УДК 549.08

ТИПОМОРФНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛОВ ТИТАНОВЫХ РУД ПИЖЕМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А.Б. Макеев
ИГЕМ РАН, г. Москва; abmakeev@mail.ru

TYPOMORPHIC FEATURES OF MINERALS OF TI ORES FROM THE PIZHEMSKOE DEPOSIT

A.B. Makeev
IGEM RAS, Moscow; abmakeev@mail.ru

Отработана технологическая схема получения концентратов титановых минералов из руд Пижемского месторождения, включающая дробление, оттирку, обесшламливание, гравитационное обогащение, классификацию и магнитную сепарацию. В немагнитной фракции класса –0.50 + 0.125 мм концентрируется почти весь лейкоксен, а класса –0.125 + 0.040 мм – лейкоксен, рутил и циркон. В магнитную фракцию этих продуктивных классов попадают ильменит, Fe-рутил, «псевдорутил» и сидерит. Соотношение в коллективном концентрате лейкоксена и магнитных титановых минералов ≈ 5 : 3, «псевдорутила» и ильменита с Fe-рутилом ≈ 20 : 4 : 6. Охарактеризован состав и типоморфные свойства минералов рудных концентратов и U-Pb датирование циркона с разбросом значений от 2740 до 334 млн лет. Полученные данные согласуются с результатами исследования возраста и геохимии циркона проявления Ичетъю, что указывает на единый глубинный источник циркона этих месторождений.

Илл. 17. Табл. 13. Библ. 20.

Ключевые слова: Тиман, Пижемское месторождение, рудные концентраты, ильменит, Fe-рутил, «псевдорутил», рутил, лейкоксен, ксенотим, монацит, хромшпинелиды, амфиболы, турмалин, слюда, циркон.

The technology of production of concentrates of Ti minerals from ores of the Pizhemskoe deposit is improved and includes crushing, mechanical removal of slime films, desliming, gravitation concentration, classification, and magnetic separation. Almost the entire leucoxene is concentrated in the non-magnetic fraction of –0.50 + 0.125 mm in size, whereas leucoxene, rutile and zircon accumulate in fraction of –0.125 + 0.040 mm in size. The magnetic fraction contains ilmenite, Fe-rutile, «pseudorutile» and siderite. The ratio between leucoxene and magnetic Ti minerals in collective concentrate is ≈ 5 : 3 and that of «pseudorutile», ilmenite, and Fe-rutile is ≈ 20 : 4 : 6. The composition and typomorphic features of minerals of ore concentrates are characterized. The U-Pb age of zircon varies from 2740 to 334 Ma. These data are consistent with results of the study of age and geochemistry of zircon from the Ichet'yu occurrence that indicates the common deep source of zircons of these deposits.

Figures 17. Tables 13. References 20.

Key words: Timan, Pizhemskoe deposit, ore concentrates, ilmenite, Fe-rutile, «pseudorutile», rutile, leucoxene, xenotime, monazite, Cr-spinels, amphibole, tourmaline, mica, zircon.

Введение

Пижемское месторождение титановых руд на Среднем Тимане локализовано в пределах Пижемской депрессии на севере Вольско-Вымской гряды на площади около 90 км^2 (рис. 1). Титаноносные песчаники слагают малоручейскую свиту, которая распространена локально (6 × 18 км) и залегает с угловым и стратиграфическим несогласием на метаморфических породах (глинистых сланцах) позднего протерозоя (PR_2). Перекрывается титаноносная толща аллювиально-дельтовыми кварце-

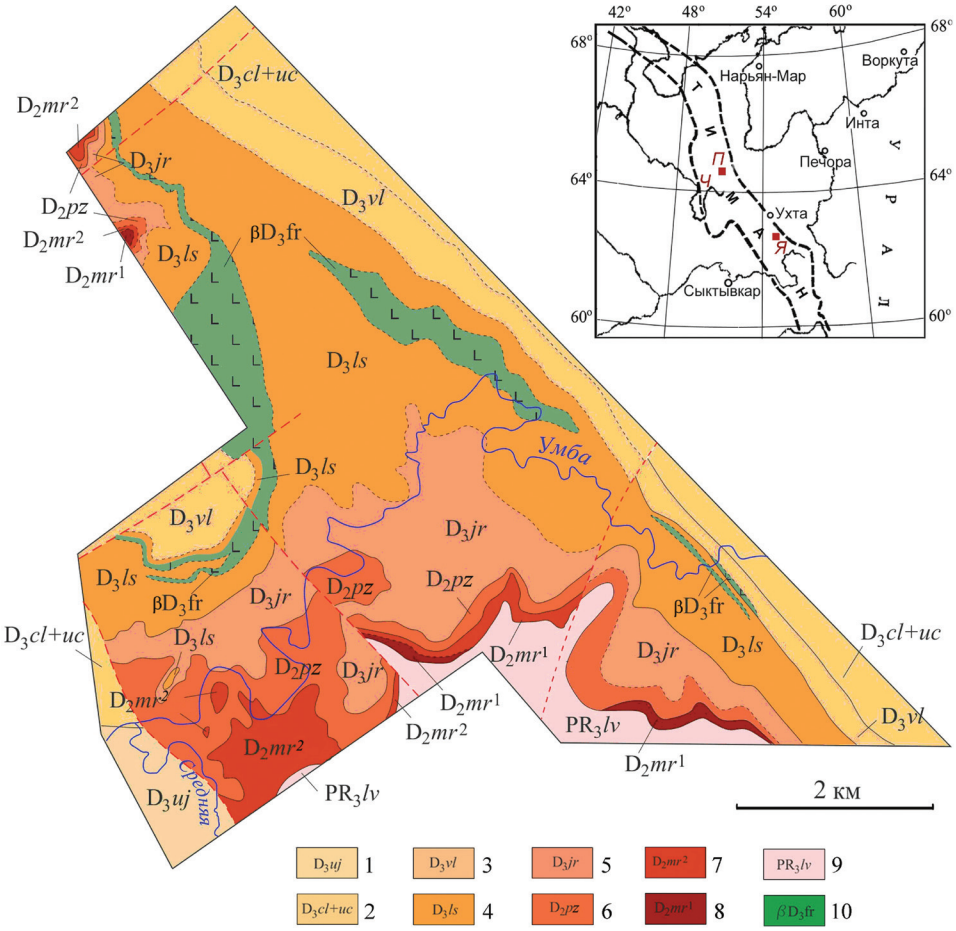

Рис. 1. Геологическая карта южной части Пижемского месторождения в границах лицензионного участка ЗАО «РУСТИТАН» (по материалам ФГУНПП «Аэрогеология», 2015).

1–9 свиты: 1 – устьярегская (песчаники, алевролиты, мергели, глины, реже известняки); 2 – устьчиркинская и цилемская (песчаники, аргиллиты); 3 – валсовская (туфы, базальты, туфопесчаники, туфоаргиллиты); 4 – лиственничная (алевролиты, глины, песчаники); 5 – яранская (песчаники, гравелиты, алевролиты, аргиллиты); 6 – пижемская (кварцевые песчаники, аргиллиты, гравелиты, конгломераты, конглобрекчии); 7 – малоручейская mr^2 (сероцветные каолинизированные титаноносные песчаники с прослоями алевролитов); 8 – малоручейская mr^1 (красноцветные титаноносные песчаники, алевролиты, гравелиты в базальных слоях); 9 – лунвожская (сланцы кварцево-глинистые, алевролиты, песчаник); 10 – базальты. Во врезке: П – Пижемское, Я – Ярегское титановые месторождения, Ч – гряда Четласский Камень.

Fig. 1. Geological map of the southern part of the Pizhemskoe deposit within the boundaries of the license area of CJSC «RUSTITAN» after (FGUNPP «Aerogeology», 2015).

1–9 – Formations: 1 – Ust Yareg (sandstone, siltstone, marl, clay, rare limestone); 2 – Ust Chirkinskaya and Tsilma (sandstone, claystone); 3 – Valsovskaya (tuff, basalt, tuff sandstones, tuff siltstone); 4 – Listvenichaya (siltstone, clay, sandstone); 5 – Yaransk (sandstone, gravelite, siltstone, claystone); 6 – Pizhemskaya (quartz sandstone, claystones, gravelite, conglomerate, conglobreccia); 7 – Malorucheyskaya mr^2 (gray kaoline Ti-bearing sandstone with interlayers of siltstone); 8 – Malorucheyskaya mr^1 (red Ti-bearing sandstone, siltstone, and gravelite in the basal layer); 9 – Lunvozh (quartz-clay shale, siltstone, sandstone); 10 – basalts. Inset map: П – Pizhemskoe and Я – Yaregskoye titanium deposits, Ч – Chetlas Stone Ridge.

выми стекольными песчаниками среднедевонского возраста (D_2pz) и вулканогенно-осадочной толщей позднего девона (D_3fr), включающей и базальтовые покровы мощностью до 10 м, и их туфы.

Геологическое строение толщи и минералогические особенности титановых руд Пижемского месторождения близки Ярегскому месторождению Южного Тимана, но пижемские лейкоксен-квар-

цевые песчаники не содержат нефти, а близповерхностное залегание их позволит отрабатывать месторождение карьером (Макеев и др., 2010; Макеев, Дудар и др., 2012). В тяжёлой фракции из минералов преобладает лейкоксен, содержание его в песчаниках достигает 10–15 мас. %. Промышленное значение имеют также лейкоксенизированный ильменит, «псевдорутил», циркон, рутил, монацит-куларит. Для рудных песчаников характерна наложенная сидеритизация, каолинизация и ожелезнение в виде гематита и гётита. Мощность рудной толщи 10–90 м и определяется палеорельефом. Поисковые работы последних лет с керновым бурением позволили уточнить строение рудных тел, установить их прерывистую ячеистую морфологию. С момента открытия и первой оценки Пижемского месторождения в начале шестидесятых годов XX века генезис его связывался с перемывом мощных кор выветривания, образовавшихся в раннем фанерозое по рифейским сланцам и накоплением вторичных титановых минералов вместе с обломочным кварцем и глинистыми минералами (мусковитом-серицитом, каолинитом) в близко расположенных межгрядовых впадинах и в крупных озёрах со слабым придонным течением (Игнатьев, Бурцев, 1997; Цаплин и др., 1988). Отсутствие руководящих окаменелостей не позволяет определить возраст титаноносной толщи, кроме как досреднедевонский.

Целью нижеприведённых исследований являются характеристика минералов концентратов гравитационных фракций, вопросы возраста месторождения и источники вещества.

Характеристика исходного материала

Материалом настоящего исследования были две технологические пробы титановой руды западного блока Пижемского месторождения, составленные из 170 керновых проб 21 разведочных скважин, пройденных по сероцветным ильменит-лейкоксен-кварцевым песчаникам средней малоручейской толщи (mr^2) и красноцветным лейкоксен-кварцевым ожелезнённым глинистым песчаникам нижней малоручейской толщи (mr^1). Общий вес каждой технологической пробы, собранной из остатков дубликатов 3.0–6.0 кг рядовых проб (1.5 м проходок), составил 250 кг. Среднее содержание TiO_2 этих двух промышленных типов руд по результатам химических рентгенофлуоресцентных анализов рядовых проб около 5.0 мас. %.

Коллективный «псевдорутил»-лейкоксеновый рудный концентрат был получен гравитационным методом (на гравитационном столе) с предварительной классификацией, оттиркой и отмучиванием (удалением фракции менее 0.04 мм). Выход продуктивного класса с размерностью 1.00–0.04 мм составил 82.7 мас. %, в том числе класса –0.5 + 0.04 мм — 74.2 мас. %, в который концентрируются почти все рудные минералы. После механических стадий оттирки и отмучивания рудные пески двух технологических типов титановых руд становятся близкими по технологическим свойствам и минеральному составу и отличаются только соотношением главных рудных фаз – лейкоксена и «псевдорутила». В сероцветах это соотношение ≈ 2.2 : 1, а в красноцветах ≈ 4 : 1. В шламы уходит большинство глинистых минералов (серицит, каолинит, хлорит), а также большая часть гематита и апатита. Потери рудных минералов составляют 20–25 %. В крупном классе накапливается сидерит, а также остаётся некоторое количество титансодержащих фаз в виде сростков. В продуктивном классе накапливаются полезные рудные титановые минералы, монацит (куларит) и циркон.

Методика исследований

Коллективный титановый концентрат технологической пробы сероцветных песчаников (mr^2) был разделён по плотности в растворах тяжёлых жидкостей на классы с шагом в 0.2 г/см^3 (2.7–4.3 г/см^3). Получено 9 гравитационных фракций, разделённых ручным магнитом на магнитную, электромагнитную и немагнитную фракции. Из этой разделённой пробы было отобрано 30 относительно однородных зёрен разных минералов и приготовлены полированные препараты для микрозондовых исследований. Исследования зёрен минералов проведены на микрозонде Jeol JSM-6480LV с размером ребра квадратной ячейки широкого зонда 140 и 280 мкм в зависимости от величины зёрен минералов (670 определений, аналитик В.О. Япаскурт, МГУ). Форма и внутреннее строение зёрен рудных минералов (пористость, наличие включений) исследованы в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE; более 120 снимков). Эти исследования впервые позволили количественно (методом нормативных расчётов) оценить содержание в зёрнах рудных минералов микровключения кварца, каолинита, гидромусковита, пирита и др. По недостатку суммы анализа оценена пористость иссле-

дуемых зёрен. Спектроскопические (ЯГР, аналитик В.П. Лютоев) и рентгеноструктурные исследования проведены в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (Макеев, Лютоев, 2015). Датирование циркона U-Pb методом проводилось в ЦИИ ВСЕГЕИ на ионном микрозонде высокого разрешения SHRIMP-II по стандартным методикам.

Минеральный и химический состав рудных концентратов

В процессе исследований диагностировано более 30 минеральных фаз: ильменит, пикроильменит, рутил, Fe-рутил, «псевдорутил», лейкоксен, ильменорутил, Ta-содержащий ильменорутил, монацит, куларит, ксенотим, флоренсит, циркон, гематит, хромит, алюмохромит, хромпикотит, герцинит, кварц, турмалин (шерл, дравит), амфиболы, гранат, гидратированная слюда ФАСИ (флогопит-аннит-сидерофиллит-истонит), гидромусковит (серицит), каолинит, хлорит (шамозит), сидерит, пирит, силицид железа. Типичная структура титановой руды показана на рис. 2.

Главные рудные титановые минеральные фазы – лейкоксен и «псевдорутил» – не имеют строгой сортировки и ориентировки в пространстве, как и остроугольные зёрна кластогенного кварца. Цементом песчаника являются гематит, сидерит, гидромусковит, каолинит и гидроксиды железа. Сидерит нередко образует тонкие прожилки толщиной

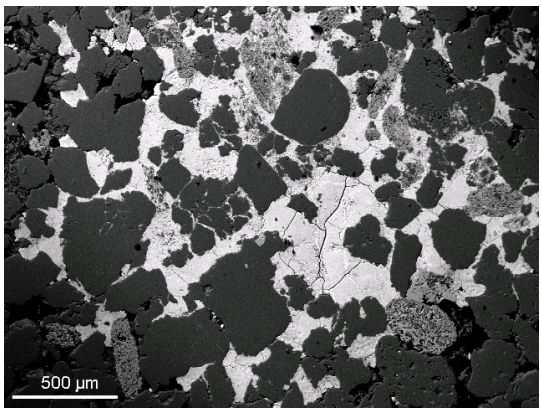

Рис. 2. Структура титановой руды красноцветного кварцевого песчаника Пижемского месторождения.

Тёмно-серое – неокатанный обломочный кварц, *белое* – гематитовый цемент, *чёрное* – каолинит-серицитовый цемент, *светло-серое* – лейкоксен. Здесь и далее BSE-фото.

Fig. 2. Texture of titanium ore of red sandstone of the Pizhemskoe deposit. *Dark gray* – angular detrital quartz, *white* – hematite cement, *black* – kaolinite-sericite cement, *light gray* – leucoxene. Here and hereafter in figures, BSE-photo.

до 1–2 мм. Среди акцессорных минералов песчаников ранее были диагностированы ильменит, рутил, циркон, монацит, ксенотим, ильменорутил, колумбит, апатит, турмалин, амфиболы, муассанит SiC, гематит, пирит, арсенопирит, силицид железа и некоторые другие очень редкие фазы (Макеев, Дудар и др., 2012).

Химический состав исходных проб песчаника и гранулометрических фракций, а также их нормативный минеральный состав приведены в таблице 1.

Наиболее изучены титановые минералы (72 % анализов), затем редкие и редкоземельные – 15 %, хромшпинели – 7.7 %, силикаты – 3.9 %.

Определены пределы распространения диагностированных минералов по гравитационным классам (г/см^3): так, лейкоксен (с микровключениями кварца и различной пористостью) встречен во фракциях 2.7–3.7, «псевдорутил» – 2.7–3.9, герцинит – 3.7–4.1, рутил – 3.5–4.3, ильменит, циркон и монацит – 3.7–> 4.3; хромит – 3.9–>.3 г /см^3. Эти данные важны для технологов в процессах гравитационного обогащения руд и получения более чистых минеральных фракций.

Собранные геологические, геохимические (Макеев, 2014) и минералогические доказательства позволяют трактовать генезис Пижемского титанового месторождения как вулканогенный (фреатомагматический) по лампрофирам с последующим длительным (сотни млн лет) метаморфическим преобразованием рудных толщ. Преобразование титановых минералов проявлено в изменении их химического состава (в наличии эдуктов и продуктов реакций) и образует единый генетический ряд последовательных минеральных форм. Первичным минералом был ильменит с содержанием, мас. %: TiO_2 51.58; FeO 45.0; MnO 0.63; MgO 1.86; V_2O_5 0.43, – сохранившийся в небольших количествах в песчаниках в виде реликтовых слабоокатанных обломков зёрен. Ильменит в значительной степени изменён с образованием агрегата высокожелезистого рутила состава, мас. %: TiO_2 53.72; FeO 29.33; MnO 1.53; MgO 0.56; V_2O_5 0.61, – и пористостью 12.38 % отн. Изменения такого Fe-рутила проявлены в частичном новообразовании рутила, а поровое пространство заполнялось кварцем и агрегатом глинистых минералов (гидромусковитом и каолинитом); эту промежуточную фазу мы условно называем «псевдорутилом». Конечным продуктом преобразований был агрегат безжелезистого лейкоксена с пористостью 10.59 %, в ассоциации

Таблица 1

Химический состав технологических проб (мас. %) и их нормативный минеральный состав

Table 1

Chemical composition of technological samples (wt. %) and their normative mineral composition

Фракции	Исходные пески		> 1.0 мм		–1.0 + 0.04 мм		< 0.04 мм	
Классы			Крупный		Продуктивный		Шламовый	
Пробы	Т-1	Т-2	Т-1	Т-2	Т-1	Т-2	Т-1	Т-2
SiO_2	88.35	73.21	76.97	70.62	93.45	85.43	61.37	59.42
TiO_2	2.80	3.56	3.75	3.34	2.73	5.05	2.99	1.81
Al_2O_3	3.84	9.98	5.24	6.10	0.96	3.30	20.12	19.87
Fe_2O_3	1.26	3.19	0.76	4.12	0.98	0.75	2.98	5.80
FeO	0.96	2.55	6.03	6.61	0.70	2.02	1.43	1.47
MnO	0.05	0.10	0.17	0.27	0.05	0.10	0.03	0.03
MgO	0.09	0.39	0.17	0.41	0.005	0.15	0.51	0.69
CaO	0.25	0.26	0.26	0.16	0.12	0.21	0.36	0.36
Na_2O	0.10	0.12	0.10	0.11	0.09	0.11	0.17	0.14
K_2O	0.74	2.47	0.76	1.59	0.31	1.06	3.20	4.58
P_2O_5	0.07	0.12	0.10	0.13	0.05	0.09	0.20	0.15
H_2O^+	0.84	1.65	0.55	0.09	0.08	0.23	5.29	4.06
H_2O^-	0.05	0.08	0.01	0.02	0.01	0.01	0.26	0.20
SO_3	0.07	0.18	0.23	0.33	0.03	0.19	0.30	0.10
CO_2	0.60	1.34	3.66	4.35	0.43	0.98	0.92	0.51
Сумма	100.07	99.20	98.76	98.25	100.00	99.68	100.13	99.19
П.п.п.	1.44	2.99	4.21	4.44	0.51	1.21	6.21	4.57
Нормативный минеральный состав, % отн.								
Классы	Исходные пески		Крупный		Продуктивный		Шламовый	
Минералы	Т-1	Т-2	Т-1	Т-2	Т-1	Т-2	Т-1	Т-2
Кварц	81.46	59.60	68.53	60.68	90.07	77.17	35.72	35.50
Каолинит	3.45	4.18	6.68	1.57	0.00	0.00	23.60	11.26
Серицит	6.27	20.91	6.44	13.46	2.42	8.98	27.10	38.78
Хлорит	0.35	1.50	0.65	1.58	0.02	0.58	1.96	2.65
Сидерит	1.58	3.53	9.64	11.45	1.13	2.58	2.42	1.34
Гематит	1.31	2.97	0.66	3.88	0.98	0.66	2.69	5.40
«Псевдорутил»	1.50	1.28	1.17	1.36	1.46	1.80	1.64	2.50
Лейкоксен	3.17	5.11	5.40	5.43	3.26	7.19	3.70	1.50
Монацит	0.08	0.12	0.06	0.04	0.13	0.24	0.08	0.09
Апатит	0.64	0.67	0.67	0.41	0.31	0.54	0.93	0.93
Циркон	0.102	0.075	0.02	0.01	0.25	0.21	0.07	0.05
Пирит	0.03	0.07	0.09	0.13	0.01	0.08	0.12	0.04
Сумма	99.94	100.01	100.01	100.00	100.02	100.03	100.03	100.04

Примечание. Т-1, Т-2 – технологические пробы: Т-1 – из сероцветных песчаников (mr^2), Т-2 – из красноцветных песчаников (mr^1). Аналитик А.И. Якушев (ИГЕМ РАН).

Note. Т-1, Т-2 – technological samples: Т-1 – gray sandstones (mr^2), Т-2 – red sandstone (mr^1). Analyst A.I. Yakushev (IGEM RAS).

с кварцем (24.07 % отн.), гидромусковитом (5.05 %) и каолинитом (1.87 %). Как правило, в более плотных разностях меньше включений кварца и глинистых минералов, а также и меньше пористость. В лейкоксене в виде включений обнаружены реликты ильменита, кварц, слюда, монацит, флоренсит, ксенотим, циркон, ильменорутил, колумбит. По рутил-циркониевому геотермометру (Watson et al., 2006) определена температура этого процесса 510 ± 35 °С. Трудно представить, чтобы эти условия были характерны для осадочного процесса или кор выветривания. Наиболее вероятно, что субстратом и источником титана для образования Пижемского месторождения могли служить лампрофиры, так как типоморфные особенности рудных и индикаторных минералов во многом близки данным о породообразующих и акцессорных минералах лапрофиров (Брянчанинова, Макеев, 2009), широко распространённых в виде крупных дайковых полей спессартитов и керсантитов в соседней гряде Четласский Камень и предполагаемых на некоторой глубине непосредственно под Пижемским месторождением в Вольско-Вымской гряде. Полученные данные о минералах Пижемского месторождения приведены ниже.

Ильменит $Fe^{2+}TiO_3$ – это первичный реликтовый минерал месторождения. Он накапливается в четырёх гравитационных фракциях от 3.7 до >4.3 г/см^3. Ильменит чёрного цвета, слабомагнитный, иногда трещиноватый, без заметных пор, с размером слабо окатанных зёрен и их обломков 0.3–0.7 мм (рис. 3а, б).

Состав концентрата ильменита (табл. 2) отличается повышенной марганцовистостью и магнезиальностью и малыми примесями сопутствующих минералов. Широким зондом в ильмените определено 0.63 мас. % MnO (по 61 зерну), а точечный анализ даёт значения от 0.2 до 7.3 мас. % MnO и повышенные содержания MgO и V_2O_5 (1.85 и 0.43 мас. %, соответственно), что позволяет определить коренной источник ильменита. Среди коренных пород Среднего Тимана такой ильменит встречается только в лампрофирах Четласского Камня. На диаграмме состава проанализированных зёрен титановых минералов (рис. 4) чётко прослеживаются тренды эволюции и преобразования состава титановых минералов – вынос железа и накопление диоксида титана и кремнезёма. Доля ильменита в массе титановых минералов ~ 3–5 %, и впервые в Пижемском месторождении обнаружены 3 зерна лейкоксенизированного пикроильменита (типичного для кимберлитов и характерного спутника алмаза).

Железистый рутил (Fe-рутил) образуется первым при процессах преобразования первичного ильменита (см. рис. 3в, г). Fe-рутил обнаружен в гравитационных фракциях 3.7–4.1 г/см^3, зёрна его величиной 0.3–0.7 мм, чёрного цвета, магнитные. В составе его агрегата заметно уменьшается содержание железа (табл. 3; см. рис. 4), оно окислено до трехвалентной формы (в среднем 29.33 мас. % Fe_2O_3), а также сохраняются примеси Mn и V, наследуемые от ильменита, и ряд других примесей. Доля Fe-рутила в основной массе титановых минералов ~ 2–5 %. В агрегатах Fe-рутила около 9–19 % открытых (незаполненных) пор. Между зёрнами железистого рутила остаётся неизменённый ильменит (см. рис. 3г). Судя по анализам в таблице 3, агрегаты железистого рутила также представляют собой минеральные смеси.

«Псевдорутил» в рудных концентратах из сероцветных песчаников (mr^2) составляет ~30 мас. %, а из красноцветов (mr^1) – меньше (~20 мас. %). В составе «псевдорутила» в среднем содержится до 18.6 мас. % Fe_2O_3, а образовавшиеся поры заполннены кварцем, серицитом и каолинитом. Структура «псевдорутила» рутиловая (по рентгенограмме, т.е. тетрагональной сингонии), а состав пересчитывается на формулу $Fe^{3+}{}_2Ti_5O_{13}$ (Макеев, Лютоев, 2015), отличаясь от собственно псевдорутила $Fe^{3+}{}_2Ti_3O_9$ (тригональной сингонии). Плотность агрегата зёрен «псевдорутила» от 2.8 до 3.9 г/см^3 в зависимости от состава (табл. 4; см. рис. 4). Зёрна его чёрного цвета с металлическим блеском, овальной формы, величиной 100–500 мкм (с преобладанием 300 мкм), сильно магнитные. В отражённых электронах видны первичная конвертовидная форма зерна ильменита (рис. 5) и постепенные переходы «псевдорутила» в рутил и лейкоксен, высокая пористость зёрен, заполненных включениями кварца и агрегатом слюдистых минералов. Химический состав «псевдорутила» наследует высокую марганцовистость и ванадиеносность первичных ильменита и Fe-рутила (см. табл. 4) и не рассчитывается на формулу псевдорутила, т. е. является смесью минералов.

Рутил как один из высокоплотных минералов (с плотностью 4–5 г/см^3) распределился в наиболее тяжёлые классы фракций (от 3.5 до 4.3 г/см^3). Величина его удлинённых зёрен и обломков кристаллов от 50 до 400 мкм, преобладают мелкие зёрна до 100 мкм (рис. 6). Состав рутила типичен (табл. 5), он на-

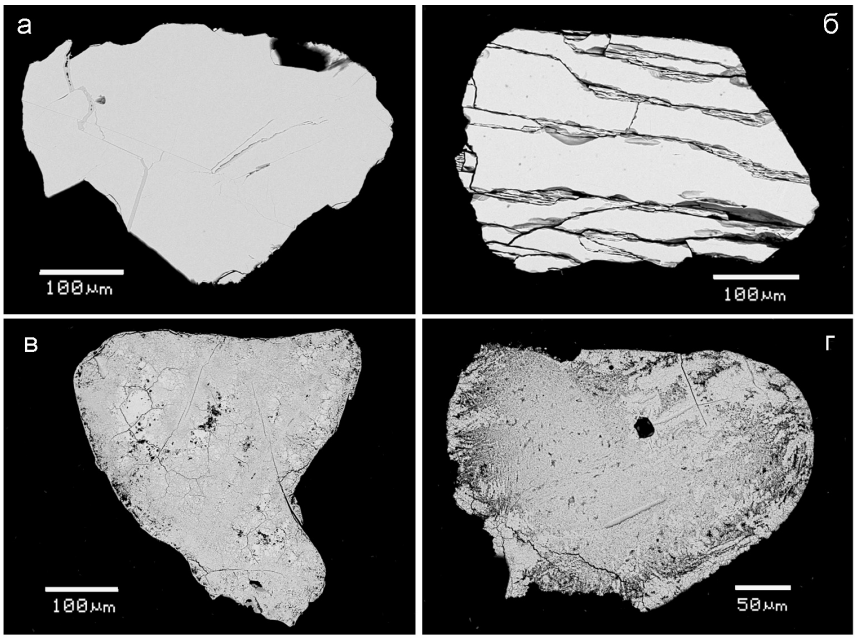

Рис. 3. Зёрна неизменённого ильменита (а, б) и железистого рутила (в, г) – первого продукта изменения ильменита – в концентрате титановых руд Пижемского месторождения (проба Т-1, сероцветные песчаники mr^2).

Fig. 3. Grains of unaltered ilmenite (а, б) and glandular rutile (в, г) – the first product of alteration of ilmenite – in Ti ore concentrate from the Pizhemskoe deposit (sample T-1, gray sandstone mr^2).

Таблица 2

Средний химический состав концентрата ильменита разных фракций (x ± δ, мас. %)

Table 2

Average chemical composition of ilmenite concentrate of different fractions (x ± δ, wt. %)

№ п/п	1		2		3		4		5		6		7	8*
Фракция 0.5–0.1 мм	6-4 (n = 8)		6-5 (n = 8)		7-2 (n = 22)		7-3 (n = 6)		8-2 (n = 3)		9-1 (n = 14)		(n = 61)	6-5 (n = 3)*
	x	δ	x	δ	x	δ	x	δ	x	δ	x	δ	x	x
SiO_2	0.65	1.74	0.08	0.12	0.05	0.05	0.13	0.07	1.64	2.82	0.04	0.05	0.219	8.05
Al_2O_3	0.24	0.31	0.16	0.29	0.10	0.07	0.10	0.10	0.89	1.45	0.06	0.05	0.157	3.74
TiO_2	51.47	1.45	51.88	2.18	52.01	0.92	51.63	0.71	47.98	5.34	51.56	1.12	51.58	39.23
FeO	44.37	1.95	45.18	3.76	44.80	2.15	45.13	1.52	46.02	1.42	45.31	2.32	45.00	38.22
MnO	0.57	0.15	0.81	0.51	0.63	0.12	0.59	0.05	0.67	0.08	0.58	0.11	0.633	0.85
CaO	0.51	1.34	0.03	0.04	0.01	0.03	0.03	0.03	0.19	0.30	0.02	0.03	0.093	0.08
MgO	1.54	0.77	1.25	1.41	2.04	1.41	1.98	1.34	1.88	1.12	2.01	1.43	1.852	8.75
K_2O	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.019	0.28
Na_2O	0.20	0.17	0.05	0.07	0.06	0.09	0.09	0.07	0.13	0.07	0.13	0.09	0.099	0.12
P_2O_5	0.06	0.05	0.07	0.08	0.04	0.06	0.02	0.03	0.05	0.05	0.05	0.07	0.046	0.11
S	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.016	0.04
Nb_2O_5	0.08	0.12	0.09	0.07	0.05	0.08	0.07	0.08	0.05	0.08	0.06	0.10	0.064	0.10
V_2O_5	0.44	0.15	0.51	0.31	0.39	0.22	0.42	0.14	0.55	0.17	0.44	0.10	0.434	0.41
Cr_2O_3	0.02	0.03	0.10	0.07	0.04	0.06	0.04	0.02	0.01	0.02	0.06	0.08	0.049	0.00
ZnO	0.04	0.03	0.03	0.06	0.06	0.08	0.04	0.06	0.07	0.07	0.01	0.03	0.043	0.17
Сумма	100.2		100.3		100.3		100.3		100.0		100.2		100.28	100.1
Плотность, г/см^3	3.7–3.9		3.7–3.9		3.9–4.1		3.9–4.1		4.1–4.3		> 4.3			3.7–3.9

Примечание. *) Проба содержит три зерна лейкоксенизированного пикроильменита, типичного для алмазоносных кимберлитовых трубок. H_2O не определялась.

Note. *) the sample contains three grains of leucoxenized picroilmenite typical of diamondiferous kimberlite pipes. H_2O was not determined.

Таблица 3

Средний химический состав концентрата Fe-рутила (x ± δ, мас. %) разных фракций в интервале плотности от 3.7 до 4.1 г/см³

Table 3

Average chemical composition of Fe-rutile concentrate (x ± δ, wt. %) of various fractions in the density range from 3.7 to 4.1 g/cm³

Фракция	6-5 (n = 3)		7-1 (n = 15)		7-2 (n = 7)		7-4 (n = 18)		N = 43
	x	δ	x	δ	x	δ	x	δ	x
SiO_2	0.32	0.21	0.12	0.09	0.15	0.07	2.62	2.57	1.18
Al_2O_3	0.40	0.11	0.22	0.06	0.24	0.05	1.00	1.08	0.56
TiO_2	55.66	5.36	53.31	1.69	52.85	3.59	54.07	3.16	53.72
Fe_2O_3	23.59	6.98	31.36	1.61	28.86	2.54	28.77	1.53	29.33
MnO	1.40	0.15	1.71	0.68	1.46	0.65	1.43	0.87	1.53
CaO	0.05	0.03	0.03	0.04	0.07	0.06	0.04	0.04	0.04
MgO	0.04	0.02	0.35	0.41	0.23	0.20	0.06	0.06	0.19
K_2O	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.15	0.23	0.07
Na_2O	0.06	0.09	0.10	0.11	0.08	0.09	0.10	0.11	0.10
P_2O_5	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.04	0.05	0.05
S	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03
Nb_2O_5	0.08	0.09	0.06	0.07	0.06	0.10	0.05	0.10	0.06
V_2O_5	0.74	0.30	0.71	0.18	0.73	0.17	0.46	0.20	0.61
Cr_2O_3	0.06	0.05	0.05	0.08	0.03	0.04	0.02	0.03	0.04
ZnO	0.07	0.06	0.09	0.12	0.05	0.08	0.16	0.14	0.11
Сумма	82.45	1.51	88.23	1.55	84.93	4.69	89.00	3.80	87.62
Пор.	17.55	1.51	11.77	1.55	15.07	4.69	11.00	3.80	12.39
Mus	0.30	0.14	0.13	0.20	0.13	0.21	1.30	1.98	0.63
Kal	0.70	0.35	0.44	0.19	0.59	0.17	1.16	1.13	0.78
Qw	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.08	1.62	2.04	0.70
Py	0.04	0.05	0.08	0.06	0.08	0.07	0.04	0.04	0.06
Сумма	18.58		12.42		15.98		15.11		14.56

Примечание. Здесь и в табл. 4: Пор. – пористость, Mus – слюда, Kal – каолинит, Qw – кварц, Py – пирит. H_2O не определялась.

Note. Here and hereafter in Table 4: Пор. – porosity, Mus – muscovite, Kal – kaolinite, Qw – quartz, Py – pyrite. H_2O was not determined.

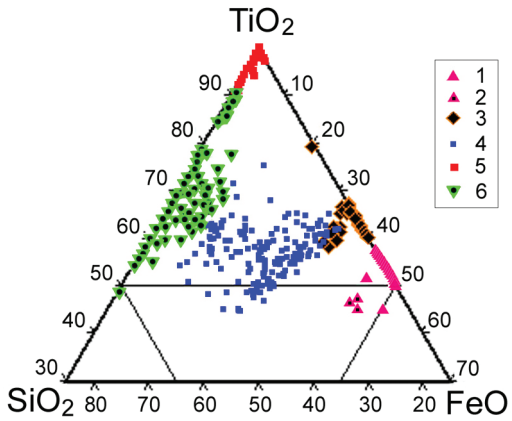

Рис. 4. Состав титановых минералов из концентратов руды Пижемского месторождения.

1 – ильменит; 2 – пикроильменит; 3 – Fe-рутил, 4 – «псевдорутил»; 5 – рутил; 6 – лейкоксен.

Fig. 4. Composition of Ti minerals from ore concentrates of the Pizhemskoe deposits.

1 – ilmenite; 2 – picroilmenite; 3 – Fe-rutile, 4 – «pseudorutile»; 5 – rutile; 6 – leucoxene.

Таблица 4

Средний химический состав «псевдорутила» (x ± δ, мас. %) разных фракций в интервале плотности от 2.7 до 3.9 г/см³

Table 4

Average chemical composition of «pseudorutile» (x ± δ, wt. %) from various fractions in the density range from 2.7 to 3.9 g/cm³

Фракция	1-1 (n = 14)		2-1 (n = 7)		3-1 (n = 17)		4-1 (n = 23)		4-2 (n = 30)		5-1 (n = 30)		6-1 (n = 16)		6-2 (n = 17)		N=154
SiO_2	18.24	6.89	20.97	6.67	21.34	4.22	19.68	5.00	19.33	4.29	14.86	3.73	8.99	3.54	9.15	3.53	16.51
Al_2O_3	2.77	1.40	3.45	1.29	2.18	0.58	3.15	0.92	2.95	1.45	2.70	0.95	2.10	1.17	2.33	1.31	2.70
TiO_2	46.76	3.21	47.00	4.60	47.18	4.02	43.02	3.52	49.55	5.34	46.94	4.02	48.67	2.58	48.83	2.36	47.26
Fe_2O_3	16.81	6.11	12.89	5.53	11.27	2.85	19.77	3.71	14.98	5.01	21.14	2.62	24.51	2.02	24.25	2.09	18.57
MnO	1.12	0.64	0.86	0.58	0.85	0.44	1.77	0.69	1.28	0.77	1.50	0.52	2.17	0.68	2.17	0.77	1.51
CaO	0.06	0.04	0.10	0.03	0.13	0.05	0.04	0.03	0.06	0.05	0.09	0.07	0.05	0.03	0.08	0.04	0.07
MgO	0.14	0.08	0.14	0.09	0.11	0.05	0.18	0.12	0.18	0.15	0.13	0.11	0.10	0.08	0.11	0.07	0.14
K_2O	0.48	0.21	0.76	0.32	0.41	0.13	0.58	0.21	0.55	0.32	0.48	0.18	0.35	0.21	0.37	0.27	0.49
Na_2O	0.04	0.06	0.04	0.04	0.07	0.05	0.12	0.11	0.13	0.10	0.15	0.14	0.08	0.08	0.06	0.09	0.10
P_2O_5	0.18	0.22	0.09	0.10	0.17	0.12	0.12	0.11	0.16	0.12	0.16	0.13	0.11	0.14	0.19	0.13	0.15
S	0.03	0.03	0.04	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.04
Nb_2O_5	0.11	0.10	0.04	0.11	0.12	0.11	0.09	0.10	0.09	0.11	0.09	0.09	0.07	0.10	0.08	0.10	0.09
V_2O_5	0.39	0.15	0.36	0.14	0.37	0.14	0.32	0.13	0.34	0.17	0.31	0.16	0.31	0.19	0.41	0.14	0.34
Cr_2O_3	0.03	0.05	0.04	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.02	0.04	0.02	0.04	0.03
ZnO	0.11	0.10	0.12	0.13	0.00		0.14	0.13	0.07	0.09	0.14	0.13	0.17	0.15	0.14	0.15	0.11
Сумма	87.35	2.58	86.90	5.01	84.26	5.92	89.04	3.16	89.75	2.86	88.76	3.37	87.75	2.96	88.23	2.86	88.12
Пор.	12.65	2.58	13.10	5.01	15.74	5.92	10.96	3.16	10.26	2.85	11.24	3.37	12.25	2.96	11.77	2.86	11.88
Mus	4.08	1.75	6.42	2.68	3.47	1.14	4.89	1.81	4.64	2.73	4.06	1.56	2.99	1.75	3.14	2.31	4.13
Kal	2.63	2.35	1.83	1.73	1.79	1.05	2.71	1.57	2.49	1.79	2.45	1.49	2.12	1.43	2.51	1.65	2.38
Qw	15.45	6.73	17.65	6.46	19.17	4.20	16.57	4.02	16.39	4.51	12.16	3.66	6.85	3.44	6.77	4.06	13.81
Py	0.06	0.06	0.08	0.11	0.09	0.08	0.10	0.08	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.07	0.10	0.08
Сумма	22.21		25.97		24.52		24.26		23.62		18.75		12.03		12.49		20.41

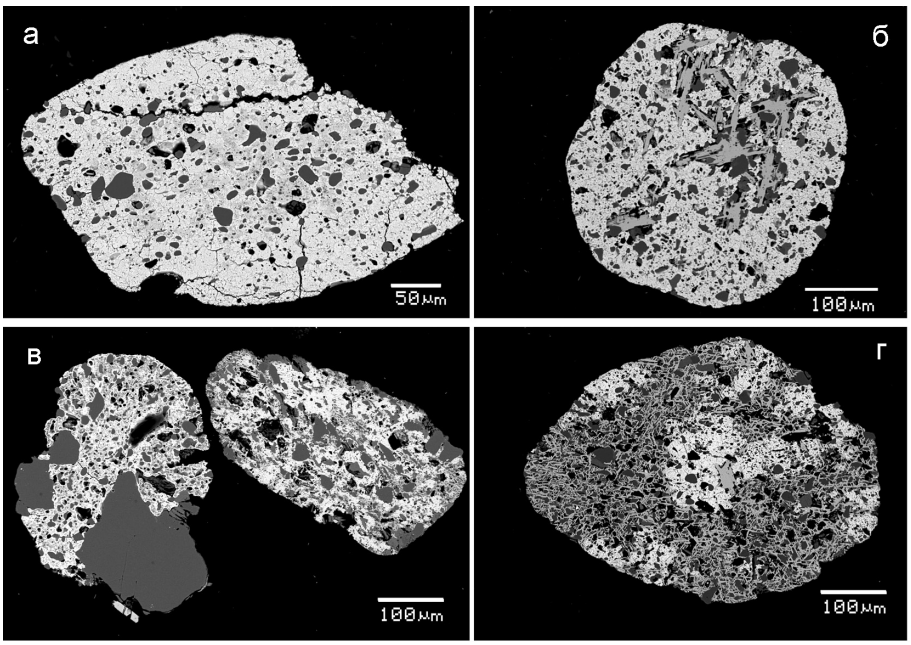

Рис. 5. Пористые псевдоморфозы «псевдорутила».

а – по ильмениту; б – поры в «псевдорутиле» заполнены кварцем; в – кристаллы рутила (70–80 мкм) в центре агрегата «псевдорутила»; г – сагенитовый агрегат рутила с включениями кварца; в центре зерна лейкоксена остаются реликты «псевдорутила».

Fig. 5. Porous pseudomorphs of «pseudorutile».

а – after ilmenite; б – pores in «pseudorutile» filled with quartz; в – rutile crystals (70–80 μm) in the center of «pseudorutile» aggregate; г – sagenite aggregate of rutile with inclusions of quartz and relic «pseudorutile» in the center of leucoxene.

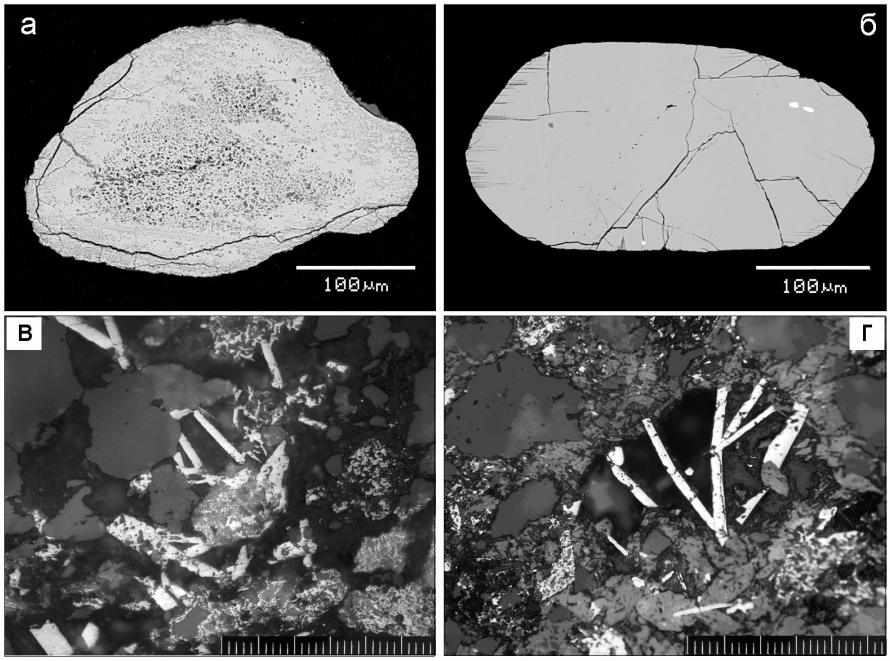

Рис. 6. Зёрна рутила пористого (а), монокристаллического (б) и игольчатого новообразованного (в, г).

а–б – BSE, в–г – отражённый свет.

Fig. 6. Grains of porous (а), monocrystal (б) and newly formed acicular (в, г) rutile.

а–б – BSE-photo, в–г – reflected light.

Таблица 5

Средний состав концентрата рутила (x ± δ, мас. %) в интервале плотности от 3.5 до 4.3 г/см³

Table 5

Average composition of rutile concentrate (x ± δ, wt. %) in the density range from 3.5 to 4.3 g/cm³

Фракция	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	FeO	MnO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	S	Nb_2O_5	V_2O_3	Cr_2O_3	ZnO	Сумма	Пор.	Mus	Kal	Qw	Py	Сумма
5-2	3.44	0.82	85.14	0.67	0.04	0.06	0.05	0.17	0.06	0.07	0.03	0.20	0.50	0.02	0.00	91.14	8.86	1.45	2.08	3.44	0.05	15.89
(n = 12)	2.60	0.67	5.21	0.32	0.05	0.04	0.07	0.18	0.07	0.06	0.03	0.09	0.22	0.05		3.22	3.22	1.56	1.69	2.60	0.06	
6-4	1.27	0.75	89.13	0.77	0.08	0.06	0.06	0.16	0.05	0.08	0.01	0.19	0.64	0.03	0.05	93.32	6.68	1.37	1.91	1.27	0.01	11.24
(n = 3)	1.31	0.67	2.93	0.30	0.05	0.04	0.05	0.25	0.05	0.07	0.01	0.16	0.17	0.04	0.08	2.15	2.15	2.08	1.69	1.31	0.02	
8-1	0.19	0.09	96.21	0.56	0.04	0.04	0.03	0.00	0.08	0.07	0.01	0.36	0.83	0.12	0.05	98.67	1.33	0.04	0.20	0.13	0.02	1.71
(n = 16)	0.42	0.07	1.10	0.27	0.05	0.13	0.04	0.02	0.09	0.05	0.02	0.40	0.18	0.23	0.07	0.89	0.89	0.13	0.18	0.38	0.03	
8-2	0.06	0.07	96.62	0.57	0.03	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.14	0.97	0.01	0.05	98.65	1.35	0.14	0.13	0.03	0.03	1.67
(n = 11)	0.08	0.07	0.94	0.57	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.19	0.33	0.00	0.09	0.33	0.33	0.23	0.18	0.07	0.04	
Среднее	1.16	0.34	92.65	0.61	0.04	0.04	0.03	0.07	0.06	0.06	0.02	0.25	0.76	0.06	0.04	96.13	3.87	0.56	0.84	1.13	0.03	6.43
(N = 42)																						

Примечание. H_2O не определялась.
Note. H_2O was not determined.

следует характерные типоморфные примеси V, Nb, Fe от первичной матрицы ильменита и «псевдорутила». Цвет рутила – тёмно-желтый, коричневый, красный, а зёрна с большей примесью железа – тёмные до чёрных. Выход собственно рутила от основной массы титановых минералов не превышает 1–3 %, он концентрируется вместе с немагнитными лейкоксеном и цирконом. Во фракциях с меньшей плотностью накапливаются зёрна рутила с повышенной пористостью и большим содержанием включений кварца.

Лейкоксен – наиболее распространённый в Пижемском месторождении агрегат титановых и силикатных минералов; содержание его в концентратах составляет ~65–75 мас. %, в сероцветах минимальное, а в красноцветах – максимальное. Агрегат лейкоксена пористый, с сагенитовой решёткой рутила до 10–30 мкм и включениями кварца, каолинита и серицита. Агрегаты лейкоксена немагнитные, жёлтого или серого цвета и имеют форму уплощённых эллипсоидов величиной 0.05–0.70 мм (рис. 7). Лейкоксен преобладает во фракциях гравитационных классов 2.7–3.7 г/см³. Состав его весьма неоднородный (табл. 6). В более плотных разностях рутила больше, уменьшаются пористость и содержания других минералов. Высокая пористость «псевдорутила» и лейкоксена – это их полезное свойство, так как после обескремнивания этих агрегатов получается пористый рутил, который можно использовать для производства титан-литиевых аккумуляторов. Пористый рутил с наименьшими затратами можно получить, классифицируя лейкоксен по его плотности.

Результаты спектроскопических исследований концентратов, выделенных из технологических проб руд, подтверждают их многофазный состав и отражают сложности выявления количественных соотношений минералов. Рудные концентраты содержат до 5-ти титановых и 6-ти железосодержащих фаз. В магнитную фракцию концентратов продуктивных классов попадают ильменит, Fe-рутил, «псевдорутил» и сидерит. Результаты электронно-микроскопических и микрозондовых анализов свидетельствуют о многочисленных включениях кварца, слюды, каолинита, пирита и некоторых других минералов внутри агрегатов «псевдорутила» и лейкоксена (см. рис. 7).

Нами использован комбинированный метод оценки соотношения минералов. Часть минералов в таблице 7 (5 последних анализов) рассчитывалась нормативным способом по результатам химическо-

Таблица 6
Table 6

Средний состав агрегата лейкоксена (x ± δ, мас. %) в интервале плотности от 2.7 до 3.7 г/см³
Average composition of leucoxene aggregate (x ± δ, wt. %) in the density range from 2.7 to 3.7 g/cm³

Фракция	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	FeO	MnO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	S	Nb_2O_5	V_2O_5	Cr_2O_3	ZnO	Сумма	Пор.	Mus	Kal	Qw	Py	Сумма
1-2	32.60	3.26	52.80	0.70	0.03	0.09	0.17	0.72	0.09	0.10	0.03	0.10	0.36	0.02	0.04	91.10	8.90	6.10	1.70	29.47	0.06	46.22
n = 26	4.77	1.27	3.95	0.82	0.05	0.05	0.11	0.34	0.09	0.11	0.03	0.15	0.18	0.04	0.06	3.36	3.36	2.84	1.44	4.90	0.05	
1-3	29.53	2.22	55.45	1.11	0.07	0.07	0.11	0.48	0.05	0.14	0.04	0.12	0.44	0.02	0.08	89.93	10.07	4.06	1.28	27.38	0.08	42.87
n = 19	5.59	0.91	3.57	1.95	0.13	0.05	0.10	0.30	0.08	0.08	0.04	0.11	0.19	0.03	0.09	2.88	2.88	2.54	1.08	5.67	0.07	
2-1	32.43	3.13	51.93	1.38	0.08	0.09	0.10	0.56	0.09	0.16	0.06	0.09	0.43	0.00	0.06	90.60	9.40	4.78	2.77	29.30	0.12	46.38
n = 18	5.32	1.35	6.94	1.86	0.13	0.05	0.08	0.27	0.08	0.13	0.05	0.13	0.19	0.01	0.07	3.23	3.23	2.25	2.31	5.51	0.10	
2-3	27.94	2.65	55.75	1.31	0.10	0.10	0.12	0.53	0.09	0.12	0.03	0.07	0.47	0.01	0.06	89.35	10.65	4.51	1.87	25.34	0.06	42.42
n = 27	7.25	1.32	4.78	1.66	0.15	0.06	0.07	0.32	0.09	0.09	0.03	0.06	0.14	0.03	0.06	4.49	4.49	2.68	1.11	7.03	0.05	
3-1	25.11	2.39	55.72	2.74	0.21	0.08	0.10	0.45	0.11	0.16	0.06	0.08	0.41	0.02	0.00	87.47	12.53	3.83	1.92	22.74	0.11	41.14
n = 23	6.51	0.75	5.24	2.33	0.25	0.06	0.06	0.18	0.08	0.27	0.08	0.12	0.16	0.04		6.66	6.66	1.54	1.77	6.64	0.15	
3-2	24.16	2.69	55.32	1.67	0.12	0.12	0.14	0.55	0.11	0.10	0.04	0.00	0.40	0.04	0.00	85.46	14.54	4.65	1.80	21.54	0.07	42.60
n = 21	4.92	0.65	5.54	2.00	0.21	0.05	0.09	0.20	0.11	0.08	0.05		0.22	0.07		6.73	6.73	1.71	0.91	4.76	0.10	
4-3	22.13	3.57	60.48	2.62	0.19	0.07	0.15	0.76	0.08	0.13	0.05	0.12	0.45	0.02	0.08	90.91	9.09	6.40	2.17	18.66	0.10	36.42
n =2 8	5.34	1.26	6.72	2.49	0.26	0.05	0.09	0.27	0.08	0.17	0.06	0.13	0.15	0.02	0.09	2.57	2.57	2.31	1.85	4.97	0.11	
5-2	18.19	2.89	66.75	0.60	0.05	0.06	0.17	0.70	0.05	0.16	0.04	0.19	0.53	0.04	0.00	90.50	9.50	5.92	1.15	15.38	0.08	32.02
n = 11	11.06	1.96	10.76	0.37	0.06	0.03	0.13	0.56	0.04	0.19	0.02	0.17	0.21	0.07		4.06	4.06	4.77	1.15	11.98	0.05	
Среднее (N = 42)	26.89	2.879	56.28	1.605	0.113	0.084	0.132	0.596	0.089	0.129	0.04	0.09	0.43	0.02	0.04	89.41	10.59	5.05	1.87	24.07	0.08	41.67

Примечание. H_2O не определялась.
Note. H_2O was not determined.

Рис. 7. Агрегаты лейкоксена.

а – кварц-рутиловый агрегат (лейкоксен); б – типичная форма зёрен лейкоксена; в – обломок агрегата лейкоксена (видна сагенитовая решетка под 60° из кристалликов рутила размером 10–25 мкм); г – кристаллы рутила размером до 70–80 мкм в центре зерна лейкоксена.

Fig. 7. Aggregates of leucoxene.

a – quartz-rutile aggregate (leucoxene); б – typical form of leucoxene grains; в – clast of leucoxene aggregate with sagenite lattice at 60° made up from rutile crystals 10–25 μm in size); г – rutile crystals to 70–80 μm in size) in the center of leucoxene grain.

Таблица 7

Нормативный минеральный состав концентратов (% отн.) по данным химических анализов (с учётом данных ЯГР по распределению и валентности железа)

Table 7

Normative mineral composition of concentrates (% rel.) according to chemical analyses (including NGR data on the distribution and valence of iron)

Пробы	Qw	Lcs	P-Rtl	Ilm	Fe-Rtl	Rtl	Sdr	Mnz	Zrc	Mus	Py	Сумма
ПЖ-40	6.00	48.59	21.59	4.13	5.47	1.30	5.00	0.42	0.15	6.52	0.17	99.99
ПЖ-41	5.00	50.12	19.72	4.65	7.19	1.50	3.50	0.37	0.12	6.86	0.19	99.94
ПЖ-44	14.00	0	46.21	9.73	5.54	0	10.53	0.45	0.09	4.91	0.09	99.86
ПЖ-46	16.00	0	43.74	7.60	7.55	0	13.95	0.42	0.09	4.41	0.07	99.84
ПЖ-52	0	0	74.63	9.71	3.53	0	5.26	0.68	0.25	5.17	0.04	99.93
ПЖ-54	0	0	67.35	19.95	5.64	0	9.48	0.63	0.21	5.00	0.04	99.99

Примечание. ПЖ-40 и ПЖ-41 – коллективные концентраты, ПЖ-44–ПЖ-54 – магнитные. Qw – кварц, Lcs – лейкоксен, P-Rtl – «псевдорутил», Ilm – ильменит, Fe-Rtl – Fe-рутил, Rtl – рутил, Sdr – сидерит, Mnz – монацит, Zrc – циркон, Mus – серицит, Py – пирит.

Note. ПЖ-40 and ПЖ-41 – collective concentrates, ПЖ-44 – ПЖ-54 – magnetic concentrates. Qw – quartz, Lcs – leucoxene, P-Rtl – «pseudorutile», Ilm – ilmenite, Fe-Rtl – Fe-rutile, Rtl – rutile, Sdr – siderite, Mnz – monazite, Zrc – zircon, Mus – sericite, Py – pyrite.

го анализа, остальные – с использованием данных ЯГР. Впервые достоверно установлено соотношение лейкоксена и магнитных титановых минералов (≈ 5 : 3 в коллективном концентрате), а также соотношение «псевдорутила» к Fe-рутилу и ильмениту ≈ 20 : 6 : 4. В крупном классе магнитной фракции это соотношение примерно сохраняется, а в мелкой магнитной фракции оно изменяется в сторону увеличения в чёрном концентрате ильменита при уменьшении количества Fe-рутила (Макеев, Лютоев, 2015). Анализ таблицы 7 показывает, что остаются нерешёнными некоторые аспекты технологии получения чистых рудных концентратов. Так, из титановых фаз лейкоксена и «псевдорутила» физическими методами концентрирования невозможно удалить все оксиды Si, Al, K, а также серу и другие компоненты, присутствующие в них в виде микровключений гидрослюды (серицита), каолинита, пирита, а также кварца. Из крупной фракции концентрата недостаточно чисто удаляется свободный кварц, и во всех фракциях остаётся много сидерита; поэтому рекомендуется включить в общий технологический процесс дополнительную операцию оттирки и дробления концентратов до класса –0.3 мм для их очистки от сростков с кварцем. Для очистки проб от сидерита необходимо применять обжиг концентрата до температуры 600 °C с последующей очисткой продукта от оксида железа в кислой среде.

Ильменорутил – очень редкий акцессорный минерал изучаемых руд и встречен нами только в двух обломках кристаллов величиной 0.5 × 0.7 мм в пробе сероцветных песчаников. Зёрна ильменорутила немагнитные, чёрного цвета. Чёткая внутренняя зональность ильменорутила обусловлена различной концентрацией Nb в зонах роста кристалла. Впервые здесь также встречено зерно Ta-содержащего ильменорутила (рис. 8), возможно, из гранитных пегматитов или метасоматитов. Состав ильменорутила, мас. %: TiO_2 74.41; FeO 5.19; Nb_2O_5 18.24; V_2O_5 2.07; Cr_2O_3 0.35; сумма 100.16. В Ta-содержащем ильменорутиле широким зондом

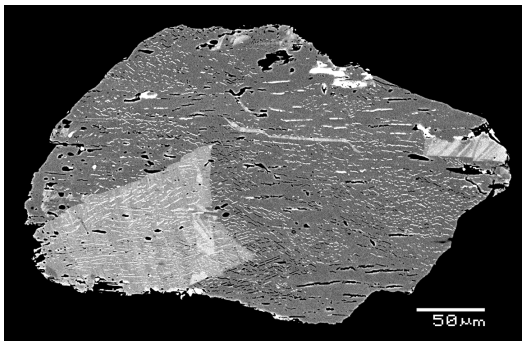

Рис. 8. Зональное зерно Ta-содержащего ильменорутила с переменным содержанием Nb и Ta и включениями касситерита (*белое*).

Fig. 8. Zonal Ta-bearing grain of ilmenorutile with variable content of Nb and Ta and inclusion of cassiterite (*white*).

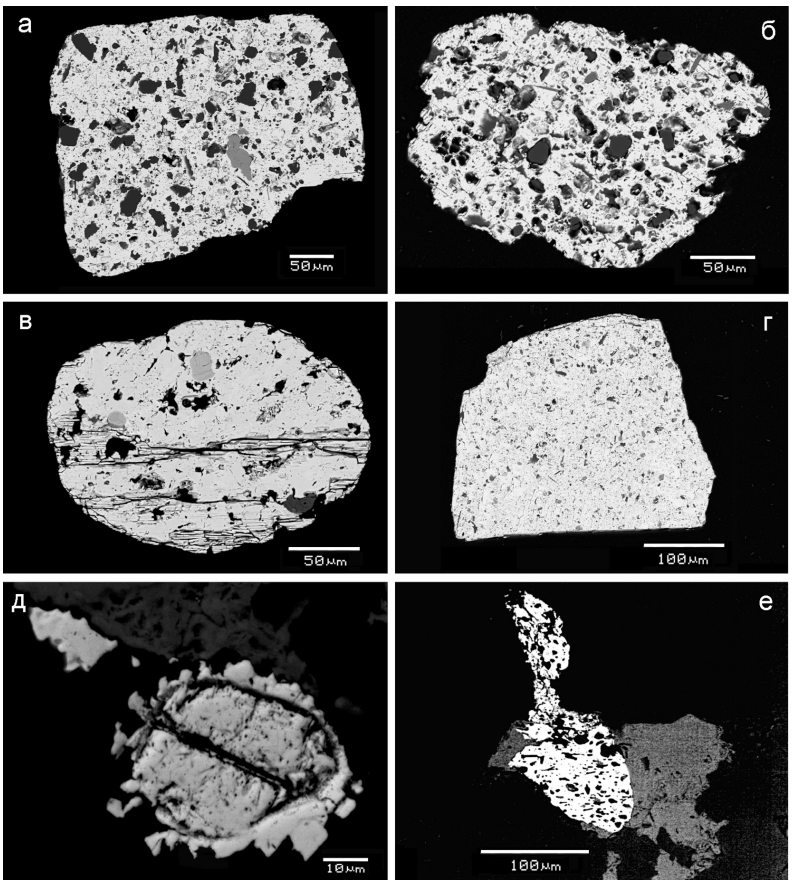

Рис. 9. Вид обломков кристаллов монацита-куларита.

а–в, е – пористые зёрна куларита-(Ce-Nd) с включениями кварца, каолинита и серицита (препарат в полистироле).

а–г – части кристаллов монацита-(Ce-La); д, е – полированные куски руды.

Fig. 9. Types of clasts of monazite-kularite crystals.

а–в, е – porous grains of kularite-(Ce-Nd) with inclusions of quartz, kaolinite and sericite (polished section in polystyrene); а–г – fragments of monazite-(Ce-La) crystals; д, е – polished ore pieces.

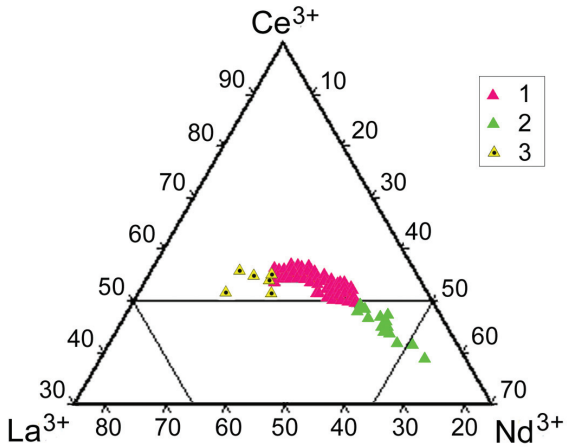

Рис. 10. Составы монацита и куларита из концентратов титановой руды Пижемского месторождения.

1 – куларит-(Ce), 2 – куларит-(Ce-Nd); 3 – монацит-(Ce-La).

Fig. 10. Composition of monazite and kularite from concentrates of Ti ore from the Pizhemskoe deposit.

1 – kularite-(Ce), 2 – kularite-(Nd-Ce); 3 – monazite-(Ce-La).

определены, мас. %: TiO_2 54.38; FeO 12.40; Nb_2O_5 17.86; Ta_2O_5 12.56; SnO_2 2.82.

Монацит-(Ce) – широко распространённый акцессорный минерал концентратов руд гравитационных классов от 3.7 до > 4.3 г/см^3, где содержание его составляет 0.3–0.6 мас. % при величине зёрен 50–400 мкм. Преобладают пористые агрегаты куларита – монацита-(Ce) с включениями кварца, серицита, каолинита, «псевдорутила», гематита и пирита. Визуальное выявление куларита затруднено, так как по форме зёрен и серо-жёлтому цвету его агрегат близок лейкоксену, но под электронным микроскопом в BSE монацит легко отличим по яркому белому изображению (рис. 9д, е) из-за содержаний редкоземельных элементов (REE). Состав монацита-(Ce) широко варьирует от лантановой разности до неодимовой (табл. 8, рис. 10) и повторяет тренд составов монацита-куларита проявления Ичетью (Макеев, Вирюс, 2013), отличаясь меньшим содержанием тория. Характерная черта куларита – это высокая пористость и наличие включений, что определило широкую вариацию реальной плотности зёрен куларита. В полированных препаратах руды (см. рис. 9) монацит часто встречается в

Таблица 8

Химический состава монацита-(Ce) (x ± δ, мас. %), пористость зерён и содержание включений минералов в агрегатах куларита

Table 8

Chemical composition of monazite-(Ce) (x ± δ, wt. %), porosity of grains and amount of mineral inclusions in kularite

Фракция	6–3	n = 19	7–5	n = 23	8–3	n = 13	9–2	n = 19	9–4	n= 15	Mnz-Ce-La n = 13	
Химический состав (расчёт на 100 мас. %)												
	x	δ	x	δ	x	δ	x	δ	x	δ	x	δ
P_2O_5	30.05	0.109	29.99	0.125	30.10	0.054	30.03	0.102	30.12	0.089	30.20	0.033
La_2O_3	9.79	2.746	8.57	3.420	11.39	2.375	10.03	3.623	13.16	4.631	16.70	2.065
Ce_2O_3	31.09	3.351	29.85	4.478	33.10	1.655	31.15	4.247	33.48	2.152	34.81	0.913
Pr_2O_3	3.77	0.552	4.28	0.646	3.83	0.609	4.03	0.738	3.81	1.004	3.05	0.524
Nd_2O_3	19.37	3.327	21.19	4.048	17.27	2.417	18.96	4.520	15.93	4.275	12.72	1.650
Sm_2O_3	3.45	1.930	4.38	2.416	2.57	1.020	3.65	2.175	1.97	1.135	1.30	0.551
Gd_2O_3	1.50	0.929	1.19	1.339	0.79	0.417	1.39	0.795	0.69	0.469	0.25	0.306
ThO_2	0.98	0.374	0.56	0.446	0.95	0.260	0.75	0.488	0.84	0.466	0.98	0.316
Сумма	100.0	0	100.0	0	100.0	0	100.0	0	100.0	0	100.0	0
Коэффициенты катионов в формулах												
P^{5+}	1.000	0	1.000	0	1.000	0	1.000	0	1.000	0	1.000	0
La^{3+}	0.1426	0.0396	0.1250	0.0494	0.1657	0.0343	0.1461	0.0523	0.1912	0.0668	0.2422	0.0299
Ce^{3+}	0.4473	0.0469	0.4302	0.0631	0.4755	0.0230	0.4484	0.0599	0.4805	0.0298	0.4985	0.0128
Pr^{3+}	0.0540	0.0079	0.0615	0.0094	0.0547	0.0088	0.0577	0.0107	0.0545	0.0145	0.0434	0.0075
Nd^{3+}	0.2721	0.0477	0.2983	0.0581	0.2420	0.0343	0.2665	0.0643	0.2232	0.0605	0.1777	0.0231
Sm^{3+}	0.0469	0.0264	0.0595	0.0331	0.0348	0.0138	0.0495	0.0297	0.0267	0.0154	0.0175	0.0074
Gd^{3+}	0.0196	0.0122	0.0156	0.0176	0.0103	0.0054	0.0182	0.0104	0.0089	0.0061	0.0032	0.0040
Th^{4+}	0.0175	0.0067	0.0100	0.0080	0.0169	0.0046	0.0135	0.0087	0.0150	0.0083	0.0174	0.0056
Пористость и содержание минералов-включений, % отн.												
Пористость	3.79	4.83	8.00	6.64	5.28	3.16	9.59	5.57	4.76	3.90	6.44	7.04
Серицит	4.43	1.63	3.88	1.34	3.95	1.65	2.79	1.29	3.56	1.46	3.32	1.65
Каолинит	3.56	3.96	2.38	1.23	2.37	1.47	1.98	1.08	2.34	1.20	3.01	4.04
Кварц	18.61	8.22	11.47	6.69	15.00	3.44	7.22	5.09	12.50	4.06	12.44	4.61
Пирит	0.83	1.20	0.57	1.22	1.24	2.01	1.79	3.57	0.49	0.71	0.41	0.62
ПсРутил	1.50	0.68	1.22	0.45	1.24	0.45	0.97	0.84	1.24	0.54	1.31	0.70
Гематит	0.09	0.19	0.32	0.47	0.16	0.32	0.47	0.69	0.41	0.74	0.44	0.78

Примечание. Плотность фракций, г/см^3: 6 – 3.7–3.9; 7 – 3.9–4.1; 8 – 4.1–4.3; 9 – > 4.3. Mnz – монацит. Jeol JSM-6480LV, широкий зонд, аналитик В.О. Япаскурт. ПсРутил – «псевдорутил».

Note. Density of fractions, g/cm^3: 6 – 3.7–3.9; 7 – 3.9–4.1; 8 – 4.1–4.3; 9 – > 4.3. Mnz – monazite. Jeol JSM-6480LV microprobe with wider beam diameter, analyst V.O. Yapaskurt. ПсРутил, «pseudorutile».

виде неокатанных зернистых агрегатов, которые в процессе метаморфизма приобретают отдельность в виде ламелей. Лантановая разность монацита более устойчива к растворению и поэтому содержит значительно меньше пор и включений (в этом она очень похожа на кристаллы лантанового монацита проявления Ичетью). В монаците из фракций большей плотности содержания Ce и La в монацитах повышенные, при меньших – Nd и Gd, а также суммы включений (кварца и др.) и пористости. В самой высокоплотной фракции соотношение разновидностей монацита-(Ce-La) и куларита-(Ce-Nd) около 7 : 8.

Ксенотим-(Y) редкий, но очень ценный минерал, т.к. тяжёлые редкоземельные элементы весьма востребованы промышленностью, что объясняет повышенный интерес даже к редким его находкам. В титановой руде месторождения ксенотим-(Y) насыщен оксидами Gd, Dy, Er и Yb, составляющих в сумме 13–18 мас. % (табл. 9). Наиболее часто ксенотим в рудах месторождения образует наросты толщиной 10–50 мкм на зёрнах циркона и примазки (рис. 11), реже мелкие включения в лейкоксене и рутиле. Важно, что операция оттирки не влияет на накопление иттриевого компонента в глинистых шламах.

Хромшпинелиды в титановых концентратах встречены нами впервые (рис. 12). Состав минералов этой группы охарактеризован 52 анализами, они сгруппировались в три компактные химико-генетические разновидности (табл. 10, рис. 13) с узкой изменчивостью состава. Здесь выделяются высокохромистые пикрохромиты величиной 0.25–0.75 мм – причудливые чёрные зёрна в срастании с оливином (см. рис. 12а, в) в концентратах классов 3.7–3.9 и > 4.3 г/см^3, а глинозёмистые разности – алюмохромит и хромпикотит (бурые и тёмно-коричневые зёрна размером 0.35–0.60 мм) – в концентратах классов 3.5–3.9 г/см^3. Герциниты (зелёные зёрна и обломки кристаллов размером 0.3–0.5 мм с включениями пирита) попали в узкий класс 3.7–3.9 г/см^3. Все хромшпинелиды немагнитные или слабо магнитные.

Химический состав высокохромистого магнезиального хромита в срастании с оливином (с 8–9 мол. % фаялитового минала) свидетельствует об их кимберлитовом алмазоносном парагенезисе. Алюмохромит и хромпикотит повторяют состав глинозёмистых хромшпинелидов проявления Ичетъю и, наиболее вероятно, происходят из лампрофиров (спессартитов и керсантитов). Зелёные цинкистые герциниты – типоморфные минералы верлитов, которые в виде крупных включений кс-

Таблица 9

Химический состав ксенотима-(Y) (расчёт на 100 мас. %) и коэффициенты катионов в формулах

Table 9

Chemical composition of xenotime-(Y) (wt. %) and formula units

Фракция*	9-2(14)	7-3(4)	7-3(20)	7-3(22)	7-3(25)	Среднее
P_2O_5	36.53	36.00	35.95	35.58	35.56	35.92
UO_2	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.08
Sm_2O_3	0.00	0.00	0.00	0.87	1.10	0.39
Gd_2O_3	2.31	0.00	3.63	4.49	4.23	2.93
Dy_2O_3	3.04	3.96	5.41	6.17	6.87	5.09
Ho_2O_3	0.00	2.01	0.00	0.00	0.82	0.57
Er_2O_3	3.01	3.88	3.72	3.08	3.23	3.38
Yb_2O_3	4.80	6.36	4.30	4.97	3.59	4.80
Y_2O_3	50.31	47.40	46.99	44.83	44.60	46.83
Сумма	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99
P^{5+}	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
U^{4+}	0.0000	0.0058	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Sm^{3+}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0100	0.0126	0.0126
Gd^{3+}	0.0247	0.0000	0.0395	0.0495	0.0466	0.0466
Dy^{3+}	0.0316	0.0418	0.0573	0.0660	0.0735	0.0735
Ho^{3+}	0.0000	0.0210	0.0000	0.0000	0.0087	0.0087
Er^{3+}	0.0305	0.0399	0.0384	0.0321	0.0337	0.0337
Yb^{3+}	0.0474	0.0636	0.0431	0.0503	0.0364	0.0364
Y^{3+}	0.8657	0.8278	0.8217	0.7921	0.7885	0.7885

Примечание. *) в скобках – номер зерна. Энергодисперсионный микрозонд, аналитик Л.О. Магазина.
Note. *) Number of grains are given in bracket. EDS microprobe, analyst L.O. Magazina.

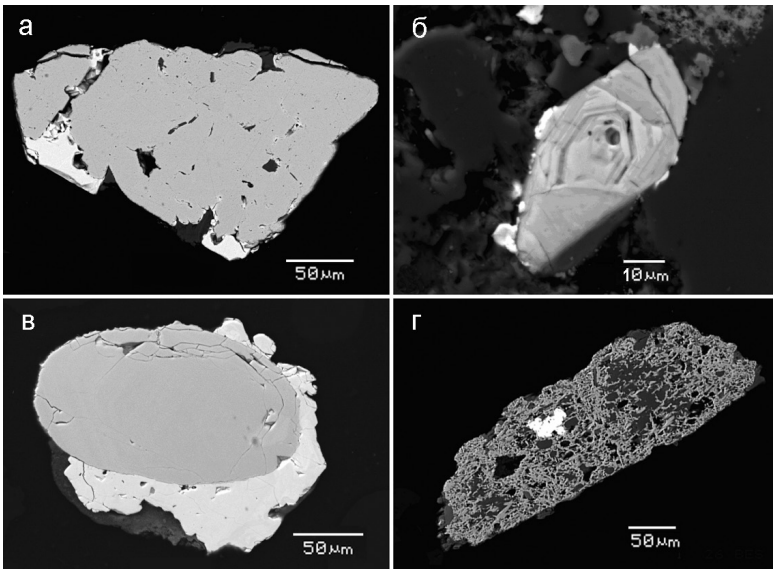

Рис. 11. Наросты ксенотима-(Y) (*белое*) на зёрнах циркона (а–в) и включение ксенотима в лейкоксене (г).

Fig. 11. The rims of ksenotime-Y (*white)* over zircon grains (а–в) and inclusion of xenotime in leucoxene (г).

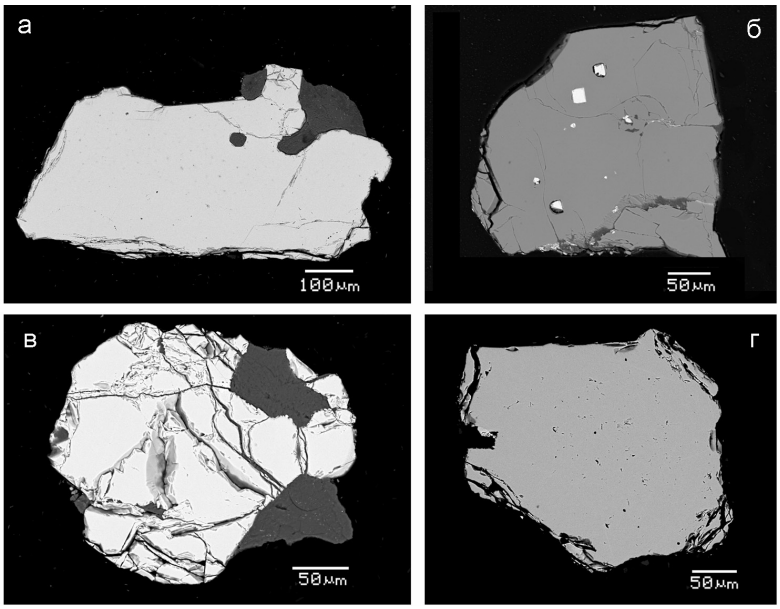

Рис. 12. Зёрна хромшпинелидов из титановых руд.

а, в – высокохромистый хромит в срастании с оливином (*серое*); б – герцинит с включениями пирита (*белое*); г – алюмохромит.

Fig. 12. Cr-spinel grains from Ti ore.

а, в – high-Cr chromite intergrown with olivine (*gray*); б – hercynite with inclusions of pyrite (*white*); г – alumochromite.

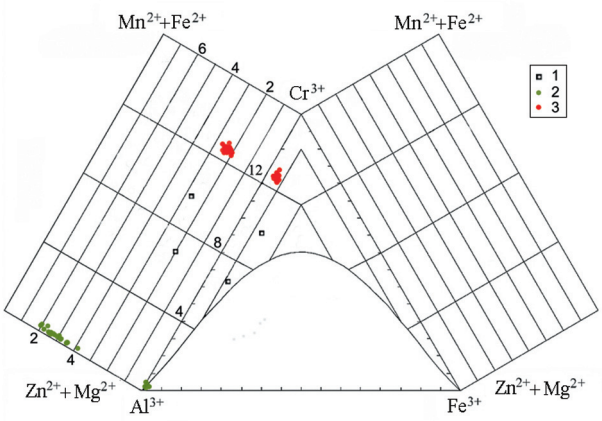

Рис. 13. Состав хромшпинелидов из концентратов титановой руды Пижемского месторождения.

1 – алюмохромит и хромпикотит, 2 – герцинит, 3 – хромит.

Fig. 13. Composition of Cr-spinels from Ti ore concentrates from the Pizhemskoe deposit.

1 – alumochromite and chrompikotite, 2 – hercynite, 3 – chromite.

Таблица 10

Химический состав (x ± δ, мас. %) хромшпинелидов Пижемского месторождения

Table 10

Chemical composition of Cr-spinel (x ± δ, wt. %) of the Pizemskoe deposit

№ п/п	1		2		3	4	5		6	
Фракция	7-3	n = 11	9-3	n = 17	7-3-02	7-3-24	6-5	n = 15	7-3	n = 7
	Химический состав, мас. %									
	x	δ	x	δ	n=1	n=1	x	δ	x	δ
Cr_2O_3	62.220	0.447	62.277	1.001	47.09	35.54	1.056	0.489	1.114	0.413
Al_2O_3	8.656	0.398	8.479	0.579	18.26	30.43	60.46	0.879	59.42	0.593
TiO_2	0.130	0.082	0.129	0.052	0.50	0.59	0.048	0.057	0.048	0.05
V_2O_3	0.104	0.038	0.092	0.096	0.10	0.21	0.156	0.081	0.093	0.051
Fe_2O_3	3.274	0.655	3.402	0.542	6.73	5.52	1.018	0.444	0.703	0.421
FeO	10.55	0.914	10.67	0.673	12.57	10.03	26.58	2.305	30.53	1.026
MnO	0.277	0.16	0.167	0.198	0.32	0.24	0.199	0.094	0.254	0.079
MgO	14.73	0.588	14.67	0.486	14.44	17.40	8.484	1.568	5.655	0.681
ZnO	0.065	0.086	0.112	0.113	0.00	0.04	1.994	0.651	2.185	0.211
Сумма	100.00	0	100.00	0	100.00	100.00	100.00	0	100.00	0
	Коэффициенты катионов в формулах									
Cr^{3+}	12.670	0.120	12.697	0.222	9.217	6.503	0.183	0.087	0.197	0.074
AI^{3+}	2.627	0.123	2.576	0.169	5.325	8.296	15.604	0.084	15.649	0.093
Ti^{4+}	0.050	0.032	0.050	0.020	0.187	0.206	0.016	0.018	0.016	0.017
V^{5+}	0.018	0.006	0.016	0.016	0.016	0.031	0.023	0.012	0.014	0.007
Fe^{3+}	0.634	0.125	0.660	0.105	1.253	0.961	0.167	0.073	0.118	0.071
Fe^{2+}	2.272	0.204	2.302	0.153	2.602	1.941	4.875	0.476	5.708	0.222
Mn^{2+}	0.060	0.035	0.036	0.043	0.067	0.048	0.037	0.017	0.048	0.015
Mg^{2+}	5.655	0.208	5.640	0.167	5.331	6.004	2.766	0.476	1.884	0.217
Zn^{2+}	0.012	0.016	0.021	0.022	0.000	0.008	0.323	0.106	0.361	0.034

Примечание. 1, 2 – хромиты, 3 – алюмохромит, 4 – хромпикотит, 5–6 – герцинит.
Note. 1, 2 – chromite, 3 – alumochromite, 4 – chrompicotite, 5–6 – hercynite.

нолитов часто встречаются в тех же лампрофирах Четласского Камня (Макеев, 2013; Макеев и др., 2008).

Слюды – серицит (гидромусковит) и гидратированная слюда ФАСИ – это вторичные породообразующие минералы титаноносных песчаников, встречающиеся в качестве порового цемента между зёрнами кварца (см. рис. 2). Содержание серицита в рудах 6–21 % отн., а в шламах возрастает в несколько раз до 27–38 % (см. табл. 1). В рудном концентрате фракции 3.7–3.9 г/см^3 встречено чешуйчатое зерно первичной слюды размером 0.4 × 0.5 мм (рис. 14а). Характерный парагенезис гидратированной слюды ФАСИ с фторапатитом и Mn-ильменитом и состав этой слюды (табл. 11, ан. 11) не оставляют сомнений в том, что она является породообразующим минералом лампрофиров (Макеев и др. 2008). Проведённые в процессе поисково-оценочных работ массовые химические анализы состава титаноносных песчаников и выявленные высокие коэффициенты корреляции между железом, алюминием, калием, магнием, барием, рубидием и потерями после прокаливания (Макеев, 2014) свидетельствуют о прошедшем процессе преобразования, при котором слюды и калишпаты лампрофиров разложились с образованием каолинита, серицита, гётита и хлорита.

Амфиболы и раньше часто диагностировались нами в петрографических шлифах рудных песчаников. Из рудных концентратов удалось выделить и изучить 9 зёрен амфибола в классах 2.9–3.1 г/см^3. Зёрна их чёрного цвета, величиной 0.4–0.6 мм, сла-

Таблица 11

Химический состав (мас. %) и коэффициенты катионов и Cl в формулах амфиболов, граната и слюды

Table 11

Chemical composition (wt. %) and formula units of amphibole, garnet and mica

№ ан.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Химический состав, мас. %											
SiO_2	40.68	40.16	41.38	42.46	42.42	41.48	39.70	39.52	38.51	38.97	36.69
TiO_2	1.49	2.40	2.14	2.66	2.21	1.67	2.33	1.46	1.94	0.16	1.77
Al_2O_3	13.22	13.65	12.02	11.81	11.35	11.95	15.55	13.64	14.79	14.35	19.04
Cr_2O_3	0.08	0.03	0.01	0.02	0.09	0.00	0.04	0.14	0.00	2.12	0.00
FeO	20.58	17.94	19.58	16.89	17.67	20.53	15.03	18.78	23.38	27.75	16.73
MgO	8.13	9.19	8.91	9.54	9.46	7.61	10.99	9.32	5.34	15.60	16.01
MnO	0.13	0.21	0.29	0.18	0.09	0.29	0.21	0.23	0.46	0.47	0.08
CaO	10.75	10.77	11.13	11.57	11.49	11.49	10.37	10.69	10.30	0.58	0.38
Na_2O	1.72	2.04	1.06	1.13	1.33	0.85	3.14	2.62	0.77	0.00	0.28
K_2O	1.10	1.00	1.19	1.66	1.78	1.93	0.65	1.24	2.28	0.00	5.05
Cl	0.33	0.73	0.19	0.09	0.25	0.32	0.00	1.38	1.23	0.00	0.00
Сумма	98.20	98.12	97.89	98.03	98.13	98.11	98.02	99.00	98.99	100.0	95.03
Коэффициенты катионов и Cl в формулах											
Si^{4+}	6.095	6.015	6.196	6.363	6.383	6.319	5.813	5.946	5.895	2.991	2.658
Ti^{4+}	0.167	0.271	0.241	0.300	0.249	0.192	0.258	0.165	0.223	0.009	0.096
AI^{3+}	2.334	2.411	2.121	2.086	2.012	2.145	2.684	2.418	2.668	1.298	2.626
Cr^{3+}	0.009	0.003	0.001	0.002	0.010	0.000	0.004	0.017	0.000	0.128	0.000
Fe^{3+}	0.394	0.300	0.441	0.248	0.345	0.345	0.241	0.454	0.214	0.576	0.000
Fe^{2+}	2.184	1.947	2.011	1.869	1.878	2.270	1.600	1.909	2.779	1.139	1.014
Mg^{2+}	1.816	2.053	1.989	2.131	2.122	1.730	2.400	2.091	1.221	1.783	1.729
Mn^{2+}	0.016	0.027	0.038	0.023	0.011	0.037	0.026	0.030	0.061	0.030	0.005
Ca^{2+}	1.725	1.728	1.785	1.858	1.851	1.875	1.628	1.722	1.690	0.048	0.029
Na^{+}	0.500	0.593	0.307	0.330	0.390	0.251	0.892	0.763	0.228	0.000	0.040
K^{+}	0.209	0.192	0.226	0.319	0.342	0.375	0.121	0.237	0.445	0.000	0.467
Cl^{-}	0.084	0.186	0.048	0.022	0.062	0.081	0.000	0.351	0.319	0.000	0.000
Mg/Mg + Fe	0.454	0.513	0.497	0.533	0.530	0.433	0.600	0.523	0.305	0.610	0.630
Ф Al^{IV}	1.738	1.714	1.563	1.337	1.368	1.489	1.929	1.889	1.882		
Ф Al^{VI}	0.596	0.697	0.558	0.749	0.644	0.656	0.755	0.529	0.786		

Примечание. 2, 4, 5, 7, 8 – чермакит; 1, 3, 6, 9 – феррочермакит; 2–5, 7 – титаностые, 4–6, 8, 9 – калиевые; 8, 9 – хлорные разности; 10 – гранат ряда кноррингит-пироп-мейджорит-альмандин; 11 – гидратированная слюда ряда флогопит-аннит-сидерофиллит-истонит; H_2O не определялась.

Note. 2, 4, 5, 7, 8 – chermakite, 1, 3, 6, 9 – ferrochermakite; 2–5, 7 – Ti-bearing, 4–6, 8, 9 – K-bearing, 8, 9 – Cl-bearing varities; 10 – garnet of the knorringite-pyrope-majorite-almandine series; 11 – hydrated mica of the phlogopite-annite-siderophillite-istonite series. H_2O was not analized.

бомагнитные, неокатанные, с характерной спайностью (см. рис. 14*б*). Пересчёт микрозондовых анализов этих амфиболов позволяет отнести их к чермакиту и феррочермакиту (см. табл. 11, ан. 1–9) с их калиевой, титанистой и хлорсодержащей разностями. Подобные амфиболы встречаются в лампрофирах (керсантитах) Четласского Камня (Брянчанинова, Макеев, 2009).

Гранаты ранее не были диагностированы в титаноносных песчаниках, хотя в вышележащих

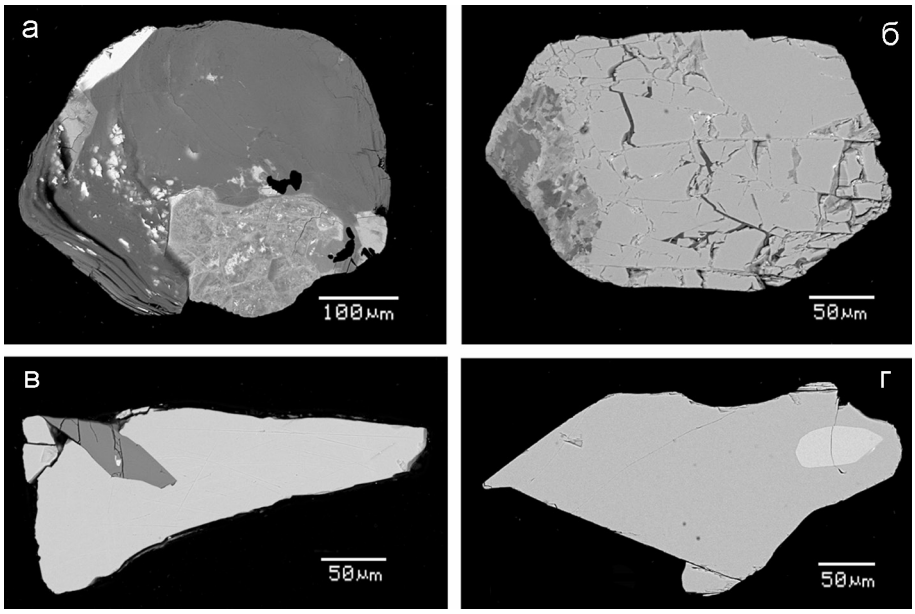

Рис. 14. Зёрна силикатов из руд.

а – чешуйка слюды ФАСИ с включениями ильменита (*белое*) и апатита (*светло-серое*); б – титанистая магнезиальная роговая обманка; в – гранат (кноррингит-пироп-мейджорит-альмандин) с включением слюды ФАСИ (*серое*); г – обломок кристалла шерла с включением эпидота (*светлое*).

Fig. 14. Silicate grains from ores.

а – scale of hydrated mica of the phlogopite-annite-siderophillite-istonite (FASI) series with inclusions of ilmenite (*white*) and apatite (*light gray*); б – Ti-Mg hornblende; в – garnet (knorringite-pyrope-majorite-almandine) with inclusion of FASI mica (*gray*); г – clast of schorl crystal with inclusion of epidote (*light*).

среднедевонских песчаниках и конглобрекчии проявления Ичетью они широко распространены и представлены пироп-альмандинами, альмандин-гроссулярами и гроссуляр-альмандин-спессартинами (Макеев, Магазина, 2014). В сероцветных титаноносных песчаниках Пижемского месторождения нами впервые обнаружено зерно граната величиной 210 × 330 мкм (см. рис. 14в). Состав его (см. табл. 11, ан. 10) отвечает редкому виду альмандина с примесными долями миналов (% отн.): меджорита 28.8, пиропа 24.2 и кноррингита 6.4. Такие гранаты были обнаружены нами ранее (Брянчанинова, Макеев, 2009) в лампрофирах Четласского Камня.

Турмалин, как и большинство силикатов, концентрируется в гравитационный класс 2.9–3.1 г/см^3. Зёрна турмалина чёрного и коричневого цвета, слабомагнитные, удлинённые и слабо окатанные (см. рис. 14г). По составу они могут быть отнесены к двум минеральным видам – шерлу и дравиту (табл. 12) – и образуют непрерывный изоморфный ряд (рис. 15). Состав их близок турмалинам проявления Ичетью, что свидетельствует о едином их источнике, которым могут быть породы фундамента.

Циркон также широко распространён в Пижемском месторождении и может являться объектом промышленной добычи из концентратов, хотя содержание его в руде невысокое – от 0.05 до 0.40 мас. %, повышаясь в мелких классах лейкоксенового концентрата до 7 %. По цвету преобладают розовые зёрна циркона, реже – жёлтые и бесцветные; размер зёрен от 35 до 400, модальный 130 мкм. Распространены короткопризматические кристаллы и слабо окатанные овальные зёрна, нередко с наростами ксенотима-(Y) (рис. 16). Изометричные кристаллы водяно-прозрачные или бледно-жёлтые с плохо выраженной зональностью или без неё, а удлинённые кристаллы – с отчётливой осцилляционной «магматической» зональностью. Циркон распределяется в два гравитационных класса –>4.3 и 3.5–3.7 г/см^3. В классе >4.3 г/см^3 накапливаются относительно чистые зёрна циркона, содержащие только примесь HfO_2 1.5–2.2 мас. %, а в класс 3.5–3.7 г/см^3 распределяются цирконы с примесями оксидов Y, HREE, Ca, Fe, Al (до 5–15 мас. %. в сумме).

Таблица 12

Химический состав турмалина (мас. %) и коэффициенты катионов в формулах

Table 12

Chemical composition of tourmaline (wt. %) and formula units

№ ан.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Химический состав, мас. %												
SiO_2	34.78	33.35	34.88	35.28	35.80	35.90	36.31	35.55	35.68	35.74	36.15	35.78	35.51
TiO_2	0.61	0.76	0.59	1.22	0.24	0.42	0.38	1.39	0.63	0.97	0.09	0.48	1.08
Al_2O_3	30.57	31.93	29.61	31.36	34.60	31.57	32.56	26.25	31.53	24.82	30.36	32.60	34.04
FeO	16.48	14.96	15.37	10.61	10.78	10.32	11.40	12.48	8.64	13.05	8.16	8.35	7.29
MnO	0.31	0.19	0.40	0.11	0.10	0.72	0.21	0.04	0.07	0.29	0.03	0.07	0.10
MgO	1.63	2.04	2.51	4.86	2.83	4.74	3.65	6.57	6.68	7.99	8.39	6.25	5.46
CaO	0.35	0.46	0.48	1.36	0.11	0.72	0.19	2.21	1.48	2.00	1.89	0.75	0.54
Na_2O	2.29	1.79	2.27	1.70	1.61	2.09	1.96	1.63	1.55	1.83	1.51	1.96	1.84
$*B_2O_3$	9.00	10.00	9.80	9.00	10.00	9.50	9.30	9.80	9.70	9.30	9.40	9.70	10.00
$*H_2O$	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Total	100.02	99.49	99.92	99.50	100.08	99.98	99.96	99.92	99.96	99.99	99.97	99.94	99.87
Коэффициенты катионов в формулах													
Si^{4+}	5.813	5.627	5.868	5.754	5.800	5.847	5.887	5.933	5.771	5.965	5.824	5.765	5.700
Ti^{4+}	0.076	0.096	0.075	0.150	0.029	0.052	0.046	0.175	0.077	0.122	0.011	0.057	0.131
Al^{3+}	6.023	6.350	5.872	6.027	6.606	6.061	6.223	5.162	6.012	4.882	5.765	6.191	6.440
Fe^{2+}	2.304	2.112	2.162	1.447	1.461	1.407	1.546	1.741	1.169	1.822	1.100	1.125	0.979
Mn^{2+}	0.044	0.027	0.057	0.015	0.014	0.099	0.028	0.006	0.010	0.040	0.005	0.009	0.012
Mg^{2+}	0.406	0.513	0.630	1.182	0.684	1.151	0.884	1.635	1.610	1.989	2.017	1.501	1.308
Ca^{2+}	0.062	0.082	0.088	0.238	0.020	0.125	0.033	0.395	0.256	0.357	0.325	0.129	0.093
Na^{+}	0.743	0.586	0.740	0.537	0.506	0.658	0.615	0.528	0.486	0.590	0.472	0.610	0.573
B^{3+}	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Миналы													
Шерл	83.13	78.00	75.09	50.48	67.50	52.44	62.77	46.17	38.51	43.71	31.95	40.82	41.14
Дравит	14.64	18.96	21.87	41.21	31.58	42.90	35.88	43.35	53.06	47.71	58.60	54.49	54.97
Увит	2.23	3.05	3.04	8.31	0.93	4.66	1.36	10.48	8.43	8.58	9.45	4.70	3.90

Примечание. 1–8 – шерл; 9–13 – дравит. Jeol JSM-6480LV, аналитик В.О. Япаскурт. *) B_2O_3 и H_2O – расчёт.
Note. 1–8 – schorl; 9–13 – dravite. Analyst V.O. Yapaskurt. *) B_2O_3 and H_2O are calculated.

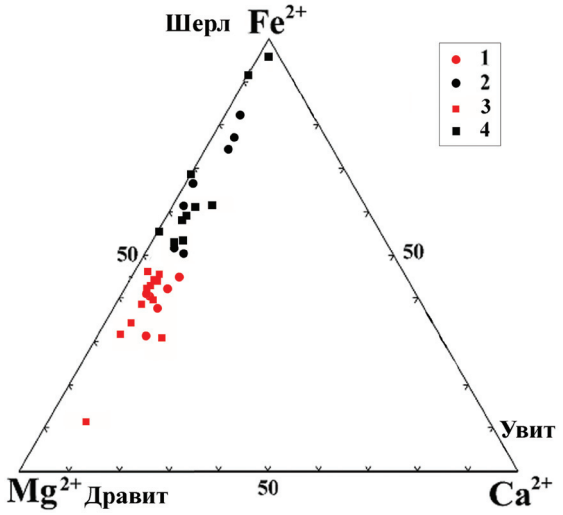

Рис. 15. Состав турмалинов из концентратов титановой руды Пижемского месторождения (1, 2) и конглобрекчий проявления Ичетъю (3, 4): 1, 3 – дравит, 2, 4 – шерл.

Fig. 15. Composition of tourmaline from Ti ore concentrates of the Pizhemskoe deposit (1, 2) and conglobreccia of the Ichet'yu occurrence (3, 4): 1, 3 – dravite, 2, 4 – schorl.

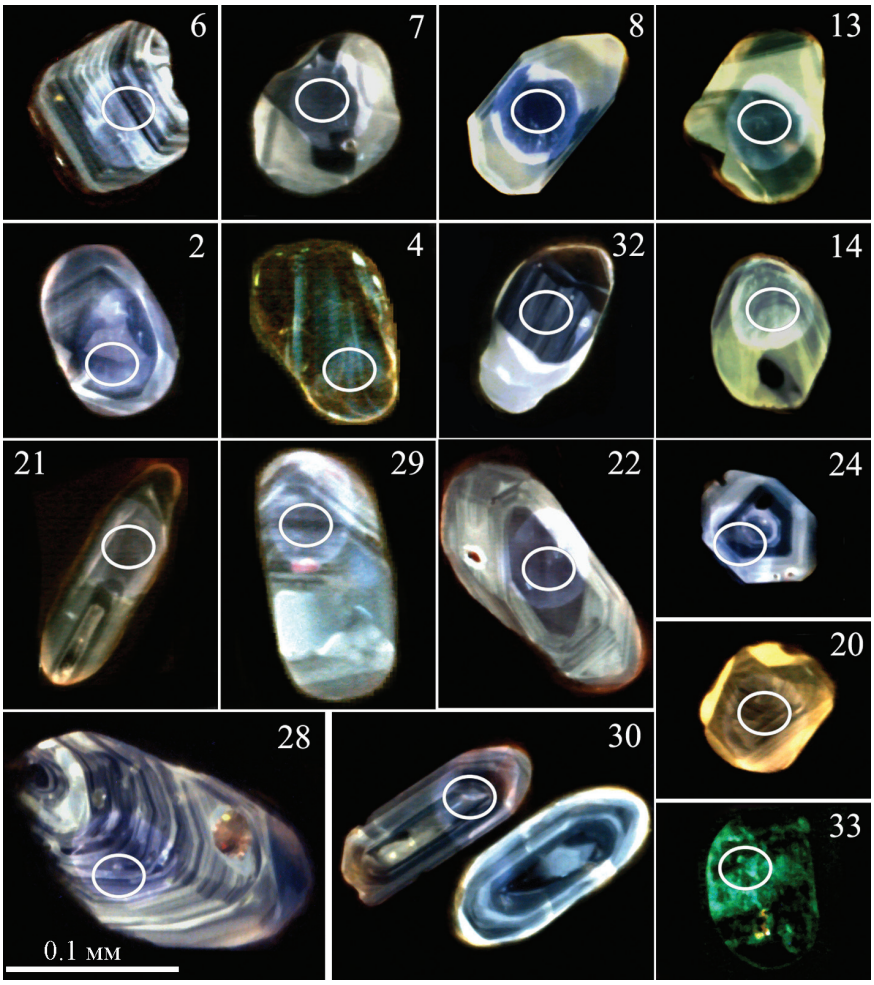

Рис. 16. Картины катодолюминесценции некоторых зёрен циркона фракции –0.25 + 0.07 мм из пробы ПЖ-50 Пижемского месторождения.

6–8, 13, 14, 22, 28, 30, 32 – номера зёрен, *кружки* – участки анализов (ионный зонд) и определения возраста (поле анализа ~20 мкм).

Fig. 16. CL-images of some zircon grains (fraction of –0.25 + 0.07 mm in size) from the Pizhemskoe deposit (sample PJ-50).

6–8, 13, 14, 22, 28, 30, 32 – numbers of grains, *circles* – areas (~ 20 μm across) of ion microprobe and age analyses.

U-Pb возраст 35 зёрен циркона Пижемского месторождения определён SHRIMP-II-анализом, а ранее были изучены ещё 7 зёрен циркона (Макеев и др., 2015_3) классическим методом в ГИ КНЦ РАН. Результаты определения возраста циркона, выделенного из немагнитной лейкоксеновой фракции пробы ПЖ-50, показали широкий разброс значений от 334 до 2740 млн лет (табл. 13). Датировки возраста распределились в четыре совокупности: неопротерозойские, мезопротерозойские, палеопротерозойские и архейские с выраженным полимодальным распределением максимумов в интервалах, млн лет: 600, 900, 1000–1600, 1600–2000 и 2660–2740 (рис. 17); самый молодой возраст 333.9 ± 7.7 млн лет получен для зерна циркона № 33 с повышенными содержаниями Y, P, HREE и других элементов, в также с высоким значением дискордантности D=319, что, вероятно, обусловлено нарушением равновесия изотопной U-Pb системы. Три зерна циркона с минимальным возрастом 571–591 млн лет как раз свидетельствуют о том, что возраст малоручейской титаноносной толщи не может быть меньшим. И это указывает на докембрийский возраст месторождения, а не на девонский, как считалось ранее. Неопротерозойские значения возраста соответствует возрасту лампрофиров Четласского Камня (Макеев и др., 2009). Диапазон древних значений возраста свидетельствует о поступлении циркона из пород фундамента, различных по глубине залегания.

Таблица 13

Харастеристика и Pb–U возраст (млн лет) циркона Пижемского месторождения и лампрофиров Четласского Камня

Table 13

Characteristic and Pb–U age of zircon of the Pizemskoe deposit and lamprophyres of the Chetlassky Stone Ridge

№ зёрен	Яркость КЛ и зональность зёрен	Зёрна, мкм	^{206}Pb, %	U, ppm	Th, ppm	$^{232}Th/^{238}U$	$^{206}Pb^*$, ppm	Возраст, млн лет		D, %
								$^{206}Pb/^{238}U$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	
Пижемское месторождение										
1	Чёрный	86 × 143	1.25	137	77.9	0.59	34.9	1646 ± 38	1664 ± 74	1
2	Т–серый	86 × 143	0.09	137	102	0.77	38.3	1814 ± 39	1878 ± 25	4
3	Св–серый, *M*	86 × 114	0.00	30.6	43.0	1.45	13.9	2740 ± 64	2699 ± 29	–1
4	Чёрный	114 × 143	1.43	1382	1838	1.37	112	571 ± 13	1431 ± 42	151
5	Т–серый, *C*	86 × 129	0.21	128	45.2	0.36	40.2	2001 ± 43	2012 ± 24	1
6	Т–серый, *O*	114 × 114	1.42	200	116	0.60	41.1	1359 ± 31	1580 ± 55	16
7	Т–серый	114 × 143	0.26	193	26.5	0.14	41.7	1444 ± 32	1430 ± 34	–1
8	Св–серый, *C*	77 × 157	1.45	39.7	30.4	0.79	3.21	572 ± 17	614 ± 280	7
9	Чёрный	100 × 100	0.26	475	188	0.41	97.4	1377 ± 31	1324 ± 21	–4
10	Чёрный	86 × 100	0.20	269	128	0.49	49.0	1237 ± 27	1196 ± 33	–3
11	Т–серый, *O*	71 × 129	0.22	111	57.7	0.54	18.9	1164 ± 28	1155 ± 62	–1
12	Чёрный	86 × 114	0.41	483	160	0.34	81.5	1151 ± 25	1247 ± 31	8
13	Т–серый, *C*	114 × 143	0.40	106	66.8	0.65	18.4	1187 ± 32	1205 ± 58	2
14	Св–серый, *O*	104 × 130	1.46	30.7	17.6	0.59	5.11	1124 ± 32	1061 ± 220	–6
15	Т–серый	83 × 143	0.22	159	94.3	0.61	40.2	1660 ± 36	1693 ± 30	2
16	Чёрный	99 × 125	0.53	404	147	0.38	96.0	1565 ± 33	1490 ± 32	–5
17	Т–серый, *C*	73 × 119	0.84	73.1	175	2.48	13.3	1228 ± 30	1084 ± 120	–12
18	Т–серый, *C*	91 × 104	0.21	164	218	1.38	24.2	1020 ± 23	978 ± 65	–4
19	Чёрный	130 × 156	0.36	365	183	0.52	81.9	1489 ± 32	1424 ± 38	–4
20	Т–серый, *C*	104 × 130	0.40	158	43.2	0.28	46.6	1896 ± 41	1812 ± 30	–4
21	Т–серый, *O*	60 × 182	0.71	335	56.8	0.17	61.4	1237 ± 27	1124 ± 67	–9
22	Т–серый	104 × 208	0.33	88.5	109	1.28	27.9	2007 ± 45	1915 ± 36	–5
23	Т–серый	78 × 104	0.86	167	129	0.80	33.1	1327 ± 30	1253 ± 65	–6
24	Св–серый, *C*	78 × 104	0.50	68.7	71.0	1.07	16.2	1555 ± 36	1495 ± 63	–4
25	Чёрный	68 × 130	0.40	902	387	0.44	119	918 ± 20	1694 ± 18	85
26	Черный	117 × 146	0.57	252	95.2	0.39	45.6	1225 ± 30	1110 ± 46	–9
27	Чёрный	154 × 154	0.34	378	291	0.80	113	1912 ± 40	1977 ± 17	3
28	Св–серый, *O*	146 × 268	0.50	145	119	0.84	12.1	591 ± 15	701 ± 100	19
29	Чёрный	98 × 195	0.05	340	140	0.43	78.3	1531 ± 33	1541 ± 19	1
30	Т–серый	59 × 184	0.49	164	235	1.48	14.4	627 ± 15	589 ± 110	–6
31	Чёрный	85 × 141	1.60	437	73.1	0.17	100	1500 ± 32	1856 ± 37	24
32	Св–серый, *O*	85 × 158	0.34	88.6	36.2	0.42	39.1	2662 ± 56	2678 ± 35	1
33	Чёрный	89 × 129	0.89	1950	1637	0.87	89.9	334 ± 8	1400 ± 34	319
34	Чёрный	87 × 94	0.22	275	186	0.70	125	2737 ± 54	2679 ± 12	–2
35	Чёрный	94 × 200	0.16	568	279	0.51	96.6	1162 ± 25	1112 ± 24	–4
Лампрофиры Четласского Камня										
36	Т–серый, O	67 × 133	0.10	480	144	0.31	155	2060 ± 44	1955 ± 13	–5
37	Т–серый, O	108 × 117	0.37	141	54.0	0.40	24.3	1173 ± 27	1161 ± 56	–1
38	Т–серый, O	100 × 125	0.38	282	95.4	0.35	63.2	1491 ± 33	1480 ± 32	–1
39	Т–серый, O	67 × 108	0.40	263	97.2	0.38	64.4	1607 ± 35	1597 ±24	–1
40	Т–серый, O	60 × 95	0.26	2275	717	0.33	291	893 ± 20	918 ± 18	3
41	Чёрный	40 × 70	0.70	3605	1229	0.35	488	937 ± 20	1012 ± 18	8
42	Т–серый, O	65 × 80	0.29	194	80.0	0.43	31.7	1119 ± 26	1126 ± 45	1
43	Яркий св–серый, O	45 × 80	0.67	245	397	1.68	12.2	361 ± 9	228 ± 160	–37

Примечание. КЛ – катодолюминесценция. Зональность: *M* – мозаичная, *O* – осцилляционная, *C* – секториальная. D – дискордантность.

Note. КЛ – cathodoluminescence. Zoning: M – mosaic, O – oscillation, C – sectorial. D – discordance.

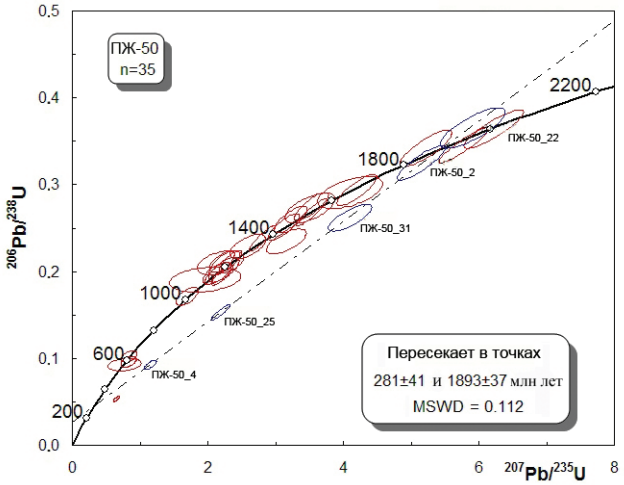

Рис. 17. Конкордия с результатами датирования 35 зёрен циркона Пижемского титанового месторождения.

Fig. 17. Concordia with dating results for 35 zircon grains of the Pizhemskoe deposit.

Пять зёрен циркона расположены на дискордии со значением верхнего пересечения с конкордией 1893 ± 37 млн лет, что соответствует свекофенскому этапу метаморфизма, проявленному в этом регионе. К этой возрастной отметке тяготеют результаты, полученные «классическим» методом датирования единичных зёрен циркона в ГИ КНЦ РАН (Макеев и др., 2015_3). Датировки циркона из лампрофиров поисковой скважины (дайка № 55, проба 55/193) распределились также в четыре совокупности: неопротерозойские (890–940 млн лет), мезопротерозойские (1100–1600 млн лет), палеопротерозойские (2040 млн лет); «молодой» возраст 360.5 ± 9 млн лет зерна циркона № 43, вероятно, вызван нарушением равновесия U-Pb системы. Распределение датировок циркона из лампрофиров повторяет особенности и вписывается в облик диаграммы полимодального распределения максимумов пижемских цирконов, среди которых не встречены зёрна архейского возраста. Необходимо отметить, что четласские лампрофиры несут в себе большое количество ксенолитов мантийных ультраосновных пород (лерцолитов, верлитов) и вмещающих осадочных пород фундамента разнообразного состава и возраста (Брянчанинова, Макеев, 2009). Поэтому широкий разброс значений возраста цирконов из лампрофиров легко объясним и понятен. Величина выделенных зёрен циркона из лампрофиров меньше пижемских, они чаще представлены обломками зональных зёрен, как и у неопротерозойских цирконов из Пижемского месторождения. Возможно, что одним из источников пижемских цирконов могли быть среднетиманские лампрофиры. Возраст цирконов вышезалегающего полиминерального золото-алмаз-редкоземельно-редкометалльно-титанового проявления Ичетью охарактеризован ранее и существенно не отличается от двух упомянутых выше; полимодальное распределение данных возраста также сходно и растянуто на более чем 2 млрд лет (Макеев и др., 2015_1; Макеев и др., 2015_2).

Обсуждение результатов

Минеральный состав тяжёлой фракции титаноносных песчаников малоручейской толщи Пижемского месторождения и алмазоносных конглобрекчий проявления Ичетью (Макеев, Дудар, 2001) совпадают на 90 %, как и типоморфные особенности всех титановых минералов (Макеев, Борисовский, 2013), хромшпинелидов (Макеев, Магазина, 2014) и редкоземельных минералов (Макеев, Вирюс, 2013; Макеев и др., 2013). Можно утверждать, что одним из источников тяжёлого шлиха вышезалегающих конглобрекчий Ичетью были именно нижележащие песчаники малоручейской толщи (а именно – лейкоксена, «псевдорутила», Fe-рутила, куларита).

Нерешённым вопросом остается генезис Пижемского месторождения. Отнесение месторождения к древней россыпи не подтверждается многими фактами. Неизвестно откуда могли взяться огромные массы кварцевых песков и рудных минералов. Подстилающие микрозернистые рифейские глинистые сланцы (и коры выветривания по ним) не могли служить субстратом для образования средне-грубозернистых титаноносных кварцевых песчаников. Да и зрелых кор выветривания по глинистым сланцам на Тимане никто ранее не наблюдал, за исключением первой стадии изменения – делювиальной щебёнки сланцев. Несортированные неокатанные кварца зёрна из титаноносных

песчаников, как и игольчатые кристаллы рутила, не могут свидетельствовать в пользу россыпного происхождения этой толщи. Сидеритовые прожилки, сидеритовый и гематитовый цемент песчаников свидетельствуют о длительной гидротермальной переработке титаноносных толщ. Ранее в руде нами был обнаружен муассанит SiC, а также силицид железа Fe_2Si, который является индикатором восстановительной среды, и его часто находят в кимберлитовой породе вместе с другими минералами-спутниками алмаза.

Не утихают споры о возрасте немых титаноносных толщ (Цаплин и др., 1988) – известно было только то, что они с угловым несогласием залегают под среднедевонскими песчаниками пижемской свиты (D_2pz), т.е. малоручейская толща древнее, чем средний девон. Нами впервые с помощью Rb-Sr изотопных исследований инструментально получены новые данные о позднепротерозойским возрасте (685 ± 30 млн лет) этих немых толщ (Чернышев и др., 2010). Проведённые исследования возраста циркона показали, что в изученной выборке присутствуют зёрна с самыми молодыми датировками 591–572 млн лет, а все другие более древние. Отсутствие фанерозойских датировок циркона свидетельствует о том, что и сама титаноносная толща более древняя, чем считалась ранее, а именно – докембрийская.

Выводы

Новые сведения о минеральном составе руд и типоморфные особенности 30 породообразующих, рудных и акцессорных минералов позволили установить источник рудного вещества. Многими предшественниками считалось, что источником рудных минералов ильменита и лейкоксена в малоручейских песчаниках были рифейские сланцы. Охарактеризованные минералы – Mn-ильменит, герцинит, хромпикотит, алюмохромит, слюды, амфиболы (чермакит и феррочермакит), а также гранат ряда кноррингит-пироп-мейджорит-альмандин – указывают на генетическую связь пород и руд Пижемского титанового месторождения с жильными магматическими породами – лампрофирами, подобными широко распространенным на соседней гряде (Четласском Камне). Полученные новые данные о преобразовании ильменита в лейкоксен при температурах процесса 510 ± 35 °C по циркон-рутиловому геотермометру (Макеев, Борисовский, 2013) свидетельствуют о том, что процесс преобразования происходил непосредственно в самой титаноносной толще при высоких температурах в окислительной обстановке в присутствии углекислоты. В малоручейской титаноносной толще обнаружены 6 надёжных минералов-индикаторов алмазоносности этих пород, что даёт основания провести поисковые исследования с целью обнаружения алмаза в базальных гравелитах рудной толщи Пижемского месторождения.

Результаты датирования циркона из Пижемского месторождения согласуются с данными возраста циркона из вышележащего конглобрекчиевого пласта проявления Ичетъю. Геохимическая специализация циркона обоих объектов во многом совпадает (Макеев и др., 2015_3). Все это может свидетельствовать о едином источнике циркона двух промышленных объектов, при этом циркон мог поступать из разных по глубине горизонтов нижележащего кристаллического фундамента Тимана. Доказательством того, что источник циркона глубинный, а не латеральный, является отсутствие на современной эрозионной поверхности Тимана пород древнее 1 млрд лет.

Благодарности. Автор искренне благодарен технологам и минералогам компании «Каролайна-Инжиниринг» О.В. Бобровой, Л.А. Макеевой, Т.С. Серебрянской, С.В. Лопатко и другим – за комплексные технологические исследования титановых руд и предоставленные для исследования концентраты, а также доценту В.О. Япаскурту (МГУ), к.г.-м.н. С.Е. Борисовскому и Л.Н. Магазиной (ИГЕМ РАН) – за микрозондовые анализы минералов титановых концентратов, д.г.-м.н. С.Г. Скублову (ИГГД РАН) – за консультации и помощь в комплексном изучении цирконов.

Работа выполнена при финансовой поддержке НИР ИГЕМ РАН № 72-8 «Эволюция россыпеобразующих систем в процессе литогенеза: от мобилизации вещества до россыпей дальнего сноса».

Литература

Брянчанинова Н.И., Макеев А.Б. Гранат пироп-меджоритового ряда из лампрофиров Среднего Тимана // Новые данные о минералах. 2009. Вып. 44. С. 5–10.

Игнатьев В.Д., Бурцев И.Н. Лейкоксен Тимана: Минералогия и проблемы технологии. СПб.: Наука, 1997. 215 с.

Макеев А.Б. Хромшпинелиды и гранаты проявления Ичетъю // Тез. Всерос. конф. «Рудообра-

зующие процессы: от генетических концепций к прогнозу и открытию новых рудных провинций и месторождений». М.: ИГЕМ РАН. 2013. С. 216.

Макеев А.Б. Пижемское титановое месторождение – флюидизатная кальдера в Пижемской депрессии (Средний Тиман) // Геохимия литогенеза: Матер. Российского совещ. с международ. участием (Сыктывкар, 17–19 марта 2014 г.). Сыктывкар: Геопринт, 2014. С. 86–89.

Макеев А.Б., Андреичев В.Л., Брянчанинова Н.И. Rb–Sr возраст лампрофиров Среднего Тимана // Докл. РАН. 2009. Т. 426. № 1. С. 94–97.

Макеев А.Б., Баянова Т.Б., Борисовский С.Е., Жиличева О.М. Состав, изотопный U-Pb возраст и источник циркона полиминерального проявления Ичетью (Средний Тиман) // Зап. РМО. 2015_1. № 6. С. 9–18.

Макеев А.Б., Борисовский С.Е. Типоморфизм и источники титановых и ниобиевых минералов проявления Ичетью, Средний Тиман // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 2013. № 2. С. 30–37.

Макеев А.Б., Борисовский С.Е., Жиличева О.М. Типоморфизм циркона из конглобрекчий Ичетью // Тез. Всерос. конфер. «Рудообразующие процессы: от генетических концепций к прогнозу и открытию новых рудных провинций и месторождений». М.: ИГЕМ РАН. 2013. С. 217.

Макеев А.Б., Борисовский С.Е., Баянова Т.Б., Жиличева О.М., Скублов С.Г. Уникальные иттриевые цирконы полиминерального проявления Ичетью // Минералогия. 2015_2. № 4. С. 29–46.

Макеев А.Б., Вирюс А.А. Монацит проявления Ичетью (состав, морфология, возраст) // Изв. ВУЗов. Геология и Разведка. 2013. № 3. С. 10–15.

Макеев А.Б., Дубинчук В.Т., Быховский Л.З., Лаломов А.В., Макеев Б.А. Пижемское титановое месторождение: проблемы генезиса // Матер. XIV межд. совещ. по Геологии россыпей и месторождений кор выветривания (РКВ-2010). Новосибирск. 2010. С. 417–422.

Макеев А.Б., Дудар В.А. Минералогия алмазов Тимана. СПб: Наука, 2001. 336 с.

Макеев А.Б., Дудар В.А., Самарова Г.С., Быховский Л.З., Тигунов Л.П. Пижемское титановое месторождение (Республика Коми): аспекты геологического строения и освоения // Рудник будущего. 2012. № 6. С. 16–24.

Макеев А.Б., Лебедев В.А., Брянчанинова Н.И. Магматиты Среднего Тимана. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2008. 348 с.

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.

Макеев А.Б., Магазина Л.О. Типоморфизм минералов переменного состава проявления Ичетью // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Матер. XVI Геологического съезда Республики Коми. Т. II. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2014. С. 323–325.

Макеев А.Б., Скублов С.Г., Баянова Т.Б., Красоткина А.О. U-Pb возраст циркона Пижемского титанового месторождения (Средний Тиман) // Матер. XVI международ. конфер. «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М., 2015_3. С. 181–184.

Цаплин А.Е., Тополюк В.В., Бакулина Л.П., Довжикова Е.Г. Строение титаноносной малоручейской свиты Среднего Тимана // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 1988. № 9. С. 57–62.

Чернышев И.В., Макеев А.Б., Гольцман Ю.В., Брянчанинова Н.И. Возраст титановых месторождений Северо-Востока Восточно-Европейской платформы: Rb-Sr-данные // Докл. РАН. 2010. Т. 435. № 3. С. 378–383.

Watson E.B., Wark D.A., Thomas J.B. Crystallization thermometers for zircon and rutile // Contrib. Mineral. Petrol. 2006. V. 151. P. 413–433.

Поступила в редакцию 1 марта 2016 г.