



Научная статья
УДК 549.08:622.7

Технологическая минералогия: развитие комплексной оценки титановых руд (на примере Пижемского месторождения)

О.Б.КОТОВА¹, Е.Г.ОЖОГИНА², А.В.ПОНАРЯДОВ¹✉

¹ Институт геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Сыктывкар, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Котова О.Б., Ожогина Е.Г., Понарядов А.В. Технологическая минералогия: развитие комплексной оценки титановых руд (на примере Пижемского месторождения) // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 632-641. DOI: 10.31897/PMI.2022.78

Аннотация. Технологическая минералогия титановых руд является основой оценки их комплексности и позволяет с единых позиций проследить весь ход изменений минерального вещества через технологические процессы, включая обогащение, переработку, получение целевых индустриальных продуктов. Объекты исследования – пижемские ильменит-лейкоксеновые песчаники, которые отличаются сложным полиминеральным составом: наряду с главными рудными компонентами присутствуют другие металлы, форма нахождения которых различна (изоморфная примесь, самостоятельные минеральные фазы). Обоснован оптимальный комплекс методов минералогического анализа для прогнозной оценки их дальнейшего использования на примере титановых руд Пижемского месторождения, которые являются комплексными, отличаются переменным содержанием оксидов железа и содержат редкоземельные металлы. На основании экспертизы рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии подтверждено, что основными титансодержащими фазами песчаников являются псевдорутил и полиминеральный агрегат – «лейкоксен». С учетом особенностей гранулометрии магнитной и немагнитной фракций гравитационного концентрата обсуждаются перспективы технологий переработки титанового сырья. Наряду с проблемами получения качественного сырья рассматриваются трансформации минеральных фаз в результате экстремальных воздействий и их физико-химические свойства как результат изоморфного замещения части атомов Ti природными агентами-модификаторами (Fe и V) при синтезеnanoструктур титановых оксидов для индустриальных приложений (фотокаталитического нанореактора).

Ключевые слова: Пижемское месторождение; титановые руды; технологическая минералогия; комплексная оценка; титансодержащие фазы; nanoструктуры титановых оксидов

Благодарность. Работа выполнена в рамках темы НИР «Развитие минерально-сырьевого комплекса Тимано-Североуральско-Баренцевоморского региона на основе эффективного прогноза, геологического моделирования, геолого-экономической оценки ресурсного потенциала и новых технологий переработки полезных ископаемых» (1021051101666-2-1.5.1; FUUU-2022-0059).

Поступила: 14.04.2022 Принята: 21.07.2022 Онлайн: 03.11.2022 Опубликована: 03.11.2022

Введение. Титан и его соединения востребованы в разных индустриальных производствах (авиация, медицина и др.) благодаря уникальным свойствам, которые сохраняются при высоких температурах и агрессивных средах, определяя экономическую и военную позиции государства. Сырьем для индустриальных производств являются минеральные титановые концентраты (ильменитовые, рутиловые, лейкоксеновые) и продукты их переработки, для повышения качества которых используют различные схемы обогащения [1-3] и технологии переработки [4, 5]. На долю отечественной сырьевой базы титана приходится 15 % мировых запасов. По состоянию на 01.01.2021 балансовые запасы составили 606,9 т TiO₂. Крупнейшие в России запасы титана сосредоточены в Республике Коми (48 %) и заключены в двух месторождениях: Яргском нефтетитановом, руды которого богаты по содержанию TiO₂ (10,44 %), и Пижемском с менее богатыми труднообогащимися циркон-ильменит-лейкоксеновыми рудами (4,27 % TiO₂). Сырьевая база титана достаточна для удовлетворения внутренних потребностей страны, но практически все российские предприятия,



использующие титановое сырье, импортируют его [6, 7]. Освоение россыпных месторождений обусловлено комплексностью руд, в значительной степени затрудняющих их переработку невозможностью извлечения всех полезных минералов (и компонентов), при этом не все извлекаемые продукты находят своих потребителей. Необходимы эффективные комплексные технологии переработки титанового (или титансодержащего) сырья, базирующиеся на достоверной минералогической информации. Следовательно, резко повышается роль изысканий в области технологической минералогии титановых руд, в том числе их комплексной прогнозной оценки.

Развитие минерально-сырьевой базы титанового сырья в силу его дефицита в России предполагается за счет вовлечения в разработку труднообогатимых руд, нетрадиционного минерального сырья, включая техногенные образования [8-10], эффективных технологий их переработки, базирующихся на достоверных данных об их типоморфных особенностях и физико-химических (технологических) свойствах [11, 12]. Технологическая минералогия титановых руд объединяет минералогические и технологические исследования, связанные с изучением их вещественного состава, текстурно-структурных признаков, технологических свойств минералов в эволюции единой минералого-техногенной системы на макро-, микро-, наноуровнях, направленных на развитие комплексной оценки всего минерального сырья при разработке альтернативных подходов освоения труднообогатимых руд [13, 14].

Титановые руды Среднего Тимана [15-17] являются типичными представителями метаморфизованных титановых месторождений России – погребенные лейкоксеновые песчаники Ярегского месторождения и ильменит-лейкоксеновые песчаники Пижемского месторождения. Анализируя публикации по проблемам освоения Пижемского месторождения [15-18], следует отметить недостаточную изученность, что является одним из факторов сдерживания его эксплуатации. Стратегическим направлением компании «РУСТИТАН» по Пижемскому месторождению становится комплексное использование титанового сырья с привлечением высоких технологий [19, 20]. Особое значение придается изысканиям, в которых ильменит-лейкоксеновые песчаники рассматриваются как перспективные источники ряда полезных ископаемых (Fe, Au, редких, в том числе редкоземельных, особо чистого кварца и др.) [12, 21, 22]. А также расширению списка индустриальных продуктов на основе природного титанового сырья [23-25], новым идеям в области их оценки с учетом гранулометрии, наличия минеральных примесей, фазовых преобразований в условиях экстремальных воздействий [26, 27].

Актуальными являются разработки методов направленного изменения физико-химических свойств минерального сырья на наноуровне на всех этапах его освоения, включая технологические схемы обогащения [28] и производства высокотехнологичных индустриальных продуктов (нанокомпозитов, нанореакторов) в результате экстремальных воздействий [29]. Основная составляющая опубликованных работ по синтезуnanoструктурированных диоксидов титана относится к синтетическому сырью [30-32], поэтому актуальны работы с вовлечением природного сырья [33, 34] для моделирования физико-химических свойств целевых прототипов для различных индустриальных приложений [35].

Цель статьи – совершенствование методических подходов минералогического сопровождения комплексной оценки титановых руд с учетом трансформации минеральных фаз в результате экстремальных воздействий и их физико-химических свойств для индустриальных приложений. Для достижения цели решались задачи: выявление оптимального комплекса методов минералогического анализа для прогнозной оценки дальнейшего использования титановых песчаников; рассмотрение трансформации минеральных фаз в результате экстремальных воздействий (на примере немагнитной фракции ильменит-лейкоксеновых песчаников) для совершенствования методических подходов комплексной оценки.

Методология. Пижемское месторождение представляет собой погребенную слабо литифицированную россыпь, расположенную на северо-западном окончании Вольско-Вымской гряды Среднего Тимана (Россия) (рис.1, а). Титаноносный пласт протягивается более чем на 10 км с юга на север и до десяти 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 на водоразделах, почти повсеместно перекрытые четвертичными осадками различной мощности. В низах девонского разреза



установлен титаноносный продуктивный горизонт – малоручейская свита [6, 15]. Объектом исследования являлись пижемские ильменит-лейкоксеновые песчаники (рис.1, б), отобранные из приконтактовой зоны второй и третьей пачек малоручейской свиты (D_2mrc) в обнажении на левом берегу р. Умба ($64^{\circ}44'29.15''N$ и $51^{\circ}31'17.96''E$). Исследовано шесть проб общей массой 12 кг. Также анализировались наноструктуры титановых оксидов, полученные из немагнитной фракции гравитационного концентрата по разработанной методике [36].

Песчаники отличаются сложным полиминеральным составом и текстурно-структурными особенностями, для получения достоверной информации об их составе и строении использовался комплекс физических методов минералогического анализа. Традиционные методы оптической микроскопии позволили получить только общие представления о текстурно-структурных особенностях и в меньшей степени о составе (полуколичественном) песчаников и слагающих их минеральных агрегатов. Поэтому оптимальными методами прогнозной оценки титановых песчаников можно считать рентгенографический и электронно-микроскопический анализы, но при этом методы оптической микроскопии (оптико-минералогический и оптико-петрографический) должны быть задействованы в обязательном порядке. Именно они позволяют правильно определить виды и последовательность минералогического изучения, а на заключительном этапе способствуют грамотной интерпретации полученных результатов.

Исходный материал для синтеза нанотрубки диоксида титана – смесь двух фаз высокой кристалличности кварца и рутила, в которой иногда в незначительном количестве присутствуют глинистые минералы, ильменит, анатаз, надежно идентифицируемые рентгенографическим фазовым анализом (РФА).

Проба песка разделялась, классифицировалась и фракционировалась по плотности ($\rho = 2,9 \text{ г}/\text{см}^3$). Основной объем минералого-аналитических работ выполнен в Институте геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. Оптико-минералогический анализ исходной руды и контрольные анализы рентгенографическим методом выполнены на поверенном оборудовании в минералогическом отделе Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М.Федоровского. Химический состав определен рентгенофлуоресцентным анализом (Shimadzu XRF-1800).

Надежную диагностику минералов и определение количественного минерального состава осуществляли РФА (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-6000).

Выявление особенностей рудообразующих минералов: морфология минералов и минеральных агрегатов, их размер, неоднородность (наличие трещиноватости, механических включений кварца в псевдорутиле, распределение минералов в «лейкоксене» и пр.), наличие вторичных изменений (примазок) – лейкоксенизация ильменита и реальный состав минералов выявлялись с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), элементный состав определялся методом рентгеноспектрального микроанализа (PCMA) (сканирующий электронный микроскоп Tescan VEGA-3, оснащенный энергодисперсионным спектрометром X-MAX 50 мм^2).

Обсуждение результатов. Гранулометрический, химический и фазовый составы титаноносных песчаников. Ильменит-лейкоксеновые (полиминеральные) песчаники неравномернозернистые, обломочный материал плохо отсортирован и слабо окатан, цемент базально-порового типа.

Содержание материала крупностью $-0,25+0,1 \text{ мм}$ составляет 54 %.

Содержание TiO_2 в песчаниках колеблется от 3 до 10 %, в то же время гранулометрическая экспертиза показала, что с понижением крупности материала содержание TiO_2 может повышаться до 14,91 %. При этом максимум содержания диоксида титана приходится на класс крупности $-0,071+0,05 \text{ мм}$ (см. таблицу). Схожие тенденции прослеживаются для алюминия, железа и марганца.

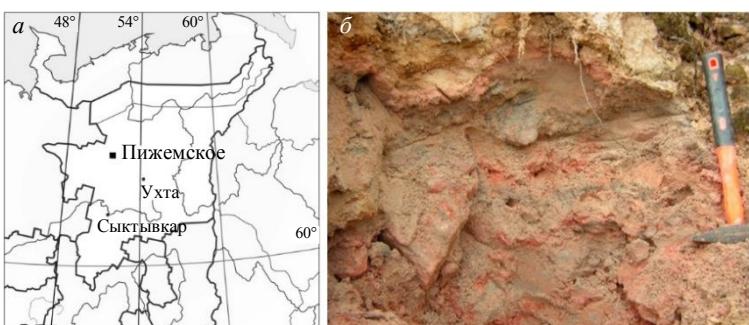


Рис.1. Пижемское месторождение (а), обнажение по левому берегу р. Умба (б)


Гранулометрический* и химический составы титаноносных песчаников (мас.%)**

Класс крупности, мм		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	ZrO ₂	Прочие
-1,0+0,5 (11)		89,55 (2,02)	3,26 (0,65)	5,95 (1,66)	0,48 (0,1)	0,01 (0,01)	0 (0,01)	0,75 (0,2)
-0,5+0,25 (25)	-0,5+0,4	87,99 (3,54)	4,56 (1,99)	6,26 (1,71)	0,48 (0,15)	0,02 (0,01)	0 (0,01)	0,69 (0,56)
	-0,4+0,315	88,3 (4,07)	5,2 (1,7)	5,36 (1,57)	0,5 (0,16)	0,02 (0,01)	0 (0,01)	0,62 (0,86)
	-0,315+0,25	86,73 (4,04)	6,28 (1,71)	5,68 (1,99)	0,62 (0,19)	0,03 (0,02)	0 (0,01)	0,66 (0,58)
	-0,25+0,2	81,48 (3,69)	8,16 (1,05)	8,57 (2,25)	0,84 (0,22)	0,04 (0,02)	0 (0,01)	0,91 (0,82)
-0,25+0,1 (54)	-0,2+0,16	79,78 (2,75)	9,61 (0,82)	8,41 (2,39)	1,27 (0,07)	0,08 (0)	0 (0,01)	0,85 (0,61)
	-0,16+0,125	75,23 (2,15)	12,55 (2,75)	8,85 (2,28)	2,1 (0,39)	0,14 (0,04)	0,03 (0,01)	1,1 (1,06)
	-0,125+0,1	75,45 (3,14)	12,02 (2,76)	8,64 (4,14)	2,56 (0,44)	0,17 (0,04)	0,03 (0)	1,13 (1,66)
	-0,1+0,071	77,69 (6,05)	10,22 (1,73)	8,48 (6,33)	2,16 (0,05)	0,11 (0,02)	0,17 (0,05)	1,17 (1,36)
-0,1+0,05 (9)	-0,071+0,05	65,89 (1,2)	14,91 (4,61)	14,15 (4,76)	2,99 (0,42)	0,17 (0,04)	0,28 (0,07)	1,61 (1,56)
	-0,05 (1)	62,44 (2,27)	12,87 (3,23)	18,17 (2,62)	2,85 (0,24)	0,16 (0,04)	0,15 (0,03)	3,36 (2,36)

*В скобках указан средний выход класса крупности.

**Приведены средние значения, в скобках указано стандартное отклонение.

Главными титаносодержащими фазами являются псевдорутил $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{TiO}_2$ и полиминеральный агрегат – «лейкоксен», которые образовались в результате выветривания ильменита $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$. Ко второстепенным минералам относятся сидерит, гематит, содержание каждого из которых может варьироваться от 3 до 7 %. Эти минералы имеют преимущественно вторичное происхождение. В песчаниках присутствуют мусковит и каолинит, в небольшом количестве циркон, а также минералы, содержащие ниобий и редкоземельные металлы [15, 22]. Сидерит, с которым связано железо, образует цементирующую вещество в песчаниках. В целом титаносодержащие фазы остаются проблемой в процессах обогащения руды, в частности методами магнитной сепарации. Значительное количество кварца в виде включений (до 40 %) в зернах псевдорутила и «лейкоксена» усложняют использование физических методов обогащения и получение качественных титановых концентратов.

Оптико-минералогический анализ. Главным породообразующим минералом является кварц. Песчаники сформированы ильменитом, рутилом, анатазом, цирконом, эпидотом, магнетитом, хромшпинелидами, турмалином, пиритом, монацитом. «Лейкоксен» представлен агрегатами разной степени сохранности, имеет черный цвет, металлический блеск, раковистый излом. Выделяются следующие различия: ильменит без визуальных следов изменения (металлический блеск присутствует на большей части поверхности зерен); ильменит различной степени сохранности (трещиноватости), 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 сростков.

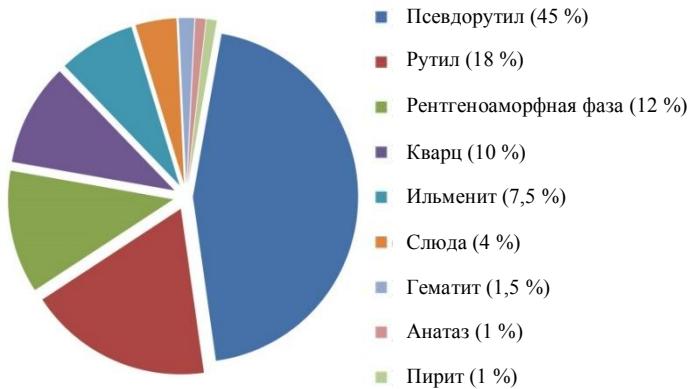


Рис.2. Минеральный состав тяжелой фракции
(фракция $-0,25+0,1$ мм; РФА)

коксене» и ильмените. Для отнесения продуктов изменения ильменита к той или иной фазе использовалось отношение $Ti/(Ti + Fe)$: < 0,5 – неизмененный ильменит; 0,5-0,6 – гидратированный (измененный) ильменит; 0,6-0,7 – псевдорутил; 0,7-1,0 – «лейкококсен».

СЭМ. Ильменит представлен изометричными угловатыми, удлиненными окатанными, реже изометричными окатанными зернами, имеющими зональное строение (рис.3, а). В минерале отмечены примеси ванадия (до 0,48 мас.%) и марганца (до 5 мас.%). Исследовано распределение железа по объему минеральных зерен (рис.4). Вариации значений отношения $Ti/(Ti + Fe)$ находятся в интервале 0,58-0,69 (псевдорутил). Меньшие значения отмечаются в центральной части зерен, а большие присущи периферийным зонам. Возрастание значений свидетельствует о большей степени выноса железа и измененности ильменита. В трещинах минерала значения отношения $Ti/(Ti + Fe)$ составляют 0,99, что типично для рутила. Он представлен игольчатыми микрокристаллами, которые образуют сагенитовую решетку из двойников рутила, сросшихся под углом 60° . При этом рутил располагается как по трещинам с четкими границами, так и непосредственно на поверхности ильменита. Каверны и пустоты в зернах ильменита выполнены кварцем (см. рис.3, б). Трещиноватые зерна кварца (до десятка микрометров) с четкими кристаллографическими формами заполняют пустоты и каверны в матрице ильменита. Доля кварца и алюмосиликатных фаз (глинистых минералов) в ильмените достигает 23 %.

РСМА показал, что Ti и Fe распределены в ильмените равномерно, кроме участков, где ильменит полностью замещен рутилом, который развивается по трещинам по направлению к центру зерен.

«Лейкококсен», составляющий основную часть гравитационного концентрата, накапливается в немагнитной фракции и представлен окатанными изометричными и овальными уплощенными агрегатами игольчатых микрокристаллов рутила и кварца с реликтами псевдорутила (рис.3, в). В объеме большую часть зерна занимает рутил (сагенитовая решетка из двойников рутила, как

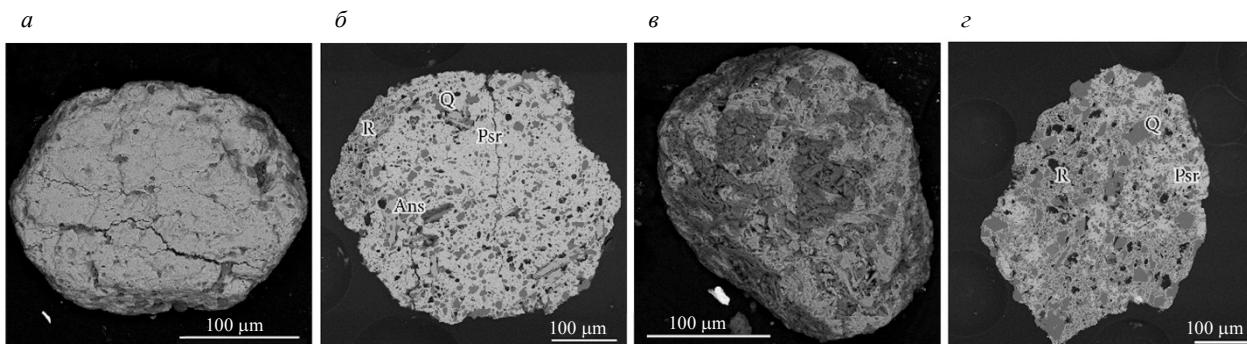


Рис.3. СЭМ-изображения зерен ильменита (а, б) и «лейкококсена» (в, г) (режим упруго-отраженных электронов;
Q – кварц, R – рутил, Ans – анатаз, Psr – псевдорутил)

РФА. Был проведен РФА гравитационного концентрата титаноносных песчаников с учетом гранулометрии (рис.2). Установлено, что главными минералами являются кварц, рутил, анатаз и ильменит. В ассоциации с ними в незначительном количестве присутствуют глинистые минералы, надежно идентифицируемые РФА.

РСМА. Позволил выявить особенности морфологии зерен ильменита и «лейкококсена», установить минеральные фазы на их поверхности и в объеме, определить морфоструктурные характеристики микроразмерных зерен кварца и алюмосиликатных фаз в «лейкококсене» и ильмените. Для отнесения продуктов изменения ильменита к той или иной фазе использовалось отношение $Ti/(Ti + Fe)$: < 0,5 – неизмененный ильменит; 0,5-0,6 – гидратированный (измененный) ильменит; 0,6-0,7 – псевдорутил; 0,7-1,0 – «лейкококсен».



и в ильмените), встречаются участки развития кристаллитов рутила, представляющих собой однородную массу (рис.3, 2).

Железо в «лейкоксене» сконцентрировано внутри агрегатов (рис.5) и связано с реликтами псевдорутила, имеющими четкие границы. По периметру реликтов минерала наблюдаются более мелкие участки псевдорутила – остатки первичного минерала. Зерна кварца имеют четкие кристаллографические формы, поверхность пористая. Объемная доля кварца и алюмосиликатных фаз несколько выше по сравнению с зернами ильменита (28 %).

Зерна ильменита и «лейкоксена» представляют собой полиминеральные агрегаты (размеры отдельных фаз от нескольких микрометров до 100 мкм), основными «загрязнителями» являются кварц и алюмосиликаные фазы, которые не могут быть надежно отделены физическими методами. Одним из перспективных направлений решения этих проблем считается направленное изменение физико-химических свойств минерального сырья в результате различных воздействий [10, 18, 24].

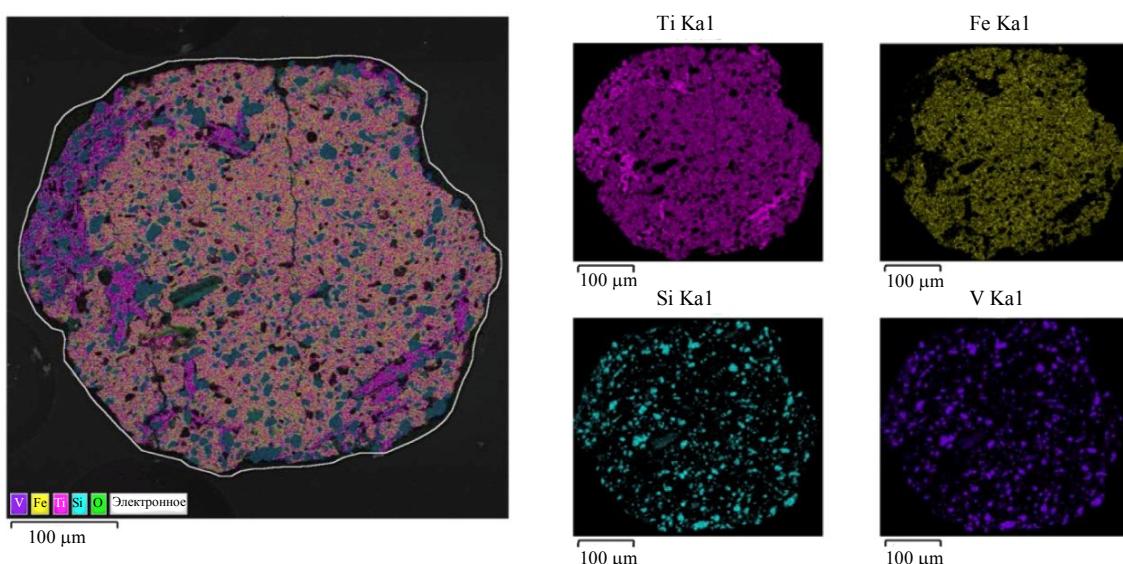


Рис.4. СЭМ-изображение зерна ильменита: распределение элементов (режим упруго-отраженных электронов, характеристическое рентгеновское излучение)

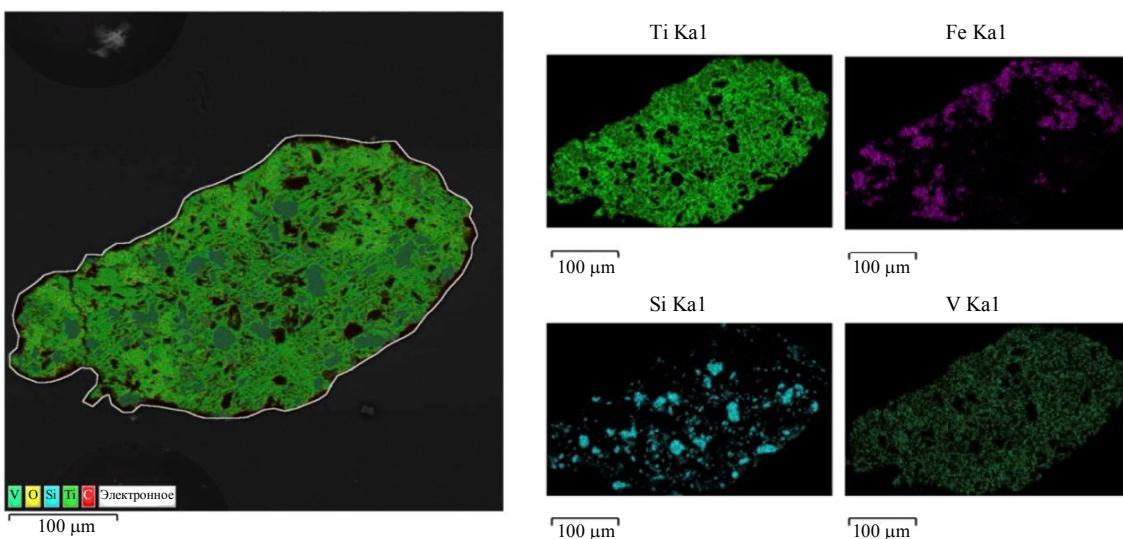


Рис.5. СЭМ-изображение «лейкоксена»: распределение элементов (режим упруго-отраженных электронов, характеристическое рентгеновское излучение)

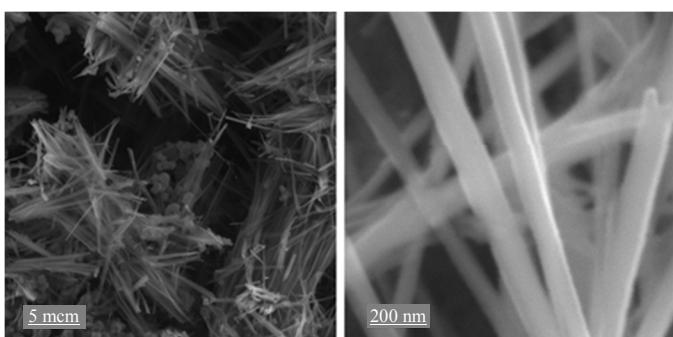


Рис.6. СЭМ-изображениеnanoструктур титановых оксидов: внешний диаметр – 50–115 нм, длина – (5–6) · 10³ нм (режим упруго-отраженных электронов)

ральные фазы трансформируются: образуются «листовые» структуры, которые сворачиваются в нанотрубки (одномерные структуры) (рис.6). Фазовый состав синтезированного образца представлен кварцем и низкокристалличной фазой, соответствующей образованным одномерным nanoструктурам титановых оксидов, идентифицированной как гидратированный титанат натрия ($\text{Na}_x\text{H}_{2-x}\text{Ti}_3\text{O}_7$).

СЭМ-изображения (рис.6) позволяют оценить геометрические параметры полученных одномерных nanoструктур, которые имеют следующий химический состав, мас.%: 83,92 TiO₂; 0,7 SiO₂; 0,39 Fe₂O₃; 2,42 Na₂O; 3,95 CaO; 1,02 V₂O₅ (полужирным выделены агенты-модификаторы).

Синтезированный «продукт», соответствующий образованным одномерным nanoструктурам титановых оксидов, условно обозначен Fe-V-TNT (обладает высокой удельной площадью поверхности 200–250 м²/г, является перспективным сорбентом [30]).

СЭМ-изображения (см. рис.4, 5) дают распределение Ti, Fe и V в зернах ильменита и «лейкоксена». На основании анализа химического состава в локальном объеме и СЭМ-изображений можно предположить, что атомы Ti могут замещаться атомами Fe и V по схеме $3\text{Ti}^{4+} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{V}^{5+}$ или $2\text{Ti}^{4+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{V}^{5+}$. Изоморфное замещение части атомов Ti природными примесями ванадия и железа (агентами-модификаторами) приводит к появлению дополнительных разрешенных уровней внутри запрещенной зоны Fe-V-TNT, которые препятствуют рекомбинации возникающих под действием излучения электронов и дырок и служат дополнительными активными поверхностными центрами (например, в реакциях разложения органических молекул). Ширина запрещенной зоны Fe-V-TNT составляет 2,4 эВ, что позволяет использовать синтезированный продукт в качестве эффективного фотокаталитического реактора [30] как альтернативу применяемым коммерческим аналогам [37].

Минералогическая информация об исходной руде (горной породе) и продуктах ее обогащения, в частности псевдорутилового и лейкоксенового концентратов, полученная комплексом методов минералогического анализа (оптическая и электронная микроскопия с энергодисперсионным анализом, рентгенография), позволяет прогнозировать рентабельное использование этого сырья. Высокое содержание кварца в песчаниках требует введения в схему обогащения операций обескремнивания титановых продуктов. При этом избавиться от кварца, входящего в лейкоксеновый агрегат, полностью не удастся в лейкоксеновом концентрате. При дезинтеграции песчаников и последующем магнитном анализе возможно не получится достичь максимального раскрытия титановых минералов, в частности псевдорутила [6, 15]. Технологические схемы включают мокрую дезинтеграцию титановых песчаников (для максимального раскрытия при минимальных потерях титана) с последующим делением на магнитную и немагнитную фракции (при этом «лейкоксен» концентрируется в немагнитной фракции). Традиционным решением являются технологии автоклавного выщелачивания с получением качественного титанового сырья (92 % диоксида титана) [17].

Учет особенностей гранулометрии магнитной и немагнитной фракций гравитационного концентратата становится важным фактором, позволяющим повысить массовую долю диоксида титана в ильменит-лейкоксеновом концентрате. Однако тонкодисперсная масса приводит к агрегационным процессам (составляет цементирующуюший материал), что также привносит проблемы в процессы обогащения.

Трансформация минеральных фаз в результате экстремальных воздействий и их физико-химические свойства. В развитии методов направленного изменения физико-химических свойств минерального сырья исследованы фазовые трансформации в системе «немагнитная фракция гравитационного концентрата ильменит-лейкоксенового песчаника – гидротермическая обработка в растворе щелочи» [30]. Наиболее значимый результат заключается в том, что такое экстремальное воздействие на сырье является причиной разрыва связей Ti-O. Поэтому исходные титановые мине-



Для формирования оптимального соотношения «затраты – выгода» при освоении ильменит-лейкоксеновых песчаников ведутся разработки новых технологий комплексной переработки с получением качественного титанового сырья и извлечением особо чистого кварца, редких, в том числе редкоземельных элементов с минимизацией потерь полезных компонентов [25, 38]. Подробнее химический состав пород, включая редкоземельные металлы, описан в [22], включая обобщающую работу [6]. Однако до сих пор нет однозначного ответа о форме нахождения редких, в том числе редкоземельных металлов, поэтому пока сложно прогнозировать вероятность их извлечения. В то же время использование соединений (которые входят в состав песков и затрудняют их обогащение, включая цементирующй материал) в качестве природных агентов-модификаторов при синтезе нанокомпозитов или нанореакторов позволит сделать переоценку комплексности титановых руд и снизить их себестоимость. Для развития этого направления изысканий предлагается разработать новые технологии с учетом «вредных» примесей титанового сырья и фазовых преобразований в условиях экстремальных воздействий на примере синтезаnanoструктур титановых оксидов (нанореакторов, нанокомпозитов и т.д.) на основе немагнитной фракции гравитационного концентрата – «лейкоксена».

В качестве перспективных направлений технологий переработки пижемских ильменит-лейкоксеновых песчаников в связи с их минералогическими особенностями в контексте проведенных изысканий и ранее опубликованных работ нужно отметить следующее: рассматривать в первую очередь следует извлечение минералов титана, возможно железа и кварца; песчаники содержат редкие металлы, что повышает перспективную значимость руды как комплексной; следует учитывать трансформации минеральных фаз в результате экстремальных воздействий на примере немагнитной фракции гравитационного концентрата ильменит-лейкоксеновых песчаников и их целевые физико-химические свойства для индустриальных приложений (нанореакторов, нанокомпозитов), что позволит уменьшить потери полезных компонентов титановых песчаников, неизбежных при технологических процессах из-за их морфоструктурных особенностей.

Заключение. Минералогические особенности пижемских ильменит-лейкоксеновых песчаников (их сложный полиминеральный состав, где наряду с главными рудными компонентами присутствуют другие металлы, форма нахождения которых различная (изоморфная примесь, самостоятельные минеральные фазы), а главными титансодержащими фазами титаноносных песчаников являются псевдорутил $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{TiO}_2$ и «лейкоксен»), выявленные комплексом минералого-аналитических методов с доминирующей ролью РФА и СЭМ, позволили оценить их физико-химические свойства для дальнейшего использования.

В развитие направления модификации минерального сырья для повышения эффективности его утилизации, включая цементирующй материал, рассматриваются трансформации титановых минеральных фаз в результате экстремальных воздействий и их физико-химические свойства для индустриальных приложений (сорбентов, нанореакторов, нанокомпозитов и т.д.).

Впервые предпринята попытка совершенствования методических подходов к минералогическому изучению пижемских титановых руд в рамках минералогического сопровождения их комплексной оценки с учетом трансформации минеральных фаз в результате экстремальных воздействий и физико-химических свойств как агентов-модификаторов при синтезе индустриальных продуктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быховский Л.З., Тигунов Л.П. Титановое сырье России // Российский химический журнал. 2010. № 2 (54). С. 73-86.
2. König U., Verryn S.M.C. Heavy Mineral Sands Mining and Downstream Processing: Value of Mineralogical Monitoring Using XRD // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 11. № 1253. DOI: 10.3390/min11111253
3. Zou X., Pang Z., Ji L., Lu X. TiO_2 as a source of titanium // Metal Oxides, Titanium Dioxide (TiO_2) and Its Applications. Elsevier, 2021. P. 429-448.
4. Sun H., Wang J., Dong X., Xue Q. A literature review of titanium slag metallurgical processes // Metallurgia International. 2012. Vol. 17. Iss. 7. P. 49-56.
5. Wensheng Zhang, Zhaowu Zhu, Chu Yong Cheng. A literature review of titanium metallurgical processes // Hydrometallurgy. 2011. Vol. 108. Iss. 3-4. P. 177-188. DOI: 10.1016/j.hydromet.2011.04.005
6. Садыхов Г.Б. Фундаментальные проблемы и перспективы использования титанового сырья в России // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 3-4. С. 178-194. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-3-4-178-194



7. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году. М.: Роснедра, 2021. 568 с.
8. Быховский Л.З., Архипова Н.А. Рудная база стратегических редких металлов России: состояние, перспективы освоения и развития // Горный журнал. 2017. Т. 7. С. 4-10. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.01
9. Спорыхина Л.В., Быховский Л.З., Чеботарева О.С. Нетрадиционные источники титана: критерии выделения, проблемы использования // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2019. № 1 (164). С. 24-30.
10. Чантурия В.А., Шадрунова И.В., Горлова О.Е. Инновационные процессы глубокой и экологически безопасной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13. № 2 (48). С. 224-237. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-224-237
11. Быстров И.Г., Пирогов Б.И., Якушина О.А. Морфоструктурные и конституционные особенности титаномагнетита железных руд Пудожгорского месторождения // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 6. С. 546-572. DOI: 10.7868/S0016777015060076
12. Садыков Г.Б., Макеев А.Б., Копьев Д.Ю. и др. Минералого-технологические особенности титаноносных песчаников Пижемского месторождения // Металлы. 2021. № 5. С. 117-129. DOI: 10.1134/S003602952109014
13. Левченко Е.Н. Особенности вещественного состава титан-циркониевых россыпей России // Литология и полезные ископаемые. 2006. № 2. С. 134-153.
14. Ожогина Е.Г., Котова О.Б. Технологическая минералогия в решении проблем комплексной переработки минерального сырья // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13. № 2 (48). С. 170-178. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-170-178
15. Макеев А.Б. Типоморфные особенности минералов титановых руд Пижемского месторождения // Минералогия. 2016. № 1. С. 24-49.
16. Плякин А.М., Ерикова О.В. О возрасте девонских полиминеральных россыпей Тимана // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. 2010. Т. 1. № 1. С. 60-63.
17. Занавескин К.Л., Масленников А.Н., Занавескина С.М., Дмитриев Г.С. Обогащение лейкоксена Ярегского месторождения методом автоклавного выщелачивания // Обогащение руд. 2016. № 6. С. 14-20. DOI: 10.17580/or.2016.06.03
18. Perovskiy I.A., Burtsev I.N., Ponaryadov A.V., Smorokov A.A. Ammonium fluoride roasting and water leaching of leucoxene concentrates to produce a high grade titanium dioxide resource (of the Yaregskoye deposit, Timan, Russia) // Hydrometallurgy. 2022. Vol. 210. № 105858. DOI: 10.1016/j.hydromet.2022.105858
19. Макеев А.Б. Пижемское титановое месторождение: аспекты геологического строения, минерального состава руд, генезиса, технологии и промышленного освоения // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVII Геологического съезда Республики Коми, Сыктывкар, 16-18 апреля 2019, Сыктывкар, Россия. Институт геологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 2019. С. 324-326.
20. Ткачук А.Н., Трофимов Е.Н., Новиков А.А. и др. Проект строительства горно-металлургического комплекса на базе Пижемского месторождения титана // Горный журнал. 2013. № 9. С. 67-70.
21. Скублов С.Г., Красоткина А.О., Макеев А.Б. и др. Первые данные о возрасте (U-Pb метод, TIMS, LA-ICP-MS) рутила из Ичетьюского полиминерального рудопроявления, Средний Тиман // Записки Горного института. 2018. Т. 232. С. 357-363. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.357
22. Понарядов А.В. Минералого-технологические особенности ильменит-лейкоксеновых руд Пижемского месторождения, Средний Тиман // Вестник Института геологии Коми научного центра УрО РАН. 2017. № 1 (265). С. 29-36. DOI: 10.19110/2221-1381-2017-1-29-36
23. Анисимова А.Б. Глубокая и комплексная переработка минерального сырья: определение и экономический смысл // Евразийский научный журнал. 2019. Т. 6 (11). URL: <https://esj.today/PDF/32ECVN619.pdf> (дата обращения 12.06.2022).
24. Jihua Zhai, Pan Chen, Wei Sun et al. A review of mineral processing of ilmenite by flotation // Minerals Engineering. 2020. Vol. 157. № 106558. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106558
25. Макеев А.Б., Лютоев В.П. Спектроскопия в технологической минералогии. Минеральный состав концентратов титановых руд Пижемского месторождения (Средний Тиман) // Обогащение руд. 2015. № 5. С. 33-41. DOI: 10.17580/or.2015.05.06
26. Jung E.J., Kim J., Lee Y.R. A comparative study on the chloride effectiveness of synthetic rutile and natural rutile manufactured from ilmenite ore // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. № 4045. DOI: 10.1038/s41598-021-83485-6
27. Kordzadeh-Kermani V., Schaffie M., Rafsanjani H.H., Ranjbar M. A modified process for leaching of ilmenite and production of TiO₂ nanoparticles // Hydrometallurgy. 2020. Vol. 198. № 105507. DOI: 10.1016/j.hydromet.2020.105507
28. Александрова Т.Н., Афанасова А.В., Николаева Н.В. Низкоразмерные структуры благородных и цветных металлов и методы их селективной сепарации // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13. № 2 (48). С. 161-169. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-161-169
29. Aphairaja D., Wirumongkol T., Pavasupree S., Limsuwan P. Synthesis of Titanate Nanotubes from Thai Leucoxene Mineral // Procedia Engineering. 2012. Vol. 32. P. 1068-1072. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.02.056
30. Bhadra C.M., Truong V.Kh., Pham V.T.H. et al. Antibacterial titanium nano-patterned arrays inspired by dragonfly wings // Scientific Reports. 2015. Vol. 5. № 16817. DOI: 10.1038/srep16817
31. Souza W., Piperni S.G., Laviola P. et al. The two faces of titanium dioxide nanoparticles bio-camouflage in 3D bone spheroids // Scientific Reports. 2019. Vol. 27. Iss. 9. № 9309. DOI: 10.1038/s41598-019-45797-6
32. Diasanayake M.A.K.L., Senadeera G.K.R., Sarangika H.N.M. et al. TiO₂ as a Low Cost, Multi Functional Material // Materials Today: Proceedings. 2016. Vol. 3. Supplement 1. P. 40-47. DOI: 10.1016/j.matpr.2016.01.006
33. Ponaryadov A.V., Kotova O.B., Sun S. et al. Natural titanium dioxide nanotubes // Épitóanyag – JSBCM. 2020. Vol. 72. Iss. 5. P. 152-155. DOI: 10.14382/epitonyag-jsbcm.2020.25
34. Fauzi A., Lalasari L.H., Sofyan N. et al. Synthesis of titanium dioxide nanotube derived from ilmenite mineral through post-hydrothermal treatment and its photocatalytic performance // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 2. P. 15-29. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.255145
35. Doong R., Kao I. Fabrication and Characterization of nanostructured titanate materials by the hydrothermal treatment method // Recent Patents on Nanotechnology. 2008. Vol. 2. P. 84-102. DOI: 10.2174/187221008784534497



36. Котова О.Б., Понарядов А.В., Гёмзе Л.А. Гидротермический синтез нанотрубок диоксида титана из концентраты титановой руды Пижемского месторождения (Россия) // Вестник Института геологии Коми научного центра УрО РАН. 2016. № 1 (253). С. 34-36. DOI: 10.19110/2221-1381-2016-1-34-36

37. Понарядов А.В., Котова О.Б., Сан Ш. Фотокаталитический нанореактор на основе низкоразмерных структур оксидов титана // Вестник геонаук. 2022. № 1 (325). С. 54-56. DOI: 10.19110/geov.2022.1.5

38. Nikolaev A.A., Kirpichev D.E., Samokhin A.V., Nikolaev A.V. Thermochemical plasma-Arc treatment of leucoxene concentrate // Inorganic Mater. 2017. Vol. 8. P. 406-411. DOI: 10.1134/S2075113317030182

Авторы: О.Б.Котова, д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-8448-3385> (Институт геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Сыктывкар, Россия), Е.Г.Ожогина, д-р геол.-минерал. наук, заведующий минералогическим отделом, <https://orcid.org/0000-0001-7845-2654> (Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского, Москва, Россия), А.В.Понарядов, младший научный сотрудник, avponaryadov@geo.komisc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1166-2408> (Институт геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Сыктывкар, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.