МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЛЬМЕНИТ-ЛЕЙКОКСЕНОВЫХ РУД ПИЖЕМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, СРЕДНИЙ ТИМАН

А. В. Понарядов

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

alex401@rambler.ru

Перспективы развития горно-рудной промышленности в Республике Коми связывают с крупнейшими месторождениями титана — Ярегским и Пижемским. Новые данные в области минералого-технологических исследований титановых руд позволят ускорить освоение этих месторождений, определить эффективные технологии их переработки и перечень товарной продукции. Использован комплекс минералого-аналитических методов (оптическая микроскопия, рентгенографический и рентгенофлуоресцентный анализы, микрорентгеноспектральный анализ). Показано, что ильменит-лейкоксеновые руды Пижемского месторождения имеют сложный полиминеральный состав, наряду с главными рудными компонентами присутствуют другие металлы, форма нахождения которых различна (изоморфная примесь, самостоятельные минеральные фазы). Морфометрические характеристики зерен ильменит-лейкоксеновой руды указывают на необходимость применения комбинированных методов обогащения и новых технологий утилизации сырья.

Ключевые слова: *Пижемское месторождение, ильменит-лейкоксеновые руды, морфоструктурные характеристики, технологические свойства.*

MINERALS AND PROCESSING FEATURES OF ILMENITE-LEUCOXENE ORES OF PIZHEMSKOE DEPOSIT, MIDDLE TIMAN

A. V. Ponaryadov

Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar

Prospects of development of the mining industry in the Komi Republic are associated with the largest deposits of titanium — Yaregskoe and Pizhemsckoe. New data on the mineralogical and technological properties of titanium ores will allow accelerating the development of these deposits and proposing effective technologies of titanium ore processing and enhancing the list of commodity products. The set of mineralogical and analytical methods was used (optical and electron microscopy, X-ray and X-ray fluorescence analysis). Ilmenite-leucoxene ores of Pizhemsckoe deposit are of complicated character, different metals (isomorphic impurity, autonomous mineral phases) are present along with main ore components. The morphometric characteristics of grains of ilmenite-leucoxene ore point to the need to use combined methods of enrichment and utilization.

Keywords: *Pizhemsckoe deposit, ilmenite-leucoxene ore, morphometric characteristics, technological properties.*

Введение

В рамках титанового проекта Республики Коми на базе Пижемского месторождения планируется строительство инновационного горно-металлургического комплекса по добыче и переработке титановой руды и кварцевых песков. Существующие технологии переработки и обогащения титановых руд не удовлетворяют запросам индустрии из-за высокой стоимости конечного продукта.

Пижемское месторождение (Средний Тиман, рис. 1) представляет собой погребенную слаболитифицированную россыпь, расположенную на северо-западном окончании Вольско-Вымской гряды Среднего Тимана. Титаноносный пласт протягивается более чем на десять километров с юга на север и до 10 километров с запада на восток, занимая площадь около 90 км² в среднем течении р. Печорская Пижма.

В геологическом строении района Пижемского месторождения принимают участие верхнепротерозойские и девонские отложения, почти повсеместно перекрытые четвертичными осадками различной мощности (от 0.2 до 40 м). В низах девонского разреза установлен титаноносный продуктивный горизонт — малоручейская свита, мощность которой достигает 300 м и определяется палеорельефом времени накопления. В объеме отложений первой и базальной части третьей пачек (D₂mgc₂₋₃) малоручейской свиты выделяется Пижемское место-

рождение титана. Наибольшее содержание TiO₂ (около 14.5 %) отмечается: 1) в пласте среднезернистых (иногда крупнозернистых и гравелитистых), хорошо сортированных песчаников на границе второй и третьей пачек; 2) в отложениях субаэральных выносов и подводно-пляжевых зон, представленных среднезернистыми песчаниками и гравелитами [3]. Мощность титаноносного пласта колеблется от 38 до 90 м, уменьшаясь от центра залежи (за исключением западного направления). Титаноносная толща считается древней палеороссыпью, сформировавшейся за счет размыва и переотложения коры выветривания на нижележащих рифейских сланцах [3]. Среднее содержание титановых минералов достигает 200 кг/т. Содержание лейкоксена в песчаниках достигает 15 %. Перекрывается титаноносная толща среднедевонскими аллювиальными кварцевыми песчаниками.

Целью настоящей работы является получение новых данных о минеральном составе, характере локализации рудных минералов, их технологических свойствах для оценки эффективности технологий переработки ильменит-лейкоксеновых руд Пижемского месторождения и товарной продукции.

Методы исследования

Исследование ильменит-лейкоксеновых руд осуществлялось комплексом методов. Предварительно проба песка была классифицирована и фракционирована

Рис. 1. А — обзорная географическая схема расположения титановых месторождений и проявлений Тимана: 1 — Сувойное и Пембойское, 2 — Пижемское, 3 — Ярегское; Б — ильменит-лейкоксовая руда

Fig. 1. Schematic map of titanium deposits and occurrences of Timan: 1 — Suvoynoe and Pemboyskoe occurrences, 2 — Pizhemsкое deposit, 3 — Yaregskoe deposit (A); leucoxene ore (Б)

по плотности ($\rho = 2.9 \text{ г/см}^3$). Химический и минеральный состав и морфоструктурные характеристики изучены рентгенофлуоресцентным анализом (XRF Shimadzu 1800), методами оптической микроскопии (стереоскопический микроскоп МБС-9), рентгеновской дифракцией (Shimadzu 6000), рентгеноспектральным микроанализом (VEGA 3 Tescan, режим обратно-рассеянных электронов). Морфоструктурные параметры минеральных фаз определены оптико-геометрическим методом с помощью программы ImageJ. Рентгенографический полуквантитативный анализ выполнен в ВИМС (X'Pert PRO MPD).

Минеральный состав

По данным оптико-минералогического анализа, тяжелая фракция ильменит-лейкоксовой руды сформирована ильменитом, рутилом, анатазом, цирконом, эпидотом, магнетитом, хромшпинелидами, турмалином, пиритом, куларитом, монацитом. Также встречается лейкоксен, представленный зернами желтого и слегка розоватого цвета, удлиненными вдоль одной из осей. Ильменит разной степени сохранности имеет черный цвет, металлический блеск, раковистый излом, несовершенную спайность. Выделяются следующие разновидности: 1) ильменит без визуальных следов изменения; металлический блеск присутствует на большей части поверхности зерен; 2) ильменит различной степени сохранности, на поверхности которого присутствуют примазки светлого цвета — участки лейкоксенизации — от незначительных по площади до занимающих большую часть зерна. Основная доля зерен ильменита и лейкоксена концентрируется в классах крупности $-0.5+0.25$ и $-0.25+0.1$ мм. С понижением крупности увеличивается содержание титановых минералов, что связано с раскрытием их зерен.

С помощью бинокулярного стереоскопического микроскопа были выделены мономинеральная фракция ильменита и обогащенные фракции, сформированные лейкоксеном.

На дифрактограмме мономинеральной фракции ильменита присутствуют значительно уширенные рефлексы ильменита, кварца и рутила. Такое уширение ха-

рактерно и для ильменита из других россыпей и связывается с наличием псевдорутила [4, 9] или протонированного ильменита (H^+ -ильменита) — переходного состояния от ильменита к псевдорутил [3]. По нашему мнению, уширение пиков ильменита также объясняется фазовым переходом ильменит $\rightarrow$ псевдорутил, что подтверждается представленными ниже данными.

Лейкоксен в основном представляет собой смесь двух фаз: рутила и кварца. Пики четкие, что свидетельствует о высокой степени совершенства рутила. Присутствуют слабые рефлексы ильменита и анатаза.

Данные полуквантитативного рентгенофазового анализа тяжелой фракции приведены в табл. 1 (класс крупности $-0.25+0.1$ мм); преобладающей минеральной фазой является псевдорутил (45 мас. %). Рентгеноаморфная фаза, отмечаемая также и на дифрактограмме мономинеральной фракции ильменита в виде подъема уровня шума, предположительно представлена продуктами изменения ильменита, не имеющими четкой кристаллической структуры.

Микрорентгеноспектральный анализ позволил выявить особенности морфологии зерен ильменита и лейкоксена, установить минеральные фазы на их поверхности и в объеме, а также определить морфоструктурные

Таблица 1. Минеральный состав тяжелой фракции (по данным рентгенографического анализа)
Table 1. Mineral composition of heavy fraction (according to X-ray analysis)

№	Минерал Mineral	Содержание, мас. %, % Content, wt %
1	Ильменит Ilmenite	7.5
2	Анализ Anatase	1
3	Рутил Rutile	18
4	Псевдорутил Pseudorutile	45
5	Гематит Hematite	1.5
6	Кварц Quartz	10
7	Пирит Pyrite	1
8	Слюда Mica	4
	Сумма кристаллических фаз Total crystalline phases	88

характеристики микроразмерных зерен кварца и алюмосиликатных фаз в лейкоксене и ильмените. Ильменит представлен изометричными угловатыми, удлинёнными окатанными, реже изометричными окатанными зёрнами (рис. 2).

Рис. 2. Измененный ильменит (1 — псевдорутил, 2 — рутил, 3 — кварц)

Fig. 2. Altered ilmenite (1 — pseudorutile, 2 — rutile, 3 — quartz)

Для отнесения продуктов изменения ильменита к той или иной фазе использовалось отношение $Ti/(Ti + Fe)$: < 0.5 — неизменный ильменит; $0.5-0.6$ — гидратированный (измененный) ильменит; $0.6-0.7$ — псевдорутил; $0.7-1.0$ — лейкоксен [6].

Зерна ильменита имеют зональное строение. Вариации значений отношения $Ti/(Ti + Fe)$ находятся в интервале от 0.58 (измененный ильменит) до 0.69 (псевдорутил) (табл. 2). Меньшие значения имеют центральные части зерен, большие — периферийные. Возрастание этих значений свидетельствует о большей степени выноса железа и измененности ильменита. В трещинах значения отношения $Ti/(Ti + Fe)$ составляют 0.99, что соответствует рутилу, образовавшемуся, по нашему мнению, по первичному ильмениту. Он представлен игольчатыми микрокристаллами, которые образуют сагенитовую решетку из двойников рутила, сросшихся под углом 60° .

Таблица 2. Содержание главных элементов в зернах измененного ильменита (по данным микрорентгеноспектрального анализа)
Table 2. Content of main elements in ilmenite grains (according to X-ray microanalysis)

образца sample	Номер Number точки point	Компонент (ат. %) Component at %			Ti/ (Ti + Fe)
		Ti	Fe	Mn	
1	1 (центр) \ center	17.31	10.96	0.42	0.61
	2 (кайма) \ rim	27.25	14.51	1.2	0.65
2	1 (центр) \ center	21.82	12.65	0.77	0.63
	2 (кайма) \ rim	10.07	5.26	0.58	0.66
3	1 (центр) \ center	17.65	10.83	1.76	0.62
	2 (кайма) \ rim	25.17	11.27	0.82	0.69
4	1 (центр) \ center	23.0	16.35	1.11	0.58
	2 (кайма) \ rim	22.48	12.83	2.07	0.63
5	1 (центр) \ center	22.87	13.15	2.82	0.63
	2 (трещина) fracture	34.22	0.24	—	0.99
6	1 (центр) \ center	23.24	11.92	1.13	0.66
	2 (трещина) fracture	36.11	0.17	—	0.99

При этом рутил располагается как по трещинам с четкими границами, так и непосредственно на поверхности ильменита.

Каверны в зернах ильменита выполнены кварцем. Кварц представлен агрегатами нескольких зерен относительно малых размеров (до десятка микрометров) с четкими кристаллографическими формами. Зерна трещиноватые.

Из данных микрорентгеноспектрального анализа (рис. 3) следует, что:

1) распределение титана и железа в ильмените равномерное за исключением участков, где ильменит полностью замещен рутилом;

2) замещение ильменита рутилом носит локальный характер, рутил развивается по трещинам по направлению к центру зерен;

3) в ильмените присутствуют механические включения кварца (яркие участки) и алюмосиликатной фазы (тусклые участки), распределенные по всему объему зерен.

Морфоструктурные характеристики (массовый размер зерен, округлость, удлинение) кварца и алюмосиликатных фаз схожи для обеих фракций ($-0.5+0.25$ и $-0.25+0.1$ мм). Доля кварца и алюмосиликатных фаз в ильмените составляет от 15 до 37 %; среднее содержание 23 %.

Рассчитано количественное распределение зерен кварца и алюмосиликатных фаз по размерам: 80 % общего числа зерен имеет длину менее 10 мкм. На это количество приходится около 35 % их объема. Удлинение равно 1.00–5.08, среднее значение — 1.44. Таким образом, в среднем зерна изометричны, причем величину удлинения менее 1.6 имеют около 75 % включений. Округлость зерен кварца и алюмосиликатных фаз находится в диапазоне значений 0.05–0.97. Как правило, значения округлости зерен минералов возрастают с уменьшением их размеров и приближаются к 1. Учитывая это, можно ожидать, что большая часть зерен будет иметь округлость более 0.6. Распределение зерен кварца и алюмосиликатных фаз по интервалам округлости практически равномерное; при этом большинство — более 70 % — имеют извилистые границы.

Рис. 3. Распределение концентраций элементов в ильмените в режиме характеристического рентгеновского излучения (1 — ильменит, 2 — рутил, 3 — кварц, 4 — алюмосиликатная фаза)

Fig. 3. Distribution of concentrations of elements in the ilmenite in the characteristic X-ray mode (1 — ilmenite, 2 — rutile, 3 — quartz, 4 — aluminosilicate)

Лейкоксен, составляющий основную часть тяжелой фракции, представлен окатанными изометричными и овальными уплощенными агрегатами игольчатых микрорезинов рутила и кварца с реликтами псевдорутита (рис. 4). Кристаллы рутила образуют сагенитовую решетку из двойников рутила, как и в ильмените, а также встречаются участки развития кристаллитов рутила, представляющих собой однородную массу. Зерна кварца имеют четкие кристаллографические формы, поверхность пористая.

Железо в лейкоксене (рис. 5) сконцентрировано внутри агрегатов и, вероятно, связано с реликтами псевдорутита $Ti/(Ti + Fe) = 0.63$ (табл. 3). По периметру реликтов наблюдаются более мелкие участки псевдорутита — остатки первичного минерала. В абсолютном большинстве исследованных агрегатов вариации содержания железа в рутиловой решетке на кайме зерен и в центре незначительны: отношение $Ti/(Ti + Fe)$ составляет 0.97–1.00. В нескольких точках значение отношения $Ti/(Ti + Fe)$ соответствует лейкоксену (0.75×0.87).

Объемная доля кварца и алюмосиликатных фаз в лейкоксене составляет от 18 до 38 %; среднее значение 28 %. Эти данные согласуются с приведенными выше значениями для ильменита. 87 % общего количества зе-

Рис. 4. Полимнеральный агрегат лейкоксена (1 — псевдорутит, 2 — рутил, 3 — кварц)

Fig. 4. Polyminerall aggregate of leucoxene (1 — pseudorutile, 2 — rutile, 3 — quartz)

Таблица 3. Содержание главных компонентов в зернах лейкоксена (по данным микрорентгеноспектрального анализа)
Table 3. Content of main components of leucoxene (according to X-ray microanalysis)

образца sample	Номер Number точки point	Компонент (ат. %) Component at %			Ti/ (Ti + Fe)
		Ti	Fe	Mn	
1	1 (центр) center	32.12	0.76	—	0.97
	2 (кайма) rim	33.33	—	—	1.00
2	1 (центр) center	20.25	6.72	—	0.75
	2 (кайма) rim	25.51	3.88	0.32	0.87
3	1 (центр) center	23.32	14.28	—	0.62
	2 (кайма) rim	31.16	—	—	1.00
4	1 (центр) center	22.53	13.00	1.53	0.63
	2 (кайма) rim	31.88	—	—	1.00
5	1 (центр) center	22.30	13.18	0.93	0.63
	2 (кайма) rim	34.65	0.26	—	0.99
6	1 (центр) center	23.87	13.73	0.72	0.64
	2 (кайма) rim	33.00	0.14	—	0.99

Рис. 5. Распределение концентраций элементов в лейкоксене в режиме характеристического рентгеновского излучения (1 — ильменит, 2 — рутил, 3 — кварц, 4 — алюмосиликатная фаза)

Fig. 5. Distribution of concentrations of elements in the leucoxene in the characteristic X-ray mode (1 — ilmenite, 2 — rutile, 3 — quartz, 4 — alumosilicate)

рен кварца имеет длину менее 10 мкм. На это количество приходится около 35 % их объема. Удлинение зерен составляет 1.00–5.11, среднее значение — 1.46. Таким образом, в среднем зерна кварца изометричны, причем величину удлинения менее 1.6 имеют около 65 % зерен. Округлость зерен кварца и алюмосиликатных фаз находится в диапазоне значений 0.02–1.00. Значения их длины, объемной доли и удлинения, а также характер их распределения почти полностью идентичны таковым для ильменита. Иной характер носит распределение зерен кварца и алюмосиликатных фаз по интервалам округлости; большинство зерен (более 60 %) имеют изрезанные границы, их округлость равна 0.17–0.40.

На поверхности и в объеме ильменита и лейкоксена присутствуют различные механические включения, которые необходимо учитывать при переработке ильменит-лейкоксеновых руд. Например, **циркон** представлен

зернами размером несколько микрометров неправильной угловатой формы (рис. 6), которые, как и зерна кварца, выполняют пустоты в матрице псевдорутила и рутила. Циркон содержит примеси гафния (до 1.86 мас. %) и скандия (до 1.78 мас. %). Более темным участкам внутри включения соответствуют более высокие содержания скандия и низкие содержания гафния (мас. %): центральная часть включения, темный участок — Sc (1.78), Hf (0.69); кайма, светлый участок — Sc (0.23), Hf (1.62).

Ксенотим представлен зернами изометричной и неправильной угловатой формы размером до 5 мкм (рис. 7); встречается, как правило, на поверхности ильменита между зернами рутила и псевдорутила. Характеризуется повышенными содержаниями редкоземельных элементов (Gd, Dy, Er, Yb).

Самородное золото отмечается на поверхности псевдорутила и алюмосиликатных фаз в виде единичных зерен размером менее микрометра (рис. 8).

Самородная медь размером до 12 мкм (рис. 9) встречается как на поверхности кварца, покрытого гидроксидами железа, так и на лейкоксене. Были выявлены две формы выделения меди:

- 1) монокристаллы изометричной (рис. 9, А) или угловатой неправильной формы (рис. 9, Б);
- 2) сростки поликристаллов пластинчатой (рис. 9, В) или дендритоподобной формы (рис. 9, Г).

Кроме самородной меди присутствует куприт.

Таким образом, диагностированные в ильменит-лейкоксеновой руде ильменит и лейкоксен представлены полиминеральными агрегатами псевдорутила, рутила, кварца и алюмосиликатов. Распределение титана и железа в ильмените равномерное за исключением участков локального замещения ильменита рутилом. В лейкоксене железо сконцентрировано внутри агрегатов и, вероятно, связано с реликтами псевдорутила. На поверхности и в объеме агрегатов установлены зерна циркона, ксенотима, самородного золота, меди размером до 15 мкм. Кварц и алюмосиликаты представлены механическими включениями размером менее 10 мкм и составляют около 35 % объема агрегатов.

Установленные морфоструктурные особенности необходимо учитывать при выборе методов переработки и разделения минералов. Физические параметры составляющих минералов ильменит-лейкоксеновой руды (плотность, магнитная восприимчивость и др.) указыва-

Рис. 6. Включения циркона: А — в псевдорутиле, Б — в сагеновской решетке рутила и В — зональное включение в псевдорутиле (1 — псевдорутил, 2 — циркон, 3 — рутил, 4 — кварц)

Fig. 6. Zircon inclusions: А — in pseudorutile, Б — in rutile lattice, В — zonal inclusion in pseudorutile (1 — pseudorutile, 2 — zircon, 3 — rutile, 4 — quartz)

Рис. 7. Включения ксенотима: А — на границе псевдорутила и рутила, Б — в лейкоксене (1 — псевдорутил, 2 — ксенотим, 3 — кварц, 4 — алюмосиликатная фаза)

Fig. 7. Xenotime inclusions: А — at contact between pseudorutile and rutile, Б — in leucoxene (1 — pseudorutile, 2 — xenotime, 3 — quartz, 4 — aluminosilicate)

ют на перспективность физических методов обогащения. Рудные компоненты минеральных песков имеют высокую плотность (больше 2.85 г/см^3) и могут быть достаточно легко отделены от более легких компонентов, таких как кварц и алюмосиликаты, при условии удовлетворительного раскрытия сростков. Однако установленная выше граничная крупность измельчения (10 мкм) требует, во-первых, значительных энергозатрат, во-вторых, возрастают силы адгезии, затрудняющие разделение частиц. Потери диоксида титана, связанного с ильменитом и лейкоксеном, оцениваются на уровне 20 % от исходного содержания, содержание диоксида титана в коллективном концентрате не превышает 62 %, в то время как для дальнейшей переработки необходимы концентраты с более высоким содержанием TiO_2 . Так, для хлоридной технологии используются концентраты от 85 % диоксида титана [8]. Поэтому все чаще предлагается применение комбинированных методов обогащения [2, 5].

Более высокая степень обескремнивания достигается применением химических методов (автоклавного выщелачивания и фторирования). Основной титансодержа-

щей фазой является рутил, который, по всей видимости, не участвует в реакциях, сохраняя свою кристаллическую форму. Установлено, что степень обескремнивания при фторировании оказывается выше (90 %), продукты фторирования тяжелой фракции титаносодержащих песчанников отличаются более высокой кристаллическостью [7].

Используемые технологии не удовлетворяют современные обогатительные производства, дают дорогие конечные продукты. Ведутся работы по изменению свойств минералов и (или) методов их утилизации [1, 10]. В ряд полезных продуктов кроме ильменита, лейкоксена, других полиморфов TiO_2 , циркона входят кварц и другие (<http://region.smikomi.ru/news/53>). Активно ведутся работы по получению высокотехнологичных материалов на основе недорогого сырья (лейкоксена), включая нанотрубки диоксида титана [11].

Выводы

Ильменит-лейкоксеновые руды Пижемского месторождения имеют сложный полиминеральный состав, наряду с главными рудными компонентами присутству-

Рис. 8. Золото на поверхности лейкоксена (1 — псевдорутил, 2 — алюмосиликатная фаза)

Fig. 8. Native gold on leucoxene surface (1 — pseudorutile, 2 — aluminosilicate)

Рис. 9. Медь: А — изометричной формы, Б — угловатой неправильной формы, В — сросток меди пластинчатой формы с кристаллом кварца, Г — сросток меди дендритоподобной формы с кристаллом кварца

Fig. 9. Copper with different shape: А — isometric, Б — angular, irregular-shaped, В — plate shape copper with quartz, Г — dendritic form copper with quartz

ют другие металлы, форма нахождения которых различная (изоморфная примесь, самостоятельные минеральные фазы). Морфометрические характеристики зерен ильменит-лейкоксовой руды указывают на необходимость применения комбинированных методов обогащения. Поскольку применяемые технологии не удовлетворяют современной индустрии, актуальны разработки эффективных схем обогащения и создание функциональных материалов.

Работа проведена при финансовой поддержке проекта УрО РАН №15-11-5-33.

Литература

1. Блехман И. И., Вайсберг Л. А. Вибрационные технологии в процессах обогащения: новые результаты и перспективы промышленного применения // Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья (Плаксинские чтения—2016): Материалы международной конференции. М.: Руда и металлы, 2016. С. 21–22.
2. Голубева И. И., Котова О. Б., Рубцова С. А. Титановые минералы прибрежно-морской россыпи о. Страдбрук (Вост. Австралия) и Пижемской палеороссыпи Среднего Тимана (Россия) // Вестник Института геологии Коми НУ УрО РАН. 2013. № 9. С. 24–28.
3. Игнатъев В. Д., Бурцев И. Н. Лейкоксен Тимана: минералогия и проблемы технологии. СПб.: Наука, 1997. 215 с.
4. Иоспа А. В. Лейкоксенизированный ильменит — его диагностика и влияние на качество титан-циркониевых руд // Минералогия во всем пространстве сего слова: проблемы укрепления минерально-сырьевой базы и рационального использования минерального сырья:

Материалы Годичного собрания Российского минералогического общества и Федоровской сессии—2012. СПб.: Лема, 2012а. С. 354–356.

5. Макеев А. Б., Лютоев В. П. Спектроскопия в технологической минералогии: Минеральный состав концентратов титановых руд Пижемского месторождения // Обогащение руд. 2015. № 5. С. 33–41.

6. Осовецкий Б. М. Типохимизм шлиховых минералов. Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 2001. 244 с.

7. Перовский И. А., Бурцев И. Н. Гидротермальный синтез ситинакита на основе лейкоксена Ярегского месторождения // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2013. № 3 (219). С. 16–19.

8. Ремизова Л. И. Титан // Минеральное сырье: от недр до рынка: В 3 т. М.: Научный мир, 2011. Т. 3. 624 с.

9. Frost M. T., Grey I. E., Harrowfield I. R., Li C. Alteration profiles and impurity element distributions in magnetic fractions of weathered ilmenite // American Mineralogist, Vol. 71, 1986. P. 167–175.

10. Kotova O., Leonenko N. Physics and chemistry of minerals under laser processing // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 123 (2016) 012016 (doi:10.1088/1757-899X/123/1/012016)

11. Kotova O. B., Ponaryadov A. V., Gomze L. A. Hydrothermal synthesis of TiO₂ nanotubes from concentrate of titanium ore of Pizhenskoe deposit (Russia) // Vestnik of Institute of Geology, 2016, № 1. P. 36–38.

References

1. Blehman I. I., Vaisberg L. A. *Vibratsionnye tehnologii v protsessah obogascheniya: novye rezultaty i perspektivy promyshlennogo primeneniya* (Vibration technologies in enrichment: new results and prospects of industrial use). *Resursosberezhenie*

i ohrana okruzhayuschei sr edy pri obogaschenii i per erabotke mineralnogo syrya (Resource saving and environmental protection during enrichment and processing of mineral raw). (Plaksin Readings–2016). Proceedings of conference. Moscow, Ruda i metally, 2016, pp. 21–22.

2. Golubeva I. I., Kotova O. B., Rubtsova S. A. *Titanovye mineraly pribrezhno-morskoi rossypi o. Stradbrouk (Vost. Avstraliya) i Pizhemskei paleorossypi Srednego Timana (Rossiya)* (Titanium minerals of coastal-marine placer of Stradbrouk Island (Eastern Australia) and Pizhemskaia paleoplacer of Middle Timan (Russia). Vestnik of Institute of geology, 2013, No. 9, pp. 24–28.

3. Ignatyev V. D., Burtsev I. N. *Leikoksen Timana. Mineralogiya i problemy tehnologii.* (Leucogene of Timan. Mineralogy and problems of technology). St. Petersburg, Nauka, 1997, 215 pp.

4. Iospa A. V. *Leikoksenizirovannyi ilmenit - ego diagnostika i vliyanie na kachestvo titan-tsirkonievyyh rud* (Leucogenized ilmenite – diagnostics and influence on quality of titanium-zircon ores). *Mineralogiya vo vsem prostranstve sogo slova: problemy ukrepleniya mineralno-syrevoi bazy i ratsionalnogo ispolzovaniya mineralnogo syrya* (Mineralogy in all senses: problems of developing of mineral-raw base and rational use of mineral raw). Proceedings. St. Petersburg, Lema, 2012, pp. 354–356.

5. Makeev A. B., Lyutov V. P. *Spektroskopiya v tehnologicheskoi mineralogii. Mineralnyi sostav kontsentratsiy titanovykh rud Pizhemskego mestorozhdeniya* (Spectroscopy in

technological mineralogy. Mineral composition of concentrates of Titanium ores of Pizhemske deposit). *Obogaschenie rud*, No. 5, 2015, pp. 33–41.

6. Osovetskii B. M. *Tipohimizm shlikhovykh mineralov* (Typochemism of concentrate minerals). Izdatelstvo Permskogo universiteta, 2001, 244 pp.

7. Perovskii I. A., Burtsev I. N. *Gidrotermalniy sintez sitinakita na osnove leikoksena Y aregskogo mestorozhdeniya* (Hydrothermal synthesis of citinikite on basis of leucogene from Yarega deposit). Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS, 2013, No. 3 (219), pp. 16–19.

8. Remizova L. I. *Titan. Mineralnoe syre: ot nedr do rynka* (Titanium. Mineral raw: from underground to market). V. 3, Moscow, Nauchnyi mir, 2011, 624 pp.

9. Frost M. T., Grey I. E., Harrowfield I. R., Li C. Alteration profiles and impurity element distributions in magnetic fractions of weathered ilmenite. *American Mineralogist*, Vol. 71, 1986, pp. 167–175.

10. Kotova O., Leonenko N. Physics and chemistry of minerals under laser processing. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 123 (2016) 012016 (doi:10.1088/1757-899X/123/1/012016)

11. Kotova O. B., Ponaryadov A. V., Gomze L. A. Hydrothermal synthesis of TiO₂ nanotubes from concentrate of titanium ore of Pizhemske deposit (Russia). *Vestnik of Institute of Geology*, 2016, No. 1, pp. 36–38.