

ПИЖЕМСКОЕ ТИТАНОВОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ — НОВЫЙ ОБЪЕКТ БЛИЖАЙШЕГО ОСВОЕНИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ

А. Б. Макеев

ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии
и геохимии РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 29 июля 2021 г.

В число привлекательных для промышленного освоения месторождений России вошло Пижемское титановое месторождение (Средний Тиман) после успешной защиты и утверждения запасов в Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых (ноябрь 2020 г.). С первых находок титановой минерализации в бассейне рек Печорская Пижма и Умба тематическими отрядами Ухтинской геолого-разведочной экспедиции и Коми филиала Академии наук прошло 60 лет, и сейчас это месторождение считается одним из крупнейших в России и мире. В Пижемском титановом и Ярегском нефте-титановом месторождениях сосредоточено до 80% запасов и прогнозных ресурсов титана России. Тиман становится крупнейшей сырьевой базой титана в мире, интенсивная отработка которой возможна на протяжении многих сотен лет. В статье освещены: геологическое строение Пижемского месторождения (ячеистая, чашеобразная структура рудных тел), вещественный и сложный полиминеральный состав руд. Доказывается неопротерозойский возраст, гидротермально-метаморфогенный генезис руд, обсуждаются источники поступления минерального вещества, решение технологической схемы переработки труднообогатимых руд. Пижемское месторождение отнесено к новому псевдорутил-лейкоксен-кварцевому подтипу коренных метаморфогенных месторождений.

Ключевые слова: Арктическая зона, Пижемское месторождение, геологическое строение, вещественный, минеральный состав, титановые фазы, пути освоения месторождения.

Введение

Благоприятными факторами, способствующими вовлечению Пижемского титанового месторождения (Средний Тиман) в промышленное освоение, стали: защита и утверждение в Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых (ГКЗ) запасов титановых руд; принятие федерального закона «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации» от 13 июля 2020 г. № 193-ФЗ, в котором Усть-Цилемский район Республики Коми включен в Арктическую зону Российской Федерации (АЗРФ) со всеми преференциями для разработчиков месторождений полезных ископаемых; утверждение Правительством РФ планов строительства проектируемой вблизи будущего рудника федеральной железнодорожной магистрали Сосногорск — Индига, которая будет проходить вдоль Тимана до мыса Ру-

мяничного; постоянные консультации и одобрение правительством Республики Коми проекта строительства вертикально-интегрированного комплекса предприятий в Ухтинском районе на основе открытой карьерной отработки Пижемского месторождения [1—3].

Метаморфогенные титановые месторождения с лейкоксеном (наиболее известно из них Ярегское нефте-титановое) по существующей классификации (по главным минеральным формам) [4] относятся к лейкоксен-кварцевым коренным месторождениям. Конечными продуктами метаморфизма ильменита (первичного титанового минерала) являются псевдорутил, лейкоксен, новообразованный рутил и анатаз, а также побочный продукт сидерит, куда выносятся железо из ильменита.

Главное, что отличает Пижемское месторождение от Ярегского, — более сложный полиминеральный состав руд, отсутствие нефти и возмож-

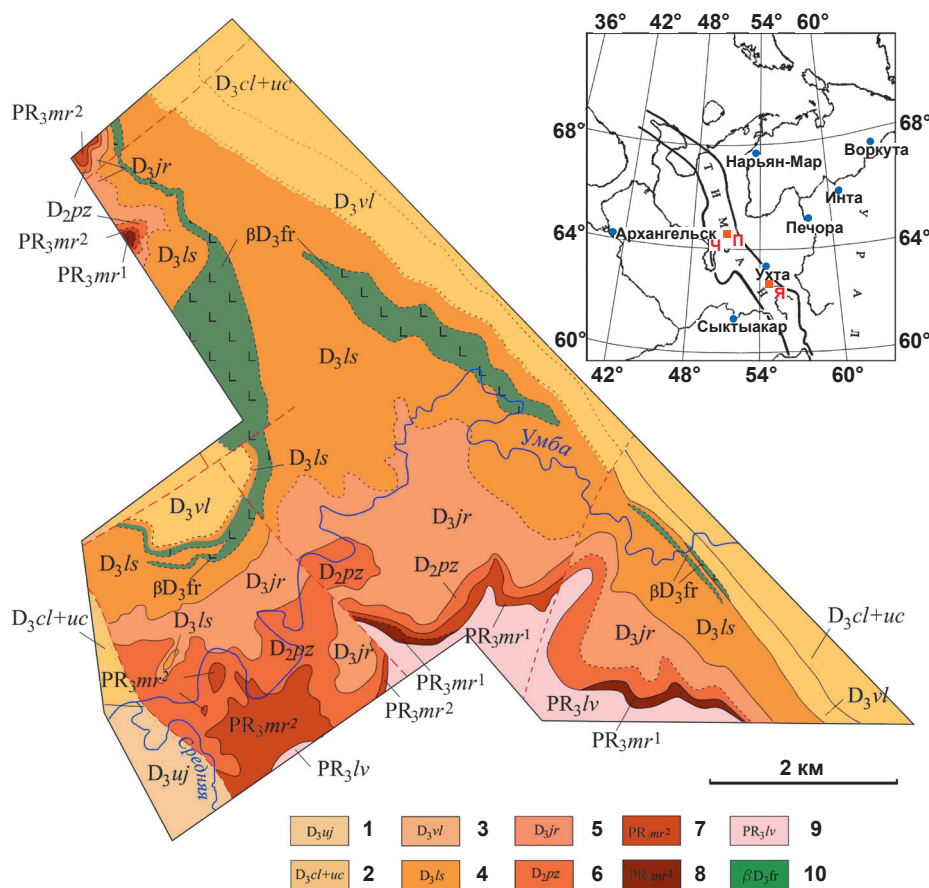


Рис. 1. Геологическая карта южной части Пижемского месторождения в границах лицензионного участка АО «РУСТИТАН». Во врезке – схема расположения Пижемского месторождения. 1 – устьярская свита (песчаники, алевролиты, мергели, глины, реже известняки); 2 – устьчиркинская и цилемская свиты (песчаники, аргиллиты); 3 – валсовская свита (туфы, базальты, туфопесчаники, туфоаргиллиты); 4 – лиственничная свита (алевролиты, глины, песчаники); 5 – яранская свита (песчаники с прослоями гравелитов, алевролитов, аргиллитов); 6 – пижемская свита (кварцевые песчаники с прослоями аргиллитов, гравелитов, конгломератов, конглобрекций); 7 – малоручейская свита, верхняя и средняя подсвиты (сероцветные каолинизированные титаноносные песчаники с прослоями алевролитов); 8 – малоручейская свита, нижняя подсвита (красноцветные каолинизированные, серицитизированные, сидеритизированные и гематитизированные титаноносные песчаники, алевролиты, а также гравелиты в базальных слоях); 9 – вымская серия, лунвожская свита (сланцы кварцево-глинистые с прослоями алевролитов и песчаников); 10 – базальты. Во врезке: П – Пижемское, Я – Ярегское титановые месторождения, Ч – гряда Четласский Камень. Fig. 1. Geological map of the Southern part of the Pyzhemskoye deposit within the boundaries of the license area of JSC "RUSTITAN". The inset shows the location of the Pyzhemskoye deposit, Sredny Timan, Komi Republic. 1 – Ustyaregskaya formation (sandstones, siltstones, marls, clays, less limestones); 2 – Ustchirkinskaya and Tsilemskaya formations (sandstones, mudstones); 3 – Valsovskaya formation (tuffs, basalts, tuff sandstones, tufoargillites); 4 – Listvenichnaua formation (siltstones, clays, sandstones); 5 – Yaranskaya formation (sandstones with layers of gravelites, siltstones, mudstones); 6 – the Pyzhemskaya formation (quartz sandstones with layers of mudstones, gravelites, conglomerates, conglobreccias); 7 – the Malorucheyeskaya formation, upper and middle sub-formations (gray-colored kaolinized titanium-bearing sandstones with layers of siltstones); 8 – the Malorucheyeskaya formation, the lower sub-formation (red-colored kaolinized, sericitized, sideritized and hematitized titanium-bearing sandstones, siltstones, and gravelites in basal layers); 9 – the Vymskaya series, the Lunvozhskaya formation (quartz-clay shales with layers of siltstones and sandstones); 10 – basalts. In the inset: P – Pyzhemskoye, Y – Yaregskoye titanium deposits, C – Chetlassky Stone ridge

Изучение и освоение природных ресурсов

ность открытой карьерной добычи. В Пижемском месторождении по минеральному составу главными являются псевдуртил и лейкоксен, оно не имеет аналогов в мире по запасам и минеральному составу руд. Поэтому следует отнести его к новому генетическому подтипу метаморфогенных коренных месторождений с собственным названием псевдуртил-лейкоксен-кварцевое.

Цель статьи — всесторонняя характеристика геологического строения, вещественного и минерального состава титановых руд, обсуждение вопросов

генезиса, возраста и источника минерального вещества месторождения, аспектов безопасной, экологически чистой, безотходной технологии переработки и извлечения всех полезных компонентов из титановых руд Пижемского месторождения.

Геологическое строение Пижемского месторождения

Пижемское титановое месторождение расположено на севере Вольско-Вымской гряды Среднего Тимана. Титаноносная малоручейская толща PR₃mr,

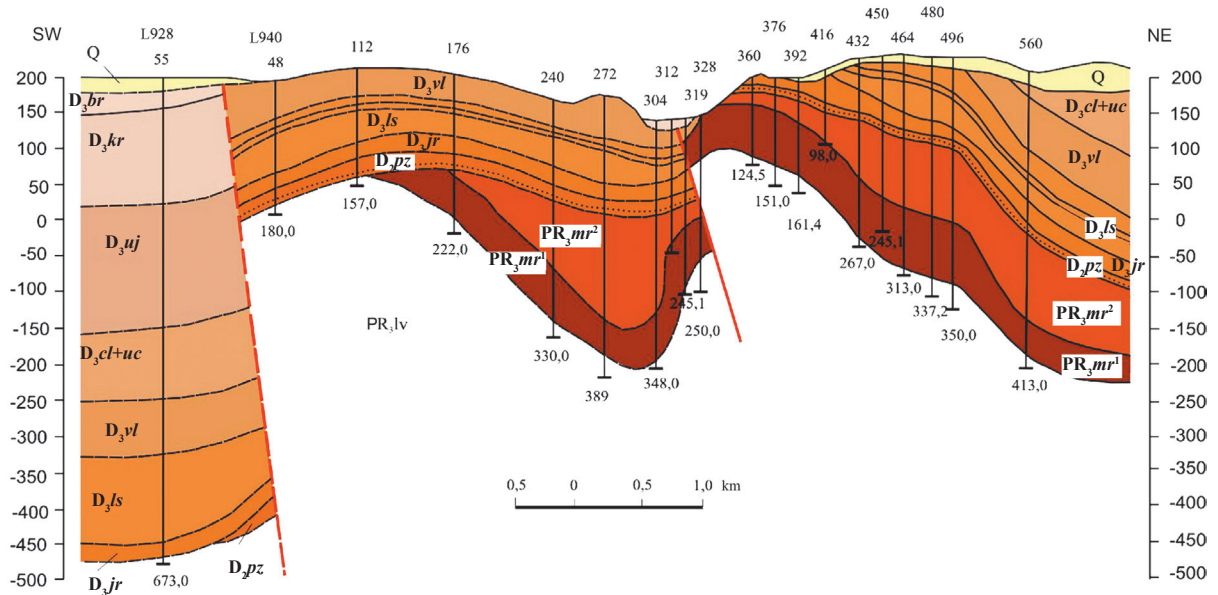


Рис. 2. Геологический разрез L-940 через Пижемское месторождение по данным Ухтинской геолого-разведочной экспедиции (1992). Место расположения разреза близко к северной границе лицензионного участка АО «РУСТИТАН»
 Fig. 2. Geological section of L-940 through the Pyzhem deposit according to the data of the Ukhtinskaya geological survey (1992). The location of the open-cut mine is close to the Northern border of the license area of JSC "RUSTITAN"

несущая псевдорутил-лейкоксеновое оруденение с угловым несогласием, субгоризонтально залегает на рифейских глинистых сланцах PR_3lv и также с угловым несогласием перекрывается терригенно-осадочными и вулканогенно-осадочными породами среднего-верхнего девона. В процессе геолого-разведочных работ (АО «РУСТИТАН» с участием ФГУНПП «Аэрогеология») на месторождении пробурено 70 поисково-оценочных скважин общим метражом более 5,5 км, изучение керна которых позволило составить представление о структуре, строении месторождения и вещественном составе руд. Построены современная геологическая карта (35 км²) лицензионного участка работ (рис. 1) и ряд разрезов (рис. 2).

Среднее содержание TiO_2 в пижемских сероцветных песчаниках средней малоручейской толщи (PR_3mr^2) — 6 мас. % при мощности пласта 0—12 м, в среднем 6 м, в красноцветных песчаниках нижней малоручейской толщи (PR_3mr^1) — соответственно 3,5 мас. %, 5—40 м и 27 м. На восток и северо-восток лицензионного участка мощность пластов значительно увеличивается до 40 и 100 м соответственно, также как и мощность перекрывающих осадочных и вулканогенно-осадочных толщ. Существенной особенностью месторождения является нестандартный для промышленного освоения состав титановых руд, сдерживавший до недавнего времени его освоение. Основным титановым компонентом месторождения является композитная фаза лейкоксен, состоящая из рутила, образующего сагенитовую решетку, с многочисленными микровключениями (1—50 мкм) диоксида кремния — кварца (15—35 мас. %) [5].

Математическая обработка результатов бурения поисковых скважин (мощностей рудных толщ и химического состава руд в керновом материале) с помощью программ Serfer 13 и Corel X7 позволила построить ряд карт-схем, которые в графическом виде дают представление о структуре рудного пласта южной части Пижемского месторождения [6]. На рис. 1—4 наглядно видно, что его структура определяется несколькими параметрами: рельефом нижежающей рифейской сланцевой толщи (см. рис. 3), разломами (взбросами) позднедевонского возраста, распространением и мощностью рудных толщ, а также содержанием в руде основного полезного компонента — TiO_2 (см. рис. 4).

Рудная толща заполняет все углубления неопротерозойского сланцевого фундамента (см. рис. 3), образуя ряд воронковидных (чашевидных) структур, сложенных слоистыми титанонесущими песчаниками — слабосцементированными в верхней части толщи и крепко сцементированными в нижней. В средней части участка работ установлен залегающий в ЮВ-СЗ направлении диагональный блок древнего фундамента шириной до 1 км, образованный Кислоручейским разломом (взбросом), который делит поисковый участок на две части (западную и восточную). В чашеобразных ложбинах фундамента происходило накопление рудных толщ. В направлении ЮЗ-СВ (по данным абсолютных отметок) происходит постепенное понижение уровня фундамента. Рудная толща в целом залегает субгоризонтально, с падением на СВ под углом менее 1°, и в этом же направлении (см. рис. 3 и 4а) растет мощность перекрывающих (D_{2-3}) отложений.

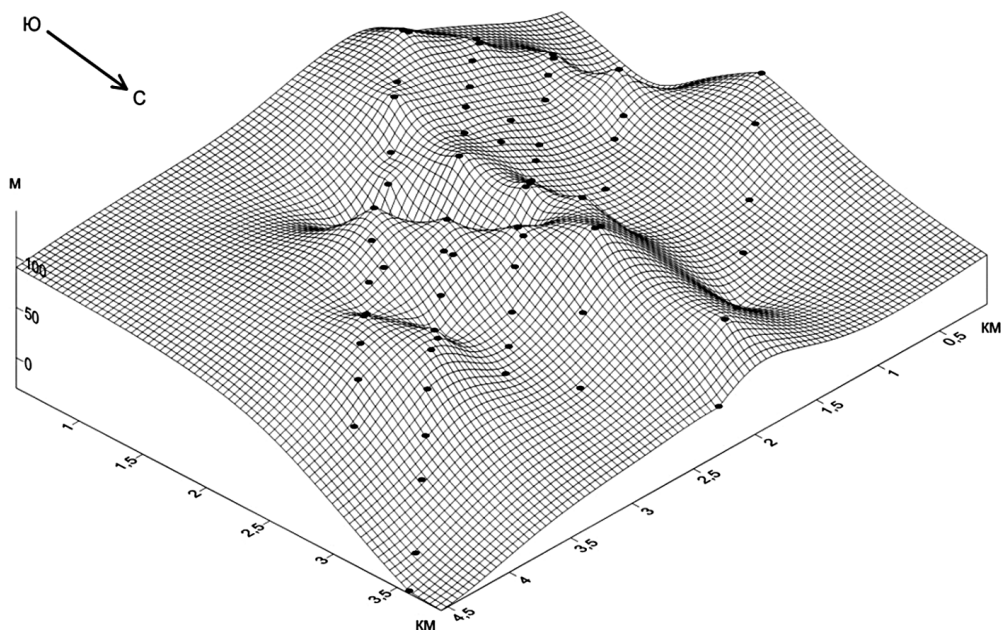


Рис. 3. Рельеф рифейского фундамента, сложенного глинистыми сланцами лунвожской свиты (PR_3lv). Для наглядности схема повернута на 180°

Fig. 3. Relief of the Riphean basement composed of clay shales of the Lunvozhskaya formation (PR_3lv). For clarity, the scheme is rotated 180°

По установленной структуре рудного пласта невозможно представить направление горизонтального перемещения рудного вещества и его источник. Не определяется ни расположение русла древней реки, ни направление течения, ни береговая линия древнего моря, поэтому за рабочую гипотезу было принято предположение о вертикальном перемещении рудного вещества во флюидизатном процессе по типу грязевых вулканов. Только в таком процессе в вулканической кальдере с выбросом огромного объема углекислого газа возможно образование множества островных центров накопления и гидротермального преобразования рудного вещества [7].

Шесть среднemasштабных карт-схем (см. рис. 4) наглядно демонстрируют повторяющуюся в своем начертании ячеистую (чашеобразную) структуру рудного пласта южной части Пижемского месторождения. Вероятно, такое же ячеистое строение следует ожидать и на всей (90 км^2) площади месторождения, о чем свидетельствуют геологические разрезы по материалам ранних работ (см. рис. 2). На поисковом участке работ ($10,2 \text{ км}^2$) выявлены две главные чашеобразные структуры с повышенными мощностями средней PR_3mr^2 малоручейской рудной толщи до $10\text{—}12 \text{ м}$ (см. рис. 4с), наследующие расположение двух главных центров повышенных мощностей нижней PR_3mr^1 малоручейской рудной толщи до $35\text{—}40 \text{ м}$ (см. рис. 4е), которые также совпадают с локализацией центров повышенных содержаний TiO_2 до $7,5 \text{ мас. \%}$ средней и до 4 мас. \% нижней малоручейской толщи (см. рис. 4д и 4ф). Они позволяют наметить площади детализации для постановки разведочных работ и места проектирования будущих добычных карьеров в центрах с максимальной мощностью рудных толщ,

наибольшим содержанием TiO_2 и наименьшей мощностью пород вскрыши (см. рис. 4а).

Химический состав и геохимические особенности руд и пород

Для определения вещественного состава руд и пород проанализирован керн всех разведочных скважин. В лаборатории Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН проведен полный силикатный анализ пород методом РФА на рентгенофлуоресцентном спектрометре последовательного действия (модель PW 2400 Phillips Analytical 1997 г.). Все пробы проанализированы сокращенным методом, охарактеризованы главные оксиды TiO_2 , Fe_2O_3 , MnO , ZrO_2 , P_2O_5 , SO_3 и микрокомпоненты Cr, V, Nb, Ba, Sr, Y, La, Ce, Nd, Th, Rb, всего 17 анализируемых компонентов, для части проб получен полный силикатный анализ, результаты представлены в табл. 1. Получаемая информация по химическому составу пород позволяет точно диагностировать литологические разности, отделять рудные толщ от безрудных. Одной из задач, решаемой с помощью РФА анализа, было уточнение определения литологических разностей пород и выделение границ толщ, похожих по цвету и текстурно-структурным особенностям, а именно серых стекольных песчаников пижемской свиты (D_3pz) от серых каолинит-кварцевых песчаников верхней малоручейской толщи и серых рудных ильменит-лейкоксен-кварцевых песчаников средней малоручейской толщи, отличающихся генезисом (терригенные осадки и гидротермально переработанные коры выветривания).

Нижняя красноцветная малоручейская толща (PR_3mr^1), которая представлена переслаиванием

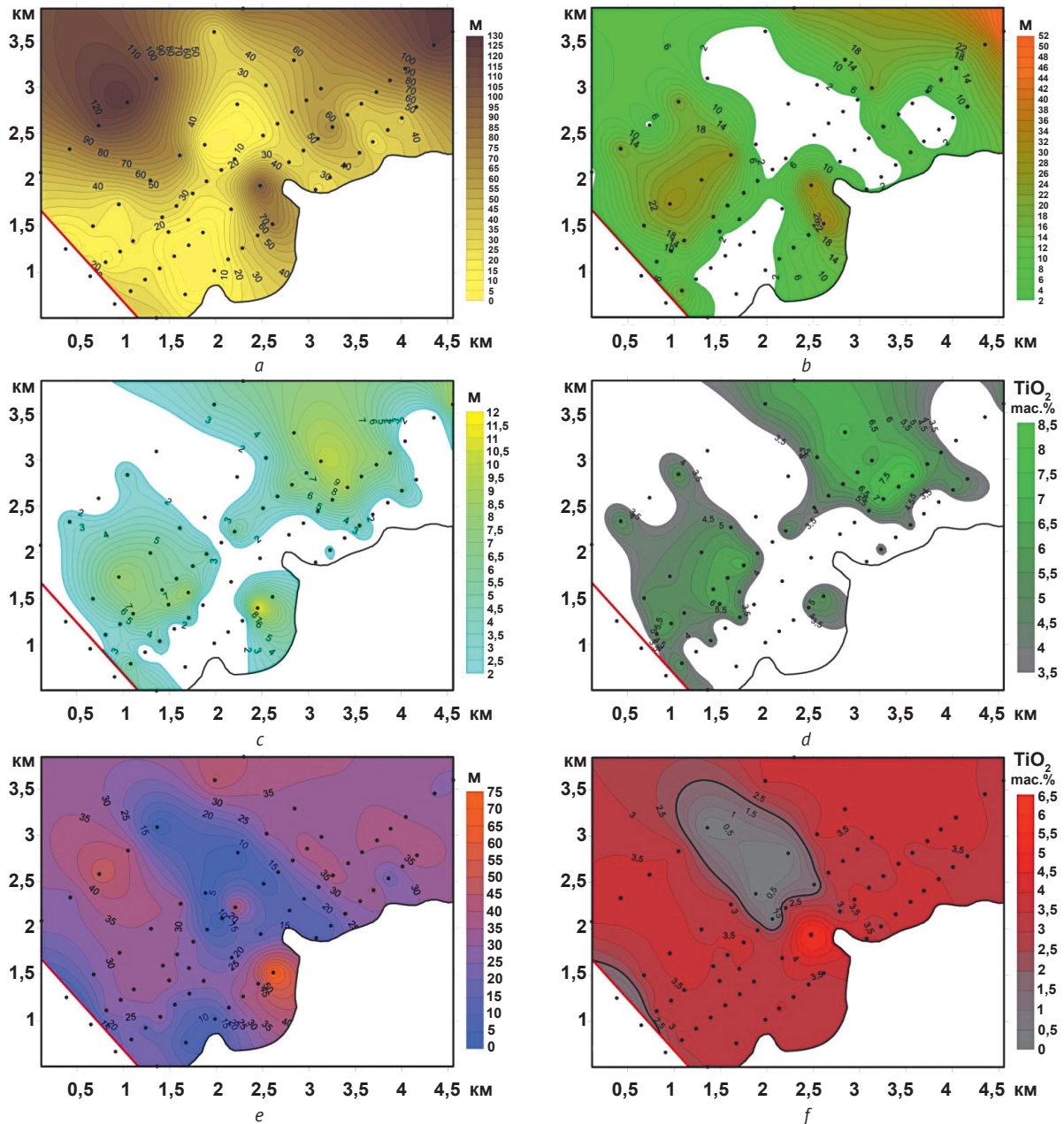


Рис. 4. Карты изолиний мощностей (a, b, c, e), м, и содержаний TiO_2 (d, f), мас. %, пород вскрыши и трех рудных толщ песчаников в южной части Пижемского месторождения: a – мощность вскрыши вулканогенно-осадочных и терригенных пород верхнего-среднего девона (D_{2-3}); b – кварц-каолиновые песчаники верхней толщи (PR_3mr^3); c–d – сероцветные слабоцементированные рудные песчаники средней толщи (PR_3mr^2); e–f – красноцветные сидеритизированные и гематитизированные рудные песчаники нижней малоручейской толщи (PR_3mr^1) неопротерозоя. Точками показано расположение устьев поисковых скважин. Западная граница месторождения ограничена субвертикальным разломом, южная граница – контакт с подстилающими глинистыми сланцами лунвожской свиты (PR_3lv) неопротерозоя

Fig. 4. Maps of isolines of capacities, m, (a, b, c, e) and TiO_2 contents, wt. %, (d, f) of overburden rocks and three ore strata of sandstones in the southern part of the Pizhemskye deposit: a – overburden capacity of volcanogenic-sedimentary and terrigenous rocks of the Upper-Middle Devonian (D_{2-3}); b – quartz-kaolinite sandstones of the upper strata (PR_3mr^3); c–d – gray-colored weakly cemented ore sandstones of medium thickness (PR_3mr^2); e–f – red-colored sideritized and hematitized ore sandstones of the lower Malorucheykaya strata (PR_3mr^1) of the Neoproterozoic. The points show the location of the mouths of the search wells. The western boundary of the deposit is bounded by a subvertical fault; the southern boundary is contact with the underlying clay shales of the Lunvozhskaya formation (PR_3lv) of the Neoproterozoic

псевдорутил-лейкоксен-кварцевых песчаников, гравелитов, алевролитов и каолинит-серицитовых глин, характеризуется максимальным накоплением железа (в виде гематита, гетита и сидерита), а также

иттрия, бария, стронция и рубидия. Максимальное содержание Rb — в аргиллитоподобных глинах.

Элементами-индикаторами рудной титаносной средней малоручейской толщи (PR_3mr^2) являются:

Таблица 1. Средний химический состав (мас. %) керновых проб титаноносных пород Пижемского месторождения (из 6 скважин)

Выборка	Оксиды	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	ZrO ₂	ППП	Sum
PR ₃ mr ² , n = 22	Среднее	77,20	6,09	7,84	3,23	0,077	0,06	0,39	1,53	0,10	0,13	0,43	0,08	2,57	99,72
	Стандартное отклонение	6,71	2,27	3,98	2,78	0,068	0,02	0,25	1,06	0,06	0,05	0,25	0,048	1,02	0,06
PR ₃ mr ¹ , n = 92	Среднее	69,29	3,44	12,03	7,54	0,071	0,12	0,55	2,74	0,09	0,12	0,19	0,049	3,56	99,78
	Стандартное отклонение	4,30	1,05	2,63	2,17	0,060	0,09	0,13	0,65	0,07	0,05	0,08	0,007	1,19	0,08
PR ₃ mr ¹ , n = 19	Среднее	65,40	1,49	15,42	8,40	0,048	0,09	0,70	3,63	0,11	0,09	0,20	0,050	4,17	99,79
	Стандартное отклонение	3,78	0,41	2,35	1,64	0,043	0,05	0,21	0,61	0,08	0,04	0,07	0,008	1,17	0,10

Примечание. ППП — потери после прокаливания, n — количество анализов.

3,2—13,5% TiO₂, 0,10—0,36% ZrO₂, 0,88—5,21% Fe₂O₃, 0,023—0,224% MnO, 217—478 г/т V, 261—538 г/т Sr, 30—323 г/т Ba, 49—99 г/т Nb, 8—65 г/т Rb. Максимальные накопления характерны для титана, циркония, ниобия, суммы лантаноидов, марганца и ванадия.

В верхней малоручейской толще (PR₃mr³) содержание всех этих компонентов резко снижается: 0,17—1,2% TiO₂, 0,017—0,064% ZrO₂, 0,20—0,73% Fe₂O₃, 0,003—0,015% MnO, 15—136 г/т V, 55—363 г/т Sr, 30—248 г/т Ba, 3—29 г/т Nb, 8—39 г/т Rb.

Пижемские песчаники (D₂pz) стекольного качества характеризуются близкими к кларковым содержаниями анализируемых компонентов на грани чувствительности анализа. Главный показатель качества стекольных песчаников — содержание железа (Fe₂O₃) — варьирует от 0,01 до 0,25 мас. %.

Граница между D₂pz песчаниками и верхней малоручейской толщей устанавливается по резкому увеличению в последней Sr и Ba.

Пересчет полных химических рентгенофлуоресцентных анализов на минеральный состав (табл. 2) ясно показывает, что главным породообразующим минералом титаноносных песчаников является кварц — его содержание в породах уменьшается (средние значения) от сероцветным песчаников PR₃mr² (64,4%, n = 19) к красноцветным PR₃mr¹ (53%, n = 92) и далее к алевролитам (45,9%, n = 22). В эту же сторону уменьшается содержание рудных минералов псевдорутила (4,57 — 3,58 — 1,12%), лейкоксена (6,28 — 3,55 — 1,54%), циркона (0,120 — 0,072 — 0,075%), пирита (0,32 — 0,14 — 0,15%), а также каолинита (5,75 — 5,21 — 5,65%). И наоборот, в эту же сторону сверху вниз увеличивается со-

Таблица 2. Средний нормативный минеральный состав (%) пород (PR₃mr) по результатам пересчета химических анализов

Выборка	Минералы	Qw	Mu	Kaol	Sid	Chl	Gem	Apt	Zir	Lec	Pru	Pir	Sum
PR ₃ mr ² , n = 22	Среднее	64,35	13,89	5,75	2,34	1,60	0,66	0,10	0,12	6,28	4,57	0,32	99,98
	Стандартное отклонение	10,23	9,63	3,71	2,29	1,34	1,03	0,04	0,072	2,34	1,70	0,13	0,09
PR ₃ mr ¹ , n = 92	Среднее	53,02	24,94	5,21	3,44	2,63	4,25	0,20	0,07	3,55	2,58	0,14	100,03
	Стандартное отклонение	6,62	5,88	1,86	3,07	0,63	2,05	0,16	0,011	1,09	0,79	0,06	0,23
PR ₃ mr ¹ , n = 19	Среднее	45,87	33,04	5,65	3,65	3,31	5,27	0,16	0,075	1,54	1,12	0,15	99,84
	Стандартное отклонение	6,27	5,53	2,21	2,78	0,99	2,04	0,09	0,013	0,42	0,30	0,05	0,24

Примечание. Первая выборка — сероцветные песчаники, вторая — красноцветные песчаники, третья — красноцветные алевролиты и аргиллитоподобные глины в составе нижней красноцветной толщи. Qw — кварц, Mu — гидромусковит-серицит, Kaol — каолинит, Sid — сидерит, Chl — хлорит, Gem — гематит, Apt — апатит, Zir — циркон, Lec — лейкоксен, Pru — псевдорутил, Pir — пирит.

Таблица 3. Матрица корреляционных связей между оксидами химического состава пород титаносной малоручейской (PR₃тг) толщи

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	ППП	Na ₂ O	ZrO ₂	SO ₃
SiO ₂	1	-0,147	-0,925	-0,933	-0,561	-0,855	-0,243	-0,934	-0,328	-0,826	-0,122	0,329	0,463
TiO ₂	-0,147	1	-0,187	0,157	0,554	-0,028	-0,071	-0,021	0,156	-0,021	0,049	0,575	0,159
Al ₂ O ₃	-0,925	-0,187	1	0,785	0,267	0,835	0,235	0,923	0,244	0,767	0,097	-0,444	-0,447
Fe ₂ O ₃	-0,933	0,157	0,785	1	0,692	0,790	0,210	0,858	0,321	0,746	0,098	-0,391	-0,536
MnO	-0,561	0,554	0,267	0,692	1	0,399	0,082	0,391	0,281	0,502	0,099	-0,084	-0,277
MgO	-0,855	-0,028	0,835	0,79	0,399	1	0,335	0,935	0,253	0,609	0,050	-0,359	-0,548
CaO	-0,243	-0,071	0,235	0,210	0,082	0,335	1	0,305	0,758	0,163	0,113	-0,216	-0,306
K ₂ O	-0,934	-0,021	0,923	0,858	0,391	0,935	0,305	1	0,280	0,673	0,067	-0,389	-0,522
P ₂ O ₅	-0,328	0,156	0,244	0,321	0,281	0,253	0,758	0,280	1	0,243	0,130	-0,159	-0,127
ППП	-0,826	-0,021	0,767	0,746	0,502	0,609	0,163	0,673	0,243	1	0,198	-0,382	-0,249
Na ₂ O	-0,122	0,049	0,097	0,098	0,099	0,050	0,113	0,067	0,130	0,198	1	-0,059	0,145
ZrO ₂	0,329	0,575	-0,444	-0,391	-0,084	-0,359	-0,216	-0,389	-0,159	-0,382	-0,059	1	0,432
SO ₃	0,463	0,159	-0,447	-0,536	-0,277	-0,548	-0,306	-0,522	-0,127	-0,249	0,145	0,432	1

	1		2		3		4
	1		2		3		4

Примечание. Цветом показана значимость коэффициентов корреляции: 1 — высокая, 2 — средняя, 3 — низкая, 4 — отсутствует. В расчете парных коэффициентов корреляции использованы результаты полных силикатных рентгенофлуоресцентных анализов. Значение порогового коэффициента корреляции (при значимости 5% и количестве анализов $n = 137$) $r = 0,165$. Матрица симметрична относительно диагонального значения, равного 1.

держание силикатных глинистых и железистых минералов — гидромусковита (13,9 — 24,9 — 33,0%), хлорита (1,6 — 2,63 — 3,31%), сидерита (2,34 — 3,44 — 3,65%), гематита (0,66 — 4,25 — 5,27%), а также апатита (0,10 — 0,20 — 0,16%). То есть вверх по разрезу увеличивается содержание рудных полезных минералов за счет уменьшения нерудных силикатов и железных минералов (гематита и сидерита). Наблюдаемая обратная корреляция между содержаниями сидерита и гематита означает, что гематит образуется по сидериту в процессе его окисления. Количество ильменита в сероцветных песчаниках, определенное с помощью мёссбауэровской спектроскопии [9], состоит с псевдуритом в пропорции 1:5 и резко уменьшается вниз по разрезу, что свидетельствует о процессе гидротермального преобразования пород в направлении снизу вверх.

Для установления ассоциаций компонентов и возможных генетических связей между ними проведен корреляционный анализ компонентов химического состава пород (табл. 3 и 4), который выявил высокие корреляционные связи: Ti, Fe, Mn, Nb и V, что отражает изоморфизм этих элементов в ильмените и псевдурите; TiO₂ и ZrO₂ — что указывает на совместное их накопление или единый источник этих компонентов; CaO и P₂O₅ — они входят в состав

апатита; Y, La, Ce, Nd и P, которые образуют матрицу монацита и ксенотима; а также между компонентами Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, K₂O, Ba, Rb и ППП (потери после прокаливания — CO₂ + (OH)⁻ + H₂O), которые являются остаточными компонентами разложившейся при выветривании слюды — типа биотита-флогопита. Это компоненты из первичной высокожелезистой слюды ряда флогопит-аннит-сидерофиллит-истонит (ФАСИ) — главного породообразующего минерала жильной магматической породы лампрофира (данная порода примерно на 50% состоит из слюды), которая разложилась в коре выветривания с образованием каолинита, гидромусковита, хлорита. В целом корреляционная матрица позволяет определить наиболее вероятный источник поступления материала в руду — это лампрофры, подобные четласским (спессартиты и камптониты), разложившиеся в коре выветривания, а ильменит, циркон и апатит — устойчивые акцессорные минералы тех же лампрофиров.

Запасы титановых руд и сопутствующих полезных ископаемых месторождения

ГКЗ в ноябре 2020 г. утвердила запасы Пижемского титанового месторождения по временным разведочным кондициям по борту 3 мас. % TiO₂,

Таблица 4. Матрицы корреляционных связей элементов примесей в рудных песчаниках малоручейской свиты, верхняя половина для красноцветной (PR₃mr¹) толщи, нижняя половина для сероцветной (PR₃mr²) толщи

	Zr	Ti	Fe	Mn	V	Nb	Y	La	Ce	Nd	Th	Sr	Ba	Rb
Zr	1	-0,632	0,163	-0,278	0,352	0,177	-0,078	-0,140	0,187	-0,125	0,712	0,019	-0,173	-0,150
Ti	0,579	1	-0,169	0,367	-0,520	-0,168	0,125	0,902	-0,337	0,933	-0,260	-0,168	0,208	-0,120
Fe	0,213	0,517	1	0,499	0,857	0,959	-0,187	0,323	0,562	0,607	0,049	0,124	-0,826	-0,857
Mn	0,318	0,669	0,905	1	0,245	0,476	-0,040	0,904	0,197	0,896	-0,212	0,337	-0,476	0,247
V	0,492	0,924	0,219	0,399	1	0,821	-0,260	0,982	0,524	0,970	-0,275	-0,267	-0,756	-0,064
Nb	0,609	0,988	0,541	0,657	0,918	1	0,040	-0,097	0,574	-0,093	0,253	0,159	-0,752	-0,258
Y	0,669	0,598	0,658	0,571	0,355	0,627	1	0,984	-0,012	0,978	-0,273	0,204	0,283	0,262
La	0,753	0,723	0,324	0,333	0,645	0,760	0,772	1	0,877	0,769	0,330	-0,219	-0,240	-0,049
Ce	0,753	0,825	0,474	0,494	0,710	0,854	0,805	0,962	1	0,910	0,330	-0,109	-0,386	-0,436
Nd	0,761	0,776	0,523	0,528	0,607	0,798	0,849	0,939	0,962	1	0,254	-0,211	-0,210	-0,071
Th	0,817	0,793	0,405	0,445	0,693	0,828	0,800	0,906	0,923	0,917	1	0,402	0,970	0,155
Sr	0,233	0,602	0,356	0,424	0,556	0,590	0,461	0,512	0,430	0,465	0,492	1	-0,120	-0,150
Ba	0,462	0,436	0,502	0,348	0,244	0,476	0,872	0,701	0,700	0,701	0,670	0,467	1	0,965
Rb	0,487	0,471	0,488	0,345	0,285	0,507	0,882	0,704	0,711	0,717	0,701	0,481	0,964	1

Примечание. PR₃mr¹ толща (n = 232, r = 0,130), PR₃mr² толща (n = 44, r = 0,290). Выделены ассоциации элементов примесей с высокими парными коэффициентами корреляции: 1) Ti, Fe, Mn, V, Nb — ассоциация элементов примесей в рудных титановых фазах; 2) Y, La, Ce, Nd, Th — редкоземельная ассоциация, входящая в состав монацит-куларита и ксенотима; 3) Ba, Rb, Fe — часть ассоциации компонентов из разложившейся первичной слюды (биотита-флогопита).

подсчитанные применительно к отработке открытым способом в количестве, приведенном в табл. 5.

Балансовые запасы кварцевых песчаников среднего качества из пород вскрыши пижемской свиты (D₂p₂) по категории C₂ — 345,355 тыс. т.

По сложности геологического строения Пижемское месторождение относится ко 2-й группе сложности, по степени изученности — к оцененным. В феврале 2021 г. Федеральное агентство по не-

дропользованию (Роснедра) признало за АО «РУ-СТИТАН» факт открытия Пижемского титанового месторождения. Месторождение не ограничивается лицензионным участком, оно продолжается на север и имеет полную площадь 90 км², расчет прогнозных ресурсов всей площади дает оценку более 7 млрд т титановой руды, и эти ресурсы после их разведки могут обрабатываться на протяжении нескольких сотен лет. Пижемское месторождение

Таблица 5. Утвержденные ГКЗ запасы и ресурсы Пижемского титанового месторождения

Категория запасов	Запасы руды, млн т	Содержание, %			Запасы, млн т		
		TiO ₂	ZrO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	ZrO ₂	Fe ₂ O ₃
<i>Балансовые запасы на площади 10,2 км²</i>							
C ₁	73,199	4,48	0,052		3,281	38	
C ₂	227,237	4,20	0,050	6,51	9,550	113	19,564
C ₁ +C ₂	300,436	4,27	0,059	6,51	12,831	151	19,564
<i>Прогнозные ресурсы, на остальной площади 22,4 км² лицензии</i>							
P ₁ +P ₂	1012,5	4,23			42,80		

является одним из крупнейших в России и мире по ресурсам титана и кварцевых песчаников стекольного качества.

Минеральный состав титановых руд Пижемского месторождения

Детальные минералогические исследования рудных концентратов пижемских титаноносных песчаников проведены с использованием современных методов, в том числе электронно-микроскопических JSM-5610LV в ИГЕМ РАН и JSM-6480LV в Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова. Выполнено более 800 микрозондовых анализов минеральных зерен из концентратов, получено более 200 электронно-микроскопических изображений в режиме BSE, которые позволили охарактеризовать текстурно-структурные особенности титановых руд (рис. 5) и морфологию зерен минералов (рис. 6) в титановых рудах, а также определить типоморфные особенности химического состава рудных и породообразующих минералов. Диагностировано и охарактеризовано более 40 минеральных фаз, подробно изучены их морфология, внутреннее строение и химический состав [5]. Видовой минеральный состав рудных песчаников средней и нижней частей малоручейской толщи примерно одинаков, он состоит из 40 минеральных видов и разновидностей минералов, главные отличия состоят в количественных соотношениях минералов. Список диагностированных минералов и разновидностей в рудах Пижемского месторождения: *главные рудные титановые минералы* и фазы — ильменит FeTiO_3 , пикроильменит, лейкоксен — $\text{TiO}_2 \cdot \text{SiO}_2$, псевдорутил — $(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_{2-n} \text{Ti}_3\text{O}_9 \cdot \text{SiO}_2$, рутил, Fe-рутил (нигрин); *акцессорные* — Nb-рутил («ильменорутил»), Ta-Nb-рутил («струверит»), колумбит $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6$, циркон ZrSiO_4 , желтый монацит $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd})\text{PO}_4$, серый куларит $(\text{Ce}, \text{Nd}, \text{La})\text{PO}_4$, ксенотим YPO_4 , флоренсит, хро-

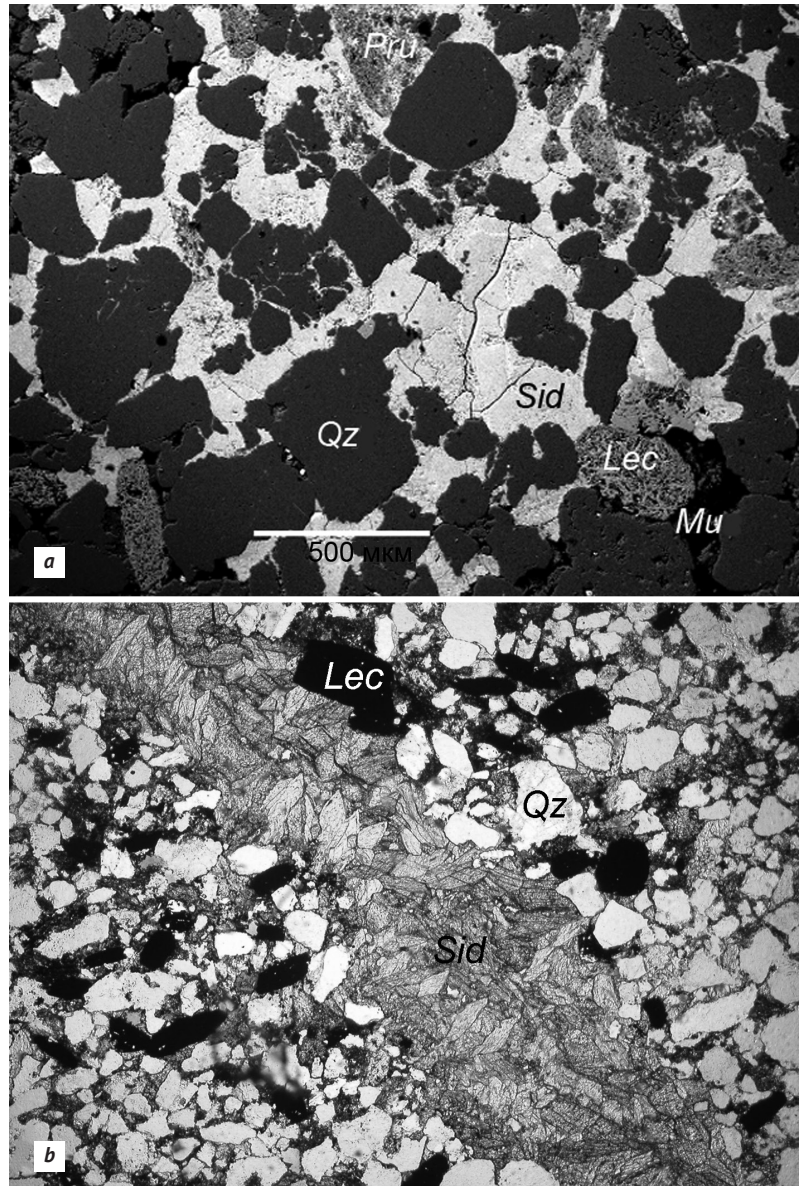


Рис. 5. а – электронно-микроскопическое (ЭМ) изображение красноцветного титаноносного песчаника PR_3mr^1 : темно-серое – неокатанный остроугольный обломочный кварц (Qz), белое – сидерит-гематитовый (Sid-Gem) цемент, черное – каолинит-серицитовый (Mu) цемент, светло-серое – лейкоксен (Lec) и псевдорутил (Pru); б – изображение шлифа в петрографическом микроскопе (николи II) мелкозернистого лейкоксен-кварцевого песчаника (толща PR_3mr^2) с диагональным прожилком сидерита (толщиной 1–2 мм) и сидеритом в поровом цементе: черное – лейкоксен и псевдорутил, серое – сидерит, белое – кварц. Размер поля 3×2 мм

Fig. 5. а – electron microscopic (EM) image of the red-colored titanium-bearing sandstone PR_3mr^1 : dark gray – unrolled acute-angled detrital quartz (Qz), white – siderite-hematite (Sid-Gem) cement, black – kaolinite-sericite (Mu) cement, light gray – leucoxene (Lec) and pseudorutile (Pru); б – image of the section in a petrographic microscope (nicoli II) fine-grained leucoxene-quartz sandstone (PR_3mr^2) with a diagonal vein of siderite (1–2 mm thick) and siderite in pore cement: black – leucoxene and pseudorutile, gray – siderite, white – quartz. The field size is 3×2 mm

мит $(\text{Fe}, \text{Mg})_2(\text{Cr}, \text{Al}, \text{Fe})\text{O}_4$, алюмохромит, хромпикотит, герцинит, гематит, гетит, сидерит FeCO_3 , пирит FeS_2 , халькопирит CuFeS_2 , арсенипирит FeAsS , силицид железа Fe_4Si_3 , ферросилиит, самородное железо, золото, сфалерит, муассонит (SiC), апатит, турмалин (шерл, дравит), амфиболы (пять разновидностей — чермакит, феррочермакит, феррочермакито-

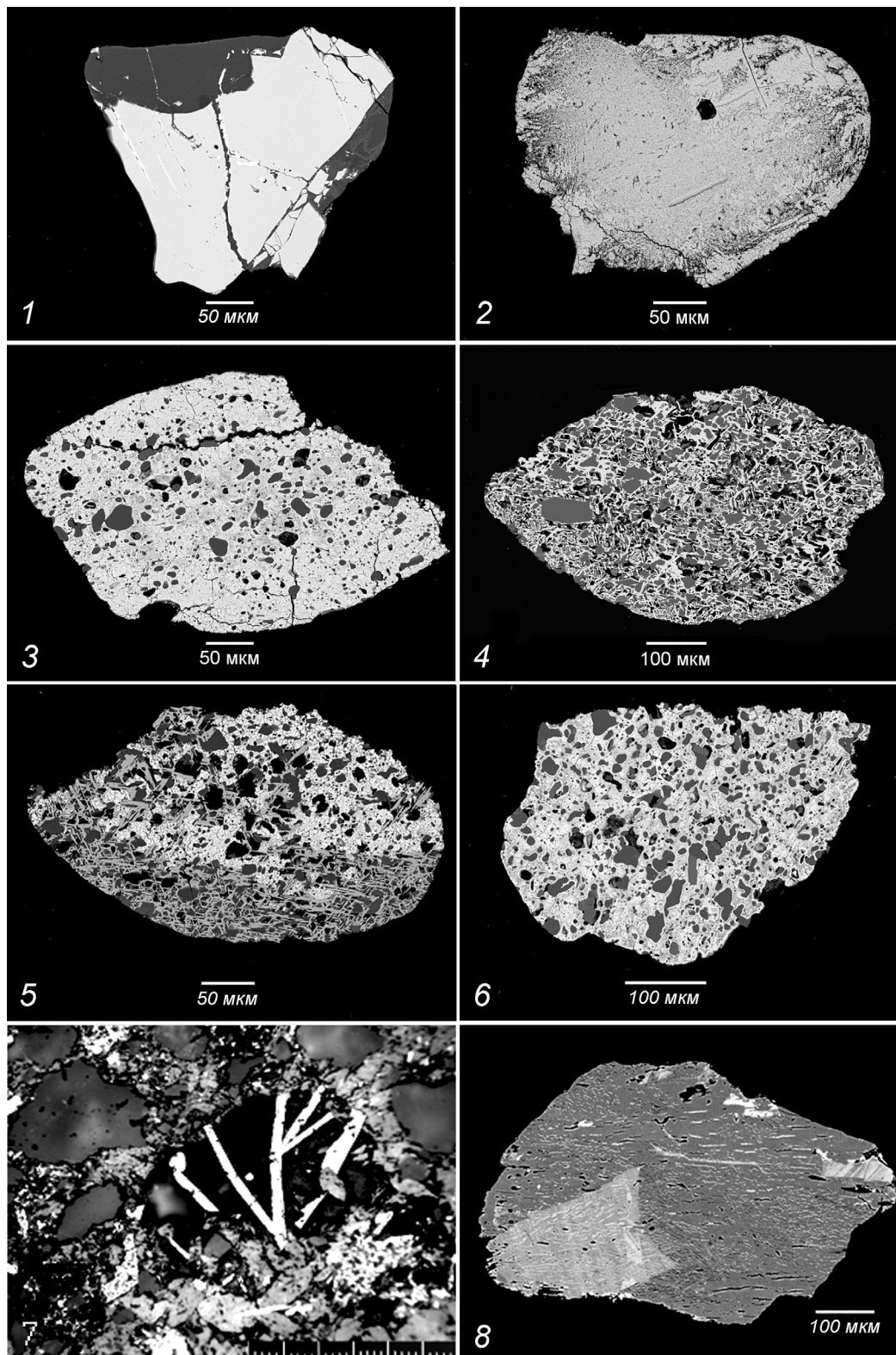
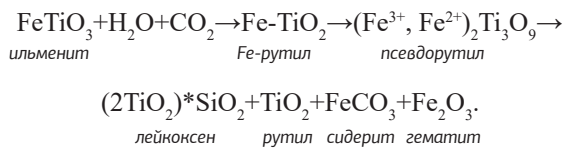


Рис. 6. ЭМ изображения титановых минералов Пижемского месторождения. В ряду последовательности метаморфического преобразования первичного ильменита: 1 – ильменит, 2 – Fe-рутил, 3 – псевдорутил, 4 – лейкоксен, 5 – срастание псевдорутила (светло-серое) и лейкоксена с многочисленными микровключениями кварца (серое) и порами (черное), 6 – монацит-куларит, 7 – иголки новообразованного рутила, 8 – зональное зерно Ta-Nb-рутила (струверита) с переменным содержанием Nb и Ta и включениями касситерита (белое)

Fig. 6. EM images of titanium minerals of the Pizhemskeye deposit. In the series of the sequence of metamorphic transformation of primary ilmenite: 1 – ilmenite, 2 – Fe-rutile, 3 – pseudorutile, 4 – leucoxene, 5 – fusion of pseudorutile (light gray) and leucoxene with numerous microinclusions of quartz (gray) and pores (black), 6 – monazite-kularite, 7 – acicular newly formed rutile, 8 – zonal grain of Ta-Nb-rutile (struverite) with variable Nb and Ta content, and inclusions of cassiterite (white)

вая роговая обманка, железистая роговая обманка и магнезиальная роговая обманка), гранат (ряда кноррингит-пироп-мейджорит-альмандин) и гранат (гроссуляр-альмандин), слюда ФАСИ (ряда флогопит-аннит-сидерофиллит-истонит). Главные *породообразующие* минералы пород — кварц, гидромусковит (серицит), каолинит, железистый хлорит. Глинистые минералы, сидерит и гематит образуют связующий поровый и пленочный цемент всех пород месторождения (см. рис. 5).

Первичным титановым минералом пижемских титановых руд был ильменит, который, по данным мёссбауэровской спектроскопии [9], частично сохраняется в сероцветных песчаниках. Последовательность преобразования первичной минеральной фазы от ильменита через Fe-рутил к псевдорутилу и лейкоксену представляется в виде химической «реакции», при этом высвобождающееся железо остается в породе в виде сидерита и гематита (см. рис. 5):



То, что ильменит в красноцветных песчаниках встречается в крайне малых количествах (по сравнению с вышележащими сероцветными песчаниками), а изотопный состав углерода сидерита соответствует глубинному изотопному показателю [8], означает, что подток гидротермального флюида с эндогенным углеродом происходил в направлении снизу вверх. Это привело к преобразованию первичного ильменита в псевдорутил и в конечном счете в лейкоксен. В рудном концентрате сероцветных песчаников средней малоручейской толщи, по данным мёссбауэровской спектроскопии, ильменит сохраняется в количестве до 10% от всех титановых фаз [9].

Большая часть акцессорных минералов титановых руд Пижемского месторождения по типохимическим особенностям совпадает с породообразующими и акцессорными минералами лампрофиров Четласского Камня [5; 10; 16]. К таким индикаторным минералам относятся: Mn-ильменит, Nb-рутил, монацит, хромит, герцинит, апатит, турмалин, амфиболы, гранат (мейджорит-кноррингит-пироп-альмандин), слюда ФАСИ и др. Этот факт указывает на то, что лампрофиры спессартиты и керсантиты, подобные тем, что широко распространены на Четласском Камне в 60 км на юго-запад от Пижемского месторождения, возможно, образуют крупные жильные поля на некоторой глубине в фундаменте под самим Пижемским месторождением. Они могли быть одним из коренных источников титановых руд этого месторождения.

Среди этого минерального разнообразия в рудах присутствуют надежные минералы-спутники (индикаторы) алмаза: пикроильменит, мейджорит-кнор-

рингит-пироп-альмандин, высокохромистый хромит, муассанит (SiC), ферросилит (FeSi), которые свидетельствуют о возможной находке самого алмаза в титаносных песчаниках и конгломератах в самой базальной части титаносной малоручейской толщи [10; 11] и о близости самого коренного источника тиманского алмаза.

Генезис и возраст Пижемского месторождения

С момента обнаружения и первой оценки Пижемского месторождения в начале 60-х годов XX в. его генезис связывался с перемывом мощных кор выветривания, предположительно образовавшихся в раннем фанерозое по рифейским сланцам, и с накоплением вторичных титановых минералов вместе с обломочным кварцем и глинистыми минералами (гидромусковитом-серицитом, каолинитом) в близко расположенных межгрядовых впадинах и в крупных озерах со слабым придонным течением [12; 13 и др.]. Отсутствие руководящих окаменелостей в исследуемых рудных песчаниках и алевролитах не позволило исследователям определить возраст титаносной толщи кроме как досреднедевонский.

Дискуссионным вопросом остается генезис Пижемского месторождения. Долгое время единственной гипотезой была россыпная, однако по мере углубления и детализации исследований она перестала быть устойчивой и требует корректировки или пересмотра. Приверженцы россыпной гипотезы предлагают несколько вариантов образования россыпи: озерный, аллювиальный, аллювиально-дельтовый, прибрежно-морской. Отнесение месторождения к древней погребенной россыпи не может ответить на существенные вопросы. Во-первых, откуда могли взяться огромные массы кварцевых песков и рудных минералов? Предполагаемый по россыпной гипотезе [13] источник вещества — подстилающие *микрзернистые* (0,1 мм) неопротерозойские глинистые сланцы (и коры выветривания по ним) — не мог служить субстратом для образования *мелко-грубозернистых* (0,3—5 мм) титаносных кварцевых песчаников.

Во-вторых, для возникновения крупного месторождения титана (такого, как Пижемское) с содержанием 2—13 мас. %, в среднем 4,2 мас. % TiO₂, оказываются непригодными бедные титаном подстилающие глинистые сланцы со средним содержанием 0,85 мас. % TiO₂ [14]. Чтобы реализовать эту модель, должны были быть перемыты в 5—10 раз более мощные коры выветривания по сланцам, т. е. мощностью в 500 м. Но зрелых кор выветривания по глинистым сланцам на Тимане никто не наблюдал, встречается только маломощная (1—3 м) делювиальная щебенка этих сланцев, т. е. первая стадия их изменения. Несортированные, неокатанные, остроугольные (обломочные) зерна кварца из титаносных песчаников (рис. 5а), как и игольчатые новообразованные кристаллы рутила (рис. 6.7),

не могут свидетельствовать о дальней транспортировке материала в каком-либо водном потоке и скорее отрицают россыпное происхождение этой толщи. Сидеритовые прожилки (рис. 5b), сидеритовый и гематитовый цемент песчаников свидетельствуют о длительной гидротермальной переработке титаноносных толщ на месте их образования. Для метаморфического преобразования ильменита в псевдорутил и лейкоксен, судя по крупным запасам Пижемского месторождения, потребовались сотни миллионов тонн углекислого газа, которые не получить из атмосферы. Это может быть только эндогенный источник, о чем также свидетельствует изотопный состав углерода сидерита [8].

Не утихают споры о возрасте немых титаноносных толщ. Без каких-либо доказательств ранее предлагалось датировать их возраст от среднего девона до силура. Известно только, что титаноносные песчаники с угловым несогласием залегают под среднедевонскими песчаниками пижемской свиты (D_2pz), возраст которой доказан с помощью микрофоссилий (пыльцы древних растений). Бесспорно одно — малоручейская титаноносная толща древнее, чем средний девон. Впервые изотопные исследования вмещающих оруденение песчано-глинистых пород малоручейской толщи и собственно концентратов титановых руд были выполнены в 2010 г. Rb-Sr методом, что позволило определить возраст самого месторождения — 685 ± 30 млн лет — PR_{3mr} [15].

Новые изотопно-геохимические данные [5; 6; 8; 14—16] опровергают гипотезу об участии кор выветривания по подстилающим рифейским глинистым сланцам PR_{3lv} (Rb-Sr-возраст которых определен нами в $816,3 \pm 5,2$ млн лет [14]) в поставке рудного вещества в титаноносную толщу, также как и дальний снос материала в процессе «россыпеобразования». Мы предполагаем глубинный эндогенный коренной источник рудного вещества [5; 6], а само месторождение относим к классу коренных, предположительно фреато-магматических.

Выше по результатам геохимических и минералогических исследований показано соответствие минерального состава и типоморфных особенностей (химического состава минералов) рудных песчаников Пижемского месторождения и лампрофиров, широко развитых в пределах Среднего Тимана. Из этого факта следует аргументированное предположение, что одним из источников вещества титановых руд могли быть коры выветривания по дайковым полям лампрофиров, предположительно залегающих под самим Пижемским месторождением. Доставка на поверхность песчано-глинистого и рудного материала могла происходить в процессе грязевого вулканизма, сопровождающегося выделением огромных масс углекислого газа. Ясно, что в таком процессе, в агрессивной среде не может существовать никакая биота, поэтому ее остатков и нет в рудной толще. Таким образом, мы

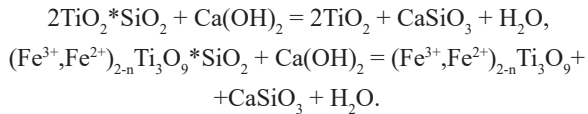
пришли к заключению, что нигде в других местах Тимана не повторяющаяся малоручейская рудная толща является рудным пластом, а не стратиграфическим подразделением.

Технология получения товарных продуктов из пижемских титаноносных песчаников

Пижемские титановые руды — это полиминеральные труднообогатимые гидротермально переработанные образования, средне- и сильно сцементированные глинистыми минералами, сидеритом и гематитом. При дезинтеграции руд не удастся напрямую получить концентраты рудных минералов с использованием простых физических методов обогащения, поскольку рудные минералы находятся в оболочке в виде агломератов и сростков с цементирующими породообразующими минералами. Главным и самым неудобным из них является сидерит. Образование сидерита в гидротермальном процессе при разложении ильменита происходило по всему объему толщи песчаников, а также с образованием сетки (рис. 5b) 1—2-миллиметровых прожилков (по трещинам), по которым снизу вверх диффундировал углекислый газ. По мере образования сидерит стал цементирующей связкой всех минеральных зерен руды. Поэтому сидерит в меньшей или большей степени присутствует в виде кайм, сростков или включений во всех находящихся с ним в контакте минералов. Присутствие сидерита в руде, во-первых, существенно снижает показатели по раскрытию минеральных фаз при дезинтеграции песчаников и, во-вторых, влияет на магнитную восприимчивость и другие физические свойства минералов. Совокупность этих факторов усложняет применение физических методов обогащения псевдорутил-лейкоксен-кварцевых песчаников Пижемского месторождения. Найден эффективный способ избавления от сидерита и тем самым раскрытия агрегатов — обработка крупно-среднезернистой дезинтегрированной массы руды, подогретой слабой соляной кислотой. При этом сидерит и гематит разлагаются с образованием воднорастворимого хлорида железа ($FeCl_2$). Последний подвергают гидролизу с получением железистооксидного пигмента (гематита) и восстановленной соляной кислоты, которая используется в оборотном циклическом процессе.

По заказу АО «РУСТИТАН» в ИМЕТ РАН разработана технология промышленной безотходной экологически чистой переработки пижемских титановых руд с получением высококачественных концентратов и товарных продуктов из лейкоксена и псевдорутила путем их обескремнивания с получением искусственного пористого рутила. Пористый рутил — весьма востребованный товарный продукт, он используется для получения титановых белил, металлического титана, для обмазки сварочных электродов, а также как катализатор для инициирования процесса хлорирования природных рутиловых концентратов. При этом скорость реакции хлорирования возрастает

в десятки раз из-за увеличения площади реакционной поверхности. Для нестандартных титановых фаз (с высоким содержанием включений микрозернистого кварца) лейкоксена и псевдуртила решена задача их обескремнивания — кварц связывается в автоклавном переделе с известковым молоком:



При этом получается несколько товарных продуктов — пористый рутил и пористый псевдуртил, а также дополнительный ценный продукт волластонит (рис. 7), широко применяемый в строительной индустрии и других областях [17; 18].

Технологические исследования, проведенные в ИМЕТ РАН с титаноносными песчаниками Пижемского месторождения, показали принципиальную возможность в промышленных масштабах производить рудные концентраты, разделять полезные компоненты, обескремнивать лейкоксен и псевдуртил с получением пористого рутила и пористого псевдуртила (аризонита) — высокоценных промышленных товарных продуктов, из которых в дальнейшем с применением уже известных промышленных технологических способов возможно получение титановых белил и металлического титана. В качестве попутных ценных товарных продуктов могут быть получены волластонит, цирконовый концентрат, железозоксидный гематитовый пигмент, а также извлекаться редкоземельные металлы из природных фосфатов монацита-куларита.

Заключение

Пижемское титановое месторождение — перспективный промышленный объект, по типу продуктивной минерализации не имеющий аналогов в мире. Главными титановыми фазами являются псевдуртил и лейкоксен, что с учетом геологических особенностей позволяет отнести его к новому генетическому подтипу — метаморфогенным коренным месторождениям с собственным названием — псевдуртил-лейкоксен-кварцевое.

Выявлена ячеистая, чашеобразная структура рудных тел, где титаноносные песчаники заполняют отрицательные формы (впадины) кристаллического фундамента. Установлены особенности вещественного и полиминерального состава руд. Представлены новые изотопно-геохимические доказательства неопротерозойского возраста Пижемского месторождения, коренной гидротермально-метаморфогенный генезис его руд. Коры выветривания по жильным полям лампрофиров рассматриваются как один из наиболее вероятных источников минерального вещества.

Проведенные в ИМЕТ РАН по заказу АО «РУСТИТАН» технологические исследования по обогащению и переработке титановых руд Пижемского месторождения показали принципиальную возможность в промышленных масштабах по

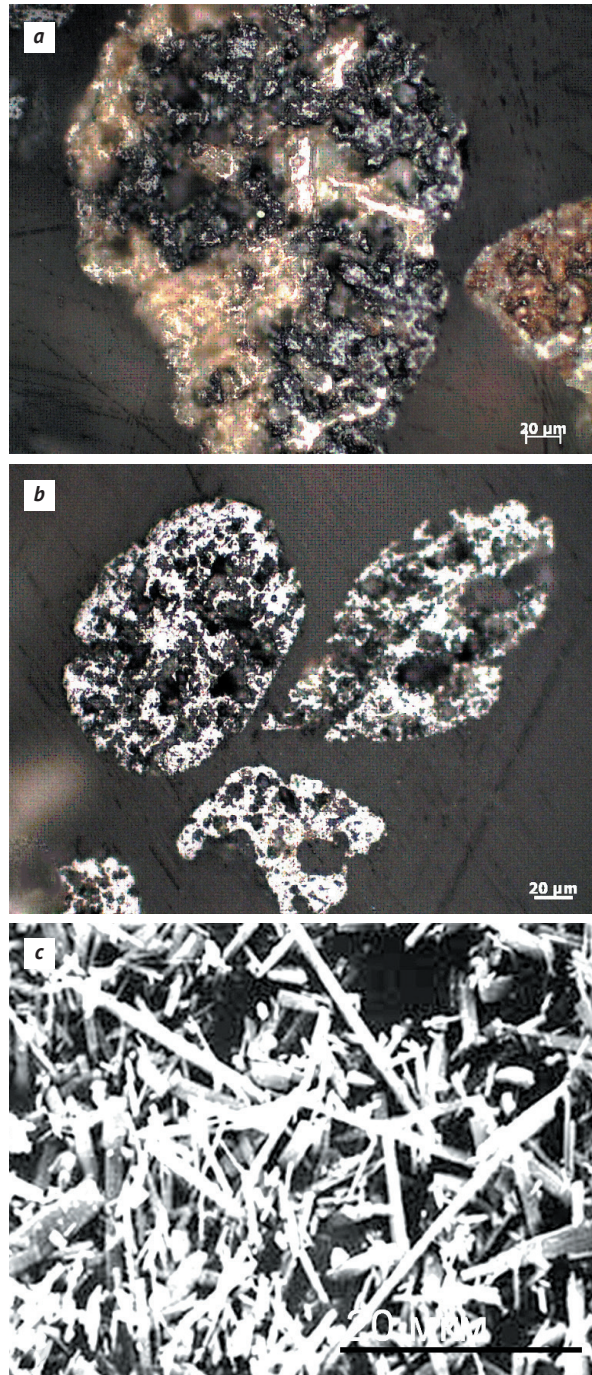


Рис. 7. Товарные продукты после обескремнивания титановых концентратов пижемских руд: *a* — срастание пористого рутила и псевдуртила; *b* — пористый псевдуртил; *c* — игольчатый волластонит. Оптические и ЭМ изображения, режимы: *a* — бинокуляр; *b, c* — BSE

Fig. 7. Commercial products after desilicization of titanium concentrates of Pizhemskeye ores: *a* — fusion of porous rutile and pseudorutile; *b* — porous pseudorutile; *c* — acicular wollastonite. Optical and EM images, modes: *a* — binocular; *b, c* — BSE

экологически чистой схеме производить рудные концентраты с разделением полезных компонентов, обескремнивание лейкоксена и псевдуртила с получением пористого рутила и пористого псев-

дорутила — высокоценных промышленных товарных продуктов, из которых в дальнейшем уже известными промышленными технологическими способами возможно получение титановых белил и металлического титана. В качестве попутных ценных товарных продуктов могут быть получены волластонит, цирконовый и редкоземельный концентраты, железоксидный гематитовый пигмент, особо чистый кварцевый песок.

Комплексность Пижемского титанового месторождения складывается из возможности добычи и безотходной переработки всех полезных компонентов из самих титановых руд, а также попутного использования пород вскрыши: базальтов, кварцевых песчаников (стекольного качества), каолинит-кварцевых песчаников, редких и редкоземельных металлов, золота и алмазов из вышележащего полиминерального проявления Ичетью. Экономические расчеты при мощности горно-обогатительного комбината по добыче руды 5 млн т руды в год с бортовым содержанием 3 мас. % TiO_2 и карьерной вскрышей перекрывающей терригенно-вулканогенной толщи 20—60 м показывают рентабельность и быструю окупаемость будущего производства. Пижемское месторождение с учетом гигантских ресурсов титановой руды имеет особое значение для развития отечественной минерально-сырьевой базы титана, необходимой для развития гражданской промышленности и оборонно-промышленного комплекса, а также выполнения государственной программы по импортозамещению соответствующей продукции.

Работа выполнена в рамках темы госзадания ИГЕМ РАН FMMN-2021-0005 «Металлогения рудных районов вулcano-плутоногенных и складчатых орогенных поясов Северо-Востока России».

Литература/References

1. *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 16—18 апреля 2019 г. — Т. 3. — Сыктывкар: Геопринт, 2019. — С. 324—326.

Makeyev A. B. Pizhemskeye titanium deposit: aspects of the geological structure, mineral composition of ores, genesis, technology and industrial development. *Geology and mineral Resources of the European North-East of Russia. Materials of the XVII Geological Congress of the Komi Republic on April 16—18, 2019. Vol. 3.* Syktyvkar, Geoprint, 2019, pp. 324—326. (In Russian).

2. *Макеев А. Б., Дудар В. А., Самарова Г. С. и др.* Пижемское титановое месторождение (Средний Тиман): аспекты геологического строения и освоения // Гор. журн. — 2012. — № 6. — С. 45—49.

Makeyev A. B., Dudar V. A., Samarova G. S., Tigunov L. P., Bykhovskiy L. Z. Pizhemskeye titanium deposit (Middle Timan): aspects of geological structure and development. *Gor. zhurn.*, 2012, no. 6, pp. 45—49. (In Russian).

3. *Ткачук А. Н., Трофимов Е. Н., Новиков А. А. и др.* Проект строительства горно-металлургического комплекса на базе Пижемского месторождения титана // Гор. журн. — 2013. — № 9. — С. 67—70.

Tkachuk A. N., Trofimov E. N., Novikov A. A., Dudar V. A., Makeyev A. B. The project of construction of a mining and metallurgical complex on the basis of the Pizhemskeye titanium deposit. *Gor. zhurn.*, 2013, no. 9, pp. 67—70. (In Russian).

4. *Тигунов Л. П., Быховский Л. З., Зубков Л. Б.* Титановые руды России: состояние и перспективы освоения // Минер. сырье. Сер. геол.-экон. — 2005. — № 17. — 104 с.

Tigunov L. P., Bykhovskiy L. Z., Zubkov L. B. Titanium Ores of Russia: State and Prospects of Development. *Mineral'noye syr'yo. Ser. geol.-ekon.*, no. 17, 104 p. (In Russian).

5. *Макеев А. Б.* Типоморфные особенности минералов титановых руд Пижемского месторождения // Минералогия. — 2016. — № 1. — С. 24—49.

Makeyev A. B. Typomorphic features of minerals of titanium ores of the Pizhemskeye deposit. *Mineralogiya*, 2016, no. 1, pp. 24—49. (In Russian).

6. *Макеев А. Б., Бочнева А. А.* Структура рудного пласта титаносных песчаников Пижемского месторождения // Породо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы исследований: Труды к 90-летию ИГЕМ РАН. — М.: ИГЕМ РАН, 2020. — С. 169—172. — URL: http://www.igg.uran.ru/sites/default/files/Conferences/sbornik_trudov_igem_ran_90_let.pdf.

Makeyev A. B., Bochneva A. A. Structure of the ore layer of titanium-bearing sandstones of the Pizhemskeye deposit. *Rock, mineral and ore formation: achievements and prospects of research. Proceedings for the 90th anniversary of IGEM RAS. Moscow, IGEM RAS, 2020, pp. 169—172.* Available at: http://www.igg.uran.ru/sites/default/files/Conferences/sbornik_trudov_igem_ran_90_let.pdf. (In Russian).

7. *Макеев А. Б.* Пижемское титановое месторождение — флюидизатная кальдера в Пижемской депрессии (Средний Тиман) // Геохимия литогенеза: Материалы Российского совещания с международным участием (Сыктывкар, Республика Коми, 17—19 марта 2014 г.). — Сыктывкар: Геопринт, 2014. — С. 86—89.

Makeyev A. B. Pizhemskeye titanium deposit — fluidized caldera in the Pizhemskeye depression (Middle Timan). *Geochemistry of lithogenesis: Materials of the Russian meeting with international participation (Syktyvkar, Komi Republic, March 17—19, 2014).* Syktyvkar, Geoprint, 2014, pp. 86—89. (In Russian).

8. *Макеев А. Б.* Изотопия С и О сидерита Пижемского титанового месторождения // Двадцатая международная конференция «Физико-химические и петро-

- физические исследования в науках о Земле». Москва, 23—29 сентября 2019 г.: Материалы конференции. — М.: ИГЕМ РАН, 2019. — С. 210—213.
- Makeyev A. B. Isotopy of C and O in siderite of the Pizhenskoye titanium deposit. The Twentieth International Conference “Physico-chemical and Petrophysical research in the Earth Sciences”. Moscow, September 23—29, 2019. Materials of the conference. Moscow, IGEM RAS, 2019, pp. 210—213. (In Russian).
9. 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. — URL: <http://dx.doi.org/10.17580/or.2015.05.06>.
- Makeyev A. B., Lyutoev V. P. Spectroscopy in technological mineralogy. Mineral composition of titanium ore concentrates of the Pizhenskoye deposit (Middle Timan). Obogashchenie rud, 2015, no. 5. pp. 33—41. URL: <http://dx.doi.org/10.17580/or.2015.05.06>. (In Russian).
10. Макеев А. Б., Брянчанинова Н. И. Лампрофиты Четласского Камня (Средний Тиман) // Регион. геология и металлогения. — 2009. — Т. 37. — С. 51—73.
- Makeyev A. B., Bryanchaninova N. I. Lamprophyres of Chetlas Stone (Middle Timan). Region. geologiya i metallogeniya, 2009, vol. 37, pp. 51—73. (In Russian).
11. Макеев А. Б. Минералы спутники алмаза в Пижемском титановом месторождении (Средний Тиман) // XIII Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле». — Т. 1. — М.: МГРИ-РГГРУ, 2017. — С. 261—262.
- Makeyev A. B. Minerals satellites of diamond in the Pizhenskoye titanium deposit (Middle Timan). XIII International Scientific and practical Conference “New ideas in Earth sciences”, vol. 1. Moscow, MGRI-RGGRU, 2017, pp. 261—262. (In Russian).
12. Игнатьев В. Д., Бурцев И. Н. Лейкоксен Тимана. Минералогия и проблемы технологии. — СПб.: Наука, 1997. — 215 с.
- Ignatiev D. V., Burtsev I. N. The Leucoxene of Timan: Mineralogy and Problems of Technology. St. Petersburg, Nauka, 1997, 215 p. (In Russian).
13. Калюжный В. А. Геология новых россыпеобразующих метаморфических формаций. — М.: Наука, 1982. — 262 с.
- Kalyuzhny V. A. Geology of New Placeforming Metamorphic Formations. Moscow, Nauka, 1982, 264 p. (In Russian).
14. Макеев А. Б., Красоткина А. О., Скублов С. Г. Глинистые сланцы лунвожской свиты Вольско-Вымской гряды (Средний Тиман): состав, возраст, акцессорный циркон // Материалы Минералогического семинара с международным участием «Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии» (Юшкинские чтения-2018). — Сыктывкар, 2018. — С. 40—41.
- Makeyev A. B., Krasotkina A. O., Skublov S. G. Clay shales of the Lunvozhskaya formation of the Volsko-Vymskaya ridge (Middle Timan): composition, age, accessory zircon. Materials of the Mineralogical seminar with international participation “Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy” (Yushkin readings-2018). Syktyvkar, 2018, pp. 40—41. (In Russian).
15. Chernyshev I. V., Makeyev A. B., Gol'tsman Yu. V., Bryanchaninova N. I. Age of Titanium Deposits of the Northeastern Part of the Eastern European Platform: Rb—Sr Data. Doklady Earth Sci., 2010, vol. 435, pp. 1524—1528. DOI: 10.1134/S1028334X10110255.
16. Makeyev A. B., Andreichev V. L., Bryanchaninova N. I. Age of Lamprophyres of the Middle Timan: First Rb—Sr Date. Doklady Earth Sciences, 2009, vol. 426, no. 4. pp. 584—587. DOI: 10.1134/S1028334X09040163.
17. Anisonyan K. G., Sadykhov G. B., Olyunina T. V., Goncharenko T. V., Leont'ev L. I. Magnetizing roasting of leucoxene concentrate. Russian metallurgy (Metally), 2011, no. 7, pp. 656—659.
18. Zablotskaya Y. V., Sadykhov G. B., Goncharenko T. V., Olyunina T. V., Anisonyan K. G., Tagirov R. K. Pressure Leaching of Leucoxene Concentrate Using Ca(OH)₂. Russian Metallurgy (Metally), 2011, no. 11, pp. 1030—1034.

Информация об авторе

Макеев Александр Борисович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: abmakeev@mail.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Макеев А. В. Пижемское титановое месторождение — новый объект ближайшего освоения в Арктической зоне России // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 4. — С. 541—556. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-541-556.

THE PIZHEMSKOYE TITANIUM DEPOSIT IS A NEW OBJECT OF THE NEAREST DEVELOPMENT IN THE ARCTIC ZONE OF RUSSIA

Makeyev, A. B.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS (Moscow, Russian Federation)

The article was received on July 29, 2021

Abstract

The Pizhemskiye titanium deposit (Middle Timan) has become one of the most attractive deposits for the industrial development in Russia as a result of the successful protection and approval of reserves at the State Reserves Committee (November 2020). 60 years have passed since the first finds of titanium mineralization in the basin of the Pechora Pizhma and Umba rivers by the thematic teams of the Ukhta Geological Exploration Department and the Komi branch of the Academy of Sciences, and now the deposit is considered one of the largest in Russia and the World. Together with the Yarega oil-titanium deposit, they contain up to 80% of the reserves and predicted resources of titanium in Russia. Timan becomes the largest raw material base of titanium in the world, the intensive development of which is possible for several hundred years. The article highlights the geological structure of the Pizhemskiye deposit (revealed a cellular, bowl-like structure of ore bodies); material and complex polymineral composition of ores; the Neoproterozoic age. The author proves the hydrothermal-metamorphogenic genesis of the ores, considers the sources of the mineral matter and solution of the technological scheme for processing refractory ores. The Pizhemskiye deposit is classified as a new pseudorutile-leucoxene-quartz subtype of primary metamorphogenic deposits.

Keywords: *Arctic zone, Pizhemskiye deposit, geological structure, material and mineral composition, titanium phases, ways of deposit development.*

The work was carried out within the framework of the State Assignment of IGEM RAS FMMN-2021-0005 "Metallogeny of ore regions of volcano-plutonogenic and folded orogenic belts of the North-East of Russia".

Information about the author

Makeyev, Alexander Borisovich, Doctor of Geology and Mineralogy, Leading Researcher, Professor, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetnyi per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: abmakeev@mail.ru.

Bibliographic description of the article

Makeyev, A. B. The Pizhemskiye titanium deposit is a new object of the nearest development in the Arctic zone of Russia. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 4, pp. 541—556. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-541-556. (In Russian).

© Makeyev A. B., 2021