханов, 2020; Likhanov, 2019, 2022; Likhanov, Santosh, 2020; Likhanov et al., 2004; Козлов, 2018, 2021) доказали, что широкое распространение в данном регионе железисто-глиноземистых метапелитов с порообразующими минералами группы силлиманита, ставролитом или хлоритоидом обусловлено уникальным сочетанием составов протолитов и условий их метаморфизма. Образование высокоглиноземистых метаморфогенных пород Енисейского кряжа (Лиханов и др., 2022) связывают глав-

ным образом с процессом постархейского (нижнепротерозойского) железисто-глиноземистого литогенеза и полиметаморфизмом с переходным режимом давлений от низких к умеренным.

Современные промышленные требования к концентратам Al_2SiO_5 очень высоки и в зависимости от области их применения ужесточаются. Крайне нежелательными примесями в рудах и концентратах являются оксиды и сульфиды Fe (особенно мелковкрапленные), щелочи, а также титан (Лепезин, Семин, 1989; Каменева и др., 2003; Фрулли, 2017; Roskill..., 1990; Niu et al., 2012; Indian Minerals Yearbook 2019). Особо чистые концентраты Al_2SiO_5 с содержанием Al_2O_3 более 57–58 мас. % получают из кианитовых или силлиманитовых пород, тогда как очистить до этой степени андалузитовые концентраты не удается. Особо чистые концентраты имеют существенно больший диапазон областей применения в сравнении с концентратами средней сортности ($Al_2O_3 > 54$ мас. %) и, в частности, используются для производства Al-Si сплавов. Андалузитовые концентраты применяют для производства огнеупоров и специальной огнестойкой и кислотостойкой керамики (табл. 5), Технологические схемы получения особо чистых концентратов Al_2SiO_5 – сложные многостадийные, и наряду с гравитационной, магнитной и электрической сепарацией включают в себя обязательные процедуры флотации (Overbeek, 1989; Коротеев др., 2011; Огородников и др., 2013а; Лепезин, 2016б), что неизбежно влечет за собой существенное удорожание финального продукта.

Таблица 5. Химический состав Al_2SiO_5 -концентратов, мас. % (промышленные требования, по (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))

Table 5. Chemical composition of Al_2SiO_5 concentrates, wt % (specification, according to (Lepezin, Semin, 1989; Roskill, 1990; Kameneva et al., 2003; Niu et al., 2012; Guo et al., 2016; Frulli, 2017; Ding et al., 2019; Indian Minerals Yearbook 2019))

Компонент	Керамика	Огнеупоры	Al-Si сплавы
	<i>And, Sil, Ky</i> (в зависимости от типа конечного продукта)	<i>And</i> (предпочтительный); <i>Sil</i> , смесь <i>Sil</i> и <i>Ky</i> , обожженный <i>Ky</i>	<i>Ky, Sil</i> и их смеси
Al_2O_3	>54–55	>54–60	>57–58
SiO_2	<43	<37–43	<37–42
Fe_2O_3	<0.5–1.3	<0.8–2	<0.8–1.5
TiO_2	<2	<1.5–2	<0.5–0.75
$K_2O + Na_2O$	Н.д.	<0.5–1.5	<0.5
CaO	<0.1	<0.5–0.6 CaO + MgO	<0.2
MgO	<0.1		<0.4

Примечание. Н.д. – нет данных.

Note. Н.д. – no data.

Высокоглиноземистые породы Тейского комплекса в целом обладают благоприятным химическим и отчасти фазовым составом для производства из них концентратов средней и высокой сортности. Составы кианит- и андалузитсодержащих пород Панимбинского и Маяконского участков укладываются в диапазон отношений Al_2O_3/SiO_2 , типичный для этого сырья. По данному параметру они ближе всего к кианитсодержащим сланцам кейвской свиты. Породы, наиболее богатые Al_2O_3 (до 24–33 мас. %), сопоставимы с кианитовыми рудами месторождения Хизоваара (Огородников и др., 2013а). Валовые концентрации Fe_2O_3 в высокоглиноземистых породах Тейского комплекса ($X_{cp} = 7.91$ мас. %, $X_{max} = 11.93$ мас. %) достаточно высоки, однако соответствуют таковым в рудах Карелии и Урала. Содержания MgO ($X_{cp} = 1.96$ мас. %) практически на порядок выше такового в аналогичных объектах России (0.17–0.29 мас. %) (Коротеев и др., 2011). Главными фазами-концентраторами железа и магния в этих породах являются ставролит и биотит. На участках с заметными диафторическими изменениями к ним добавляется хлорит. Метапелиты Тейского комплекса содержат пренебрежимо малые количества сульфидов ($SO_3 < 0.03$ мас. %). Эта особенность исключительно благоприятна с точки зрения технологии их обогащения, поскольку пирит является крайне нежелательной примесью в концентратах Al_2SiO_5 , а его удаление требует использования нескольких процедур флотационной доочистки, что резко увеличивает стоимость продукта (Огород-

ников и др., 2013а). Главный концентратор Ti (второй нежелательной примеси) – ильменит, наряду с ним иногда присутствует рутил. Среднее содержание $TiO_2 = 0.98$ мас. % ($n = 71$) в породах Панимбинского и Маяконского участков соответствует таковому в большинстве кианитовых руд России ($X_{cp} = 0.96$ мас. %) (Коротеев и др., 2011; Огородников и др., 2013а). Аналогичный вывод справедлив и в отношении CaO ($X_{cp} = 0.36$ мас. % – для изученных комплексов, $X_{cp} = 0.43$ мас. % – для метаморфогенных руд России), MnO ($X_{cp} = 0.09$ и 0.04 мас. % соответственно), P_2O_5 ($X_{cp} = 0.11$ и 0.02–0.30 мас. %).

В интересующем нас технологическом-экономическом аспекте сложная история геологического развития территории Заангарья Енисейского кряжа имеет три важнейшие следствия: 1) формирование на Енисейском кряже аккумуляций редкого типа глиноземистого сырья – андалузитовых сланцев (наряду с кианитовыми и силлиманитовыми породами); 2) полиминеральные ассоциации метапелитов, где минералы группы силлиманита образуют сложные сростки с иными фазами, включая фазы-концентраторы Al_2O_3 ; 3) интенсивный диафторез метаморфических пород, затрагивающий полиморфные модификации Al_2SiO_5 . Важным фактором формирования рудных тел с наиболее высокими кондициями сырья принято считать локально проявленные процессы контактового метаморфизма, связанного с воздействием гранитоидов Татарского и Аяклинского комплексов на породы протерозойского Тейского комплекса (Likhanov et al.,

2001). Выполненный нами анализ андалузит-кианитовых пород Маяконского участка на частном примере убедительно доказывает справедливость этого суждения: ставролит обнаружен здесь практически во всех пробах (1–13%), кианит – в 2/3 проб (1–20%), андалузит – в 1/3 проб (3–24%).

На примере Панимбинского участка установлено, что в породах кординской свиты, претерпевших низкобарический региональный метаморфизм, андалузит интенсивно замещается мусковитом и маргаритом (см. рис. 2б, в, д). Частичные, а нередко и полные псевдоморфозы образуются не только по мелкому, рассеянному в породе андалузиту, но и по крупным хиастолитам, потенциально наиболее благоприятным для извлечения в концентрат. Количественный рентгенофазовый анализ типичных сланцев с “видимым хиастолитом” показал, что породы со средней концентрацией $Al_2O_3 = 19.6$ мас. % суммарно содержат $\approx 30\%$ слюд, тогда как андалузит сохраняется лишь в половине таких проб, а его количество может снижаться до 2%. В зоне контактово-метаморфических преобразований содержание слюд снижается до 15–20%, а доля высокоглиноземистых фаз растет: андалузита – 5–18, кианита – 4–20, ставролита – до 30%.

Выявленные вариации минеральных ассоциаций высокоглиноземистых сланцев (при практическом неизменном содержании в них $Al_2O_3 \approx 20$ мас. %) указывают на необходимость обязательного контроля и учета их фазового состава при оценке перспектив рудоносности и запасов отдельных участков и горизонтов. Высока вероятность, что на Панимбинском участке рудные тела, где андалузит минимально затронут поздними процессами диафореза, не будут следовать непрерывно на значительные рас-

стояния, как это предполагалось изначально на основе валового химического состава пород и присутствия в них обильного видимого “хиастолита” (Козлов, Лепезин, 1995). Наиболее перспективными для будущих разведочных работ представляются зоны контактов метапелитов кординской свиты с гранитоидами, где наряду с сохранным андалузитом присутствует также и кианит.

Сравнительная характеристика концентратов, извлеченных из пород Тейского метаморфического комплекса

В 1960-х гг. Ленинградским институтом огнеупоров были проведены технологические опыты по флотационному обогащению проб массой 500 кг андалузитовых и силлиманитовых сланцев Панимбинского и Тейского рудопроявлений соответственно (табл. 6) (Козлов, Лепезин, 1995; Козлов, 2021).

Важнейший итог выполненной нами работы состоит в том, что в лабораторных условиях из типичных проб кианит-андалузитовых сланцев удалось получить концентраты с содержанием *And* 86–95 мас. % и *Ky* – 94–97 мас. % (см. табл. 4) без привлечения типовых для извлечения Al_2SiO_5 дорогостоящих флотационных схем и схем повторной очистки (Огородников и др., 2013а). Процесс обогащения в данном случае опирался на три базовые физические характеристики руд и отдельных минералов: 1) вскрытие минеральных сростков по их естественным границам и раскалывание кианита (и в меньшей мере андалузита) по спайности; 2) различия плотности андалузита ($\rho = 3.05\text{--}3.10$ г/см³) в зависимости от количества и типов минеральных включений; плотность чисто-

Таблица 6. Показатели флотационного обогащения пород Панимбинского и Тейского рудопроявлений, проведенного Ленинградским институтом огнеупоров, по (Козлов, Лепезин, 1995).

Table 6. Indicators of flotation beneficiation of the rocks of Panimba and Teya ore occurrences, carried out by the Leningrad Institute of refractories, according to (Kozlov, Lepezin, 1995).

Продукт	Химический состав, мас. %									Показатели обогащения, %	
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ общ	CaO	MgO	Na ₂ O + K ₂ O	SO ₃	П.п.п.	γ	ε
Панимбинское (<i>And</i>)											
Руда	60.80–61.99	0.95	22.27	7.59	0.41–0.55	1.51–2.21	2.93–3.12	Н.д.	1.97–2.80	–	–
Концентрат	36.48	1.60	57.14	2.22	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	6.9	60
Тейское (<i>Sil</i>)											
Руда	60.25	1.42	18.20	6.69	0.42	1.58	2.68	0.35	2.48	–	–
Концентрат	41.00	0.32	54.57	1.77	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	13.9	79

Примечание. γ – выход продукта, ε – извлечение полезного компонента. Н.д. – нет данных. *And* – андалузит, *Sil* – силлиманит.

Note. γ – fractions yield, ε – extraction of the product (Al_2SiO_5 modifications). Н.д. – no data. *And* – andalusite, *Sil* – sillimanite.

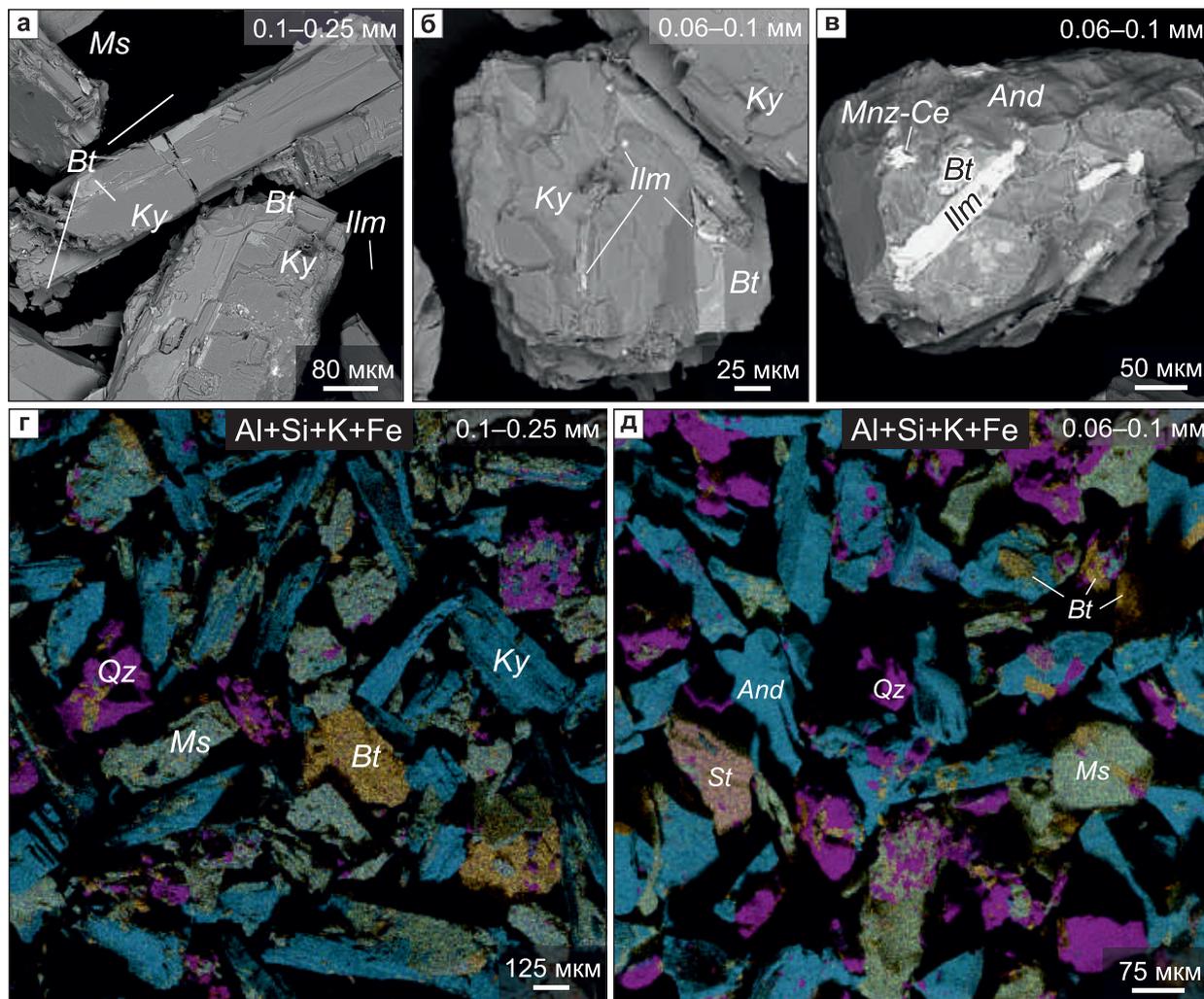


Рис. 6. Первичные Al_2SiO_5 -концентраты, полученные из высокоглиноземистых пород Тейского комплекса.

Концентраты содержат обильные минеральные индивиды кварца, мусковита и биотита. Кианит преимущественно вскрыт, андалузит вскрыт частично. Изображения в обратнорассеянных электронах (а–в) и многоэлементные карты Al, Si, K, Fe (г, д). а, б – вростки биотита в кристаллах кианита; в – зерно андалузита, насыщенное включениями биотита, ильменита и монацита; г, д – соотношения главных фаз в кианитовом и андалузитовом концентратах различной размерности. *And* – андалузит, *Bt* – биотит, *Ilm* – ильменит, *Ky* – кианит, *Mnz-Ce* – монацит-Це, *Ms* – мусковит, *Qz* – кварц, *St* – ставролит.

Fig. 6. Raw Al_2SiO_5 concentrate obtained from Al-rich rocks of the Teya metamorphic complex.

The concentrates contain abundant quartz, muscovite and biotite grains. Kyanite is mostly liberated, andalusite is partially liberated. BSE images (a–v) and multi-element maps Al, Si, K, Fe (г, д). а, б – biotite inclusions in kyanite; (в) – andalusite grain stuffed with biotite, ilmenite, and monazite; (г, д) the ratios of the main phases in kyanite and andalusite concentrates of different grain size. *And* – andalusite, *Bt* – biotite, *Ilm* – ilmenite, *Ky* – kyanite, *Mnz-Ce* – monazite-Ce, *Ms* – muscovite, *Qz* – quartz, *St* – staurolite.

го *And* – 3.13–3.17 г/см³, $X_{cp} = 3.15$), *Ky* (3.56–3.67 г/см³, $X_{cp} = 3.61$) и прочих силикатов (2.70–2.85 г/см³), за исключением ставролита (3.65–3.77 г/см³, $X_{cp} = 3.71$); 3) различия магнитной восприимчивости Fe-содержащих фаз и немагнитных модификаций Al_2SiO_5 . Фазовый состав и особенности минеральных сростков в глиноземистых породах Тейского комплекса оказались благоприятны для сепарации ставролита и иных минералов-концентра-

торов Ti и Fe в магнитный продукт (где был получен 27-кратный рост их содержаний относительно исходных пород) уже на первом этапе обогащения (электромагнитная сепарация). Измельчение руды до крупности 0.06–0.1 мм позволило вскрыть сложные минеральные сростки и освободить промпродукты Al_2SiO_5 от подавляющего большинства силикатных включений размером более 60 мкм. Среднее содержание SiO_2 в промпро-

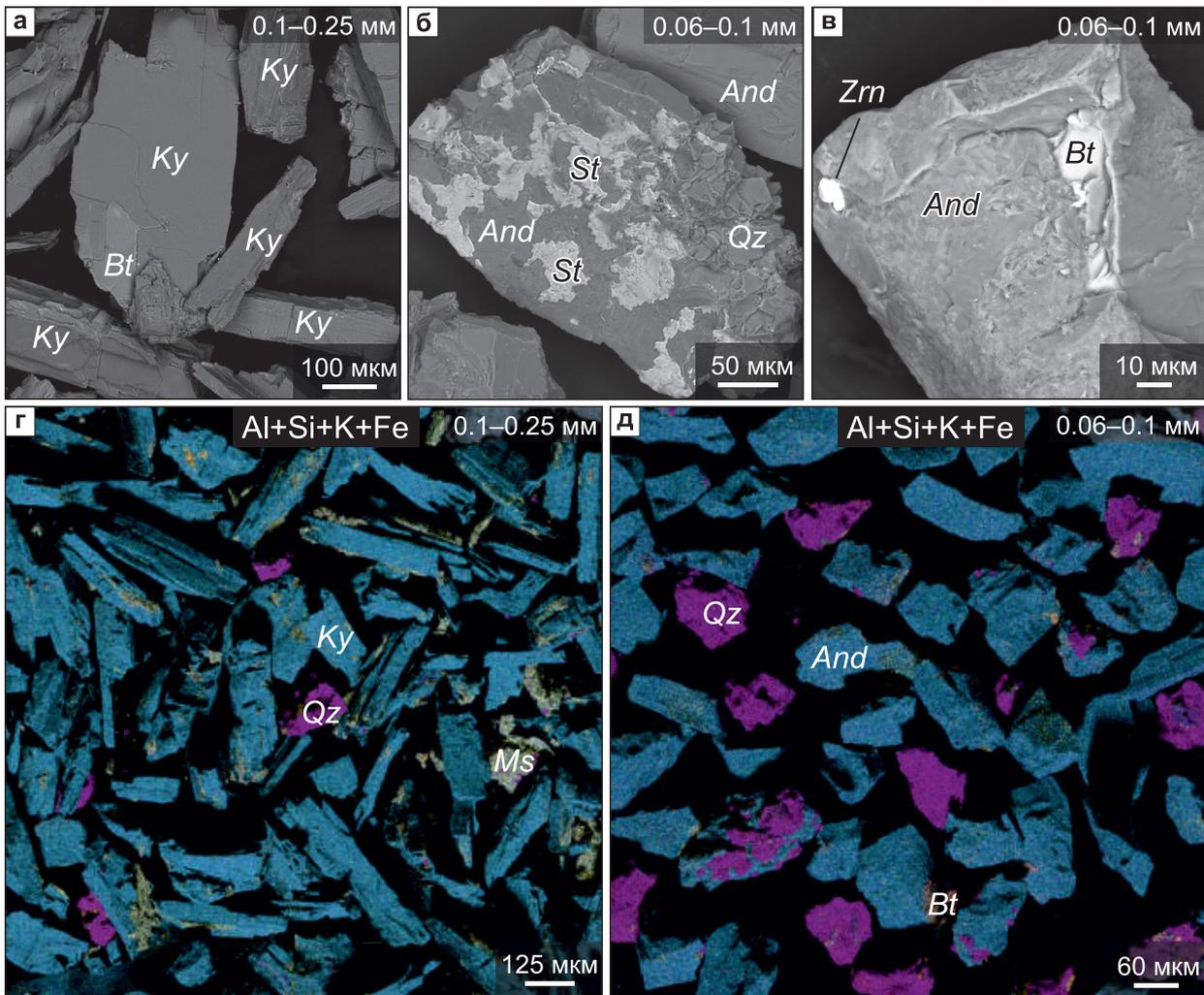


Рис. 7. Финальные Al_2SiO_5 -концентраты, полученные из высокоглиноземистых пород Тейского комплекса.

Изображения в обратнорассеянных электронах (а–в) и многоэлементные карты в характеристическом излучении Al, Si, K, Fe (г, д). а – крупное зерно кyanита с единичным вростком биотита; б – сложный сросток андалузита, ставролита, биотита и кварца; в – зерно андалузита с мельчайшими (<10 мкм) включениями биотита и циркона; г – крупные зерна кyanита, содержащие множественные мелкие включения слюд и кварца; д – зерна андалузита, содержащие единичные включения слюд и кварца. *And* – андалузит, *Bt* – биотит, *Ky* – кyanит, *Ms* – мусковит, *Qz* – кварц, *St* – ставролит.

Fig. 7. Final concentrate obtained from Al-rich rocks of the Teya metamorphic.

BSE images (a–v) and multi-element maps Al, Si, K, Fe (г, д). а – large kyanite grain with a single biotite inclusion, б – complex intergrowth of andalusite, staurolite, biotite, and quartz, в – andalusite grain with tiny (<10 mkm) inclusions of biotite and zircon; г – large kyanite plates with fine inclusions of mica and quartz, д – andalusite grains with sporadic inclusions of mica and quartz. *And* – andalusite, *Bt* – biotite, *Ky* – kyanite, *Ms* – muscovite, *Qz* – quartz, *St* – staurolite.

дуктах составило 38.6 мас. % (при теоретическом содержании в фазах Al_2SiO_5 37.1 мас. %).

Из кyanитовых пород Маяконского рудопроявления (исходное содержание *Ky* 13–20 мас. %, Al_2O_3 19–23 мас. %) без использования флотационных технологий обогащения получены концентраты с содержанием Al_2SiO_5 93–97 мас. % (Al_2O_3 ≈ 60 мас. %) (см. табл. 2). Благодаря хрупкости и совершенной спайности кyanита его тонкие фрак-

ции удалось очистить от минеральных включений практически полностью при уровне потерь не более 3%. Обогащаемость андалузитовых руд ниже (*And* 86–92 мас. %, Al_2O_3 55–59 мас. %), что в целом характерно для этого минерала (Overbeek, 1989). Андалузит в изученных рудах обычно присутствует в виде сложных сростков *And-Qz-Ms-Bt-St*, которые не удастся вскрыть полностью. Это влечет за собой значимые потери полезного компонента:

до 10% Al_2SiO_5 остается в магнитном и до 23% – в легком продуктах. Необходимо отметить, что использованная нами лабораторная схема обогащения не позволила целиком очистить концентраты от вскрытых уже зерен кварца и иных силикатов (рис. 6г, д; 7г, д). Кроме того, и в андалузите, и в кианите сохранились микровключения (≤ 10 мкм) монацита, ксенотима, циркона, ильменита и пирротина (см. рис. 6а–в, 7а–в), которые не удалось сепарировать в отдельные концентраты (см. табл. 3).

По химическому и фазовому составу (см. табл. 2, 3) полученные концентраты близки к современным промышленным (коммерческим) кондициям (КДСЗ по ТУ 14-10-017-98: $Al_2O_3 > 57$ мас. %, $SiO_2 < 42$ мас. %, $Fe_2O_3 < 0.8$ мас. %, $TiO_2 < 2$ мас. % и $CaO+MgO < 0.6$ мас. %) и могут быть квалифицированы как среднесортные (Al_2O_3 до 60 мас. %) (Gogou et al., 2021). Выходы андалузитовых, кианитовых и смешанных концентратов составили 0.7–4.1, 0.7–2.2 и 1.9–6.0% соответственно. Эти показатели сопоставимы с показателями обогащения андалузитовых руд Шотландии (0.1–2.8%; магнитная и гравитационная сепарация (Mitchell, Harrison, 1997)), кианитовых руд Карелии и Кольского полуострова (2–13%; флотация (Огородников и др., 2013а)) и провинции Ганьсу, Китай (7.2%; флотация (Zhao et al., 2017)). В потенциале с привлечением флотационных методов обогащения сортность Al_2SiO_5 -концентратов, полученных из метапелитов Тейского метаморфического комплекса, может быть повышена. Освоение высокоглиноземистого сырья Заангарья Енисейского кряжа в перспективе может быть осуществлено в рамках инвестиционных проектов по развитию инфраструктуры и освоению ресурсной базы Ангаро-Енисейского экономического района, реализуемых как часть инвестиционного проекта “Енисейская Сибирь” (распоряжение Правительства РФ от 29.03.2019 г. № 571-р).

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность д.г.-м.н. П.С. Козлову (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург) за сбор коллекции представительных образцов и консультирование, а также И.Ю. Васильковой и Ю.В. Дёминой (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск) за проведение лабораторных экспериментов по обогащению высокоглиноземистых пород. Авторы глубоко признательны анонимным рецензентам за ценные предложения по модернизации рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Войтеховский Ю.Л., Нерадовский Ю.Н., Гришин Н.Н., Гершенкоп А.Ш. (2011) Комплексное использование кианита Больших Кейв в качестве нетрадиционного сырья для производства алюминия. *Экология промышленности*, (4), 75-84.
- Каменева Е.Е., Скамницкая Л.С., Щипцов В.В., Букчина О.В. (2003) Особенности вещественного состава и технологические свойства кианитовых руд Хизоварского месторождения. *Обогащение руд*, (6), 17-21.
- Козлов П.С. (2018) Высокоглиноземистые небокситные породы Заангарья Енисейского кряжа: состав, направления и перспективы использования. *Изв. Уральского гос. горн. ун-та*, 1(49), 39-45. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-1-39-45>
- Козлов П.С. (2021) Геология и тектоно-метаморфическая эволюция докембрийских комплексов западной окраины Сибирского кратона (Северо-Енисейский кряж). Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург: ИГ УрО РАН, 345 с.
- Козлов П.С., Лепезин Г.Г. (1995) Петрология, петрохимия и метаморфизм пород Заангарья Енисейского кряжа. *Геология и геофизика*, 36(5), 3-22.
- Коротеев В.А., Огородников В.Н., Войтеховский Ю.Л., Поленов Ю.А., Савичев А.Н., Щипцов В.В., Сазонов В.Н., Коротеев Д.В. (2011) Небокситовое алюминиевое сырье России. Екатеринбург: УрО РАН, 227 с.
- Лепезин Г.Г. (1997) Месторождения и рудопроявления минералов группы силлиманита России и перспективы создания на их базе промышленного производства концентратов. *Огнеупоры и техн. керамика*, (8), 27-32.
- Лепезин Г.Г. (2016а) Минералы группы силлиманита – перспективный вид сырья для импортозамещения в огнеупорной отрасли России. (2016а) *Новые огнеупоры*, 1(5), 6-13. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2016-5-6-13>
- Лепезин Г.Г. (2016б) Перспективы импортозамещения в алюминиевой отрасли России. *Инновации*, 1(207), 43-52.
- Лепезин Г.Г. (2018) Перспективы создания на базе Кяхтинского месторождения (Республика Бурятия) промышленных производств силлиманитовых, рутиловых и кварцевых концентратов, глинозема, огнеупоров, силимина, алюминия, кремния и другой высокотехнологичной продукции. *Оборудование для обогащения рудных и нерудных материалов. Технологии обогащения*. Мат-лы XIII Междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск, 58-92.
- Лепезин Г.Г., Горюнов В.А. (1988) Области применения минералов группы силлиманита. *Геология и геофизика*, (5), 80-88.
- Лепезин Г.Г., Семин В.Д. (1989) Перспективы развития сырьевой базы алюминиевой промышленности Сибири. *Геология и геофизика*, (2), 85-95.
- Лепезин Г.Г., Семин В.Д., Степанов С.А., Медведев Г.П., Семина З.Ф. (1989) Базыбайское месторождение кварц-силлиманитовых руд (геология, петрохимия, промышленные залежи). *Геология и геофизика*, (6), 80-87.
- Лепезин Г.Г., Сокол Э.В., Жираковский В.Ю., Френкель А.Э., Осипов В.А. (1997) Месторождения и рудопроявления кианита Среднего и Южного Урала. *Огнеупоры и техн. керамика*, (2), 29-33.
- Лепезин Г.Г., Каргополов С.А., Жираковский В.Ю. (2010) Минералы группы силлиманита как новое перспективное сырье для алюминиевой промышленности России. *Геология и геофизика*, 51(12), 1605-1617.
- Лепезин Г.Г., Шерман М.Л., Семин В.Д., Кравцов И.С. (1979) Перспективы использования метаморфических пород Алтае-Саянской складчатой области и Енисейского кряжа как источника высокоглиноземистого сырья. *Геология и геофизика*, (1), 35-43.
- Лиханов И.И. (2020) Метаморфические индикаторы геодинамических обстановок коллизии, растяжения и сдвиговых зон земной коры. *Петрология*, 28(1), 4-22. <https://doi.org/10.31857/S0869590320010045>
- Лиханов И.И., Козлов П.С., Попов Н.В. (2022) Железисто-глиноземистые метапелиты Северо-Енисейско-

- го кряжа: палеообстановки формирования, природа и возраст протолита. *Литосфера*, **22**(4), 448-471. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-4-448-471>
- Огородников В.Н., Коротеев В.А., Войтеховский Ю.Л., Щипцов В.В., Поленов Ю.А., Савичев А.Н., Нерадовский Ю.Н., Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П., Гришин Н.Н., Белогурова О.А., Гершенкоп А.Ш., Коротеев Д.В. (2013а) Морфогенетические типы и технология обогащения кианитовых руд. Екатеринбург: УрО РАН, 311 с.
- Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Савичев А.Н. (2013б) Редкие металлы и редкоземельные элементы в кианитовых рудах Кольского полуострова и Урала. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 160, 274-281.
- Распоряжение Правительства РФ от 29.03.2019 г. №571-р. [Текст]. Комплексный инвестиционный проект "Енисейская Сибирь". М., 12 с.
- Степанов С.А. (2005) Метаморфизм, условия формирования и перспективы высокоглиноземистого сырья Базыбайского выступа. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: ОИГГМ, 278 с.
- Фрулли Д. (2017) Производство и характеристики огнеупорных сырьевых материалов на основе андалузита и муллита. Влияние примесей на огнеупорные свойства. *Новые огнеупоры*, (3), 93-97. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-3-93-97>
- Ding D., Ye G., Li N., Liao G., Tian X., Chen L. (2019) Andalusite transformation and properties of andalusite-bearing refractories fired in different atmospheres. *Ceram. Int.*, **45**(3), 3186-91. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.220>
- Gogou A., Mavrogenatos C., Anastasatou M., Voudouris P., Chryssoulis S., Stamatakis M. (2021) Beneficiation Process of Kyanite-Rich Mineral Assemblages from Thassos Island Aegean Sea, Greece. *Miner. Proc. Extract. Metall. Rev.*, **43**(7), 899-909. <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1959330>
- Guo H., Li W., Ye F. (2016) Low-cost porous mullite ceramic membrane supports fabricated from kyanite by casting and reaction sintering. *Ceram. Int.*, **42**(4), 4819-4826. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.11.167>
- Indian minerals Yearbook 2019. Pt III, Mineral Reviews, 58th ed., Indian Bureau of Mines 2020.
- Likhanov I.I., Polyansky O.P., Reverdatto V.V., Memmi I. (2004) Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, eastern Siberia. *J. Metamorph. Geol.*, **22**(8), 743-762. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x>
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Sheplev V.S., Vershinin A.E., Kozlov P.S. (2001) Contact metamorphism of Fe- and Al-rich graphitic metapelites in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, eastern Siberia, Russia. *Lithos*, **58**(1-2), 55-80. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(01\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(01)00048-2)
- Likhanov I.I., Santosh M. (2020) The "triple point" paradigm of aluminosilicates revisited. *Geol. J.*, **55**(6), 4772-4789. <https://doi.org/10.1002/gj.3716>
- Likhanov I.I. (2019) Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia. *Geol. Soc., Lond., Spec. Publ.*, **478**, 89-115. <https://doi.org/10.1144/SP478.11>
- Likhanov I.I. (2022) Provenance, Age and Tectonic Settings of Rock Complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): Geochemical and Geochronological Evidence. *Geosciences (Switzerland)*, **12**(11), 402. <https://doi.org/10.3390/geosciences12110402>
- Mitchell C.J., Harrison D.J. (1997) Industrial mineral potential of andalusite and garnet in the Scottish Highlands. Nottingham, British Geological Survey Publ., 70 p.
- Niu F.S., Tian L.N., Zhang J.X., Wang X.G. (2012) Kyanite's Status of Beneficiation Process and Application. *Adv. Mater. Res.*, (602-604), 124-127. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.602-604.124>
- Overbeek P.W. (1989) Andalusite in South Africa. *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.*, **89**(6), 157-171.
- Roskill. The economics of kyanite. (1990) London, Roskill Information Services Ltd, 118 p.
- Rudnick R.L., Gao S. (2003) Composition of the Continental Crust. *Treat. Geochem.*, **3**, 1-64.
- Warr L.N. (2021) IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Miner. Magaz.*, **85**(3), 291-320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- Zhao J., Jia J., Wang W., Cao G., Zhang F., Li J. (2017) Experimental Study on Mineral Processing of Kyanite Ore in Saerhabutale in Gansu Province. *Multipurp. Utiliz. Miner. Res.*, (6), 72-77. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6532.2017.06.015>

REFERENCES

- try, and metamorphism of the rocks in the Angara region of the Yenisei Ridge. *Russ. Geol. Geophys.*, **36**(5), 1-21 (translated from *Geol. Geofiz.*, **36**(5), 3-22)
- Koroteev V.A., Ogorodnikov V.N., Voitekhovskii Yu.L., Polenov Yu.A., Savichev A.N., Shiptsov V.V., Sazonov V.N., Koroteev D.V. (2011) Non-bauxite aluminum raw materials of Russia. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 227 p. (In Russ.)
- Lepezin G.G. (1997) Russian deposits and ore occurrences of sillimanite group minerals and the prospects of commercial concentrate production on their basis. *Ogneupory i Tekhnicheskaya Keramika*, (8), 27-32. (In Russ.)
- Lepezin G.G. (2016a) Sillimanite mineral family is the promising import – substituting raw material for the Russian refractory industry. *Novye Ogneupory*, **1**(5), 6-13. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2016-5-6-13>
- Lepezin G.G. (2016b) The prospects for import substitution in the aluminum industry of Russia. *Innovatsii*, **1**(207), 43-52. (In Russ.)
- Lepezin G.G. (2018) Prospects for the creation on the basis of the Kyakhta deposit (Republic of Buryatia) of industrial production of sillimanite, rutile and quartz concentrates, alumina, refractories, silumin, aluminum, silicon and other high-tech products. *Equipment for enrichment of ore and non-metallic materials. Enrichment technologies*. Materials of the XIII Int. Sci. and Tech. Conf. Novosibirsk, 58-92. (In Russ.)
- Lepezin G.G., Goryunov V.A. (1988). Areas of application of minerals of the sillimanite group. *Sov. Geol. Geophys.*, **29**(5), 68-74 (translated from *Geol. Geofiz.*, **29**(5), 80-88)
- Lepezin G.G., Kargopolov S.A., Zhirakovskii V.Y. (2010) Sillimanite group minerals: a new promising raw material for the Russian aluminum industry. *Russ. Geol. Geophys.*, **51**(12), 1247-1256 (translated from *Geol. Geofiz.*, **51**(12), 1605-1617) <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.11.004>
- Lepezin G.G., Semin V.D. (1989) Prospects for development of raw material base of the aluminum industry of Siberia. *Sov. Geol. Geophys.*, **30**(2), 77-85 (translated from *Geol. Geofiz.*, **30**(2), 805-85)
- Lepezin G.G., Semin V.D., Stepanov S.A., Medvedev G.P., Semina Z.F. (1989) Bazybai field of quartz-sillimanite ores (geology, petrochemistry, and industrial importance). *Sov. Geol. Geophys.*, **30**(6), 70-76 (translated from *Geol. Geofiz.*, **30**(6), 80-87)
- Lepezin G.G., Sherman M.L., Semin V.D., Kravtsov I.S. (1979) Prospects for the use of metamorphic rocks of the Altai-Sayan folded region and Yenisei range as a source of highly aluminiferous raw material. *Sov. Geol. Geophys.*, **20**(11), 26-32 (translated from *Geol. Geofiz.*, (1), 35-43)
- Lepezin G.G., Sokol E.V., Zhirakovskii V.Yu., Frenkel' A.E., Osipov V.A. (1997) Kyanite deposits and ore occurrences in the Central and South Urals. *Ogneupory i Tekhnicheskaya Keramika*, (2), 29-33. (In Russ.)
- Likhanov I.I. (2020) Metamorphic indicators for collision, extension and shear zones geodynamic settings of the Earth's crust. *Petrology*, **28**(1), 1-16. <https://doi.org/10.1134/S086959112001004X>
- Likhanov I.I. (2019) Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia. *Geol. Soc., Lond., Spec. Publ.*, **478**, 89-115. <https://doi.org/10.1144/SP478.11>
- Likhanov I.I. (2022) Provenance, Age and Tectonic Settings of Rock Complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): Geochemical and Geochronological Evidence. *Geosciences (Switzerland)*, **12**(11), 402. <https://doi.org/10.3390/geosciences12110402>
- Likhanov I.I., Kozlov P.S., Popov N.V. (2022) Ferruginous-aluminous metapelites of the North Yenisei Ridge: Formation paleosettings, nature and age of protolith. *Lithosphere (Russia)*, **22**(4), 448-471. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-4-448-471>
- Likhanov I.I., Polyansky O.P., Reverdatto V.V., Memmi I. (2004) Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisei Ridge, eastern Siberia. *J. Metamorph. Geol.*, **22**(8), 743-762. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2004.00546>
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Sheplev V.S., Vershinin A.E., Kozlov P.S. (2001) Contact metamorphism of Fe- and Al-rich graphitic metapelites in the Transangarian Region of the Yenisei Ridge, eastern Siberia, Russia. *Lithos*, **58**(1-2), 55-80. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(01\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(01)00048-2)
- Likhanov I.I., Santosh M. (2020) The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited. *Geol. J.*, **55**(6), 4772-4789. <https://doi.org/10.1002/gj.3716>
- Mitchell C.J., Harrison D.J. (1997) Industrial mineral potential of andalusite and garnet in the Scottish Highlands. Nottingham, British Geological Survey Publ., 70 p.
- Niu F.S., Tian L.N., Zhang J.X., Wang X.G. (2012) Kyanite's Status of Beneficiation Process and Application. *Adv. Mater. Res.*, (602-604), 124-127. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.602-604.124>
- Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Voitekhovskii Yu.L., Shiptsov V.V., Polenov Yu.A., Savichev A.N., Neradovskii Yu.N., Skamnitckaya L.S., Bubnova T.P., Grishin N.N., Belogurova O.A., Gershenkop A.Sh., Koroteev D.V. (2013a) Morphogenetic types and beneficiation technology of kyanite ores. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 311 p. (In Russ.)
- Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A., Savichev A.N. (2013b) Rare metals and rare earth elements in kyanite ore from Kola peninsula and Ural. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 160, 274-281. (In Russ.)
- Order of the Government of the Russian Federation of March 29, 2019 No. 571 - p. [Text]. Complex investment project “Yenisei Siberia”. Moscow, 12 p. (In Russ.)
- Stepanov S.A. (2005) Metamorphism, formation conditions, and prospects for high-alumina raw materials of the Bazybai uplift. Cand. geol. and min. sci. diss. Ekaterinburg, OIGGM, 278 c. (In Russ.)
- Overbeek P.W. (1989) Andalusite in South Africa. *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.*, **89**(6), 157-171.
- Roskill. The economics of kyanite. (1990) London, Roskill Information Services Ltd, 118 p.
- Rudnick R.L., Gao S. (2003) Composition of the Continental Crust. *Treat. Geochem.*, **3**, 1-64.
- Voitekhovskii Yu.L., Neradovskii Yu.N., Grishin N.N., Gershenkop A.S. (2011) Complex utilization of kyanite of the Bol'shiye Keivy as a non-traditional raw material for the alumina production. *Ekologiya Promyshlennogo Proizvodstva*, (4), 75-84. (In Russ.)
- Warr L.N. (2021) IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineral. Magaz.*, **85**(3), 291-320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- Zhao J., Jia J., Wang W., Cao G., Zhang F., Li J. (2017) Experimental Study on Mineral Processing of Kyanite Ore in Saerhabutale in Gansu Province. *Multipurp. Utiliz. Miner. Res.*, (6), 72-77. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6532.2017.06.015>